



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL
Commission fédérale de l'hygiène de l'air CFHA
Commissione federale per l'igiene dell'aria CFIAR
Cumissiun federala per l'igièna da l'aria CFIA

Qualité de l'air 2023

Les nouvelles lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 et leur importance pour l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air



Impressum

Éditeur

Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA)

La Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) est une commission extraparlamentaire instituée par le Conseil fédéral et composée d'experts du domaine de la protection de l'air. Elle conseille le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) et l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) pour les questions de méthodologie scientifique liées à la protection de l'air et aux effets des polluants atmosphériques sur l'être humain, les animaux, les plantes, les biocénoses ou les biotopes. Du point de vue fonctionnel, cette commission administrative indépendante et interdisciplinaire peut aussi consulter d'autres spécialistes de différents domaines pour traiter certaines questions.

Auteur

Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA)

Nino Künzli, Prof. Dr med. et Ph.D., président
Beat Achermann, biochimiste diplômé, pharmacien diplômé
Christof Ammann, Dr sc. nat.
Urs Baltensperger, Prof. Dr phil II
Brigitte Buchmann, Dr phil II
Luca Colombo, Dr sc. nat. EPF
Lukas Emmenegger, Dr
Alexandre Flückiger, Prof. Dr iur.
Hans Gygax, Dr sc. nat.
Linda Kren, MSc. EPF
Pierre Kunz, Dr sc. nat.
Meltem Kutlar Joss, MSc. EPF, MPH
Barbara Rothen-Rutishauser, Prof. Dr sc. nat. EPF
Andrea von Känel, physicien EPF

Approuvé à l'unanimité lors de la séance du 10 mai 2023 de la CFHA

Remerciements

La CFHA remercie Christoph Hüglin, Empa, et Ron Kappeler, LUDOK, Swiss TPH, pour leurs commentaires et leurs contributions détaillées à la rédaction de ce rapport.

Référence bibliographique

Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) 2023 : Les nouvelles lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 et leur importance pour l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air Berne. 120 p.

Secrétariat de la CFHA

Brigitte Gälli Purgart et Lara Lüthi, division Protection de l'air et produits chimiques, Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Photo de couverture

© iStock / AscentXmedia

Téléchargement du fichier PDF

www.ekl.admin.ch/fr/documentation/publications/ (il n'existe pas de version imprimée)

Cette publication est également disponible en allemand et en italien.

[Die neuen WHO-Luftqualitätsrichtwerte 2021 und ihre Bedeutung für die Schweizer Luftreinhalte-Verordnung](#)

[I nuovi valori indicativi 2021 dell'OMS sulla qualità dell'aria e il loro significato per l'ordinanza federale contro l'inquinamento atmosferico](#)

© CFHA 2023

Table des matières

Avant-propos	6
Résumé	8
Zusammenfassung	10
Riassunto	12
Executive Summary	14
1 Introduction	16
2 Objectifs et structure du rapport	26
3 Bases des recommandations de la CFHA	27
4 Poussières fines PM10	28
5 Poussières fines PM2.5	33
6 Ozone (O₃)	37
7 Dioxyde d'azote (NO₂)	44
8 Dioxyde de soufre (SO₂)	49
9 Monoxyde de carbone (CO)	52
10 Suie (carbone noir ou élémentaire)	54
11 Particules ultrafines – nombre de particules	57
12 Tempêtes de sable et de poussières désertiques	60
13 Autres substances et paramètres	61
14 Recommandations pour une adaptation de l'OPair	67
15 Discussion	72
16 Conclusion	79

Annexe

Annexe A – Lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air 2021	80
Annexe B – Sources de polluants atmosphériques	85
Annexe C – Informations complémentaires sur les PM10 et PM2.5	86
Annexe D – Valeurs limites destinées à protéger la végétation dans les écosystèmes proches de l'état naturel	92
Annexe E – Informations complémentaires sur l'ozone : comparabilité des différentes valeurs d'évaluation de l'OMS et de la Suisse	95
Annexe F – Informations complémentaires sur le NO ₂	98
Annexe G – Informations complémentaires sur le SO ₂	101
Annexe H – Informations complémentaires sur les HAP	102
Annexe I – Schémas des conséquences sur la santé attestées scientifiquement pour différents polluants	104
Liste des abréviations et définitions	107
Liste des figures et des tableaux	110
Bibliographie	114

Avant-propos

Il y a dix ans, la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) recommandait dans son rapport « Les poussières fines en Suisse 2013 » de définir une valeur limite d'immissions supplémentaire pour les poussières fines et de prendre d'autres mesures pour réduire leur concentration. En 2018, le Conseil fédéral a modifié l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair) en conséquence, les autorités poursuivant, en collaboration avec l'économie et la population, les efforts engagés depuis des décennies pour améliorer la qualité de l'air. Les résultats sont indéniables : ce qui n'était qu'une vision lointaine il y a trente ans est devenue une réalité dans presque toutes les stations de mesure, y compris dans les grandes agglomérations. La plupart des valeurs limites d'immissions fixées dans l'OPair sont respectées, sauf lors des pics d'ozone, et la tendance à la baisse se poursuit. Grâce à l'efficacité de la politique de protection de l'air, la majorité de la population helvétique est soumise depuis des années à une exposition aux polluants sensiblement inférieure aux valeurs limites d'immissions en vigueur en Suisse.

Ces progrès majeurs ne concernent pas seulement la protection de l'air. En 2016, de nouveaux résultats de recherche portant sur les conséquences pour la santé des concentrations de polluants atmosphériques ont incité l'Organisation mondiale de la santé (OMS) à commander une nouvelle évaluation de ses lignes directrices relatives à la qualité de l'air, qui dataient de 2005. Une équipe de chercheurs internationaux a été chargée de déterminer les concentrations de polluants pour lesquelles des atteintes à la santé sont avérées. Il en ressort que ces concentrations sont généralement très inférieures aux niveaux proposés en 2005. Ceux-ci ont donc été revus à la baisse, donnant lieu à de nouvelles lignes directrices relatives à la qualité de l'air qui ont été publiées en 2021.

La CFHA examine ce nouveau paradigme dans le présent rapport. Elle recommande d'adapter les valeurs limites d'immissions des principaux polluants atmosphériques fixées dans l'OPair, aux connaissances scientifiques les plus récentes. Ce faisant, la CFHA s'appuie sur les exigences formulées dans la loi sur la protection de l'environnement (LPE), selon lesquelles la qualité de l'air ne doit pas porter atteinte à la fois aux écosystèmes et à la santé de la population, y compris les catégories de personnes particulièrement sensibles, telles que les enfants, les malades, les personnes âgées et les femmes enceintes. Les valeurs limites d'immissions en vigueur en Suisse ne répondent plus à cette exigence. La CFHA préconise donc d'inscrire dans l'OPair la plupart des nouveaux niveaux de qualité de l'air proposées par l'OMS, afin que les valeurs limites d'immissions de l'ordonnance répondent réellement à la protection requise dans la LPE.

Le respect des nouvelles valeurs limites proposées peut de nouveau sembler être une « vision lointaine », mais la baisse tendancielle des immissions observée depuis des années incite à l'optimisme. Les progrès technologiques réalisés régulièrement dans la réduction des émissions à la source ne se démentent pas, la promotion de la mobilité à faibles émissions devrait ainsi se poursuivre. On pourra également s'appuyer à l'avenir sur la force d'innovation et sur la longue tradition suisse d'une exécution participative et fédéraliste des mesures de protection de l'air, car elles ont elles aussi contribué à améliorer continuellement la qualité de l'air. Toutes ces expériences laissent présager une nouvelle amélioration en la matière, de sorte que la réalisation des objectifs sanitaires recommandés est à portée de main.

Enfin, j'aimerais profiter de l'occasion pour remercier tous les membres de la CFHA, les autres experts participants et l'équipe internationale qui a rédigé les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021, pour l'immense et précieux travail accompli. La CFHA a approuvé le présent rapport à l'unanimité le 10 mai 2023.

Nino Künzli
Président de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA)

Résumé

Les valeurs limites d'immissions (VLI) en vigueur dans l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air (OPair) correspondent dans une large mesure aux niveaux de qualité de l'air que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) avait recommandés en 2005 en se fondant sur les connaissances d'alors. La plupart de ces VLI sont actuellement respectées quasiment à l'échelle suisse. La recherche nationale et internationale des 20 dernières années a montré des atteintes à la santé, même pour des concentrations de polluants atmosphériques sensiblement plus faibles. Après un examen approfondi des connaissances actuelles, l'OMS a donc abaissé les niveaux de qualité de l'air en 2021 dans de nouvelles lignes directrices relatives à la qualité de l'air (*Global Air Quality Guidelines*, AQG).

La loi suisse sur la protection de l'environnement (LPE) exige des VLI et des mesures de protection de l'air qu'elles tiennent compte de la protection de l'environnement et de la santé de toute de la population, y compris les catégories de personnes particulièrement sensibles. La CFHA recommande donc de modifier les VLI pour six polluants (SO₂, NO₂, CO, O₃, PM10, PM2.5 – voir tableau 1) en considérant les niveaux préconisés par l'OMS, ce qui revient à réduire ou à compléter ces VLI. Deux VLI qui ne sont plus pertinentes pour les pics d'exposition à court terme, concernant le dioxyde de soufre (SO₂) et le dioxyde d'azote (NO₂), devraient être abrogées. Ainsi modifiées, les VLI suisses répondront, selon l'état actuel des connaissances, aux exigences de protection de la LPE.

L'application du principe de précaution et les mesures existantes fixent le cadre pour une nouvelle réduction de la concentration des polluants atmosphériques. Toutefois, le respect de VLI plus strictes à l'échelle nationale nécessitera à l'avenir une diminution durable des émissions. Les mesures nationales et les plans de mesures cantonaux devront dès lors être modifiés en conséquence et mis en œuvre de façon cohérente.

Parallèlement, il faudra poursuivre et renforcer la coopération internationale dans la politique de protection de l'air, les polluants atmosphériques s'affranchissant des frontières géographiques.

Tableau 1 : Recommandations de la CFHA pour adapter les VLI dans l'OPair. S'appuyant dans une large mesure sur les niveaux préconisés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) et les nombreuses publications correspondantes, ces recommandations n'en dérogent que dans des cas exceptionnels dûment justifiés.

Polluant	Unité de temps	AQG OMS 2021	VLI en vigueur (OPair)	Recommandation CFHA 2023
Dioxyde de soufre (SO₂), µg/m³ (voir chap. 8)	Moyenne annuelle et, désormais, moyenne du semestre d'hiver	–	30 ^a	20 ^b
	95 % des moyennes semi-horaires d'une année	–	100	Abroger
	Moyenne par 24 h	40 ^c	100 ^d	40 ^c
Dioxyde d'azote (NO₂), µg/m³ (voir chap. 7)	Moyenne annuelle	10	30	10
	95 % des moyennes semi-horaires d'une année	–	100	Abroger
	Moyenne par 24 h	25 ^c	80 ^d	25 ^c
Monoxyde de carbone (CO), mg/m³ (voir chap. 9)	Moyenne par 24 h	4 ^c	8 ^d	4 ^c
Ozone (O₃), µg/m³ (voir chap. 6)	Saison estivale ^e	60	–	60
	98 % des moyennes semi-horaires d'un mois	–	100	100
	Moyenne par 8 h	100 ^c	–	–
	Moyenne horaire	–	120 ^d	120 ^d
Poussières en suspension / poussières fines (PM₁₀), µg/m³ (voir chap. 4)	Moyenne annuelle	15	20	15
	Moyenne par 24 h	45 ^c	50 ^c	45 ^c
Poussières en suspension / poussières fines (PM_{2.5}), µg/m³ (voir chap. 5)	Moyenne annuelle	5	10	5
	Moyenne par 24 h	15 ^c	–	15 ^c

^a VLI qui englobe également la protection des animaux et des plantes, de leurs biocénoses et de leurs biotopes selon l'art. 1, al. 1, LPE et qui correspond à l'état des connaissances au moment de l'édiction de l'OPair en 1985.

^b Valeur des lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2000 (OMS, 2000) qui a été fixée pour protéger les forêts et d'autres écosystèmes proches de la nature. Elle s'applique en tant que moyenne annuelle et pour le semestre d'hiver (d'octobre à mars).

^c 99^e percentile (en d'autres termes, trois dépassements par an sont admis).

^d Ne peut être dépassée qu'une fois par an au maximum.

^e Moyenne calculée à partir des moyennes journalières maximales par 8 heures de la concentration d'ozone pendant six mois consécutifs et de la concentration d'ozone la plus élevée en moyenne semestrielle. En Suisse, cela correspond à la période allant d'avril à septembre.

Mots-clés : protection de l'air, ordonnance fédérale sur la protection de l'air suisse, immissions, monoxyde de carbone, CO, poussières fines, PM₁₀, PM_{2.5}, ozone, O₃, dioxyde de soufre, SO₂, dioxyde d'azote, NO₂, suie, particules ultrafines PUF, hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP, métaux, potentiel oxydatif des poussières fines PO, lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air.

Zusammenfassung

Die derzeit in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) festgelegten Immissionsgrenzwerte (IGW) entsprechen weitgehend den Richtwerten der Weltgesundheitsorganisation (WHO) aus dem Jahr 2005, welche auf dem damaligen Wissensstand beruhen. Die meisten dieser IGW werden heute in der Schweiz fast flächendeckend eingehalten. Die nationale und internationale Forschung der letzten 20 Jahre belegt nun gesundheitliche Beeinträchtigungen auch bei deutlich tieferen Konzentrationen von Luftschadstoffen. Deshalb hat die WHO nach umfassender Aufarbeitung des aktuellen Wissensstandes die Richtwerte 2021 in den neuen Luftqualitätsleitlinien «Global Air Quality Guidelines» (AQG) herabgesetzt.

Das Schweizer Umweltschutzgesetz fordert IGW und Luftreinhaltemassnahmen, welche dem Schutz der Umwelt und der Gesundheit der gesamten Bevölkerung – einschliesslich Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit – gerecht werden. Die EKL empfiehlt deshalb für sechs Schadstoffe (SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} – siehe Tabelle 1) die Anpassung der LRV unter Berücksichtigung der WHO-Richtwerte und damit eine Senkung bzw. Ergänzung der IGW. Zwei derzeit nicht mehr relevante IGW zu Kurzzeitbelastungsspitzen von SO₂ und NO₂ sollen gestrichen werden. Mit diesen Anpassungen werden die Schweizer IGW den Schutzanforderungen des Umweltschutzgesetzes nach heutigem Wissensstand entsprechen.

Dank Anwendung des Vorsorgeprinzips und bereits bestehender Massnahmen ist weiterhin eine Abnahme der Luftschadstoffbelastung zu erwarten. Die flächendeckende Einhaltung der verschärften IGW wird aber auch in Zukunft eine nachhaltige Reduktion der Emissionen erfordern. Nationale Massnahmen und die kantonalen Massnahmenpläne zur Emissionsminderung müssen angepasst und konsequent umgesetzt werden.

Ebenso muss die internationale Zusammenarbeit in der Luftreinhaltepolitik fortgesetzt und gestärkt werden, da Luftschadstoffe auch über Grenzen hinweg transportiert werden.

Tabelle 1: Empfehlungen der EKL zur Anpassung der IGW in der LRV. Sie stützen sich weitgehend auf die Richtwerte der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 (AQG) und die umfangreichen zugehörigen Publikationen und weichen nur in begründeten Ausnahmefällen davon ab.

Schadstoff	Mittelungszeit	WHO AQG 2021	LRV IGW derzeit	Empfehlung EKL 2023
Schwefeldioxid (SO₂), µg/m³ (siehe Kapitel 8)	Jahresmittelwert und neu Mittelwert über das Winterhalbjahr	–	30 ^a	20 ^b
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres	–	100	streichen
	24-h-Mittelwert	40 ^c	100 ^d	40 ^c
Stickstoffdioxid (NO₂), µg/m³ (siehe Kapitel 7)	Jahresmittelwert	10	30	10
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres	–	100	streichen
	24-h-Mittelwert	25 ^c	80 ^d	25 ^c
Kohlenmonoxid (CO), mg/m³ (siehe Kapitel 9)	24-h-Mittelwert	4 ^c	8 ^d	4 ^c
Ozon (O₃), µg/m³ (siehe Kapitel 6)	Sommersaison ^e	60	–	60
	98 % der ½-h-Mittelwerte eines Monats	–	100	100
	8-h-Mittelwert	100 ^c	–	–
	1-h-Mittelwert	–	120 ^d	120 ^d
Schwebestaub / Feinstaub (PM₁₀), µg/m³ (siehe Kapitel 4)	Jahresmittelwert	15	20	15
	24-h-Mittelwert	45 ^c	50 ^c	45 ^c
Schwebestaub / Feinstaub (PM_{2.5}), µg/m³ (siehe Kapitel 5)	Jahresmittelwert	5	10	5
	24-h-Mittelwert	15 ^c	–	15 ^c

^a Immissionsgrenzwert, welcher auch den Schutz von Tieren und Pflanzen, ihren Lebensgemeinschaften und Lebensräumen nach USG Art. 1 Abs. 1 einschliesst und dem Stand des Wissens zum Zeitpunkt des Erlasses der Luftreinhalte-Verordnung im Jahre 1985 entspricht.

^b Wert der WHO-Luftqualitätsleitlinien 2000 (WHO, 2000), welcher zum Schutz von Wäldern und weiteren naturnahen Ökosystemen festgelegt wurde. Er gilt als Jahresmittelwert sowie auch für das Winterhalbjahr (Oktober–März).

^c 99. Perzentil (d. h. 3 Überschreitungen pro Jahr sind zulässig).

^d Darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden.

^e Durchschnitt der maximalen täglichen 8-h-Mittelwerte der Ozon-Konzentration in den sechs aufeinanderfolgenden Monaten mit der höchsten Ozon-Konzentration im Sechsmonatsdurchschnitt. Für die Schweiz entspricht dies April bis September.

Stichwörter: Luftreinhaltung, Luftreinhalte-Verordnung Schweiz, Immissionsgrenzwerte Schweiz, Immissionen, Kohlenmonoxid CO, Feinstaub PM₁₀, Feinstaub PM_{2.5}, Ozon O₃, Schwefeldioxid SO₂, Stickstoffdioxid NO₂, Russ, Ultrafeine Partikel UFP, Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe PAK, Metalle, oxidatives Potenzial von Feinstaub OP, WHO Air Quality Guideline

Cette publication est également disponible en allemand.

[Die neuen WHO-Luftqualitätsrichtwerte 2021 und ihre Bedeutung für die Schweizer Luftreinhalte-Verordnung](#)

Riassunto

I valori limite d'immissione (VLI) attualmente sanciti dall'ordinanza contro l'inquinamento atmosferico (OIA) corrispondono in ampia misura ai valori indicativi fissati dall'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) nel 2005, che si basano sulle conoscenze scientifiche di allora. Nella maggior parte dei casi, questi VLI sono oggi rispettati praticamente su tutto il territorio svizzero. La ricerca nazionale e internazionale degli ultimi 20 anni indica ora che anche concentrazioni nettamente inferiori di inquinanti possono provocare danni alla salute. Per tale motivo l'OMS, dopo essersi confrontata a fondo con lo stato attuale delle conoscenze, ha introdotto una riduzione dei valori indicativi nelle nuove linee guida sulla qualità dell'aria 2021 «Global Air Quality Guidelines» (AQG).

La legge federale sulla protezione dell'ambiente (LPAmb) impone VLI e provvedimenti contro l'inquinamento atmosferico che tengano conto della protezione dell'ambiente e della salute di tutta la popolazione, comprese le categorie di persone particolarmente sensibili. La CFIAR raccomanda pertanto per sei inquinanti (SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} – cfr. tabella 1) l'adeguamento dell'OIA in considerazione dei valori indicativi dell'OMS e quindi una riduzione o integrazione dei VLI. Due VLI non più rilevanti per i picchi di inquinamento a breve termine di SO₂ e NO₂ dovrebbero essere abrogati. Con queste modifiche, i VLI svizzeri saranno resi conformi, secondo lo stato attuale delle conoscenze, ai requisiti di protezione della LPAmb.

Grazie all'applicazione del principio di precauzione e dei provvedimenti già esistenti, è prevedibile un'ulteriore riduzione dell'inquinamento atmosferico. Il rispetto dei VLI più severi su tutto il territorio nazionale richiederà però una riduzione continua delle emissioni anche in futuro. È necessario adeguare e attuare di conseguenza i provvedimenti nazionali e i piani cantonali per la riduzione delle emissioni.

La cooperazione internazionale nella politica contro l'inquinamento atmosferico deve inoltre essere portata avanti e rafforzata, in quanto gli inquinanti atmosferici vengono trasportati anche al di là dei confini.

Tabella 1: Raccomandazioni della CFIAR per l'adeguamento dei VLI nell'OIAt. Si basano in larga misura sui valori indicativi delle linee guida sulla qualità dell'aria 2021 (AQG) dell'OMS e sulle numerose pubblicazioni in materia e se ne discostano solo in casi eccezionali motivati

Inquinante	Unità di tempo per il calcolo del valore medio	AQG 2021 OMS	VLI OIAt attuali	Raccomandazione CFIAR 2023
Diossido di zolfo (SO₂), µg/m³ (cfr. cap. 8)	Valore medio annuo e nuovo valore medio per il semestre invernale	–	30 ^a	20 ^b
	95 % dei valori medi su ½ h di un anno	–	100	abrogare
	Valore medio su 24 h	40 ^c	100 ^d	40 ^c
Diossido di azoto (NO₂), µg/m³ (cfr. cap. 7)	Valore medio annuo	10	30	10
	95 % dei valori medi su ½ h di un anno	–	100	abrogare
	Valore medio su 24 h	25 ^c	80 ^d	25 ^c
Monossido di carbonio (CO), mg/m³ (cfr. cap. 9)	Valore medio su 24 h	4 ^c	8 ^d	4 ^c
Ozono (O₃), µg/m³ (cfr. cap. 6)	Stagione estiva ^e	60	–	60
	98 % dei valori medi su ½ h di un mese	–	100	100
	Valore medio su 8 h	100 ^c	–	–
	Valore medio su 1 h	–	120 ^d	120 ^d
Polveri in sospensione / polveri fini (PM₁₀), µg/m³ (cfr. cap. 4)	Valore medio annuo	15	20	15
	Valore medio su 24 h	45 ^c	50 ^c	45 ^c
Polveri in sospensione / polveri fini (PM_{2.5}), µg/m³ (cfr. cap. 5)	Valore medio annuo	5	10	5
	Valore medio su 24 h	15 ^c	–	15 ^c

^a Valore limite d'immissione che comprende anche la protezione della flora e della fauna, delle loro biocenosi e dei loro biotopi secondo l'articolo 1 capoverso 1 LPAmb e corrisponde allo stato delle conoscenze al momento dell'emanazione dell'ordinanza contro l'inquinamento atmosferico nel 1985.

^b Valore delle linee guida sulla qualità dell'aria 2000 dell'OMS (OMS, 2000), fissato per la protezione dei boschi e di altri ecosistemi prossimi allo stato naturale. Si applica come valore medio annuo e anche per il semestre invernale (ottobre–marzo).

^c 99° percentile (ossia tre superamenti all'anno consentiti).

^d Può essere superato al massimo una volta all'anno.

^e Media dei valori medi giornalieri massimi su 8 ore della concentrazione di ozono nei sei mesi consecutivi con la concentrazione di ozono più elevata sulla media semestrale. Per la Svizzera si tratta del periodo aprile–settembre.

Parole chiave: protezione dell'aria, ordinanza federale contro l'inquinamento atmosferico, valori limite d'immissione in Svizzera, immissioni, monossido di carbonio CO, polveri fini PM₁₀, polveri fini PM_{2.5}, ozono (O₃), diossido di azoto (NO₂), diossido di zolfo (SO₂), fuliggine, particelle ultrafini (UFP), idrocarburi policiclici aromatici (IPA), metalli, potenziale ossidativo delle polveri fini (PO), Air Quality Guidelines (AQG) dell'OMS

Cette publication est également disponible en italien. [I nuovi valori indicativi 2021 dell'OMS sulla qualità dell'aria e il loro significato per l'ordinanza federale contro l'inquinamento atmosferico](#)

Executive Summary

The ambient air quality standards currently stipulated in the Air Pollution Control Ordinance (OAPC) largely correspond to the benchmarks set by the World Health Organization (WHO) in 2005, which were based on the knowledge available at the time. Switzerland currently complies with almost all of these ambient limit values. However, national and international research over the past 20 years has shown that air pollutants have adverse health effects even at significantly lower concentrations. The WHO has therefore lowered the guideline values for 2021 in its new Global Air Quality Guidelines (AQG) following a comprehensive review of currently available knowledge.

The Swiss Federal Environmental Protection Act calls for ambient air quality standards and measures against air pollution that appropriately protect the environment and the health of the entire population – including particularly sensitive groups. The Federal Commission for Air Hygiene (FCAH) therefore recommends the OAPC to be adjusted for six pollutants (SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} – see Table 1) to reflect the WHO guideline values, with ambient air quality standards being either reduced or supplemented. Two ambient air quality standards relating to short-term peaks of SO₂ and NO₂ are no longer relevant and will be removed. These modifications will bring Switzerland's ambient air quality standards into line with the protection requirements of the Environmental Protection Act based on current knowledge.

A further decrease in air pollution levels can be expected thanks to the application of the precautionary principle and existing measures. However, emissions will need to continue falling in the long term to ensure widespread compliance with these stricter ambient air quality standards. National measures and cantonal action plans to reduce emissions will need to be adjusted and consistently implemented.

And because air pollutants travel across borders, international cooperation on air pollution control policy will need to be maintained and reinforced.

Table 1: FCAH recommendations for changes to ambient limit values in the OAPC. These are largely based on the 2021 WHO AQGs and the wide range of related publications, deviating from them only with justification and in exceptional cases.

Pollutant	Averaging time	WHO AQG 2021	Current OAPC ambient limit value	FCAH recommendation 2023
Sulphur dioxide (SO₂), µg/m³ (see Chapter 8)	Annual average and new mean value over winter half-year	–	30 ^a	20 ^b
	95 % of ½ h mean value for a year	–	100	remove
	24h mean value	40 ^c	100 ^d	40 ^c
Nitrogen dioxide (NO₂), µg/m³ (see Chapter 7)	Annual average	10	30	10
	95 % of ½ h mean value for a year	–	100	remove
	24h mean value	25 ^c	80 ^d	25 ^c
Carbon monoxide (CO), mg/m³ (see Chapter 9)	24h mean value	4 ^c	8 ^d	4 ^c
Ozone (O₃), µg/m³ (see Chapter 6)	Summer season ^e	60	–	60
	98 % of ½ h mean value for a month	–	100	100
	8h mean value	100 ^c	–	–
	1h mean value	–	120 ^d	120 ^d
Suspended particulates / particulate matter (PM₁₀), µg/m³ (see Chapter 4)	Annual average	15	20	15
	24h mean value	45 ^c	50 ^c	45 ^c
Suspended particulates / particulate matter (PM_{2.5}), µg/m³ (see Chapter 5)	Annual average	5	10	5
	24h mean value	15 ^c	–	15 ^c

^a Ambient air quality standard, which also includes the protection of animals and plants, their biological communities and habitats according to Article 1 paragraph 1 EPA, and corresponds to the state of knowledge when the Air Pollution Control Ordinance was adopted in 1985.

^b Value stipulated in the 2000 WHO AQGs (WHO, 2000) for the protection of forests and other seminatural ecosystems. Valid as an annual average as well as for the winter half-year. (October–March).

^c 99th percentile (i.e. limit value may be exceeded three times per year).

^d May only be exceeded once per year.

^e Average of the maximum daily 8h mean value ozone concentrations in the six consecutive months with the highest six-month average for ozone concentration. For Switzerland, this corresponds to April to September.

Keywords: Air pollution control, Swiss Air Pollution Control Ordinance, Swiss ambient air quality standards, immissions, carbon monoxide CO, particulate matter PM₁₀, particulate matter PM_{2.5}, ozone O₃, sulphur dioxide SO₂, nitrogen dioxide NO₂, black carbon, ultrafine particles UFP, polycyclic aromatic hydrocarbons PAH, metals, oxidative potential of particulate matter OP, WHO Air Quality Guidelines

1 Introduction

1.1 Contexte

Commission extraparlamentaire instituée par le Conseil fédéral, la **Commission fédérale de l'hygiène de l'air** (CFHA) conseille le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) et l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) pour les questions de méthodologie scientifique liées à la protection de l'air et aux effets des polluants atmosphériques sur l'être humain, les animaux, les plantes, les biocénoses ou les biotopes. La loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (loi sur la protection de l'environnement, LPE ; RS 814.01) constitue le fondement des rapports, des recommandations, des prises de position et des propositions de la CFHA qui sont destinés au Conseil fédéral. La fixation de valeurs limites d'immissions (VLI) est un instrument majeur de la protection de l'air qui est ancré dans la LPE. En vertu des art. 13 et 14 de la LPE, les VLI doivent également tenir compte des effets des immissions sur les catégories de personnes particulièrement sensibles (p. ex. enfants, malades, personnes âgées, etc.) et être fixées de manière que, selon l'état de la science, les immissions inférieures à ces valeurs ne menacent pas les hommes, les animaux et les plantes, leurs biocénoses et leurs biotopes. En Suisse, les VLI sont réglementées dans l'ordonnance fédérale du 16 décembre 1985 sur la protection de l'air (OPair ; RS 814.318.142.1, état au 1^{er} janvier 2023).

En raison de ces exigences de la LPE et contrairement à de nombreux autres pays, les données scientifiques ont toujours été prises en considération par le Conseil fédéral au cours des 30 dernières années. La CFHA s'est ainsi régulièrement exprimée sur l'état des connaissances relatives aux effets de la pollution de l'air et a formulé des recommandations au Conseil fédéral en vue d'une modification des VLI de l'OPair, ceci pour la dernière fois en 2013 (CFHA, 2013 ; voir point 1.2).

1.2 Travaux préparatoires

En 2013, la CFHA a publié le rapport « Les poussières fines en Suisse 2013 » (CFHA, 2013) dans lequel elle émet les recommandations suivantes, sur la base de connaissances scientifiques concernant les conséquences de l'exposition aux poussières fines sur la santé humaine :

1. maintenir les valeurs limites d'immissions à court et à long terme pour les PM₁₀ définies dans l'OPair¹ (*particulate matter* ; poussières fines dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à 10 µm) ;
2. aligner les valeurs limites suisses pour les poussières fines sur les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), fondées sur les effets et applicables dans le monde entier, en inscrivant notamment dans l'annexe 7 de l'OPair une valeur moyenne annuelle pour les PM_{2.5} ;
3. définir un objectif intermédiaire contraignant visant à ramener d'ici dix ans les concentrations de suies cancérigènes à 20 % des valeurs de 2013.

Les deux premières recommandations ont été mises en œuvre dans l'OPair en juin 2018.

Dans le rapport susmentionné, la CFHA s'était donnée pour mission de réévaluer la situation en Suisse après cinq ans environ pour répondre aux questions suivantes :

- I. Dans quelle mesure les concentrations de particules fines et de suies ont-elles été réduites, y compris sur les sites fortement touchés ?

¹ La valeur limite journalière autorise désormais trois dépassements au lieu d'un seul par année.

- II. Les modifications de VLI proposées par la CFHA en 2013 ont-elles permis d'améliorer la situation sanitaire ?
- III. Faut-il introduire une VLI spécifique pour les suies ou pour d'autres paramètres de la charge en poussières fines ?
- IV. Y a-t-il de nouvelles connaissances concernant les effets sur la santé ?

La décision de l'OMS d'initier en 2016 la mise à jour des lignes directrices relatives à la qualité de l'air (*Air Quality Guidelines*, AQG) et la nomination du président de la CFHA dans le « WHO Guideline Development Group », chargé d'élaborer ces lignes directrices, ont placé la CFHA dans un nouveau contexte. Celle-ci a donc décidé d'attendre la publication des nouvelles lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air, avant d'examiner les questions formulées dans son rapport de 2013.

L'élaboration et la publication de ces nouvelles lignes directrices ont été fortement retardées pour différentes raisons. D'une part, la méthodologie était sensiblement plus stricte, plus contraignante, mais également plus transparente. D'autre part, la pandémie de COVID-19 a engendré des retards supplémentaires. La rédaction du présent rapport a donc été reportée d'autant, permettant ainsi à la CFHA de poser des questions spécifiques dans un contexte plus large et, en cas d'adaptation aux niveaux recommandés par l'OMS, d'étudier dans le même temps leur pertinence pour la protection de l'air en Suisse.

1.3 Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air

Origine des niveaux de qualité de l'air

Références reconnues internationalement pour définir des VLI, les niveaux de qualité de l'air recommandés par l'OMS dans ses lignes directrices visent principalement à protéger la santé, mais tiennent également compte dans la publication de l'an 2000 des effets sur les plantes et les biotopes. Ils ont toujours joué un rôle majeur dans la protection de l'air en Suisse. La première édition de ces lignes directrices date de 1987 (OMS, 1987). Celles-ci ont été adaptées à l'état des connaissances en 2000 et en 2005 (OMS, 2000, 2006). En juin 2018, le Conseil fédéral s'était appuyé sur les lignes directrices de l'OMS de 2005 pour modifier les VLI. Sur proposition de la CFHA (2013), une moyenne annuelle avait été inscrite dans l'OPair pour les particules les plus fines (PM_{2.5} ; poussières fines dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à 2,5 micromètres [μm]). Fixée en 2018, la valeur de 10 microgrammes par mètre cube d'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) correspond au niveau que recommandait alors l'OMS.

En septembre 2021, l'OMS a publié de nouvelles recommandations sur la qualité de l'air applicables dans le monde entier (OMS, 2021). Les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air ont été élaborées dans le cadre d'un processus rigoureux impliquant plusieurs groupes d'experts ayant des rôles et des responsabilités définis (voir chap. 2). Les niveaux de particules fines, de dioxyde de soufre (NO₂), d'ozone (O₃), de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde d'azote (SO₂) ont été modifiés selon une méthodologie rigoureuse, tout en tenant compte de la primauté de la protection de la santé et des données scientifiques. Pour ce faire, l'OMS s'est limitée à quelques effets sur la santé, ce qui est suffisant si ces derniers sont clairement établis scientifiquement. Dès qu'une conséquence sanitaire est réputée prouvée, la fixation d'un niveau de qualité de l'air pour protéger de tout effet nocif peut être débattue. L'OMS s'est donc concentrée sur six recherches synthétiques, à défaut de devoir analyser tous les autres effets sur la santé.

Ces six travaux de recherche ont porté sur les conséquences d'une exposition à long terme (mois, années) à des polluants atmosphériques comportant des particules fines, du NO₂ et de l'ozone, ainsi que d'une exposition à court terme (heures, jours) aux particules fines, au NO₂, à l'ozone, au SO₂ et au CO. Les conséquences sanitaires concernaient la mortalité, les maladies respiratoires aiguës et

les infarctus, car il existe dans le monde une abondante littérature scientifique sur ces sujets (Chen et Hoek, 2020 ; Huangfu et Atkinson, 2020 ; Lee et al., 2020 ; Orellano et al., 2021 ; Orellano et al., 2020 ; Zheng et al., 2021).

Se basant sur les résultats des examens systématiques, l'équipe d'experts scientifiques des cinq continents que l'OMS a mandatée, a évalué les données scientifiques des interactions, puis en a déduit les niveaux de qualité de l'air pour chacun des polluants considérés, selon une procédure transparente qui est présentée à l'annexe A.

Le groupe d'experts de l'OMS est parti du postulat suivant : les niveaux de qualité de l'air doivent être fixés de manière à éviter des effets nocifs pour la santé, l'alternative consistant à définir des niveaux autorisant un risque maximal toléré n'ayant pas été retenue. Dès lors dans un premier temps, il a fallu déterminer si la science renvoie à des valeurs seuils (ou à des seuils d'effets) en dessous desquelles aucune conséquence sanitaire n'est observée. Le comité est arrivé à la conclusion qu'il n'existe aucun seuil sûr pour les polluants évalués dans les domaines de concentration examinés. Dans un deuxième temps, il a été recherché les concentrations les plus faibles pour lesquelles des effets nocifs ont pu être constatés de manière fiable. Les concentrations les plus basses prises en compte dans les études les plus récentes ont été déterminantes pour fixer les nouveaux niveaux de qualité de l'air à long terme (moyennes annuelles recommandées).

Contrairement aux niveaux à long terme, les seuils à court terme (p. ex. moyennes journalières) ne définissent pas l'exposition la plus faible avec des effets démontrables, mais précisent une concentration qui pourrait être dépassée au plus une fois par an (pour l'ozone) ou trois fois par an (pour tous les autres polluants). Une nouvelle méthode a donc été retenue pour fixer les niveaux de qualité de l'air à court terme, visant une cohérence statistique entre la fréquence des dépassements de ces derniers et le niveau à long terme déterminé à partir des études. On s'assure ainsi qu'en respectant la fréquence maximale tolérée des dépassements des niveaux de qualité de l'air à court terme, on répond également aux seuils à long terme et inversement.

En matière de protection de la santé humaine, les critères de l'OMS utilisés pour élaborer les lignes directrices relatives à la qualité de l'air sont conformes aux exigences de la LPE pour les VLI.

Niveaux de qualité de l'air de l'OMS et recommandations

S'appuyant sur les présentes données scientifiques et sur l'application de la méthode susmentionnée, l'OMS (2021) recommande les niveaux de qualité de l'air du tableau 2 pour les expositions à court et à long termes aux polluants « classiques » que sont : les poussières fines (PM10 et PM2.5), le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone (O₃), le dioxyde de soufre (SO₂) et le monoxyde de carbone (CO). L'OMS propose également des objectifs intermédiaires, afin que les pays dont la qualité de l'air est très dégradée, puissent mener une politique de protection de l'air s'approchant progressivement des objectifs fixés en matière de qualité de l'air et atteindre ainsi des résultats partiels.

De plus, l'OMS émet des recommandations (meilleures pratiques ou *best practices*) pour les polluants suivants liés aux poussières fines : suie (carbone noir), particules ultrafines et particules apportées par les tempêtes de sable et de poussières désertiques. Ces recommandations sont exposées brièvement dans les chapitres correspondants.

Les nouvelles lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air avec les meilleures pratiques, ainsi que les questions en suspens formulées dans le rapport de la CFHA « Les poussières fines

en Suisse 2013 », définissent le cadre du présent rapport de la CFHA et des recommandations qui y sont émises.

Tableau 2 : Niveaux recommandés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air (AQG) et objectifs intermédiaires (*cibles intermédiaires ou interim targets*), préconisées dans les lignes directrices 2005 (OMS, 2006) et 2021 (OMS, 2021) et VLI en vigueur selon l'OPair (RS 814.318.142.1, état au 1^{er} janvier 2023)

Polluant	Unité de temps	AQG OMS 2005	Objectifs intermédiaires 2021 de l'OMS				AQG OMS 2021	OPair en vigueur
			1	2	3	4		
PM2.5, µg/m ³	Année	10	35	25	15	10	5	10
	24 heures ^a	25	75	50	37.5	25	15	–
PM10, µg/m ³	Année	20	70	50	30	20	15	20
	24 heures ^a	50	150	100	75	50	45	50
Ozone, µg/m ³	Saison estivale ^b	–	100	70	–	–	60	–
	8 heures ^a	100	160	120	–	–	100	–
	1 heure						–	120 ^c
	98 % des moyennes semi-horaires d'un mois						–	100
NO ₂ , µg/m ³	Année	40	40	30	20	–	10	30
	24 heures	200 (1-h) ^a	120	50	–	–	25 ^a	80 ^c
	95 % des moyennes semi-horaires d'une année						–	100
SO ₂ , µg/m ³	Année	20 ^d					–	30 ^e
	24 heures	20	125	50	–	–	40 ^a	100 ^c
	95 % des moyennes semi-horaires d'une année						–	100
CO, mg/m ³	24 heures	–	7	–	–	–	4 ^a	8 ^c

^a 99^e percentile (en d'autres termes, trois dépassements par an sont admis).

^b Moyenne calculée à partir des moyennes journalières maximales par 8 heures de la concentration d'ozone pendant six mois consécutifs et de la concentration d'ozone la plus élevée en moyenne semestrielle. En Suisse, cela correspond à la période allant d'avril à septembre.

^c Ne peut être dépassée qu'une fois par an au maximum.

^d Valeur des lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2000 (OMS, 2000) qui a été fixée pour protéger les forêts et d'autres écosystèmes proches de la nature. Elle s'applique en tant que moyenne annuelle et pour le semestre d'hiver (d'octobre à mars).

^e VLI qui englobe également la protection des animaux et des plantes, de leurs biocénoses et de leurs biotopes selon les art. 1, al. 1, et 14, let. a, LPE et qui correspond à l'état des connaissances au moment de l'édiction de l'OPair en 1985.

1.4 Effets de la pollution de l'air sur la santé

La recherche concernant les effets de la pollution de l'air sur la santé est très détaillée et le nombre de publications scientifiques sur les conséquences sanitaires des polluants atmosphériques croît régulièrement. En particulier, les nouvelles connaissances sur la diversité des conséquences, les mécanismes d'action et les effets sur la santé des concentrations inférieures aux VLI en vigueur qui sont caractéristiques de la Suisse, revêtent une grande importance.

Effets constatés sur la santé

En plus des effets des polluants de l'air sur les poumons, la recherche porte sur d'autres conséquences sanitaires, telles que l'impact sur le système cardiovasculaire, le fœtus et le métabolisme ou les effets neurocognitifs dans l'enfance et à l'âge adulte. La pollution de l'air peut agir de manière très différente à chaque étape de la vie, de l'embryon aux personnes âgées en passant par les enfants. Outre l'âge, l'état de santé peut augmenter la vulnérabilité face à ces polluants. De courtes études pertinentes pour la Suisse ont été publiées en 2014 et en 2019 (Dietrich Felber, 2014 ; Joss Kutlar et al., 2019).

LUDOK, le centre de documentation sur l'air et la santé de l'Institut Tropical et de Santé Publique Suisse, fournit une vue d'ensemble des conséquences avérées sur la santé (Swiss TPH, 2022). Pour ce faire, il s'appuie sur des évaluations de groupes d'experts qui sont regroupées dans les *Integrated Science Assessments* (ISA) de l'agence de protection de l'environnement des États-Unis (U.S. EPA, 2010, 2016, 2017, 2019, 2020). Ces ISA classent par catégorie les données scientifiques présentant un lien de causalité entre les expositions aux substances et des affections spécifiques, notamment les conséquences « occasionnées » ou « probablement occasionnées »² par les polluants atmosphériques. Un graphique interactif présente les effets sur la santé à l'adresse <https://www.swisstph.ch/fr/projects/ludok/healtheffects> (voir également la fig. 1).

² L'U.S. EPA considère les liens de causalité comme « probables » (*likely causal*) lorsque des résultats aléatoires, des facteurs perturbateurs ou d'autres distorsions ne sauraient les expliquer dans des études de grande qualité. Une incertitude entoure néanmoins l'ensemble des données scientifiques, p. ex. lorsque des études par observation révèlent un lien avec une substance sans toutefois pouvoir exclure clairement l'influence d'autres substances ou lorsque des mécanismes d'action ou des résultats d'expérimentations sur l'être humain ou les animaux sont limités ou incohérents ou lorsque des expérimentations animales de grande qualité montrent des effets sur la santé, mais que les données issues de la recherche expérimentale ou épidémiologique sur l'être humain font défaut ou sont restreintes (voir U.S. EPA. [2015], *Preamble to the Integrated Science Assessments*. <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=310244>). Conformément au principe de précaution, il est nécessaire d'agir pour la protection de la santé même lorsque le lien de causalité n'est que « probable ».

A court terme

Voies respiratoires

Symptômes des voies respiratoires, p. ex. respiration sifflante

Aggravation de la maladie, augmentation des symptômes ou du traitement chez les patients asthmatiques

Fonction pulmonaire réduite chez les patients asthmatiques

Aggravation de la maladie ou augmentation des symptômes chez les patients atteints de BPCO

Réduction de la fonction pulmonaire

Inflammation des voies respiratoires, réaction inflammatoire

Système cardiovasculaire

Hypertension artérielle

Arythmies cardiaques

Métabolisme/système immunitaire

Troubles/maladies du métabolisme des sucres et des graisses (p. ex., diabète)

Réduction des défenses immunitaires

Mortalité

Mortalité due à la maladie

Mortalité due à des maladies cardiovasculaires

Mortalité due à des maladies des voies respiratoires

Urgences

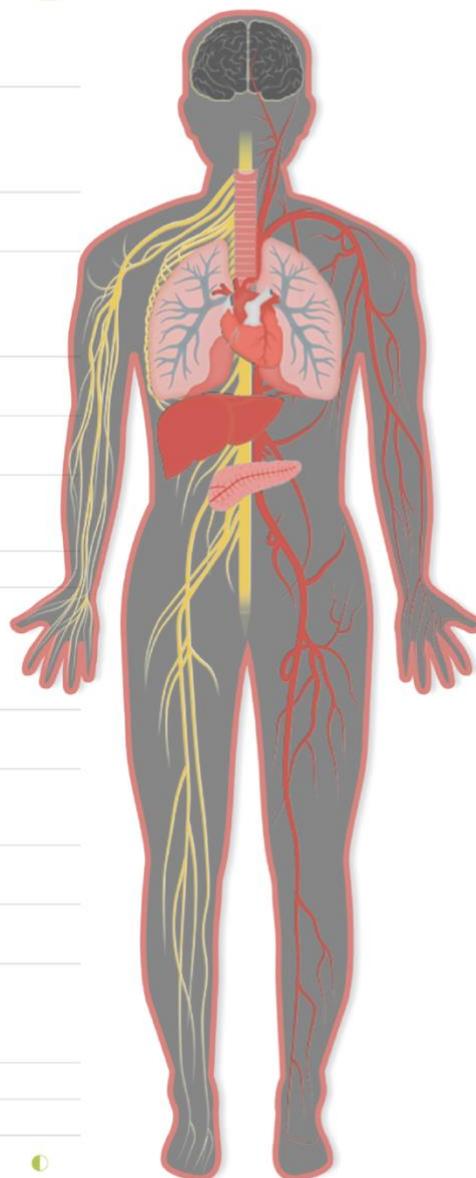
Urgences dues à des maladies respiratoires

Urgences dues à l'asthme

Urgences dues à la BPCO

Urgences dues aux maladies cardiovasculaires

Causalité: ● cause ● cause probable



A long terme

Voies respiratoires

	Poussières fines	Ozone	Dioxyde d'azote
Asthme	●	●	●
Symptômes des voies respiratoires, p. ex. respiration sifflante	●		
Aggravation de la maladie, augmentation des symptômes ou du traitement chez les patients asthmatiques	●	●	●
Augmentation des symptômes chez les personnes allergiques		●	
Bronchite chronique			●
Réduction de la fonction pulmonaire	●		●
Réduction de la croissance des poumons	●		●
Accélération de la diminution de la fonction pulmonaire	●		
Bronchite	●		
Inflammation des voies respiratoires, réaction inflammatoire	●		
Développement d'un cancer du poumon	●		

Système cardiovasculaire

Artériosclérose	●
Hypertension artérielle	●
Arythmies cardiaques	●
Coagulation du sang	●

Système nerveux

Réduction du volume du cerveau (masse blanche)	●
Diminution des performances cognitives (démence)	●

Mortalité

Mortalité due à la maladie	●
Mortalité due à des maladies cardiovasculaires	●
Mortalité due à des maladies des voies respiratoires	●
Mortalité: asthme	●
Mortalité: BPCO	●
Mortalité: cancer du poumon	●
Mortalité: infections des voies respiratoires	●

Causalité: ● cause ● cause probable

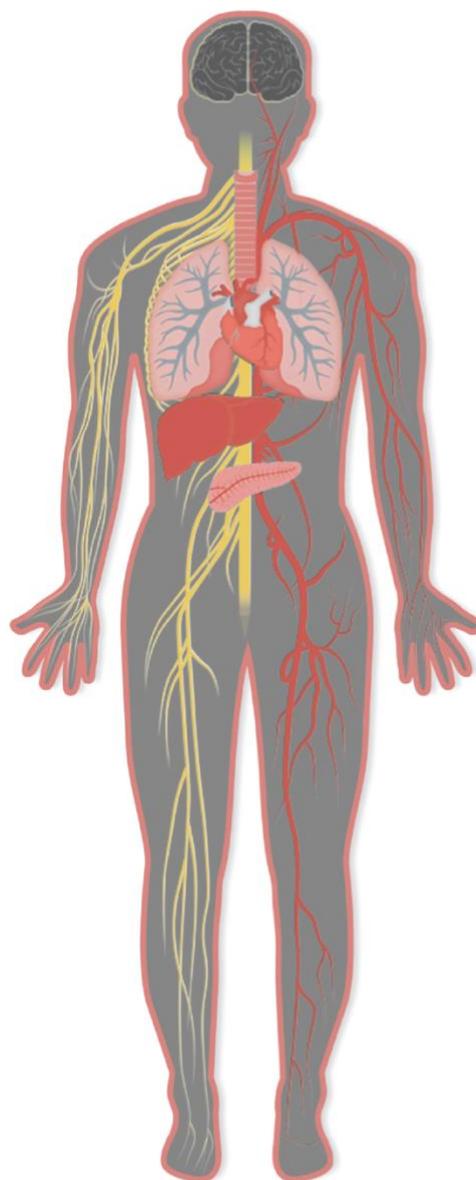


Figure 1 : Effets sur la santé occasionnés ou probablement occasionnés par une exposition à court terme respectivement à long terme, aux polluants atmosphériques (Swiss TPH, 2022)

Mécanismes d'action

Les nouvelles connaissances approfondies relatives aux mécanismes d'action biologiques et biochimiques des polluants atmosphériques, expliquant les interactions observées en matière de santé, revêtent une grande importance. Un examen systématique a présenté les principaux mécanismes d'action au niveau cellulaire (Peters et al., 2021).

En particulier, le stress oxydatif et la modification de la fonction mitochondriale des cellules, les mutations génétiques et épigénétiques, les réactions inflammatoires systémiques et les effets sur le système nerveux sont à l'origine des conséquences observées, mais leur importance et leurs interactions diffèrent en fonction du polluant ou du mélange de polluants, du contexte temporel (action à court ou à long terme) et de la situation individuelle (fig. 2).

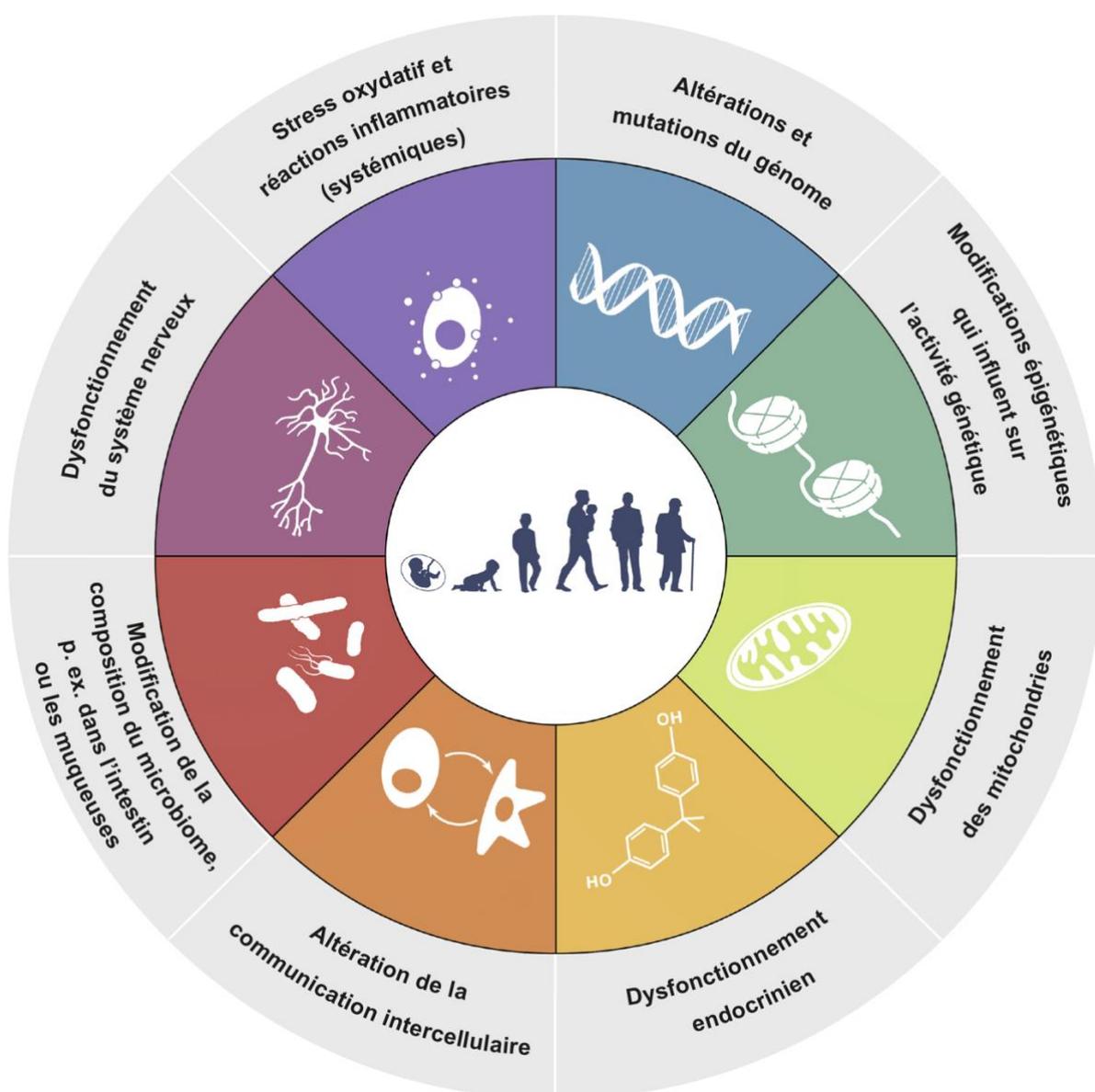


Figure 2 : Aperçu des mécanismes d'action connus pouvant être déclenchés par des charges sur l'environnement (Peters et al., 2021).

Seuils d'effets

Compte tenu de la diminution notable de la charge en polluants atmosphériques en Suisse, la question des seuils présentant des effets revêt une importance majeure dans la fixation des valeurs limites. Il n'existait certes aucun indice probant de seuils de concentration non nocifs lors de l'élaboration des lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air en 2005 ou de la définition des VLI dans l'OPair, mais les études alors à disposition ne comportaient aucune donnée sur les concentrations les plus faibles. Ainsi lorsque les principaux projets de recherche suisses SCARPOL et SAPALDIA ont été lancés, sur des cohortes d'enfants respectivement d'adultes, les valeurs mesurées étaient supérieures aux VLI, même dans les régions examinées les moins exposées. Depuis, la situation a fortement changé : le nombre d'études à long terme (études de cohorte) déterminantes pour évaluer les données scientifiques a sensiblement augmenté. Ces études s'appuient sur des données concernant des échantillons de population de plusieurs centaines de milliers de personnes, grâce à une coopération internationale entre des grands consortiums d'études – auxquels la Suisse participe. En outre, une large part de ces échantillons vit dans des régions faiblement exposées, permettant ainsi à la recherche de quantifier les liens de cause à effet lors de concentrations très basses.

Comme indiqué précédemment, l'OMS a tout d'abord examiné si la littérature scientifique permettait de fixer des seuils présentant des effets lorsqu'elle a défini ses niveaux de qualité de l'air. Même si les études disponibles les plus récentes portaient également sur des niveaux d'immission très faibles, aucun seuil d'effets n'était identifiable. La figure 3 met cette situation en évidence en se fondant sur le lien entre une exposition à long terme aux PM_{2.5} et le risque de mortalité dans la cohorte américaine Medicare (Di et al., 2017). Le rapport exposition/effets quasiment linéaire dans le domaine des basses concentrations ne donne aucune indication sur un seuil d'effets. En d'autres termes, on ne peut pas identifier une concentration en dessous de laquelle il n'y a pas de dommage. Par conséquent, l'OMS a pris comme nouveau niveau recommandé, toute concentration située à l'extrémité inférieure de la courbe d'exposition des études disponibles pour laquelle des effets sur la santé sont perceptibles (5^e percentile de l'exposition). Le niveau recommandé par l'OMS pour la moyenne annuelle des poussières fines PM_{2.5} a donc été abaissé sur cette base, passant de 10 µg/m³ à 5 µg/m³ (voir annexe A.1). Publiée après les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air, l'étude européenne ELAPSE, qui englobe plus de 28 millions de participants issus de cohortes européennes, dont la « Swiss National Cohort », confirme des effets en-deçà de la valeur limite suisse en vigueur de 10 µg/m³ (Stafoggia et al., 2022). Les études actuellement disponibles ne permettent pas de tirer de conclusions sur les conséquences sanitaires des concentrations inférieures au nouveau niveau recommandé.

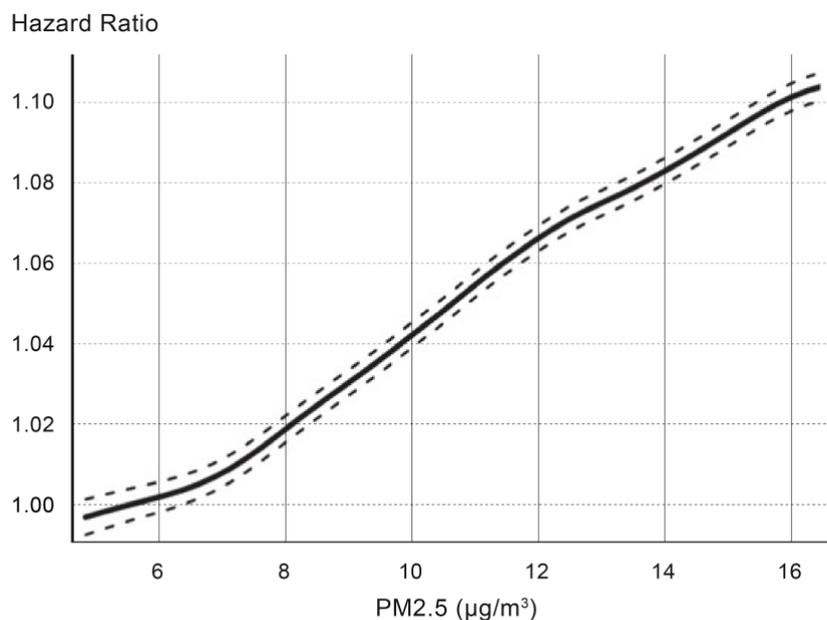


Figure 3 : Rapport exposition/effets (ligne pleine, les marges de confiance supérieure et inférieure figurant en pointillé) entre le risque de mortalité (*hazard ratio*, HR) et l'exposition à long terme aux poussières fines PM2.5, dans l'étude de cohorte américaine Medicare (Di et al., 2017). Il existe un risque de mortalité supplémentaire lié aux PM, même pour les moyennes annuelles inférieures à 10 µg/m³. Le risque de mortalité croît avec l'exposition.

2 Objectifs et structure du rapport

Le présent rapport poursuit trois objectifs principaux. Premièrement, il convient de déterminer si l'état actuel des connaissances relatives aux effets sur la santé et les nouveaux niveaux de qualité de l'air de l'OMS qui en découlent requièrent une modification des VLI suisses. Deuxièmement, une réponse est apportée aux questions posées dans le rapport de la CFHA « Les poussières fines en Suisse 2013 », notamment celle sur la nécessité de VLI pour d'autres polluants. Enfin, troisièmement, des recommandations correspondantes sont formulées pour le Conseil fédéral.

Les chapitres 4 à 13 ci-après donnent une vue d'ensemble des recommandations de la CFHA, des sources d'émissions, des conséquences sanitaires et du niveau des immissions en Suisse pour les polluants examinés. Ceux-ci sont présentés dans le même ordre que dans les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air. Le respect des VLI en vigueur (OPair) et des nouveaux niveaux de qualité de l'air 2021 de l'OMS est examiné à l'aune des mesures du Réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL). Comme dans le réseau NABEL, la notion de sites caractéristiques permet une évaluation représentative de l'exposition en Suisse, mais ne couvre pas les *hotspots* locaux. Dans certains cas, des mesurages cantonaux sont utilisés en complément. L'existence de méthodes de mesure de référence reconnues sur le plan international est également précisée pour les polluants examinés, car c'est une condition impérative pour les VLI.

Outre les polluants répertoriés dans le tableau 1, pour lesquels l'OMS a fixé des niveaux de qualité de l'air, les modalités d'action (meilleures pratiques de l'OMS) pour les particules ultrafines, la suie et les particules apportées par les tempêtes de sable et de poussières désertiques sont examinées dans le contexte suisse. Conformément aux questions formulées dans le dernier rapport sur les poussières fines, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les métaux et le potentiel oxydatif (PO) des poussières fines sont mis en évidence. Dans le chapitre 14, la CFHA dresse des perspectives et récapitule l'ensemble de ses recommandations.

À l'annexe B, le tableau 15 présente les contributions des différentes sources d'émissions polluantes. Des informations complémentaires sur la fixation des niveaux recommandés par l'OMS, ainsi que d'autres renseignements et présentations détaillés sur les polluants examinés, figurent également dans cette annexe. A fin de comparaison, tous les tableaux répertorient les polluants (substances) dans le même ordre que dans l'OPair (tableau 10).

3 Bases des recommandations de la CFHA

Les recommandations de la CFHA se fondent sur le mandat inscrit dans la LPE, comme indiqué au début du rapport. En vertu de cette loi, le Conseil fédéral édicte, selon l'état des connaissances, des VLI applicables aux polluants atmosphériques pour protéger les êtres humains et l'environnement. Ces VLI doivent être fixées de manière à ce que les immissions montrant des valeurs inférieures, ne menacent pas les hommes, les animaux et les plantes, leurs biocénoses et leurs biotopes.

Lorsqu'elle a élaboré les lignes directrices 2021 relatives à la qualité de l'air, l'OMS a analysé en profondeur et synthétisé l'état actuel des connaissances, elle s'est basée sur cet état pour émettre ses recommandations. Les critères que l'OMS a employés pour fixer ses nouveaux niveaux de qualité de l'air se trouvent être conformes aux exigences de l'art. 14 de la LPE pour la définition des VLI. Par conséquent et après une analyse détaillée des documents scientifiques mis à disposition, la CFHA reprend dans ses propres recommandations la plupart des niveaux proposés par l'OMS. L'évaluation de la CFHA tient également compte de la protection des écosystèmes.

4 Poussières fines PM10

4.1 Recommandations de la CFHA concernant les PM10

La CFHA propose d'abaisser les VLI applicables aux poussières fines PM10 à 15 µg/m³ pour la moyenne annuelle et à 45 µg/m³ pour la moyenne journalière, afin de prendre en considération l'objectif de protection de la LPE et les recommandations de l'OMS.

Tableau 3 : Niveaux de PM10 à court et à long termes préconisés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport aux VLI de l'OPair et aux recommandations de la CFHA

Polluant	Unité de temps	AQG OMS	VLI OPair	Recommandation de la CFHA
PM10, µg/m ³	Année	15	20	15
	24 heures ^a	45	50	45

^a 99^e percentile (soit, trois jours de dépassement par an sont admis).

4.2 Sources de PM10

Les poussières fines sont constituées d'un mélange complexe de substances chimiques aux propriétés et aux effets variés. Elles sont produites par d'innombrables sources et processus. Les PM10 proviennent notamment de l'industrie, de l'artisanat, des transports et des chauffages à bois. Les poussières fines se composent d'une fraction primaire, émise directement sous forme de particules, et de poussières fines secondaires, qui résultent de réactions chimiques des gaz précurseurs dans l'atmosphère. Représentant près de la moitié du volume total des PM10, ces poussières fines secondaires se répartissent de manière bien plus homogène dans l'espace en raison de la propagation des gaz précurseurs et du temps nécessaire à leur formation. Des concentrations élevées de poussières fines primaires sont recensées sur les sites à proximité des sources. Sur les routes à très fort trafic, il s'agit de poussières minérales en suspension, de particules formées par l'abrasion des freins, des routes et des pneumatiques, ainsi que de suie. De fortes concentrations d'aérosols organiques dus à la combustion et de suie sont mesurées dans les régions présentant beaucoup de chauffages au bois (CFHA, 2007, 2013). De plus amples informations sur la composition des PM10 et leurs sources figurent à l'annexe C. La masse de la fraction de PM10 comprend également des particules encore plus fines (PM2.5), qui sont présentées dans le prochain chapitre.

4.3 Conséquences des poussières fines pour la santé

Sur le plan qualitatif, les conséquences des PM10 et des PM2.5 sont relativement similaires. Elles sont donc présentées ici pour ces deux fractions de poussières fines (voir également CFHA [2013], fig. 1, annexe C et fig. 41 de l'annexe I).

Le nombre de décès, de consultations d'urgence et d'hospitalisations pour des affections cardiovasculaires et pulmonaires augmente en cas d'exposition accrue à court terme aux poussières fines. Une charge excessive prolongée en poussières fines contribue à des maladies non transmissibles, telles que des pathologies cardiovasculaires ou des troubles neurodégénératifs (démence). Selon certaines données, une exposition à la fraction grossière des poussières fines, c'est-à-dire à des particules dont le diamètre aérodynamique est compris entre 2,5 et 10 µm, hors PM2.5, aurait de graves conséquences

pour la santé, notamment des affections des voies respiratoires, des consultations d'urgence liées à l'asthme et des décès (voir CFHA, 2013, annexe A.2; Liu et al., 2022).

Selon la vue d'ensemble de l'OMS, les conséquences d'une charge excessive prolongée en poussières fines s'observent également en cas de faibles concentrations. Comme indiqué à la figure 3 (point 1.4) à titre d'exemple, le risque croît régulièrement à mesure que la concentration augmente. Étant donné que les études les plus récentes menées dans des régions présentant une faible concentration ne portent souvent que sur les PM2.5, les effets sur la santé des concentrations basses de PM10 sont rarement exposés. La figure 1 donne un aperçu des effets à court et à long termes des poussières fines qui ont été établis scientifiquement. Une [version interactive est disponible sur le site Internet LUDOK](#) (voir également la figure 41 à l'annexe I).

4.4 Évolution de la concentration de PM10 en Suisse

La concentration de PM10 baisse régulièrement depuis des décennies (voir figure 4). Il existe également une forte corrélation entre les valeurs à court et à long termes. Si le nombre maximum autorisé de dépassements de la valeur à court terme est respecté, on peut considérer que la moyenne annuelle l'est aussi, et inversement (voir annexe C.2).

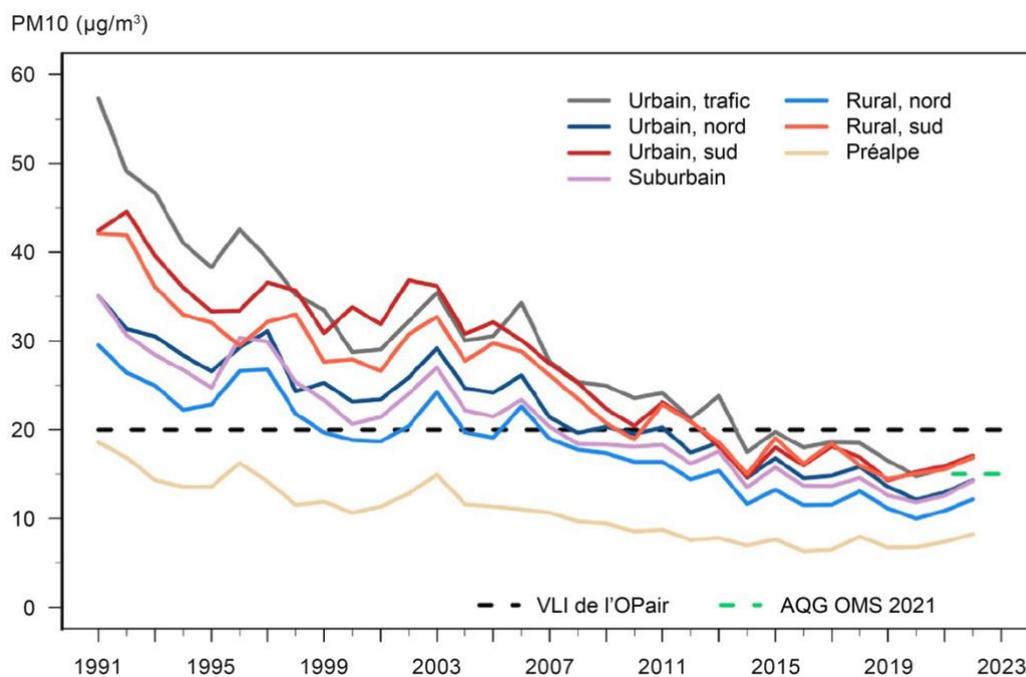


Figure 4 : Moyenne annuelle des poussières fines PM10 entre 1991 et 2022, par site caractéristique

4.5 PM10 : respect des VLI et des nouveaux niveaux recommandés par l'OMS

Les VLI en vigueur sont-elles respectées ?

La VLI pour la moyenne annuelle des PM10, soit $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, est respectée depuis plusieurs années sur tous les sites du réseau NABEL (voir fig. 4). Celle qui s'applique à la moyenne journalière n'est dépassée que sporadiquement, principalement au sud des Alpes et durant les années qui comptent des tempêtes de sable fréquentes et intenses et venant du Sahara (fig. 5). Il convient de noter que l'OPair autorise jusqu'à trois jours d'immissions supérieures à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nombre de jours avec moyenne horaire de PM10 > $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

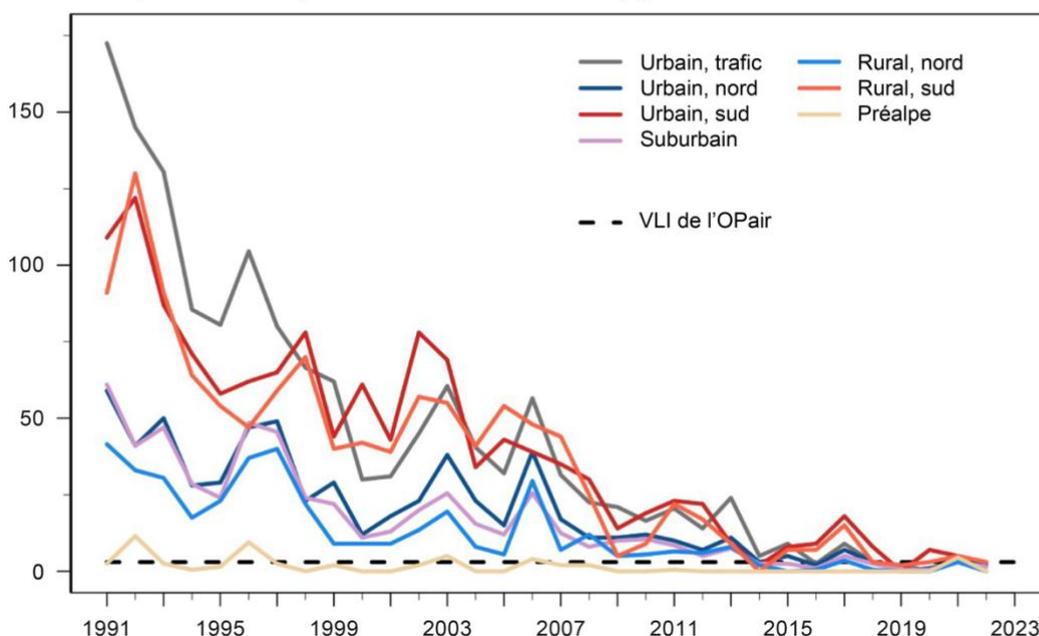


Figure 5 : Évolution du nombre de moyennes journalières de PM10 supérieures à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 1991 et 2022. La ligne pointillée correspond à la VLI de l'OPair, qui peut être dépassée trois fois par an.

La Suisse respecte-t-elle déjà les nouveaux niveaux de qualité de l'air de l'OMS ?

L'OMS recommande comme nouveaux niveaux de qualité de l'air, une moyenne annuelle de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et une moyenne journalière de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En tenant compte des données de mesures cantonales et communales, on peut établir la carte des immissions ci-après pour la moyenne annuelle 2021 (figure 6). Les zones en bleu et en vert respectent le nouveau niveau recommandé pour la moyenne annuelle ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$). La figure 7 recense le nombre de dépassements du nouveau niveau préconisé pour la moyenne journalière ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Contrairement aux années précédentes, cette dernière a été dépassée en 2021 plus que les trois fois autorisées, car les tempêtes de sable venant du Sahara ont été fréquentes et fortes cette année-là.

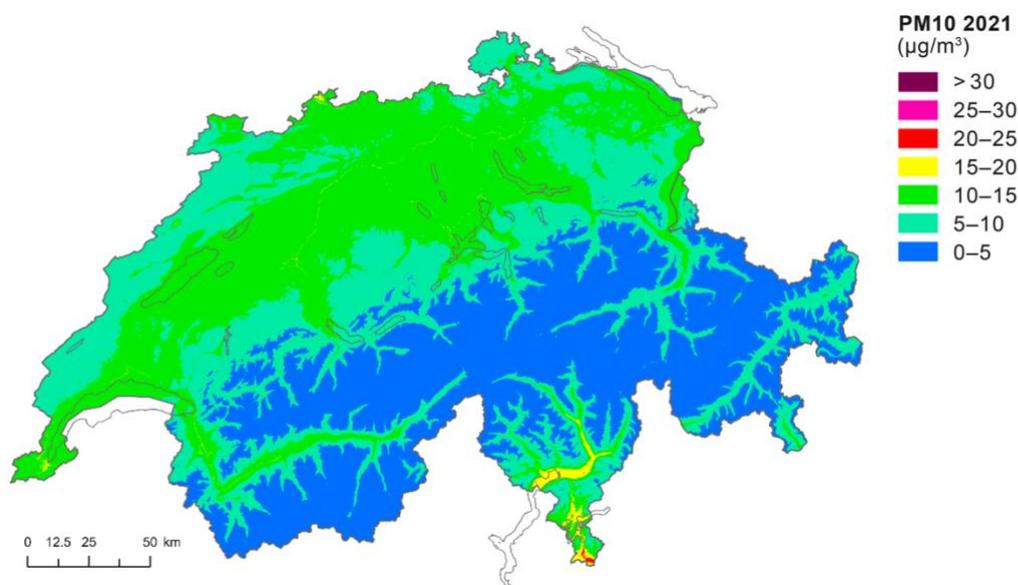


Figure 6 : Carte des immissions, moyenne annuelle des poussières fines PM10 en 2021

Code couleur de cette modélisation spatiale qui intègre les mesures des immissions : les régions en bleu et en vert respectent déjà le nouveau niveau recommandé par l'OMS ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ; les régions en jaune le dépassent, mais respectent la VLI de l'OPair en vigueur (moyenne annuelle). Les zones en rouge affichent des immissions supérieures à la VLI.

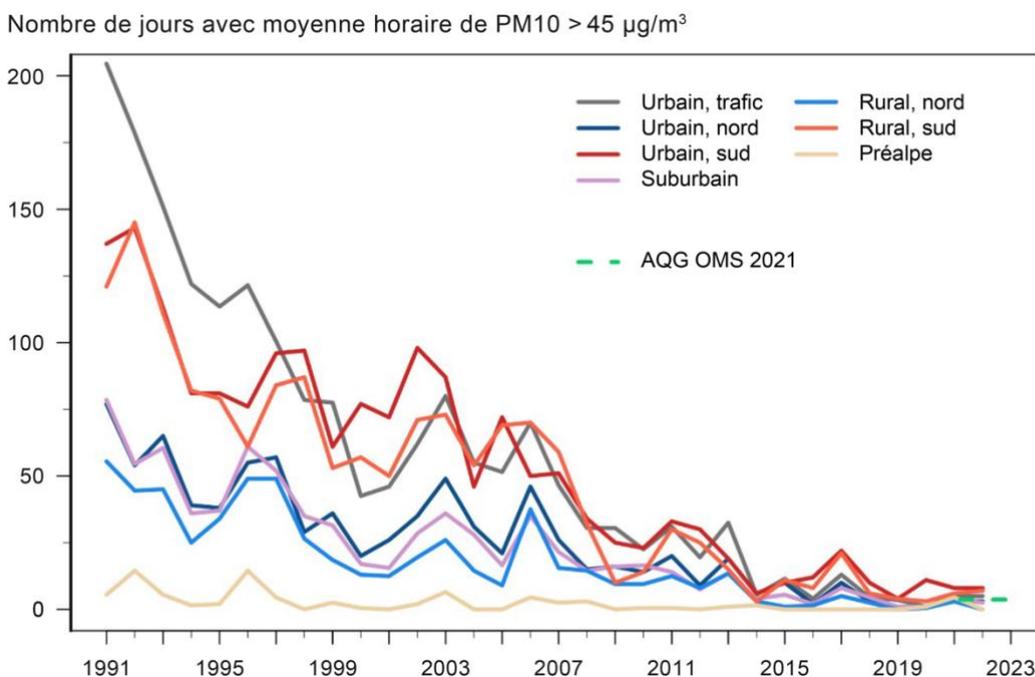


Figure 7 : Évolution du nombre de moyennes journalières de PM10 supérieures à $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 1991 et 2022. La ligne pointillée correspond au niveau recommandé par l'OMS, qui peut être dépassé trois fois par an.

Où les immissions sont-elles supérieures aux nouveaux niveaux recommandés par l'OMS ? Quelles sources ou influences caractérisent ces endroits ?

Il ressort des figures 6 et 7 que les nouveaux niveaux de qualité de l'air ne sont pas encore respectés partout. Compte tenu de leurs constructions denses, de l'aménagement du territoire et de leur population, les zones urbaines affichent des émissions plus élevées dues aux transports et à l'industrie et, partant, des concentrations accrues de polluants. La formation des fractions de poussières fines secondaires à partir des gaz précurseurs tels que les oxydes d'azote (transports), l'ammoniac (production animale agricole) et les composés organiques volatils (industrie, chauffages au bois, artisanat et solvants) est uniforme sur le plan spatial et ne présente guère de différences locales. De manière générale, leur concentration est plus faible en altitude, à l'exception des lieux comportant un grand nombre de chauffages au bois. En altitude, les tempêtes de sable et de poussières désertiques peuvent se traduire par un dépassement de la moyenne journalière.

Un échange d'air limité, qui entrave la dilution des polluants dans certaines conditions météorologiques (p. ex. inversions thermiques ou inversions matinales dans les vallées alpines), entraîne à court terme une hausse des émissions de poussières fines. Les sites caractérisés par une circulation dense ou de nombreux chauffages au bois et une topographie défavorable sont les plus concernés. On s'attend dès lors à ce que les niveaux de qualité de l'air applicables aux PM10 soient dépassés, notamment au sud des Alpes et dans les zones urbaines à fort trafic.

Le renforcement des prescriptions relatives aux gaz d'échappement des véhicules et l'électrification visée de la flotte de véhicules contribueront à un nouveau recul des émissions dues aux gaz d'échappement. La charge en poussières fines résultant de l'abrasion des pneumatiques, des rails, des plaquettes de frein et des routes ou de la resuspension des poussières se trouvant déjà sur la route demeurera néanmoins. Or, ces émissions non liées aux effluents gazeux des véhicules représentent actuellement plus de 50 % des émissions de poussières fines primaires en matière de transport. Elles comprennent notamment des métaux tels que le cuivre et le fer (voir point 13.2). Des mesures organisationnelles et techniques plus étendues sont nécessaires pour réduire les émissions qui ne sont pas dues aux gaz d'échappement.

Une méthode de mesure de référence est-elle reconnue sur le plan international ?

Oui. Il s'agit des normes SN EN 12341:2014 et SN EN 16450:2017 (SN EN, 2014, 2017a).

5 Poussières fines PM2.5

5.1 Recommandations de la CFHA concernant les PM2.5

La CFHA propose d'abaisser la VLI applicable aux poussières fines PM2.5 à 5 µg/m³ pour la moyenne annuelle et de mettre en place une VLI de 15 µg/m³ pour la moyenne journalière, afin de prendre en considération l'objectif de protection de la LPE et les recommandations de l'OMS.

Tableau 4 : Niveaux de PM2.5 à court et à long termes préconisés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport aux VLI de l'OPair et aux recommandations de la CFHA

Polluant	Unité de temps	AQG OMS	VLI OPair	Recommandation de la CFHA
PM2.5, µg/m ³	Année	5	10	5
	24 heures ^a	15	–	15

^a 99^e percentile (en d'autres termes, trois jours de dépassement par an sont admis).

Des mesures à haute résolution temporelle sont d'ores et déjà réalisées pour déterminer la moyenne annuelle des poussières fines PM2.5. Comme celles-ci ont une répartition spatiale très homogène, on peut supposer que quelques sites de mesure suffiront pour surveiller les immissions correspondantes. La mise en place de cette nouvelle VLI ne devrait donc guère entraîner des charges métrologiques supplémentaires. De plus amples informations figurent à l'annexe C.1.

5.2 Sources de PM2.5

Tout comme la fraction grossière PM10, les poussières fines PM2.5 sont un mélange de substances chimiques très diverses. Leurs sources sont similaires à celles des PM10, les principales étant l'industrie, l'artisanat, les chauffages au bois et les transports. En termes absolus et en pourcentage, leurs contributions aux PM2.5 peuvent toutefois diverger sensiblement par rapport aux PM10 en fonction du lieu. Par exemple, les proportions de poussières fines primaires résultant d'abrasion ou de tourbillons sont nettement plus faibles pour les PM2.5 que pour les PM10. En revanche, les poussières fines secondaires et la suie se retrouvent presque intégralement dans les PM2.5. Ces dernières jouent un rôle bien plus important dans les PM2.5 que dans les PM10 et représentent plus de la moitié de la concentration en PM2.5 (CFHA, 2007, 2013). De plus amples informations sur la composition et les sources de poussières fines PM2.5 figurent à l'annexe C.1.

5.3 Conséquences des PM2.5 pour la santé

Voir point 4.3.

5.4 Évolution de la concentration de PM2.5 en Suisse

La figure 8 ci-après confirme, pour la moyenne annuelle, la baisse régulière de la concentration depuis le début des mesures. Il existe également une forte corrélation entre les valeurs à court et à long termes. Si le nombre maximum autorisé de dépassements de la valeur à court terme est respecté, on peut considérer que la moyenne annuelle l'est aussi, et inversement (voir annexe C.3).

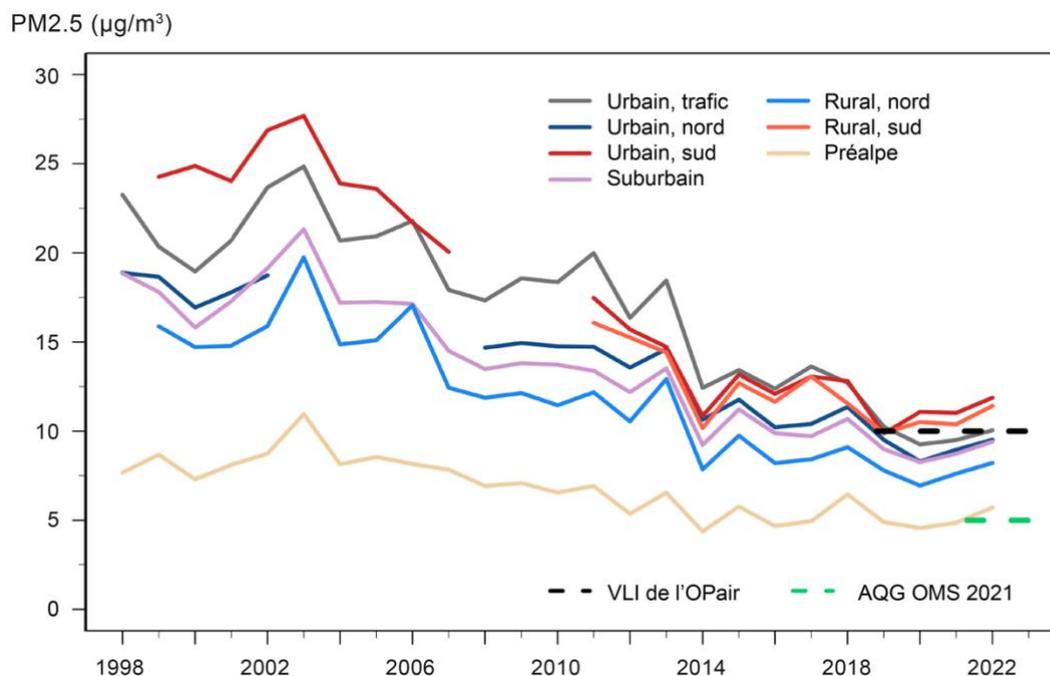


Figure 8 : Moyenne annuelle des poussières fines PM2.5 entre 1998 et 2022, par site caractéristique

5.5 PM2.5 : respect de la VLI et des nouveaux niveaux recommandés par l'OMS

La VLI en vigueur (moyenne annuelle) est-elle respectée ?

La VLI pour la moyenne annuelle des PM2.5, soit 10 µg/m³, est respectée dans une large mesure au nord des Alpes. Au Tessin, on enregistre encore des dépassements (fig. 8 et 9). Jusqu'à présent, la Suisse n'a fixé aucune VLI pour la moyenne journalière des PM2.5.

La Suisse respecte-t-elle déjà les nouveaux niveaux de qualité de l'air de l'OMS ?

Les nouveaux niveaux de PM2.5 recommandés par l'OMS sont actuellement dépassés sur les sites urbains et ruraux et respectés uniquement dans les régions situées en altitude, même si de brefs dépassements peuvent se produire en raison de grandes tempêtes de sable et de poussières venant du Sahara (fig. 9 et 10). Il existe une forte corrélation entre les valeurs à court et à long termes (voir annexe C.3).

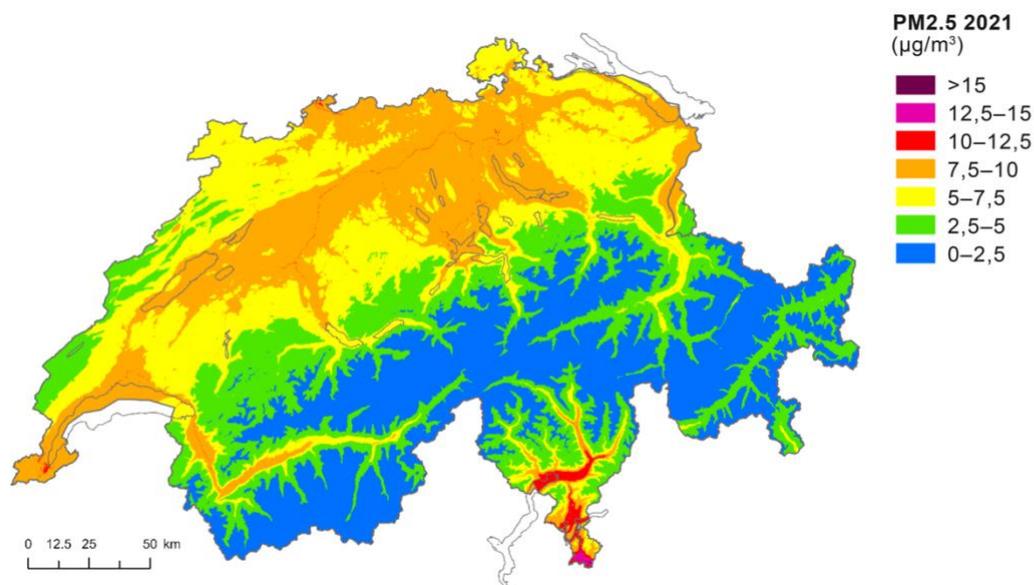


Figure 9 : Carte des immissions, moyenne annuelle des poussières fines PM2.5 en 2021

Code couleur de cette modélisation spatiale qui intègre les mesures des immissions : les régions en bleu et en vert respectent déjà le nouveau niveau recommandé par l'OMS ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ; les régions en jaune et en orange le dépassent, mais respectent la VLI de l'OPair en vigueur (moyenne annuelle). Les zones en rouge et en violet affichent des immissions supérieures à la VLI.

Nombre de jours avec moyenne horaire de PM2.5 > 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

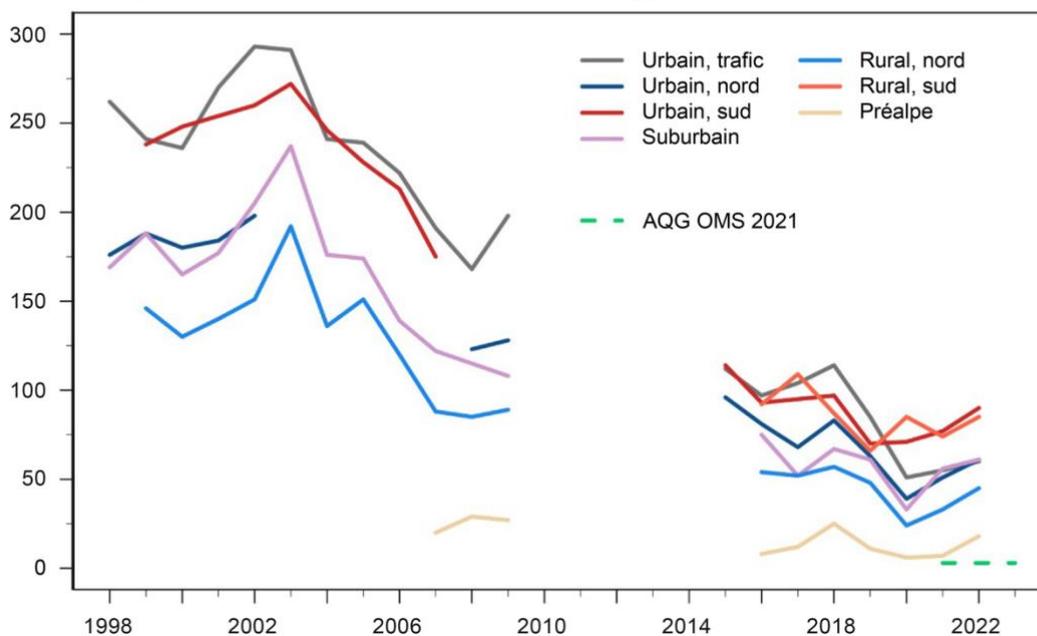


Figure 10 : Évolution du nombre de moyennes journalières de PM2.5 supérieures à $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 1991 et 2022.

La ligne pointillée correspond au niveau recommandé par l'OMS, qui peut être dépassé trois fois par an. Les mesures n'ayant été réalisées que tous les quatre jours entre 2010 et 2015, il n'y a aucune indication sur le nombre de dépassements pendant cette période.

Où les immissions sont-elles supérieures aux nouveaux niveaux recommandés par l'OMS ? Quelles sources ou influences caractérisent ces endroits ?

La nouvelle moyenne annuelle des PM_{2.5} recommandée par l'OMS, soit 5 µg/m³, n'est respectée que sur les sites ruraux d'altitude du réseau NABEL (fig. 8). Les immissions sur les autres sites y sont sensiblement supérieures, mais les PM_{2.5} ne sont mesurées que sur douze des seize sites de ce réseau. De même, le niveau préconisé par l'OMS pour la moyenne journalière (15 µg/m³) est dépassé en Suisse beaucoup plus que trois fois par an dans presque toutes les régions habitées (fig. 10).

Il faut donc partir du principe que les nouveaux niveaux recommandés par l'OMS pour les moyennes tant journalière qu'annuelle, ne sont actuellement respectés que dans des régions rurales à plus de 1000 m d'altitude. Comme indiqué dans le chapitre sur les PM₁₀, il est également vraisemblable, dans le cas des PM_{2.5}, que le renforcement des prescriptions relatives aux gaz d'échappement des véhicules et l'électrification visée de la flotte de véhicules contribuent à un nouveau recul des émissions. Des mesures organisationnelles et techniques plus étendues sont nécessaires pour réduire les émissions qui ne sont pas liées à ces derniers.

Une méthode de mesure de référence est-elle reconnue sur le plan international ?

Oui. Il s'agit des normes SN EN 12341:2014 et SN EN 16450:2017 (SN EN, 2014, 2017a).

6 Ozone (O₃)

6.1 Recommandations de la CFHA concernant l'ozone

La CFHA recommande d'introduire en tant que valeur à long terme le niveau d'ozone préconisé par l'OMS pour la saison estivale (d'avril à septembre), soit 60 µg/m³. La moyenne horaire de l'OPair (120 µg/m³), qui peut être dépassée au plus une fois par an, est conservée. Comme elle est équivalente, sur le plan statistique, au niveau recommandé par l'OMS pour la moyenne par 8 heures et garantit dès lors une protection de la santé similaire, on renoncera à mettre en place une valeur limite par 8 heures. Le 98^e percentile des moyennes semi-horaires d'un mois est maintenu pour évaluer les tendances à long terme.

Tableau 5 : Niveaux d'ozone à court et à long termes préconisés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport aux VLI de l'OPair et aux recommandations de la CFHA

Polluant	Unité de temps	AQG OMS	VLI OPair	Recommandation de la CFHA
Ozone, µg/m ³	Saison estivale ^a	60	–	60
	98 % des moyennes semi-horaires d'un mois	–	100	100
	Maximum par 8 h ^b	100	–	–
	Moyenne horaire ^c	–	120	120

^a Moyenne calculée à partir des moyennes journalières maximales par 8 heures de la concentration d'ozone pendant six mois consécutifs et de la concentration d'ozone la plus élevée en moyenne semestrielle. En Suisse, cela correspond à la période allant d'avril à septembre.

^b 99^e percentile (en d'autres termes, trois dépassements par an sont admis).

^c La moyenne horaire peut être dépassée au plus une fois par an.

La valeur à long terme de 60 µg/m³ pour la saison estivale (d'avril à septembre) se fonde sur de nouvelles données scientifiques concernant l'impact d'une charge prolongée sur la santé. Elle contribue également au respect des niveaux critiques spécifiques à la végétation (*critical levels* ; voir annexe D.1), qui ont été fixés dans le cadre de la Convention CEE-ONU sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CLRTAP) pour protéger la végétation des dommages de l'ozone.

De plus amples informations sur la comparabilité des deux valeurs (moyenne horaire et moyenne par 8 heures) figurent à l'annexe E. L'adoption de la moyenne par 8 heures de l'OMS entraînerait une charge administrative considérable. De plus, le concept d'information et les plans de mesures cantonaux se basent sur la moyenne horaire et devraient alors être modifiés.

Toutes les valeurs limites pouvant être déterminées lors des mêmes séries de mesures, l'ajout proposé ou le maintien de ces VLI n'occasionnent pas de frais de mesure supplémentaires.

6.2 Sources d'ozone

L'ozone anthropogène dans la troposphère n'est pas un polluant primaire, c'est-à-dire qu'il n'est pas émis directement. Il se forme dans l'atmosphère sous l'action du rayonnement solaire à travers des réactions photochimiques de polluants dits précurseurs – principalement les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV non méthaniques, COVNM). Les fortes concentrations d'ozone à proximité du sol découlent donc surtout des émissions anthropogènes de ces précurseurs. L'industrie, l'artisanat et les ménages (solvants notamment) sont les principaux émetteurs de COVNM anthropogènes, tandis que deux tiers de l'oxyde d'azote proviennent des moteurs (véhicules routiers et non routiers, machines et engins de travail). L'ozone se forme à grande échelle dans l'atmosphère sous l'effet du rayonnement solaire et des températures estivales. Il peut se disperser sur de vastes étendues, au-delà des frontières.

Outre les COVNM, des gaz réactifs comme le méthane (CH₄) et le monoxyde de carbone (CO) contribuent à la concentration de fond de l'ozone. Dans son rapport de 1989 sur l'ozone en Suisse (CFHA, 1989), la CFHA avait déjà souligné la nécessité d'efforts internationaux visant à réduire les émissions de méthane et de monoxyde de carbone pour résoudre le problème de l'ozone. Les émissions dans toute l'hémisphère nord influent sur la concentration de fond de l'ozone. En Suisse, l'agriculture est le principal émetteur de méthane (80 %), tandis que le monoxyde de carbone résulte de processus de combustion incomplets (voir point 9.2).

6.3 Conséquences de l'ozone pour la santé

L'ozone est un gaz irritant. Une hausse à court terme de sa concentration peut accentuer les symptômes respiratoires et accroître le nombre de consultations d'urgence pour des affectations des voies respiratoires chez les patients atteints d'asthme ou de bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO). Une augmentation prolongée de la concentration d'ozone accroît le risque de développer de l'asthme, aggrave les affectations asthmatiques existantes et favorise l'apparition de symptômes chez les personnes allergiques. De plus, l'OMS estime qu'une concentration d'ozone élevée se traduit à long terme par une mortalité accrue liée aux affectations des voies respiratoires. La figure 1 donne un aperçu des effets à court et à long termes de la concentration d'ozone qui ont été établis scientifiquement. Une [version interactive est disponible sur le site Internet LUDOK](#) (voir également la figure 42 à l'annexe I.2).

6.4 Évolution de la concentration d'ozone en Suisse

La figure 11 présente les tendances à long terme du 98^e percentile des moyennes semi-horaires d'un mois. Les stations de mesure situées au Tessin, région la plus fortement touchée, indiquent une baisse régulière, mais seule une tendance faible est identifiable dans le reste du pays. En léger repli, le nombre de dépassements de la valeur limite reste à un niveau élevé (figure 12).

Le plus grand 98^e percentile mensuel des moyennes semi-horaires d'O₃ (µg/m³)

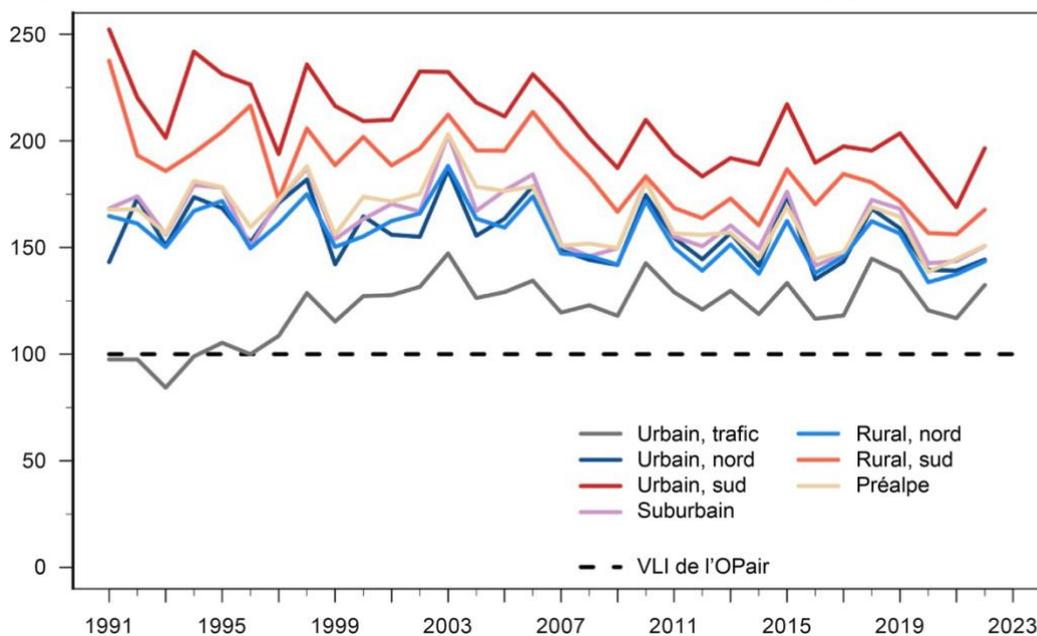


Figure 11 : Évolution du 98^e percentile des moyennes semi-horaires d'ozone sur un mois, de 1991 à 2022. Elle sert de référence pour déterminer la tendance à long terme en matière de pics d'ozone.

6.5 Ozone : respect des VLI et des nouveaux niveaux recommandés par l'OMS

La VLI en vigueur est-elle respectée ?

Actuellement, aucune station de mesure NABEL ne respecte la VLI (fig. 11 et 12).

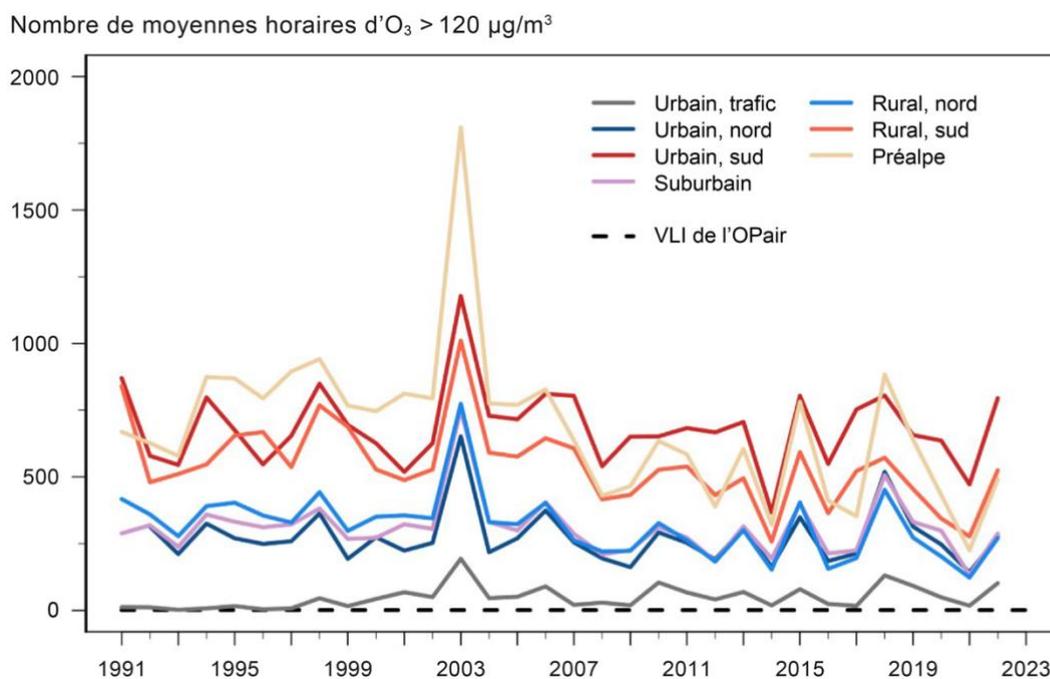


Figure 12 : Évolution du nombre de moyennes horaires d'ozone supérieures à 120 µg/m³ entre 1991 et 2022. La ligne pointillée correspond à la VLI de l'OPair, qui peut être dépassée une fois par an.

La Suisse respecte-t-elle déjà les nouveaux niveaux de qualité de l'air de l'OMS ?

Lors de la révision de ses lignes directrices, l'OMS n'a pas modifié le niveau de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la moyenne journalière par 8 heures. Trois dépassements par an sont admis. En Suisse, l'OPair fixe une VLI (moyenne horaire) de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'ozone, qui ne peut être dépassée qu'une fois par an. Ces deux valeurs sont équivalentes (voir annexe E pour leur comparabilité). Aucune des deux n'est respectée (fig. 12 et 13).

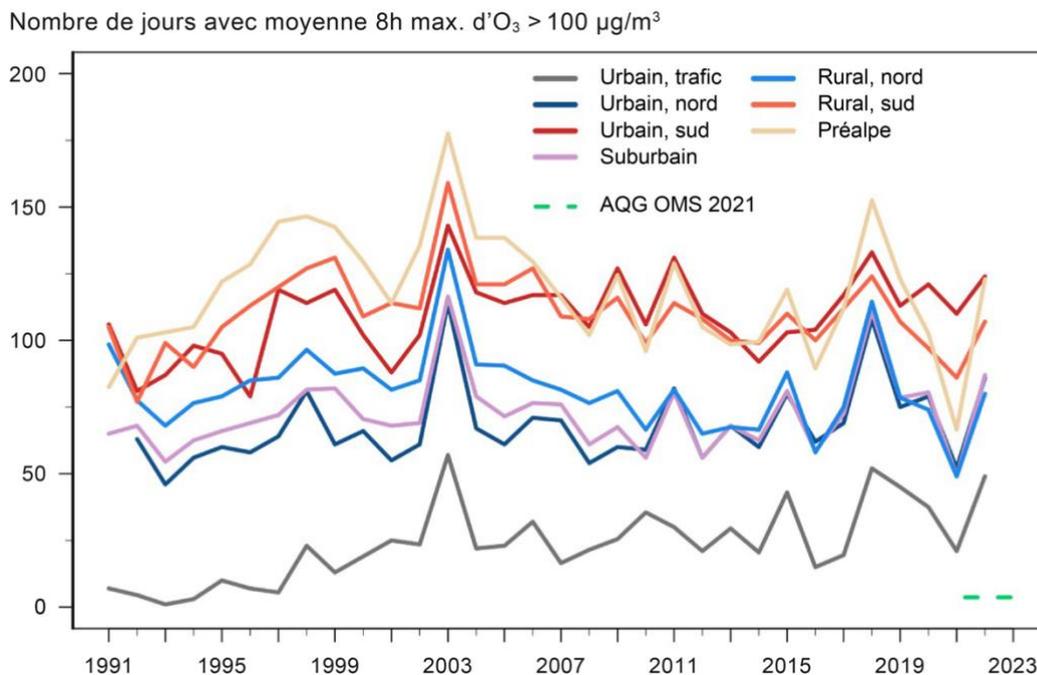


Figure 13 : Évolution du nombre de dépassements de la moyenne journalière maximale par 8 heures de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'ozone entre 1991 et 2022. La ligne pointillée correspond au niveau recommandé par l'OMS, qui peut être dépassé trois fois par an.

Le nouveau niveau préconisé par l'OMS pour une exposition prolongée à l'ozone, que la CFHA recommande d'inscrire dans l'OPair, ne devrait pas être supérieur à 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne des moyennes journalières maximales par 8 heures pendant la saison estivale. En Suisse, aucune station de mesure du réseau NABEL ne le respecte (fig. 14).

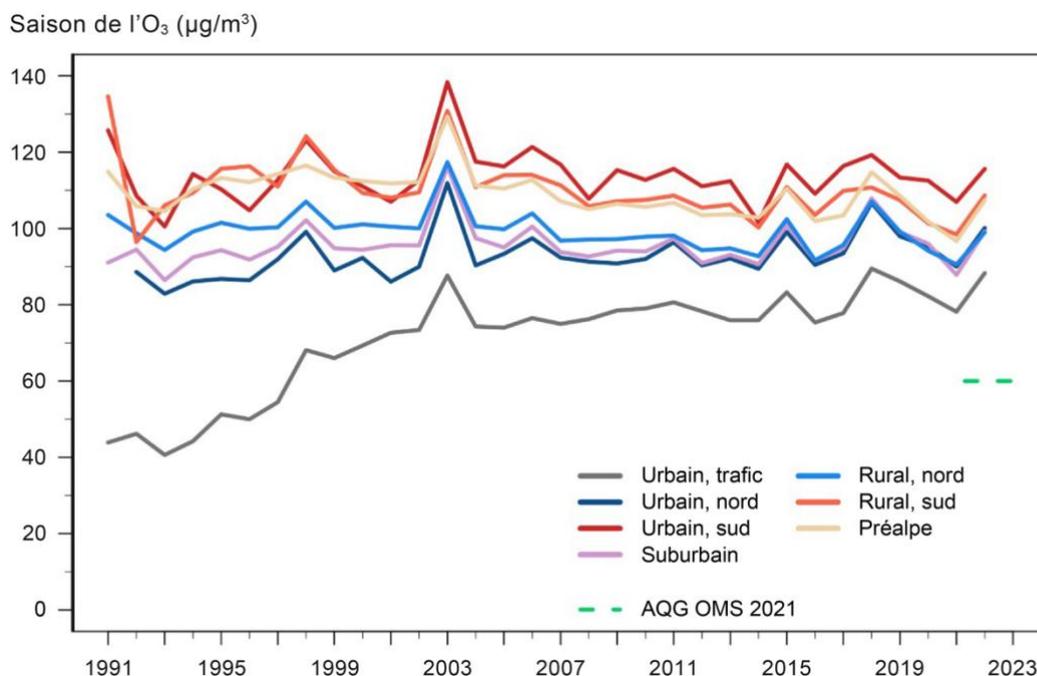


Figure 14 : Évolution de la concentration d'ozone à long terme entre 1991 et 2022 en tant que moyenne des moyennes journalières maximales par 8 heures de la concentration d'ozone pendant six mois consécutifs et de la concentration d'ozone la plus élevée. En Suisse, cela correspond à la période allant d'avril à septembre. Le niveau recommandé par l'OMS est de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Où les immissions sont-elles supérieures aux nouveaux niveaux recommandés par l'OMS ? Quelles sources ou influences caractérisent ces endroits ?

Toutes les stations de mesure dépassent les niveaux de qualité de l'air en vigueur et ceux qui sont désormais proposés. La concentration d'ozone est plus élevée au sud des Alpes qu'au nord. Outre les influences climatiques, les émissions liées aux transports à partir de la plaine du Pô jouent un rôle en la matière. Pendant les périodes de smog estival, la concentration d'ozone est supérieure aux VLI à court terme dans l'ensemble de la Suisse, l'écart étant parfois considérable. Les concentrations calculées sur le long terme pendant les mois d'été y sont comprises entre 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (urbain, trafic) et 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au sud des Alpes ; elles dépassent donc globalement le nouveau niveau recommandé par l'OMS (60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, fig. 14).

La protection des zones de végétation contre l'ozone est également importante. La moyenne sur six mois devrait contribuer au respect des niveaux critiques (*critical levels*) qui ont été fixés pour l'ozone (valeurs

AOT40³ et POD_γ⁴, cette dernière étant considérée comme la plus pertinente sur le plan biologique) dans le cadre de la CLRTAP pour protéger la végétation (voir annexe D.1).

Une méthode de mesure de référence est-elle reconnue sur le plan international ?

Oui. Il s'agit de la norme SN EN 14625:2012 (SN EN, 2012c).

³ AOT40 : *Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb*. Concentration d'ozone dépassant le seuil de 40 ppb qui a été accumulée pendant la période de végétation. Cette valeur sert de référence pour les expositions chroniques à long terme des plantes à l'ozone.

⁴ POD_γ : *Phytotoxic Ozone Dose*. Dose d'ozone accumulée pendant la période de végétation que la plante absorbe par les stomates (flux d'ozone). Elle tient compte d'un seuil Y spécifique à la végétation pour considérer la capacité de détoxification d'une plante.

7 Dioxyde d'azote (NO₂)

7.1 Recommandations de la CFHA concernant le NO₂

La CFHA recommande de fixer désormais la VLI applicable au NO₂ à 10 µg/m³ pour la moyenne annuelle et à 25 µg/m³ pour la moyenne journalière. Cet abaissement tient compte des objectifs de protection de la LPE en matière de santé humaine et d'écosystèmes et des recommandations de l'OMS. Le 95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année devrait être abrogé.

Tableau 6 : Niveaux de NO₂ à court et à long termes préconisés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport aux VLI de l'OPair et aux recommandations de la CFHA

Polluant	Unité de temps	AQG OMS	VLI OPair	Recommandation de la CFHA
NO ₂ , µg/m ³	Année	10	30	10
	24 heures	25 ^a	80 ^b	25 ^a
	95 % des moyennes semi-horaires d'une année	–	100	Abroger

^a 99^e percentile (en d'autres termes, trois dépassements par an sont admis).

^b La moyenne par 24 heures peut être dépassée au plus une fois par an.

Compte tenu des nouvelles valeurs limites plus faibles recommandées pour les moyennes annuelle et journalière, la VLI applicable au 95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année pour évaluer la qualité de l'air en Suisse n'est plus considérée comme pertinente. Elle est respectée depuis plus de 20 ans sur tous les sites NABEL (voir annexe F.1). La CFHA propose de l'abroger, mais de continuer à en rendre compte régulièrement pendant les cinq prochaines années pour garantir la comparabilité avec les années précédentes et l'analyse des tendances.

7.2 Sources des oxydes d'azote

En Suisse, près de 65 % des oxydes d'azote (NO₂ et NO) sont émis par les véhicules et les machines, en particulier ceux qui sont équipés de moteurs diesel. La circulation routière représente environ 45 % des émissions et le trafic aérien 7 %, mais ce dernier affiche une baisse en raison de la pandémie de coronavirus (données territoriales 2021 venant d'EMIS [OFEV, 2023]). Le chauffage dans l'industrie, l'artisanat et dans les ménages (y c. les chauffages au bois) occasionne à peu près 20 % des émissions (voir annexe B).

7.3 Conséquences du NO₂ pour la santé et autres conséquences

Le NO₂ est un gaz irritant. Une hausse à court terme de sa concentration peut engendrer une irritation des poumons et une augmentation du nombre de décès, de consultations d'urgence et d'hospitalisations liés à des affections des voies respiratoires. Une concentration excessive prolongée de NO₂ s'accompagne d'un nombre accru des cas d'asthmes et d'une moindre résistance aux infections des voies respiratoires. On recense davantage de bronchites chroniques, ainsi qu'une réduction de la croissance des poumons et de la fonction pulmonaire chez les enfants. La figure 1 donne un aperçu des effets à court et

à long terme du NO₂ qui ont été établis scientifiquement. Une [version interactive est disponible sur le site Internet LUDOK](#) (voir également la fig. 34 à l'annexe I.3).

En plus des effets directs du NO₂, les oxydes d'azote jouent un rôle dans la formation de l'ozone et des poussières fines secondaires, ainsi que dans l'apport d'azote dans les écosystèmes.

7.4 Évolution de la concentration de NO₂ en Suisse

Depuis le milieu des années 1980, les émissions d'oxyde d'azote ont diminué de plus de 60 %, notamment grâce au renforcement des prescriptions relatives aux gaz d'échappement des véhicules, aux chauffages et à l'industrie et à l'abaissement de la teneur en azote de l'huile de chauffage. La figure 15 présente cette évolution remarquable à l'aune des moyennes annuelles de la concentration de NO₂. Il existe également une forte corrélation entre les valeurs à court et à long termes. Si le nombre maximum autorisé de dépassements de la valeur à court terme est respecté, on peut considérer que la moyenne annuelle l'est aussi, et inversement (voir annexe F.2).

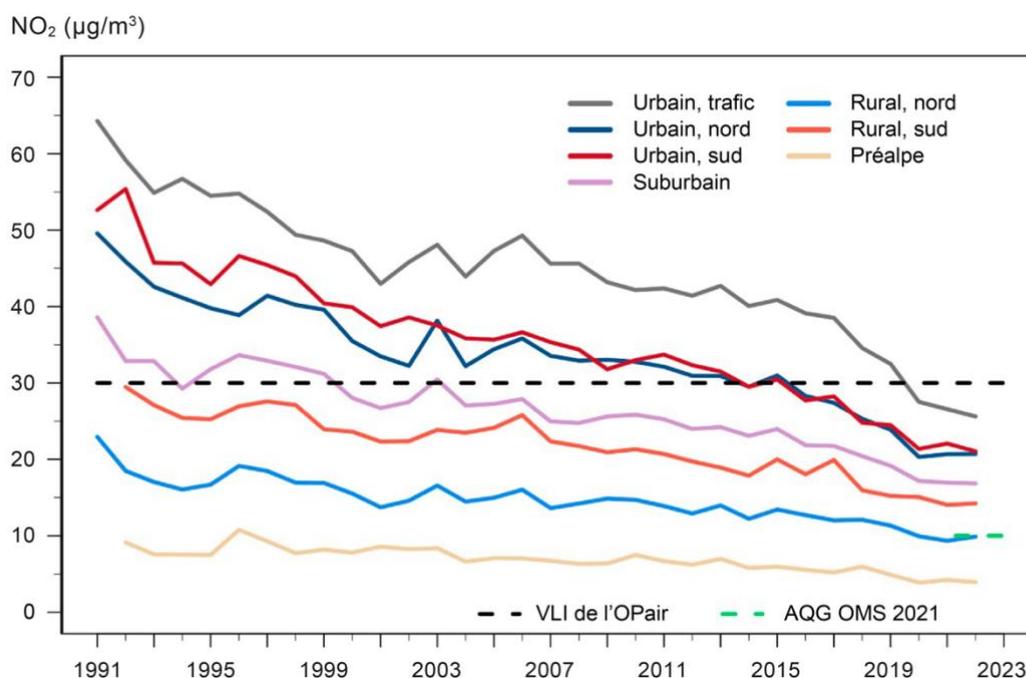


Figure 15 : Moyennes annuelles de NO₂ entre 1991 et 2022, par site caractéristique

7.5 NO₂ : respect des VLI et des nouveaux niveaux recommandés par l'OMS

Les VLI en vigueur sont-elles respectées ?

Les VLI en vigueur pour le NO₂ sont respectées dans une large mesure. Selon les calculs de la modélisation spatiale (fig. 17), la moyenne annuelle de 30 µg/m³ (fig. 15) ne dépasse la VLI de l'OPair que sur quelques sites le long des axes routiers à fort trafic.

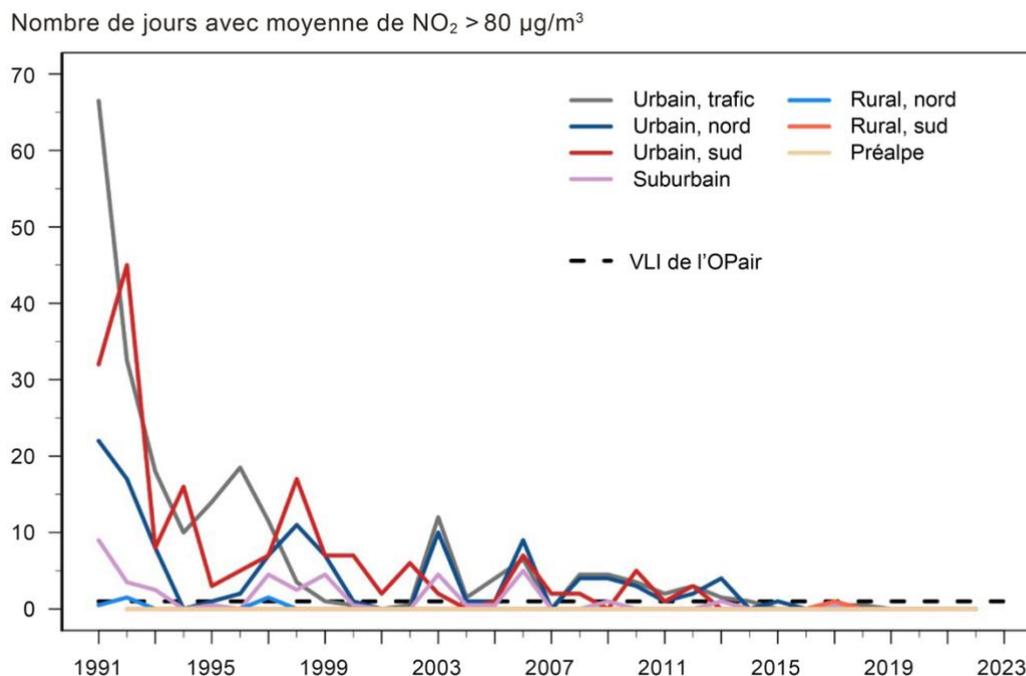


Figure 16 : Évolution du nombre de moyennes journalières de NO₂ supérieures à 80 µg/m³ entre 1991 et 2022, par site caractéristique.

La ligne pointillée correspond à la VLI de l'OPair, qui peut être dépassée une fois par an.

Il ressort de la figure 16 que même la VLI de 80 µg/m³ applicable à la moyenne journalière de NO₂ n'est plus dépassée en Suisse (un dépassement par an est admis). La figure 35 de l'annexe F.1 indique que même des pics à court terme n'occasionnent plus de dépassements, alors que la VLI concernant le 95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année est respectée depuis très longtemps.

La Suisse respecte-t-elle déjà les nouveaux niveaux de qualité de l'air de l'OMS ?

Selon les calculs de la modélisation spatiale (fig. 17), le nouveau niveau de 10 µg/m³ recommandé par l'OMS pour la moyenne annuelle de NO₂ est déjà respecté en Suisse dans les régions rurales et d'altitude, loin des axes de forte circulation (zones en bleu et en vert).

*Où les immissions sont-elles supérieures aux nouveaux niveaux recommandés par l'OMS ?
Quelles sources ou influences caractérisent ces endroits ?*

Le niveau de qualité de l'air est dépassé dans tous les autres sites, ce qui reflète clairement l'influence des émissions liées au transport routier. Le niveau de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recommandé pour la moyenne journalière n'est respecté qu'en altitude (fig. 18).

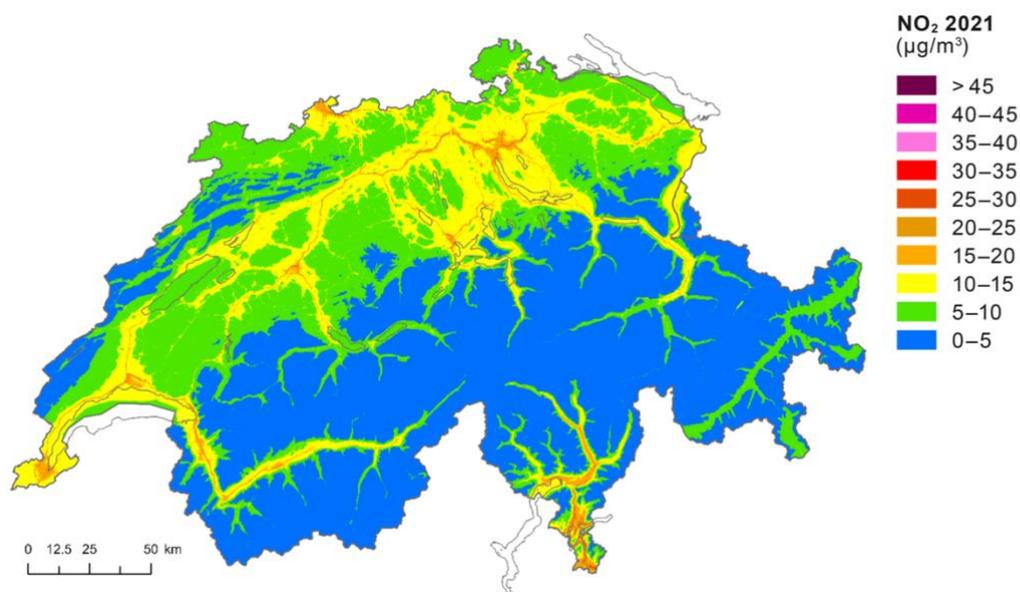


Figure 17 : Carte des immissions, moyenne annuelle du NO₂ en 2021

Code couleur de cette modélisation spatiale qui intègre les mesures des immissions : les régions en bleu et en vert respectent déjà le nouveau niveau recommandé par l'OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ; les régions en jaune et en orange le dépassent, mais respectent la VLI de l'OPair en vigueur (moyenne annuelle). Les zones en rouge et en violet affichent des immissions supérieures à la VLI. Il s'agit généralement d'agglomérations denses.

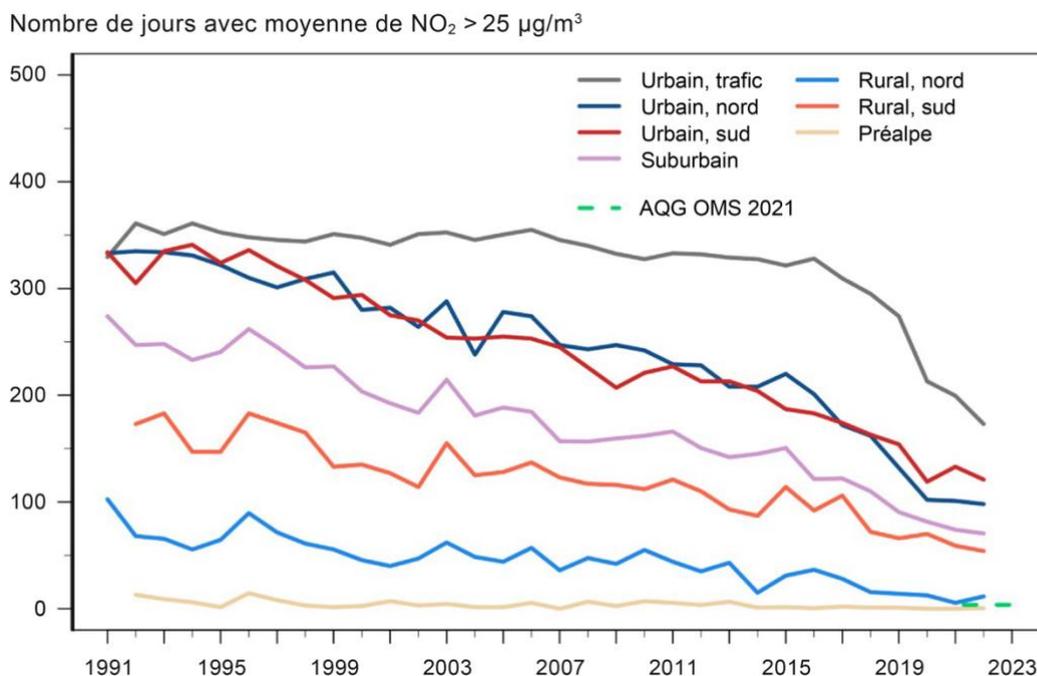


Figure 18 : Évolution du nombre de moyennes journalières de NO₂ supérieures à 25 µg/m³ entre 1991 et 2022.

La ligne pointillée correspond au niveau recommandé par l'OMS, qui peut être dépassé trois fois par an.

L'électrification visée de la flotte de véhicules en Suisse devrait se traduire par un nouveau recul des émissions d'oxyde d'azote.

Les VLI plus basses recommandées par la CFHA pour le NO₂ contribuent également à protéger les écosystèmes sensibles proches de l'état naturel qui sont menacés par des apports accrus d'azote dans l'atmosphère (oxydes d'azote, ammoniac et leurs produits de réaction) et par les effets directs des NO_x. On peut partir du principe que le respect de la moyenne annuelle de 10 µg/m³ proposée pour le NO₂ protégera également la végétation contre les effets directs des oxydes d'azote et que les niveaux critiques (*critical levels*) fixés pour les NO_x dans le cadre de la CLRTAP et par l'OMS pour protéger la végétation ne seront plus dépassés (CEE-ONU, 2017; OMS, 2000).

Une méthode de mesure de référence est-elle reconnue sur le plan international ?

Oui. Il s'agit de la norme SN EN 14211:2012 (SN EN, 2012a).

8 Dioxyde de soufre (SO₂)

8.1 Recommandations de la CFHA concernant le SO₂

La CFHA propose d'abaisser les VLI applicables au SO₂ à 20 µg/m³ pour la moyenne annuelle et le semestre d'hiver et à 40 µg/m³ pour la moyenne journalière, afin de prendre en considération l'objectif de protection de la LPE et les recommandations de l'OMS et de la CLRTAP. Le 95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année devrait être abrogé.

Tableau 7 : Niveau de SO₂ à court terme préconisé par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport aux VLI à court et à long termes de l'OPair et aux recommandations de la CFHA

Polluant	Unité de temps	AQG OMS	VLI OPair	Recommandation de la CFHA
SO ₂ , µg/m ³	Année et (nouveau) semestre d'hiver	–	30 ^a	20 ^b
	24 heures	40 ^c	100 ^d	40 ^c
	95 % des moyennes semi-horaires d'une année	–	100	Abroger

^a VLI qui englobe également la protection des animaux et des plantes, de leurs biocénoses et de leurs biotopes selon les art. 1, al. 1, et 14, let. a, LPE et qui correspond à l'état des connaissances au moment de l'édiction de l'OPair en 1985.

^b Valeur des lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2000 (OMS, 2000) qui a été fixée pour protéger les forêts et d'autres écosystèmes proches de la nature. Elle s'applique en tant que moyenne annuelle et pour le semestre d'hiver (d'octobre à mars).

^c 99^e percentile (soit, trois dépassements par an sont admis).

^d Ne peut être dépassée qu'une fois par an au maximum.

La concentration de SO₂ est déjà sensiblement inférieure à la valeur à court terme proposée par l'OMS grâce à l'efficacité des mesures de protection de l'air comme la désulfuration de l'huile de chauffage et des carburants. Pour protéger la végétation dans les écosystèmes proches de l'état naturel, la CFHA recommande d'adopter comme moyenne annuelle et moyenne du semestre d'hiver (d'octobre à mars) la concentration critique de 20 µg/m³ fixée dans le cadre de la CLRTAP (voir annexe D.3). Cette valeur correspond également aux recommandations de l'an 2000 de l'OMS pour l'Europe qui visent à protéger les écosystèmes forestiers et naturels (OMS, 2000).

Compte tenu des nouvelles valeurs limites plus faibles recommandées pour la moyenne annuelle, celle du semestre d'hiver et la moyenne journalière, la VLI applicable au 95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année pour évaluer la qualité de l'air en Suisse n'est plus considérée comme pertinente. Elle est respectée depuis plus de 20 ans sur tous les sites du réseau NABEL (voir figure 38 de l'annexe G). La CFHA propose de l'abroger, mais de continuer à en rendre compte régulièrement pendant les cinq prochaines années pour garantir la comparabilité avec les années précédentes et l'analyse des tendances.

8.2 Sources de SO₂

Le SO₂ est émis principalement dans l'industrie, notamment lors de la production de ciment et de la fabrication de graphite, et, dans une moindre mesure, lors de la combustion de produits fossiles (chauffages des locaux et transports).

8.3 Conséquences du SO₂ pour la santé

Le SO₂ est un gaz irritant. Une hausse à court terme de sa concentration peut engendrer une irritation et une inflammation des voies respiratoires, ainsi qu'une augmentation du nombre de décès, de consultations d'urgence et d'hospitalisations liés à des affections des voies respiratoires. Aucune conséquence d'une concentration excessive prolongée de SO₂ n'est décrite. La figure 1 donne un aperçu des effets d'une concentration de SO₂ qui ont été établis scientifiquement. Une [version interactive est disponible sur le site Internet LUDOK](#) (voir également la figure 45 à l'annexe I.4).

8.4 Évolution de la concentration de SO₂ en Suisse

Depuis le début des années 1990, la concentration de SO₂ est sensiblement inférieure aux valeurs limites fixées dans l'OPair pour les moyennes annuelle et journalière (fig. 19 et 20).

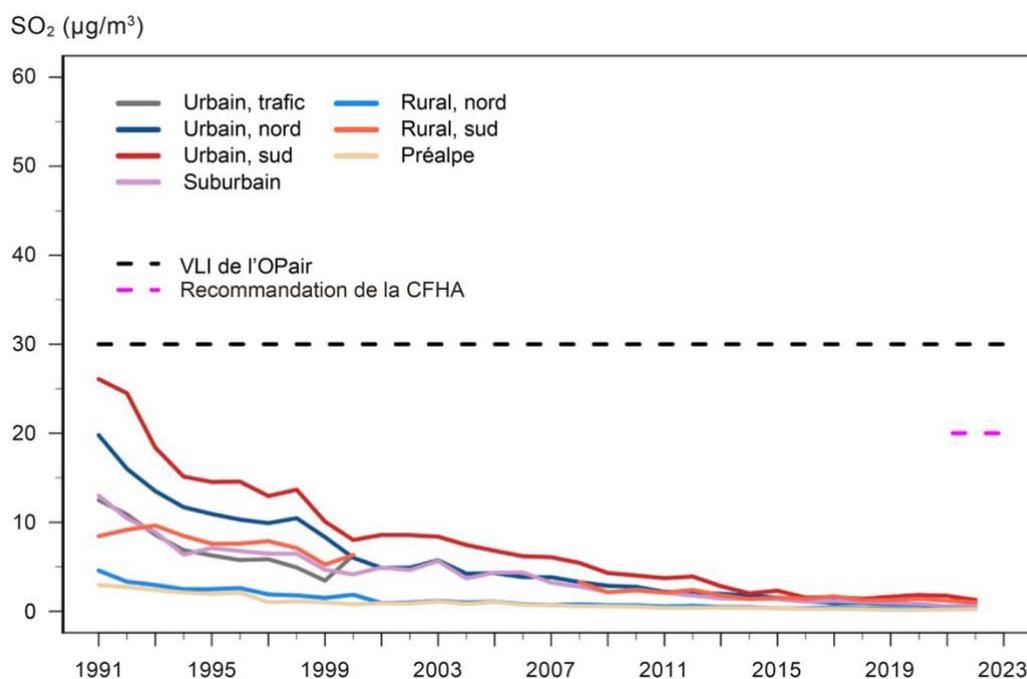


Figure 19 : Moyenne annuelle de SO₂ entre 1991 et 2022, par site caractéristique

8.5 SO₂ : respect des VLI et des nouveaux niveaux recommandés par l'OMS

Les VLI en vigueur et les nouveaux niveaux recommandés par l'OMS sont-ils respectés en Suisse ?

L'utilisation réduite du charbon et les prescriptions strictes sur la teneur en soufre des combustibles et des carburants ont permis de diminuer massivement les émissions et, partant, les immissions. Tant la VLI définie dans l'OPair pour la moyenne annuelle (30 µg/m³), la moyenne journalière et les pics de concentration (95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année ; 100 µg/m³ chacune) que le niveau préconisé par l'OMS et les nouvelles moyennes annuelle, semestrielle et journalières recommandées, sont respectés à l'échelle suisse (fig. 19 et 20 et fig. 38 de l'annexe G).

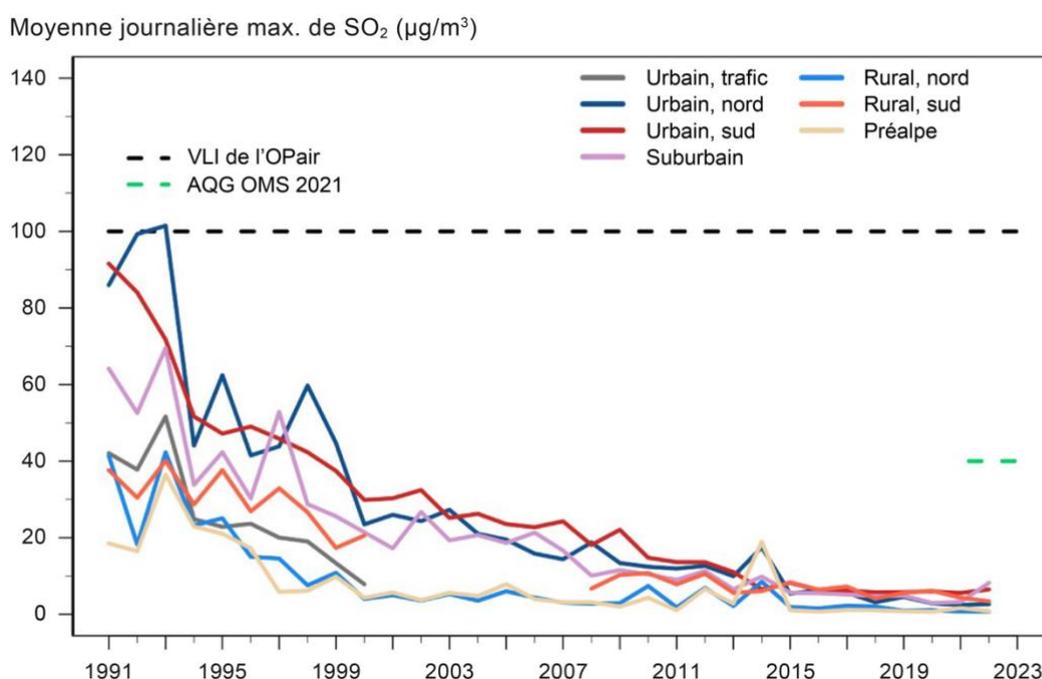


Figure 20 : Évolution des moyennes journalières maximales de SO₂ entre 1991 et 2022, par site caractéristique. La VLI de l'OPair peut être dépassée une fois par an ; le niveau recommandé par l'OMS, trois fois par an.

Une méthode de mesure de référence est-elle reconnue sur le plan international ?

Oui. Il s'agit de la norme SN EN 14212:2012 (SN EN, 2012b).

9 Monoxyde de carbone (CO)

9.1 Recommandations de la CFHA concernant le CO

La CFHA propose d'abaisser la VLI applicable au CO à 4 mg/m³ pour la moyenne journalière, afin de prendre en considération l'objectif de protection de la LPE et les recommandations de l'OMS.

Tableau 8 : Niveau de CO à court terme préconisé par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport à la VLI de l'OPair et aux recommandations de la CFHA

Polluant	Unité de temps	AQG OMS	VLI OPair	Recommandation de la CFHA
CO, mg/m ³	24 heures	4 ^a	8 ^b	4 ^a

^a 99^e percentile (en d'autres termes, trois jours de dépassement par an sont admis).

^b La moyenne par 24 heures peut être dépassée au plus une fois par an.

9.2 Sources de CO

Le CO naît de la combustion incomplète de carburants et de combustibles contenant du carbone dans des conditions pauvres en oxygène. Le principal émetteur est la circulation routière, avec environ 40 % du total.

9.3 Conséquences du CO pour la santé

Le gaz CO affecte l'apport en oxygène chez l'être humain, car il se fixe sur l'hémoglobine, qui transporte l'oxygène dans les globules rouges. En cas de concentrations élevées, le nombre de consultations d'urgence et de décès liés à des infarctus augmente. Aucune conséquence d'une concentration prolongée de CO n'est décrite. La figure 1 donne un aperçu des effets du CO qui ont été établis scientifiquement. Une [version interactive est disponible sur le site Internet LUDOK](#) (voir également la fig. 45 de l'annexe I.5).

9.4 Évolution de la concentration de CO en Suisse

Les concentrations journalières maximales de CO ont diminué régulièrement sur tous les sites de mesure (fig. 21). Cette baisse est particulièrement notable sur les sites qui étaient auparavant les plus exposés. Les émissions de CO ont atteint des sommets au milieu des années 1970, mais elles ont été réduites depuis et en représentent désormais moins d'un cinquième.

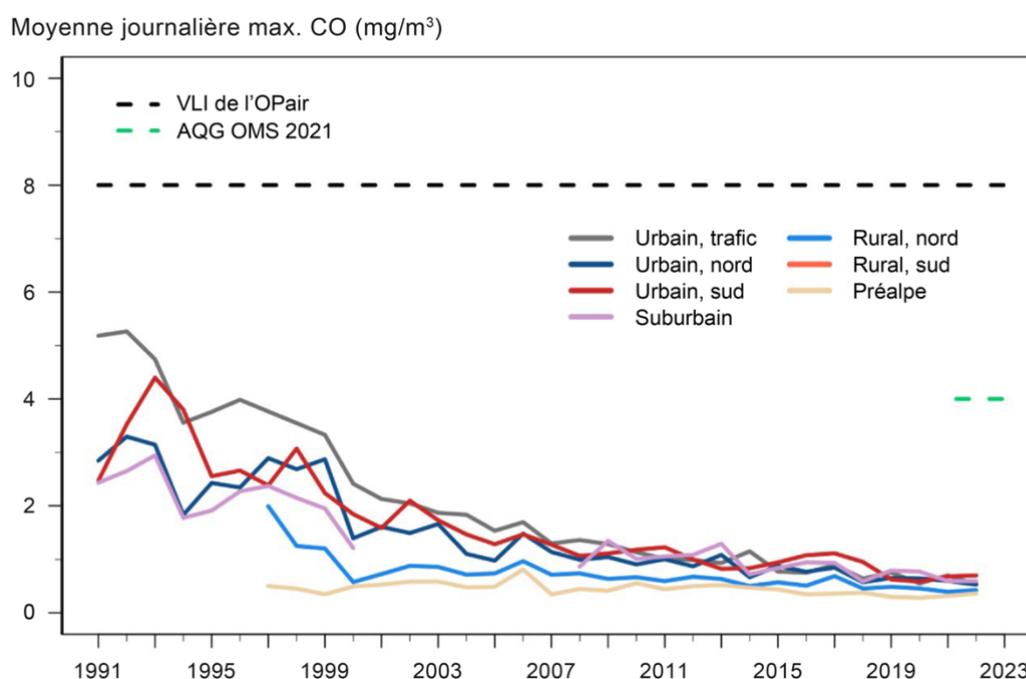


Figure 21 : Moyennes journalières maximales du monoxyde de carbone entre 1991 et 2022, par site caractéristique

9.5 CO : respect des VLI et des nouveaux niveaux recommandés par l'OMS

Les VLI en vigueur et les nouveaux niveaux recommandés par l'OMS sont-ils respectés en Suisse ?

La VLI de 8 mg/m³ fixée dans l'OPair pour la moyenne journalière est respectée partout depuis des décennies. De même, le nouveau niveau de 4 mg/m³ recommandé par l'OMS n'est dépassé sur aucun site en Suisse depuis plus de 20 ans (fig. 21).

Quelles sources ou influences caractérisent les endroits présentant la concentration la plus élevée ?

La concentration de CO n'est plus un problème sanitaire en Suisse. La valeur limite de l'OPair et le niveau préconisé par l'OMS sont également respectés dans les rues-canyon des villes. Les immissions de CO y sont les plus élevées en raison d'une circulation dense, souvent en accordéon, et d'une mauvaise ventilation. Les moyennes journalières maximales en Suisse sont inférieures à 1 mg/m³.

Une méthode de mesure de référence est-elle reconnue sur le plan international ?

Oui. Il s'agit de la norme SN EN 14626:2012 (SN EN, 2012d)

10 Suie (carbone noir ou élémentaire)

10.1 Recommandations de la CFHA concernant la suie

Conformément aux lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air, la CFHA ne propose actuellement aucune VLI pour la suie. La surveillance des immissions correspondantes devrait se poursuivre et les émissions devraient être réduites selon le devoir de réduction. La CFHA recommande de conserver la stratégie en vigueur en matière de suie (réduction des immissions à 20 % des valeurs de 2013 ; CFHA, 2013). La stratégie suisse est conforme aux recommandations de l'OMS.

10.2 Sources de suie

La suie est une composante des poussières fines PM₁₀ et PM_{2.5}, qui sont mesurées en Suisse et réglementées dans l'OPair (voir chap. 4 et 5). Ce n'est pas une valeur définie clairement sur le plan chimique et il n'existe aucune méthode de mesure directe la concernant. La charge en suie est souvent indiquée en tant que concentration de carbone élémentaire (*elemental carbon*, EC) ou de carbone absorbant la lumière (carbone noir [CN] ou *black carbon*). Comme le carbone noir est déterminé en convertissant un coefficient d'absorption optique en une concentration massique, on parle d'équivalent carbone noir (eCN). Les concentrations d'EC et d'eCN ne sont pas comparables directement, car le coefficient d'absorption utilisé pour la conversion est variable et dépend des propriétés des aérosols. Des mesures parallèles des eCN et de l'EC permettent de vérifier la cohérence des valeurs respectives (Petzold et al., 2013).

Près de 60 % des émissions de suie proviennent des chauffages au bois et un tiers des véhicules et des machines. La concentration de suie est plus marquée le long des routes à très fort trafic, qu'en milieu urbain ou suburbain. La part de la suie dans la concentration massique des PM_{2.5} y est également légèrement supérieure (env. 6 %) par rapport aux autres sites (env. 5 %). Des valeurs élevées de poussières fines, de suie et de composés cancérigènes de HAP sont mesurées dans les régions présentant beaucoup de chauffages au bois (vallées alpines, p. ex.), notamment en cas d'inversion thermique ou matinale (CFHA, 2007, 2013 ; Hüglin & Grange, 2021).

10.3 Conséquences de la suie pour la santé

Les études épidémiologiques relatives aux effets de EC/CN sur la santé sont limpides, notamment en ce qui concerne les maladies cardiovasculaires, les affections des voies respiratoires (p. ex. cancer du poumon) et la mortalité. Elles sont également étayées par des expérimentations animales (ANSES, 2019). Les études qui portent sur les interactions avec les poussières fines dans le cadre de modèles analysant plusieurs polluants, montrent des risques accrus qui sont indépendants de celles-ci et qui peuvent être attribués à la fraction de suie.

Les effets correspondants sur la santé sont donc dus aux émissions liées à la combustion, notamment la combustion du bois et les moteurs diesel (OMS, 2021, point 4.2, introduction sur le CN).

10.4 Évolution de la concentration de suie en Suisse

Les mesures strictes concernant la réduction des émissions se traduisent également par une diminution notable des concentrations de suie (fig. 22), qui est la plus marquée dans les sites à très fort trafic.

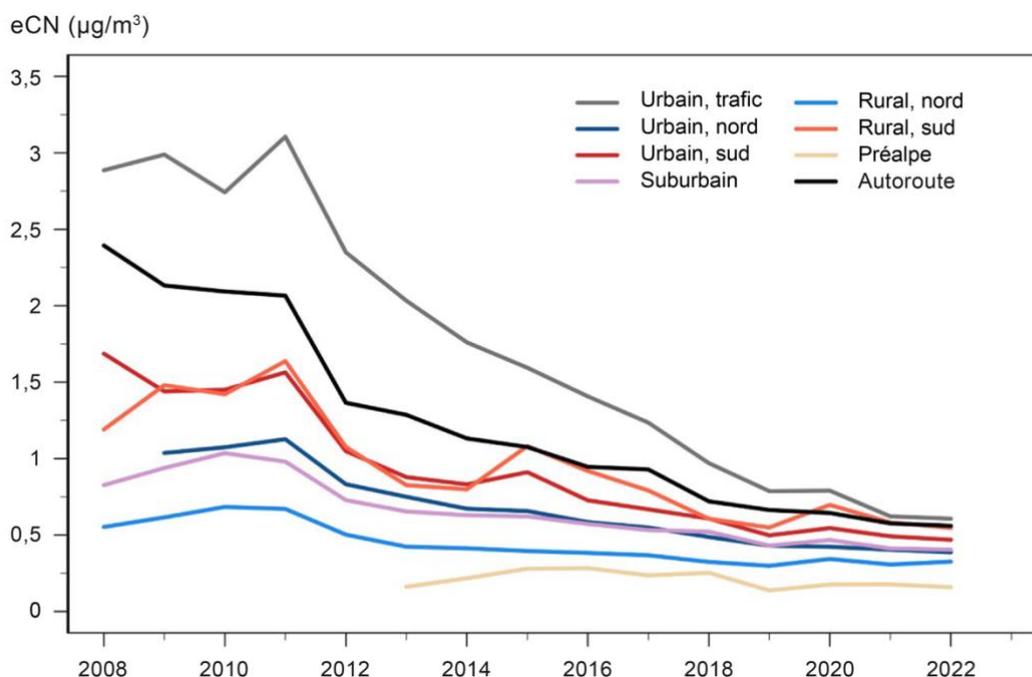


Figure 22 : Moyennes annuelles de suie (eCN en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$) entre 2008 et 2022, par site caractéristique

10.5 Estimations concernant la Suisse

Recommandations de l'OMS

L'OMS ne fixe aucun niveau recommandé pour la suie, mais préconise des actions (meilleures pratiques). Elle suggère de mesurer un paramètre concernant la suie et renvoie notamment à la norme européenne sur le mesurage (CEN, 2017). Elle conseille également d'établir un inventaire des émissions, d'évaluer l'exposition de la population et de déterminer les sources de suie. Enfin, elle préconise d'appliquer des mesures visant à atténuer la concentration et où cela est possible voire nécessaire, de fixer des objectifs ou des valeurs limites.

La Suisse respecte-t-elle les recommandations de l'OMS ?

La Suisse met en œuvre les recommandations de l'OMS depuis longtemps. Le plan d'action Particules fines de 2006 comprend de nombreuses mesures contribuant à réduire les émissions de suie. En 2008, la Suisse a commencé à mesurer l'eCN et l'EC présents dans les $\text{PM}_{2.5}$ grâce au réseau NABEL. L'eCN et l'EC sont désormais recensés sur neuf sites (l'eCN à l'aide de méthodes optiques et l'EC selon la procédure de référence du CEN). Des inventaires des émissions ont été mis en place ; ils sont transmis régulièrement à la CLRTAP et peuvent être consultés dans la base de données EMEP (<https://www.ceip.at/webdab-emission-database/reported-emissiondata>).

Autres recommandations pour la Suisse

En Suisse, les concentrations annuelles moyennes sont actuellement comprises entre $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (fig. 23). Dans son rapport 2013 sur les poussières fines, la CFHA suggérait de réduire en l'espace de dix ans la concentration de suie à 20 % des valeurs relevées à cette époque. Les émissions ont certes sensiblement reculé depuis 2013, mais l'objectif des 20 % n'est pas encore atteint.

La Suisse n'a pas de valeur limite pour les substances cancérigènes, mais le devoir de réduction s'applique. Selon une expertise juridique sur les bases de la limitation des émissions de polluants atmosphériques cancérigènes, l'objectif de protection inscrit dans la LPE est réputé garanti lorsque le risque n'est guère identifiable en raison d'influences anthropogènes. Un risque de cancer égal à 1 cas pour 1 million de personnes exposées est quasiment insignifiant (Brunner, 2000). Pour limiter ce risque au niveau indiqué, la concentration de suie dans les zones à très fort trafic devrait rester en-deçà de $0,2$ à $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (CFHA, 2013).

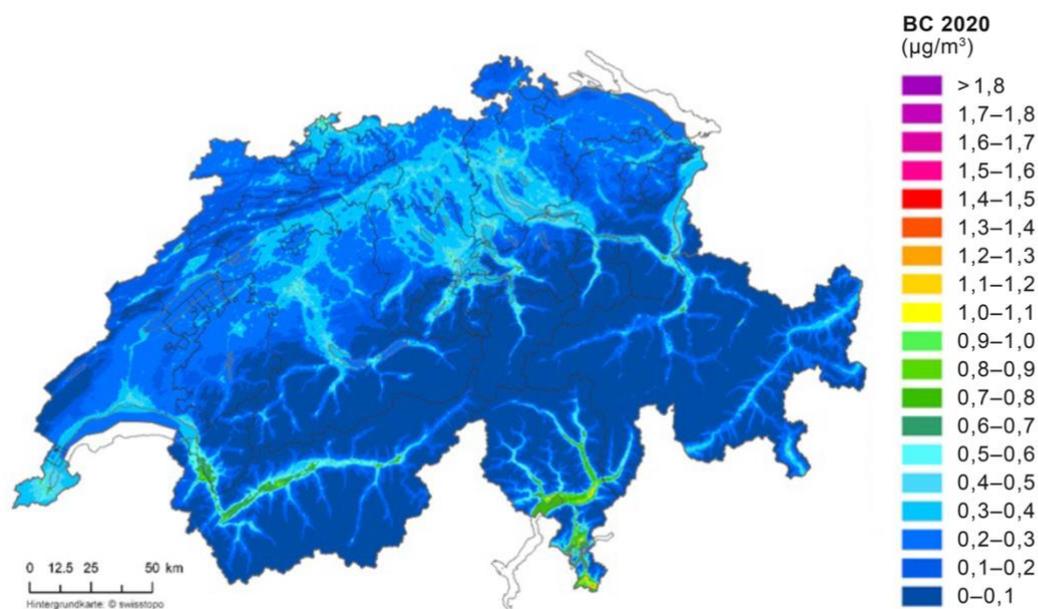


Figure 23 : Immissions de suie en 2020 (hors effets des mesures relatives à la pandémie de coronavirus ; INFRAS, 2021)

Code couleur de cette modélisation spatiale : les zones en bleu foncé affichent des valeurs inférieures à $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ selon les calculs du modèle.

Si la tendance se poursuit, la CFHA pense que l'objectif de réduction visé sera atteint à l'échelle nationale dans quelques années.

Une méthode de mesure de référence est-elle reconnue sur le plan international ?

Oui. Il s'agit de la norme SN EN 16909:2017 (SN EN, 2017b)

11 Particules ultrafines – nombre de particules

11.1 Recommandations de la CFHA concernant les particules ultrafines

Conformément aux lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air, la CFHA ne propose actuellement aucune VLI pour les particules ultrafines (PUF). Comme il n'existe aucune méthode de mesure de référence reconnue sur le plan international, la principale condition pour mettre en place une VLI fait défaut. La CFHA soutient toutefois l'ensemble des meilleures pratiques proposées par l'OMS (mesures recommandées), que les autorités suisses appliquent depuis quelques années.

11.2 Sources de PUF

Les PUF sont des particules dont le diamètre est inférieur à 100 nanomètres (nm). Leur contribution à la concentration massique des poussières fines n'est que minime, raison pour laquelle elles ne sont pas présentées avec les PM10 ou les PM2.5. L'exposition aux PUF est donc généralement exprimée par une concentration de leur nombre. En fonction de leur genèse, les PUF peuvent être classées en particules primaires ou secondaires. Les particules primaires apparaissent dans l'air extérieur à la suite d'une combustion incomplète dans des moteurs, des chauffages ou des centrales électriques, dans l'agriculture ou lors d'incendies de forêt. En milieu urbain et suburbain, la circulation routière est la principale source de PUF. Les aéronefs émettent également de grandes quantités de PUF, de sorte que les concentrations correspondantes peuvent être très élevées à proximité des grands aéroports (OSTLUFT, 2021 ; Sintermann et al., 2021). Les particules secondaires résultent uniquement de l'oxydation de précurseurs gazeux dans l'atmosphère et sont généralement solubles dans l'eau. La coagulation des particules (collision et agglomération avec d'autres particules) fait baisser la concentration du nombre de PUF, qui décroît dès lors rapidement à mesure que l'on s'éloigne des sources.

11.3 Conséquences des PUF pour la santé

Un grand nombre d'effets et de mécanismes d'action des PUF sont étayés par des études sur des animaux et des cellules, mais les interactions épidémiologiques ne sont pas encore évaluables de manière exhaustive. On a surtout observé les effets directs des PUF sur les tissus pulmonaires, mais les médiateurs inflammatoires qui passent des poumons au système sanguin, peuvent eux aussi déclencher des effets indirects et d'autres organes peuvent être affectés. Si elles ne sont pas dissoutes dans les fluides pulmonaires, les PUF peuvent s'immiscer dans la moindre alvéole pulmonaire en raison de leur petite taille, être fixées par les cellules pulmonaires et franchir la barrière air/sang, même en quantité limitée, pour parvenir dans la circulation sanguine (Health Effects Institute [HEI], 2013).

L'évaluation épidémiologique des conséquences des PUF pour la santé s'appuie sur un nombre réduit d'études hétérogènes, car contrairement aux poussières fines ou aux oxydes d'azote, les mesures et les modélisations de la concentration ne sont disponibles que dans quelques travaux. Globalement, les données scientifiques sont insuffisantes pour évaluer les liens de cause à effet sur le plan épidémiologique. Il n'existe aucune mesure standardisée des PUF, les tailles mesurées sont très variées, la distinction entre les effets des PUF et ceux qui sont imputables aux PM2.5 et à d'autres substances est difficile, enfin les études épidémiologiques de grande qualité sont rares (Ohlwein et al., 2019).

11.4 Évolution de la concentration de PUF en Suisse

Les séries de mesures réalisées dans tous les sites caractéristiques depuis 2005, montrent une diminution de la concentration du nombre de particules (fig. 24).

Nombre de particules par cm^3

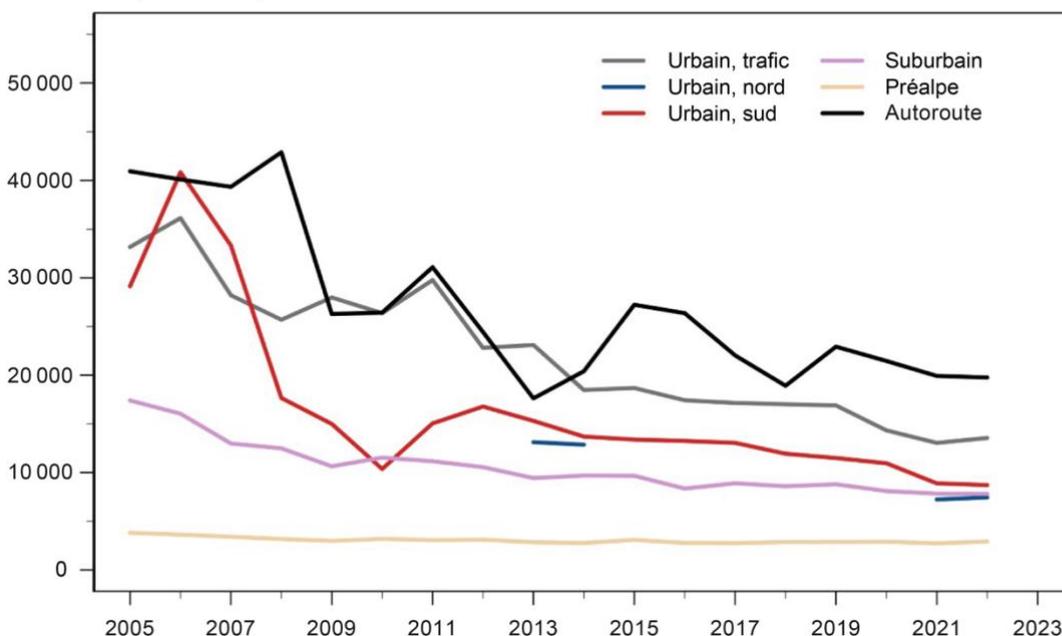


Figure 24 : Moyennes annuelles des particules ultrafines entre 2005 et 2022, mesurées en tant que nombre de particules (taille comprise entre 4 nm et 3 μm), par site caractéristique

11.5 Estimations concernant la Suisse

Recommandations de l'OMS

L'OMS ne fixe aucun niveau recommandé pour les PUF, mais préconise des actions (meilleures pratiques). En plus du mesurage des polluants atmosphériques classiques (voir chap. 4 à 9), elle suggère de quantifier les PUF (nombre de particules dont la taille est comprise entre ≤ 10 nm et $1 \mu\text{m}$). Les lieux de mesure devraient être répartis entre les sites à faible concentration (moyenne annuelle < 1000 particules/ cm^3) et les sites urbains ou à forte concentration (moyenne annuelle $> 10\,000$ particules/ cm^3). Les mesures exécutées dans le cadre du contrôle des immissions devraient se limiter aux sites avec une charge élevée, y compris les routes à très fort trafic et les aéroports. Enfin, l'OMS conseille de recenser les PUF en permanence sur les sites de mesure existants, pour pouvoir vérifier l'efficacité des mesures d'assainissement prises et fournir des données à la recherche sur la protection de l'air. Celles-ci devraient alimenter des modèles destinés à évaluer l'exposition de la population.

La Suisse respecte-t-elle les recommandations de l'OMS ?

Le réseau NABEL a commencé à mesurer le nombre de particules en 2003. Six de ses stations recensent désormais les concentrations de PUF. Les séries de mesures indiquent une concentration

« élevée » dans un environnement urbain et proche des axes de circulation (autoroute, aéroport) et une réduction de moitié de la charge en PUF depuis le début des mesures. La réglementation des émissions quelle que soit leur source (véhicules automobiles, y c. machines de chantier et machines agricoles, chauffages au bois, bateaux et aéronefs), constitue la principale mesure pour réduire cette concentration.

Recommandations plus étendues concernant la Suisse

Sur le plan technique, un mesurage permettant d'opérer une distinction entre les PUF primaires et secondaires, se traduirait par une évaluation plus ciblée de l'incidence sur la santé et sur des mesures de protection de l'air. D'autres mesures visant à réduire les émissions à la source contribueraient à poursuivre la baisse de la charge en PUF observée ces dernières années. En cas de retournement de tendance, il faudrait en déterminer les causes et prendre des contre-mesures.

Eu égard aux questions en suspens sur les PUF, qui jouent indéniablement un rôle important en matière de santé, la CFHA étudiera à nouveau une éventuelle réglementation de ces particules dans les années à venir.

Une méthode de mesure de référence est-elle reconnue sur le plan international ?

Non. Il existe certes des méthodes de mesure reconnues pour déterminer la concentration du nombre de PUF (compteurs de noyaux de condensation), mais aucune méthode de référence établie au niveau international. Une spécification technique du CEN explique comment utiliser ces compteurs : CEN/TS 16976:2016 (CEN, 2016).

12 Tempêtes de sable et de poussières désertiques

12.1 Recommandations de la CFHA concernant le sable du désert

La CFHA ne recommande ni VLI pour le sable du désert, ni mesures supplémentaires pour la Suisse. La VLI applicable à la moyenne journalière des PM10 et PM2.5 tient déjà compte du sable du désert. Ces concentrations jouent un rôle minime pour la Suisse. Les recommandations que l'OMS formule pour les régions fortement touchées ne sont pas pertinentes en Suisse.

12.2 Conséquences des tempêtes de sable et de poussières désertiques pour la santé

Les concentrations de PM10 et de PM2.5 dues au sable du désert augmentent la mortalité causée par les maladies cardiovasculaires et la fréquence des problèmes respiratoires (Tobias et al., 2019). Ces événements sont cependant rares et brefs en Suisse ; les conséquences graves pour la santé sont donc minimales.

12.3 Aperçu des immissions de sable du désert en Suisse

Depuis 2001, l'Institut Paul Scherrer mesure les propriétés optiques des poussières fines au Jungfraujoch pour identifier les tempêtes de sable du Sahara. Des concentrations de sable y sont enregistrées entre 10 et 34 jours par an et peuvent entraîner des dépassements minimes de la valeur limite journalière des PM10. Elles ne contribuent à la moyenne annuelle des PM10 qu'à hauteur de 0,8 µg/m³ (Collaud Coen et al., 2004). Ces tempêtes de sable jouent un rôle encore plus faible dans les régions de basse altitude, ainsi le sable du désert n'influe guère sur la concentration annuelle moyenne des PM2.5 mesurées sur le Plateau suisse.

12.4 Estimations concernant la Suisse

Recommandations de l'OMS et pertinence pour la Suisse

Les recommandations de l'OMS s'adressent aux pays qui sont fortement touchés par les tempêtes de sable et de poussières désertiques. Le sable du désert est négligeable pour la qualité de l'air en Suisse et la pratique en vigueur en matière de mesurage et d'information suffit. Les personnes intéressées peuvent par ailleurs consulter le site de MétéoSuisse ([Poussières du Sahara - MétéoSuisse \[admin.ch\]](https://www.meteosuisse.admin.ch)). Les cantons proposent un aperçu actualisé de la pollution de l'air sur leurs différentes plates-formes et dans l'application airCheck. De plus, les journaux télévisés rendent compte régulièrement des tempêtes de sable du Sahara.

Une méthode de mesure de référence est-elle reconnue sur le plan international ?

Non. Il n'existe aucune méthode de mesure de référence pour la poussière minérale ou le sable du désert. L'Agence européenne pour l'environnement (AEE, 2012) recommande d'identifier et de quantifier ce sable en combinant les caractéristiques chimiques des échantillons de poussières fines et les informations météorologiques. La reconnaissance d'une méthode de référence présenterait un avantage pour les régions concernées.

13 Autres substances et paramètres

L'OMS ne s'exprime pas sur les métaux, les HAP ou le potentiel oxydatif (PO) des poussières fines, dans le rapport concernant ses nouvelles lignes directrices relatives à la qualité de l'air. Dans son rapport de 2013 sur les poussières fines, la CFHA répertoriait d'autres paramètres pour ces poussières ou leurs composantes (CFHA, 2013, p. 42) et réclamait un réexamen, car les bases scientifiques pour évaluer ces paramètres étaient rares, notamment en ce qui concerne leurs conséquences à long terme. L'argumentaire mentionnait également l'absence d'une méthode de mesure de référence.

Le présent rapport fournit ci-après un aperçu des autres substances réglementées dans l'OPair et des paramètres indiqués dans le rapport de la CFHA (HAP, métaux et PO des poussières fines).

13.1 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Recommandations de la CFHA concernant les HAP

La CFHA ne propose pas de VLI pour les HAP. Les immissions correspondantes devraient continuer d'être surveillées et les émissions devraient être réduites conformément au principe de minimisation.

Sources de HAP

Les HAP se forment lors de la combustion incomplète de matériaux organiques tels que le charbon, l'essence, le tabac, l'huile de chauffage, le diesel, le bois ou d'autres produits d'origine végétale. En Suisse, les benzo(a)pyrènes (B[a]P), le principal polluant de la famille des HAP, proviennent aux deux tiers des chauffages à bois. Composés de deux ou plusieurs anneaux de benzène accolés, les HAP peuvent se présenter sous forme gazeuse ou être liés aux particules selon leur taille et leur environnement.

Conséquences des HAP pour la santé

Les HAP peuvent être inhalés, ingérés avec la nourriture ou absorbés par la peau. Ils s'accumulent dans les tissus graisseux. De nombreux HAP, dont les B[a]P, qui sont les plus connus, sont cancérigènes. Ils favorisent la formation de métabolites nocifs dans le corps qui ont des conséquences pour la santé.

Ces dernières décennies, peu d'études épidémiologiques ont porté sur les conséquences sanitaires néfastes des HAP présents dans l'air ambiant extérieur. Rares sont les études qui ont analysé les HAP avec une résolution spatiale et temporelle suffisante. Certains indices laissent toutefois penser que l'apparition de cancers serait liée aux HAP. De plus, des études mécanistiques étayent les graves effets des HAP liés aux particules qui ont été observés sur le système cardiovasculaire et les voies respiratoires. Globalement, les données disponibles ne sont pas encore assez détaillées (OMS Europe, 2021).

Évolution de la concentration de HAP en Suisse

Dans le réseau NABEL et les stations de mesure cantonales, la concentration de B[a]P a diminué depuis le début des mesurages en 2006 (figure 25 et, pour les autres HAP, figure 19 et figure 40 de l'annexe H [Fischer & Hüglin, 2023]). Les concentrations sont plus élevées dans les régions rurales comptant de nombreux chauffages à bois en raison des émissions de ces derniers. Les émissions locales jouent un rôle important, en particulier pour les concentrations accrues de B[a]P en milieu rural (voir figure 25, site caractéristique « rural, sud », et annexe H). En 2020, la charge moyenne de B[a]P pondérée en fonction de la population s'inscrivait à 0,3 ng/m³ (Castro et al., 2020).

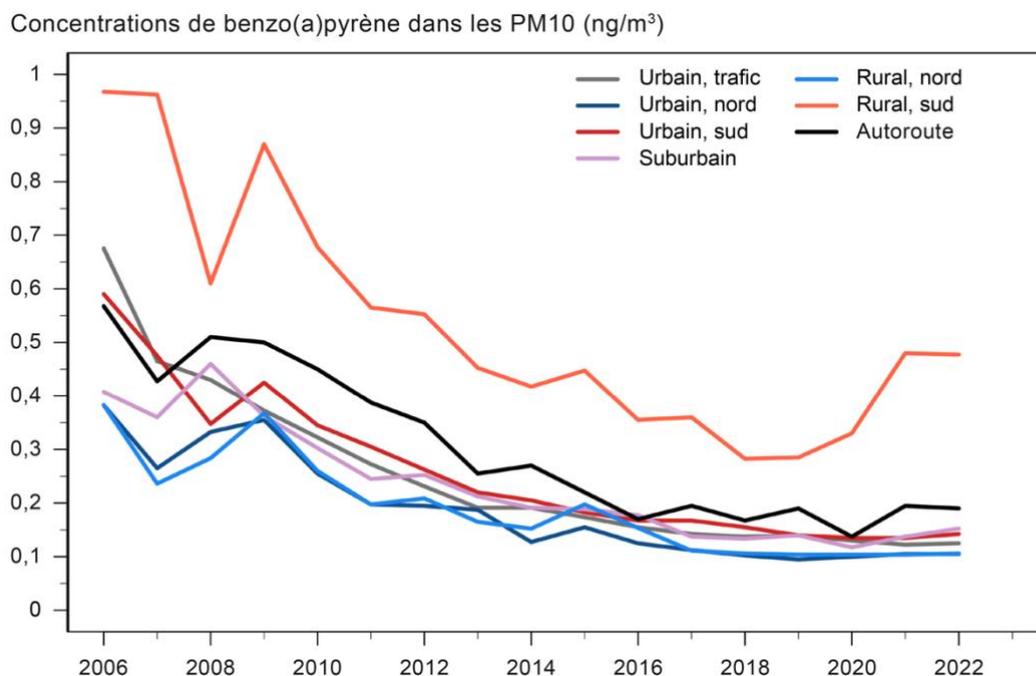


Figure 25 : Moyennes annuelles des benzo(a)pyrènes entre 2006 et 2021, par site caractéristique (stations de mesure du réseau NABEL)

Estimations concernant la Suisse

Recommandations de l'Union européenne (UE)

Compte tenu de sa toxicité, le B[a]P est souvent utilisé pour représenter la famille des HAP. Dans sa directive 2004/107/CE (Parlement européen et Conseil de l'UE, 2004), l'UE a fixé une valeur cible (moyenne annuelle) de 1 ng/m³ pour le B[a]P dans les poussières fines (PM10) atmosphériques. De plus, cette directive impose de déterminer les HAP suivants dans les poussières fines : le benz[a]anthracène, le benzo(b)fluoranthène, le benzo(j)fluoranthène, le benzo(k)fluoranthène, l'indéno(1,2,3-cd)pyrène, le dibenz(a, h)anthracène et le fluoranthène. En Suisse, les immissions de ces HAP et d'autres sont recensées depuis 2006 (figure 39 et figure 40 de l'annexe H). Des inventaires des émissions ont également été établis pour les principaux représentants des HAP.

Comment évaluer les immissions ?

La Suisse n'a pas de valeurs limites pour les substances cancérigènes, mais le principe de minimisation s'applique. Pour limiter le risque de cancer à 1 cas pour 1 million de personnes, l'exposition moyenne de la population au B[a]P devrait être inférieure à 0,12 ng/m³ (Brunner, 2000 ; Guerreiro et al., 2016). Cette valeur cible n'est pas encore atteinte. Les HAP étant une composante majeure de l'EC, ils sont indirectement concernés par l'objectif de réduction de l'EC défini par la CFHA en 2013. Les concentrations les plus élevées de HAP sont recensées pendant le semestre d'hiver dans les vallées alpines où les chauffages à bois sont très répandus et les inversions thermiques sont fréquentes.

Une méthode de mesure de référence est-elle reconnue sur le plan international ?

Oui. Il s'agit de la norme SN EN 15549:2008 (SN EN, 2008).

13.2 Retombées de poussières et métaux présents dans les retombées de poussières et les poussières fines

En Suisse, l'OPair fixe des VLI pour les retombées de poussières (total), le plomb, le cadmium, le zinc et le thallium dans les retombées de poussières, ainsi que le plomb et le cadmium dans les poussières fines (PM10). De plus, le programme de mesure NABEL recense le cuivre, l'arsenic et le nickel dans les PM10 et les retombées de poussières.

Recommandations de la CFHA concernant les retombées de poussières et les métaux dans les poussières fines

La CFHA recommande de conserver les VLI de l'OPair en vigueur pour les métaux dans les PM10 et dans les retombées de poussières ainsi que pour ces retombées (total). Ces valeurs sont compatibles avec les lignes directrices 2005 relatives à la qualité de l'air (OMS, 2006) que l'OMS n'a pas modifiées. Actuellement, aucune VLI ne peut être déterminée pour les autres métaux importants en matière de santé. Le principe de précaution s'applique ; des mesures régulières des métaux dans les PM10 demeurent donc opportunes.

Tableau 9 : Retombées de poussières (total) et métaux pour lesquels l'OPair fixe une VLI. L'ordonnance indique encore « poussières en suspension », mais il faut comprendre « poussières fines ».

Substance	Unité de temps	VLI OPair
Plomb dans les poussières fines (PM10), ng/m ³	Année	500
Cadmium dans les poussières fines (PM10), ng/m ³	Année	1,5
Retombées de poussières (total), mg / (m ² * d)	Année	200
Plomb dans retombées de poussières, µg / (m ² * d)	Année	100
Cadmium dans retombées de poussières, µg / (m ² * d)	Année	2
Zinc dans retombées de poussières, µg / (m ² * d)	Année	400
Thallium dans retombées de poussières, µg / (m ² * d)	Année	2

Sources des poussières fines métalliques

L'OPair réglemente les immissions de quatre métaux (plomb [Pb], cadmium [Cd], thallium [Tl] et zinc [Zn]), dont les principales sources sont les ménages et les processus et chauffages industriels. D'autres métaux comme le mercure sont régis par des prescriptions d'émission figurant dans l'OPair. L'industrie et l'artisanat, y compris l'incinération des déchets, constituent la principale source de mercure (80 %). Le thallium provient notamment de la production de ciment et le zinc, de l'incinération des déchets, des aciéries et de l'abrasion des pneumatiques dans le trafic motorisé.

Des études épidémiologiques recensent d'autres métaux dans les poussières fines (PM10 ou PM2.5) comme indicateurs de sources précises. Par exemple, le cuivre et le fer sont des indices de pollution de

l'air due aux transports. Le cuivre résulte de l'abrasion des plaquettes de frein et le fer, de l'usure mécanique des moteurs, des freins et des rails (Piscitello et al., 2021).

Conséquences des poussières fines métalliques pour la santé

La neurotoxicité des métaux présents dans les poussières fines qui sont réglementés dans l'OPair (Pb, Cd) a été établie. En France, un rapport d'expertise collective de l'ANSES (2019) a évalué les preuves des effets sanitaires en se fondant sur des études épidémiologiques et animales qui portaient notamment sur les composantes métalliques des poussières fines. L'indication d'effets du nickel sur les voies respiratoires et du fer ou du vanadium sur le système cardiovasculaire est réputée « forte ». L'indication d'effets du zinc sur le système cardiovasculaire est jugée « modérée », tout comme celle d'une mortalité accrue liée au fer. L'indication d'une hausse de la mortalité induite par le cuivre est considérée comme « faible ».

Évolution des immissions de métaux en Suisse

L'évolution des concentrations de métaux réglementés dans l'OPair figure dans les rapports de mesure annuels du réseau NABEL (OFEV, 2020 ; OFEV et Empa, 2022). Ces trois dernières décennies, les concentrations de ces métaux (Pb, Cd) dans les poussières fines (PM10) et dans les retombées de poussières (Pb, Cd, Tl, Zn) ont fortement diminué et les VLI sont clairement respectées (OFEV et Empa, 2021). Les concentrations de cuivre (voir figure 26), de nickel et d'arsenic dans les PM10, qui sont mesurées depuis 2006 par les stations NABEL, affichent elles aussi une baisse sensible (OFEV, 2020 ; OFEV et Empa, 2022). L'évolution temporelle des concentrations des autres métaux non réglementés dans les PM10 est plus incertaine, car les données proviennent uniquement d'études basées sur des projets et sur un petit nombre de stations de mesure.

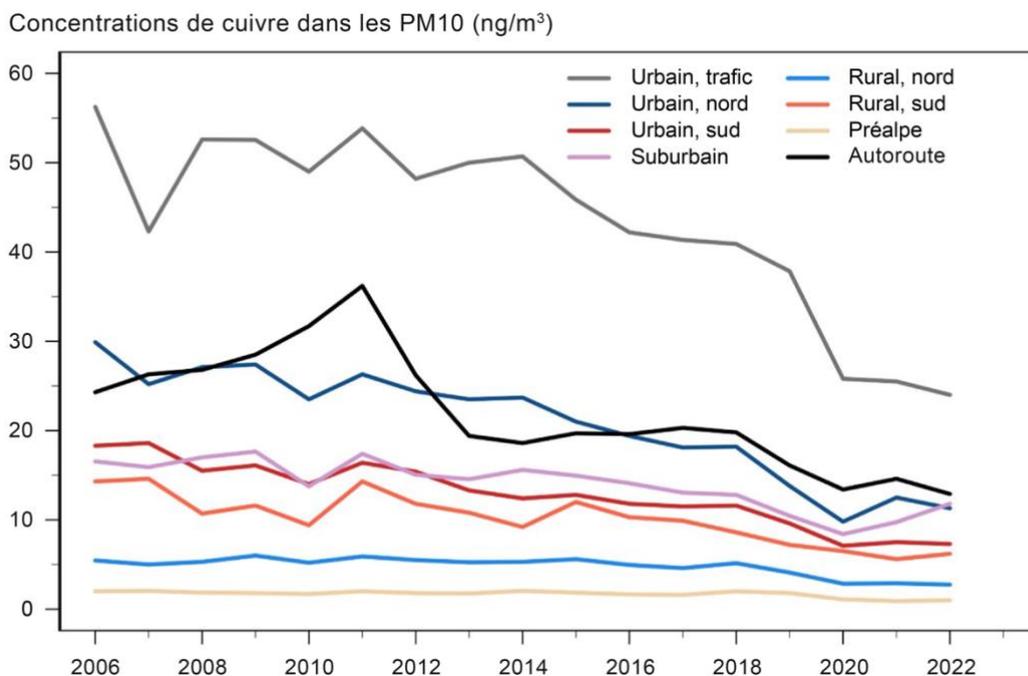


Figure 26 : Moyenne annuelle de la concentration en cuivre dans les PM10 entre 2006 et 2022, par site caractéristique. Exemple destiné à illustrer l'évolution des métaux dans les PM10 au fil du temps

Estimations concernant la Suisse

Les concentrations de métaux dans les PM10 sont sensiblement plus élevées dans les régions urbaines qu'en milieu rural (Grange et al., 2021). Les émissions du trafic routier qui ne sont pas liées aux effluents gazeux des véhicules (p. ex. poussières fines dues à l'abrasion des freins, des pneumatiques et des routes) constituent une source majeure d'antimoine (Sb), de baryum (Ba), de cuivre (Cu), de fer (Fe) et de zinc (Zn), par exemple. Comme elles ne sont pas réglementées pour le moment, leur contribution relative devrait croître à l'avenir, d'autant que les émissions liées aux gaz d'échappement diminueront encore à mesure que la mobilité électrique s'étendra. Les connaissances sur les effets sanitaires progressent certes, mais le mesurage et l'estimation des concentrations demeurent rares dans les études épidémiologiques. Les bases permettant de déterminer une valeur limite font défaut. Il convient d'examiner des mesures visant une réduction à la source et de quantifier régulièrement les métaux présents dans les poussières fines qui sont importants pour la qualité de l'air. L'exigence d'une diminution préventive des émissions de métaux s'appuie sur la LPE.

13.3 Potentiel oxydatif des poussières fines

Les particules de poussières fines peuvent entraîner du stress oxydatif lorsque les oxydants directement liés aux particules pénètrent dans les voies respiratoires ou lorsque les composantes des poussières fines forment par catalyse des dérivés réactifs de l'oxygène (*reactive oxygen species*, ROS) dans le corps humain. Selon plusieurs études, certains composés organiques et métaux, tels que le fer, le manganèse, le cuivre ou le nickel, engendrent des ROS dans les systèmes biologiques. Susceptibles de dégrader les antioxydants, les ROS contenus dans les poussières fines ou formés par catalyse sont mesurés en tant que PO. Plusieurs tests en laboratoire, qui réagissent différemment à la composition des poussières fines, sont utilisés pour déterminer le PO de celles-ci (Bates et al., 2019). Par ailleurs, ces tests sont parfois réalisés en laboratoire selon diverses méthodes, car il n'existe aucune norme internationale en la matière, ce qui complique la comparabilité des mesures correspondantes.

Recommandations de la CFHA concernant le potentiel oxydatif des poussières fines

Il n'existe pas encore de méthode de mesure de référence, et aucune VLI ne peut être déterminée pour le PO des poussières fines, une caractéristique scientifiquement intéressante d'une de leurs propriétés qui pourrait être importante en matière de santé. La CFHA recommande d'exécuter une surveillance régulière et d'intégrer les mesures du PO dans les études épidémiologiques pour pouvoir à l'avenir répondre aux questions sur les méthodes de mesure et mieux évaluer la pertinence du PO pour la qualité de l'air.

Sources d'un potentiel oxydatif accru dans les poussières fines

Les tests de PO utilisés réagissent aux métaux tels que le fer, le cuivre et le manganèse, et aux composés organiques fortement oxydés. Par conséquent, les sources de ces composés déterminent le PO des poussières fines. Selon des études sur le lien entre les sources d'émission et ce PO, les composés organiques issus des chauffages au bois et les métaux de transition présents dans les émissions par abrasion des transports affichent un PO élevé. Les chauffages au bois et les poussières fines organiques secondaires contribuent de manière déterminante au PO des deux fractions (PM2.5 et PM10). Le PO des PM10 résulte principalement des particules liées aux transports qui ne dépendent pas d'une combustion (resuspension, abrasion, etc.), en raison de leur taille (Daellenbach et al., 2020).

Conséquences du potentiel oxydatif accru des poussières fines pour la santé

Les différentes composantes des poussières fines peuvent produire des ROS ou des dérivés réactifs de l'azote (*reactive nitrogen species*, RNS), déclenchant alors un stress oxydatif. C'est un mécanisme d'action important des atteintes environnementales sur la santé (Peters et al., 2021). Un stress

oxydatif accru dans les cellules pulmonaires, c'est-à-dire un déséquilibre entre les processus oxydatifs et antioxydatifs, provoque des troubles du métabolisme et des dommages oxydatifs aux lipides, aux protéines et au matériel génétique. Il peut en résulter des réactions inflammatoires chroniques et, partant, des affections des voies respiratoires, des maladies cardiovasculaires ou des cancers. Il se peut que le PO des poussières fines soit une valeur de mesure plus spécifique de ce mécanisme d'action, que la concentration massique ou numérique des poussières fines.

Les rares études épidémiologiques donnent des résultats mitigés quant aux effets observés sur la santé, mais les différentes méthodes de mesure et les estimations de la concentration pourraient en être la cause (voir Atkinson et al., 2016 ; Weichenthal et al., 2016 ; Weichenthal et al., 2021). Dans une étude de cohorte néerlandaise, une analyse commune des PM_{2.5}, des PM₁₀, de la suie (absorption lumineuse des PM_{2.5}), du NO₂ et du PO (mesuré avec du dithiothréitol [DTT]) réalisée dans un modèle examinant plusieurs polluants indique que l'accroissement du risque de décès est majoritairement imputable à la concentration massique de PM_{2.5} dans les poussières fines (Traini et al., 2022). L'hypothèse selon laquelle le PO de ces dernières constituerait un critère plus important en matière de santé, que le calcul classique de la masse de poussières fines ou du nombre de particules, n'a pas encore été prouvée.

Évolution de la concentration de PO en Suisse

En Suisse, le PO des poussières fines n'est pas mesuré régulièrement. Des mesurages correspondants ont été réalisés dans plusieurs régions du pays dans le cadre de deux projets de recherche en 2013/2014 (Daellenbach et al., 2020) et en 2018/2019 (Grange et al., 2022). Ces analyses révèlent un PO sensiblement plus élevé dans les PM₁₀ que dans les PM_{2.5} et les lieux à fort trafic affichent une concentration accrue par rapport aux autres sites. Les valeurs mesurées par la station urbaine de Berne-Bollwerk, qui est exposée au trafic, semblent indiquer un PO décroissant dans les PM_{2.5} et PM₁₀.

Estimations concernant la Suisse

Il n'y a pas encore de méthode de mesure standardisée pour quantifier le PO. Plusieurs sont utilisées à cet effet et elles réagissent différemment aux composantes des poussières fines. De plus, on ignore si les propriétés oxydatives qui sont pertinentes en matière de santé peuvent être attribuées aux particules collectées sur les filtres ou s'il faut recourir à des méthodes plus contraignantes, dans lesquelles les particules sont isolées directement dans une solution. Une incertitude demeure donc quant à l'interprétation des résultats des tests de PO et à la pondération des propriétés oxydatives des particules. En outre, d'autres composantes de l'air pollué, notamment l'ozone et l'oxyde d'azote, ont des effets oxydatifs marqués.

Seule la poursuite des recherches permettra de déterminer si le PO constituera à l'avenir un indicateur de la qualité de l'air indépendant de la concentration massique ou du nombre de particules, et quelle méthode sera employée à cet effet. Le besoin de recherche dépend à la fois de l'importance du PO en tant qu'indicateur de la toxicité des poussières fines et de la méthode de mesure (Bates et al., 2019).

14 Recommandations pour une adaptation de l'OPair

La CFHA recommande au Conseil fédéral d'adapter les VLI de l'annexe 7 OPair conformément au tableau 10 afin qu'elles répondent, à l'avenir également, aux exigences de la LPE. Les valeurs recommandées par la CFHA sont conformes dans une large mesure aux niveaux de qualité de l'air préconisés par l'OMS, qui ont été établis scientifiquement. Les légères divergences entre les recommandations de la CFHA et ces niveaux ont été exposées et justifiées dans les chapitres précédents.

Les autres VLI sont conservées de manière inchangée. La CFHA renonce pour le moment à préconiser des VLI pour des polluants atmosphériques supplémentaires qui ne sont pas encore réglementés. Pour une réduction de la suie et des PUF, elle soutient néanmoins les mesures ou meilleures pratiques suggérées dans les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021. Par souci de lisibilité, les motifs des recommandations qui figurent dans les chapitres précédents sont de nouveau présentés ci-après. Le prochain chapitre examine celles-ci selon différentes perspectives.

Tableau 10 : Recommandations de la CFHA pour adapter les VLI de l'OPair (identiques au tableau 1). S'appuyant dans une large mesure sur les niveaux préconisés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) et les nombreuses publications correspondantes, ces recommandations n'en dérogent que dans des cas exceptionnels dûment justifiés. L'OPair indique encore « poussières en suspension », mais l'expression « poussières fines » est désormais préconisée

Polluant	Unité de temps	AQG OMS 2021	VLI en vigueur (OPair)	Recommandation CFHA 2023
Dioxyde de soufre (SO₂), µg/m³ (voir chap. 8)	Moyenne annuelle et, désormais, moyenne du semestre d'hiver	–	30 ^a	20 ^b
	95 % des moyennes semi-horaires d'une année	–	100	Abroger
	Moyenne par 24 h	40 ^c	100 ^d	40 ^c
Dioxyde d'azote (NO₂), µg/m³ (voir chap. 7)	Moyenne annuelle	10	30	10
	95 % des moyennes semi-horaires d'une année	–	100	Abroger
	Moyenne par 24 h	25 ^c	80 ^d	25 ^c
Monoxyde de carbone (CO), mg/m³ (voir chap. 9)	Moyenne par 24 h	4 ^c	8 ^d	4 ^c
Ozone (O₃), µg/m³ (voir chap. 6)	Saison estivale ^e	60	–	60
	98 % des moyennes semi-horaires d'un mois	–	100	100
	Moyenne par 8 h	100 ^c	–	–
	Moyenne horaire	–	120 ^d	120 ^d
Poussières en suspension / poussières fines (PM₁₀), µg/m³ (voir chap. 4)	Moyenne annuelle	15	20	15
	Moyenne par 24 h	45 ^c	50 ^c	45 ^c
Poussières en suspension / poussières fines (PM_{2.5}), µg/m³ (voir chap. 5)	Moyenne annuelle	5	10	5
	Moyenne par 24 h	15 ^c	–	15 ^c

^a VLI qui englobe également la protection des animaux et des plantes, de leurs biocénoses et de leurs biotopes selon l'art. 1, al. 1, LPE et qui correspond à l'état des connaissances au moment de l'édiction de l'OPair en 1985.

^b Valeur des lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2000 (OMS, 2000) qui a été fixée pour protéger les forêts et d'autres écosystèmes proches de la nature. Elle s'applique en tant que moyenne annuelle et pour le semestre d'hiver (d'octobre à mars).

^c 99^e percentile (en d'autres termes, trois dépassements par an sont admis).

^d Ne peut être dépassée qu'une fois par an au maximum.

^e Moyenne calculée à partir des moyennes journalières maximales par 8 heures de la concentration d'ozone pendant six mois consécutifs et de la concentration d'ozone la plus élevée en moyenne semestrielle. En Suisse, cela correspond à la période allant d'avril à septembre.

Poussières fines PM10

La CFHA propose d'abaisser les VLI applicables aux poussières fines PM10 à $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la moyenne annuelle et à $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la moyenne journalière, afin de prendre en considération l'objectif de protection de la LPE et les recommandations de l'OMS.

Poussières fines PM2.5

La CFHA propose d'abaisser la VLI applicable aux poussières fines PM2.5 à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la moyenne annuelle et de mettre en place une VLI de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la moyenne journalière, afin de prendre en considération l'objectif de protection de la LPE et les recommandations de l'OMS.

Des mesures à haute résolution temporelle sont d'ores et déjà réalisées pour déterminer la moyenne annuelle des poussières fines PM2.5. Comme celles-ci ont une répartition spatiale très homogène, on peut supposer que quelques sites de mesure suffiront pour surveiller les immissions correspondantes. La mise en place de cette nouvelle VLI ne devrait donc guère entraîner des charges métrologiques supplémentaires.

Ozone

La CFHA recommande d'introduire en tant que valeur à long terme le niveau d'ozone préconisé par l'OMS pour la saison estivale (d'avril à septembre), soit $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La moyenne horaire de l'OPair de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, qui peut être dépassée au plus une fois par an, est conservée. Comme elle est équivalente, sur le plan statistique, au niveau recommandé par l'OMS pour la moyenne par 8 heures et garantit dès lors une protection de la santé similaire, on renoncera à mettre en place une valeur limite par 8 heures. Le 98^e percentile des moyennes semi-horaires d'un mois est maintenu pour évaluer les tendances à long terme.

La valeur à long terme de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la saison estivale (d'avril à septembre) se fonde sur de nouvelles données scientifiques concernant l'impact d'une charge prolongée sur la santé. Elle contribue également au respect des niveaux critiques spécifiques à la végétation (*critical levels* ; voir annexe D.1), qui ont été fixés dans le cadre de la CLRTAP pour protéger la végétation des dommages de l'ozone.

De plus amples informations sur la comparabilité des deux valeurs (moyenne horaire et moyenne par 8 heures) figurent à l'annexe E. L'adoption de la moyenne par 8 heures de l'OMS entraînerait une charge administrative considérable. De plus, les plans d'information et de mesures cantonaux se basent sur la moyenne horaire et devraient alors être modifiés.

Toutes les valeurs limites pouvant être déterminées depuis les mêmes séries de mesures, l'ajout proposé ou le maintien de ces VLI n'occasionnent pas de frais supplémentaires.

Dioxyde d'azote (NO₂)

La CFHA recommande de fixer désormais la VLI applicable au NO₂ à $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la moyenne annuelle et à $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la moyenne journalière. Cet abaissement tient compte des objectifs de protection de la LPE en matière de santé humaine et d'écosystèmes et des recommandations de l'OMS. Le 95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année devrait être abrogé.

Compte tenu des nouvelles valeurs limites plus faibles recommandées par l'OMS pour les moyennes annuelle et journalière, la VLI applicable au 95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année pour évaluer la qualité de l'air en Suisse n'est plus considérée comme pertinente. Elle est respectée depuis plus de 20 ans sur tous les sites NABEL (voir figure 35 de l'annexe F.1). La CFHA propose de l'abroger,

mais de continuer à en rendre compte régulièrement pendant les cinq prochaines années pour garantir la comparabilité avec les années précédentes et l'analyse des tendances.

Dioxyde de soufre (SO₂)

La CFHA propose d'abaisser les VLI applicables au SO₂ à 20 µg/m³ pour la moyenne annuelle et le semestre d'hiver et à 40 µg/m³ pour la moyenne journalière, afin de prendre en considération l'objectif de protection de la LPE et les recommandations de l'OMS et de la CLRTAP. Le 95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année devrait être abrogé.

La concentration de SO₂ est déjà sensiblement inférieure à la valeur à court terme proposée par l'OMS grâce à l'efficacité des mesures de protection de l'air comme la désulfuration de l'huile de chauffage et des carburants. Pour protéger la végétation dans les écosystèmes proches de l'état naturel, la CFHA recommande d'adopter comme moyenne annuelle et moyenne du semestre d'hiver (d'octobre à mars) la concentration critique de 20 µg/m³ fixée dans le cadre de la CLRTAP de 2017 (voir D.3). Cette valeur correspond également aux recommandations de 2000 de l'OMS pour l'Europe qui visent à protéger les écosystèmes forestiers et naturels (OMS, 2000).

Compte tenu des nouvelles valeurs limites plus faibles recommandées pour la moyenne annuelle, celle du semestre d'hiver et la moyenne journalière, la VLI applicable au 95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année pour évaluer la qualité de l'air en Suisse n'est plus considérée comme pertinente. Elle est respectée depuis plus de 20 ans sur tous les sites NABEL (voir figure 38 de l'annexe G). La CFHA propose de l'abroger, mais de continuer à en rendre compte régulièrement pendant les cinq prochaines années pour garantir la comparabilité avec les années précédentes et l'analyse des tendances.

Monoxyde de carbone (CO)

La CFHA propose d'abaisser la VLI applicable au CO à 4 mg/m³ pour la moyenne journalière, afin de prendre en considération l'objectif de protection de la LPE et les recommandations de l'OMS.

Suie

Conformément aux lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air, la CFHA ne propose actuellement aucune VLI pour la suie. La surveillance des immissions correspondantes devrait se poursuivre et les émissions devraient être réduites selon le devoir de minimisation. La CFHA recommande de conserver la stratégie en vigueur en matière de suie (réduction des immissions à 20 % des valeurs de 2013 ; CFHA, 2013). La stratégie suisse est conforme aux recommandations de l'OMS.

Particules ultrafines (PUF)

Conformément aux lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air, la CFHA ne propose actuellement aucune VLI pour les PUF. Comme il n'existe aucune méthode de mesure de référence reconnue sur le plan international, la principale condition pour mettre en place une VLI fait défaut. La CFHA soutient toutefois l'ensemble des meilleures pratiques proposées par l'OMS (mesures recommandées), que les autorités suisses appliquent déjà depuis quelques années.

Tempêtes de sable et de poussière désertiques

La CFHA ne recommande aucune VLI pour le sable du désert et également aucune mesure supplémentaire pour la Suisse. La VLI applicable à la moyenne journalière des PM₁₀ et PM_{2.5} tient déjà compte du sable du désert. Les concentrations jouent un rôle minime pour la Suisse. Les recommandations que l'OMS formule pour les régions fortement touchées ne sont pas pertinentes en Suisse.

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

La CFHA ne propose pas de VLI pour les HAP. Les immissions correspondantes devraient toujours être surveillées et les émissions réduites conformément au devoir de minimisation.

Retombées de poussières et métaux présents dans les retombées de poussières et les poussières fines

La CFHA recommande de conserver les VLI de l'OPair en vigueur pour les métaux dans les PM10 et dans les retombées de poussières, ainsi que pour ces retombées (total). Ces valeurs sont compatibles avec les lignes directrices 2005 relatives à la qualité de l'air, que l'OMS n'a pas modifiées. Actuellement, aucune VLI ne peut être déterminée pour les autres métaux importants en matière de santé. Le principe de précaution s'appliquant, des mesures régulières des métaux dans les PM10 demeurent donc opportunes.

Potentiel oxydatif (PO)

Il n'existe pas encore de méthode de mesure de référence et aucune VLI ne peut être déterminée pour le PO des poussières fines, une propriété scientifiquement intéressante qui pourrait être importante en matière de santé. La CFHA recommande d'exécuter une surveillance régulière et d'intégrer les mesures du PO dans les études épidémiologiques, pour pouvoir à l'avenir répondre aux questions sur les méthodes de mesure et mieux évaluer l'importance du PO sur la qualité de l'air.

15 Discussion

15.1 Protection de la santé exigée par la LPE

Base légale de l'OPair, la LPE exige notamment que le Conseil fédéral fixe des VLI applicables aux pollutions atmosphériques qui garantissent la protection de la santé et de l'environnement. Les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 révèlent de manière convaincante que la pollution de l'air peut provoquer des maladies et des décès anticipés, même lorsque les concentrations sont inférieures aux valeurs de qualité de l'air prévalentes de 2005 (OMS, 2006). Compte tenu des données scientifiques disponibles, il faut abaisser les actuels niveaux de l'OMS à des concentrations au-dessous desquelles les effets des polluants n'ont pas encore pu être mis en évidence.

Depuis des décennies, les lignes directrices de l'OMS, qui sont adaptées régulièrement à l'état de la recherche, servent de référence scientifique pour la politique suisse de protection de l'air exigée par la LPE. La CFHA estime que l'état de la science documenté dans ces lignes directrices et dans les publications connexes de l'OMS, rend nécessaire une modification des VLI de l'OPair pour répondre aux prescriptions de la LPE à l'avenir également. Il est donc indispensable de modifier les VLI en vigueur en s'appuyant sur les nouvelles lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021. La mise en place de VLI plus strictes dans l'OPair pose cependant de nouvelles questions et de nouveaux défis, qui sont examinés ci-après selon une perspective locale, nationale et internationale. Les conséquences découlant des méthodes parfois nouvelles pour déterminer les niveaux recommandés par l'OMS sont discutées dans un second temps. Les motifs des divergences entre les VLI proposées par la CFHA et les nouveaux niveaux préconisés par l'OMS (2021) sont ensuite présentés brièvement. Enfin, la CFHA met en évidence les lacunes scientifiques actuelles avant de formuler ses conclusions.

15.2 Protection de l'air : un défi local, national et international

Mesures supplémentaires requises

Ces 40 dernières années, la Suisse a mis en place avec succès sa politique de protection de l'air à l'aide de VLI basées sur la LPE et axées sur les résultats. Celles-ci sont désormais respectées à une large échelle, sur presque tous les sites de mesure et pour quasiment tous les polluants. Si les VLI étaient abaissées comme cela est proposé, les niveaux de qualité de l'air mesurés, notamment dans les centres urbains densément peuplés, seraient plus élevés donc considérés comme excessifs sur le plan légal. Les émissions de polluants atmosphériques doivent ainsi encore diminuer pour pouvoir respecter à moyen terme les VLI suggérées par la CFHA. À cet effet et pour continuer à bénéficier du soutien des acteurs locaux et nationaux et de la population, il convient d'exposer clairement et en toute transparence les motifs qui imposent d'abaisser les VLI. Les principaux éléments sont récapitulés ci-après :

- Il n'y avait aucune donnée fiable sur les effets de basses concentrations de polluants lorsque les VLI en vigueur et les précédentes lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air (OMS, 2006) ont été définies. Les groupes de population qui avaient participé aux vastes études nationales et internationales centrales pour la recherche étaient exposés à des concentrations majoritairement supérieures aux anciens niveaux recommandés par l'OMS ou aux VLI de l'OPair en vigueur.
- La pollution de l'air n'est pas devenue elle-même « plus dangereuse », mais les succès majeurs enregistrés dans la protection de l'air et l'intensification de la recherche en Europe et en Amérique du Nord, ont permis d'identifier les conséquences de concentrations plus faibles. Le fait que celles-ci puissent nuire à la santé impose, selon la LPE, d'abaisser les VLI de l'OPair.

- La science a établi que toute réduction de la pollution de l'air a des effets bénéfiques sur la santé de la population.

Mise à jour des plans de mesures

Le respect des nouvelles valeurs limites plus strictes nécessite une actualisation des mesures d'assainissement de la qualité de l'air. Les autorités cantonales et nationales devront encore se focaliser sur l'exécution préventive et sur les plans de mesures de protection de l'air. Compte tenu des nouveaux défis en la matière, le Conseil fédéral devra réviser prochainement sa stratégie de lutte contre la pollution de l'air.

Les mesures en vigueur ont engendré des tendances baissières notables en matière d'émissions de polluants de l'air, elles devraient donc être conservées. Toutefois, les prescriptions relatives aux émissions devraient être adaptées de façon conséquente au progrès de la technique. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de compléter et de mettre en œuvre rapidement les plans de mesures cantonaux pour toutes les sources de polluants. Sinon, les objectifs des nouvelles VLI proposées ne seront guère atteints ou ne le seront que bien tardivement.

Compte tenu de la nécessité de réduire davantage des concentrations déjà relativement faibles, une réglementation ciblée et axée sur les sources gagne en importance pour prioriser les mesures présentant un bon rapport coûts/efficacité. Il se peut que celles-ci doivent être pondérées différemment sur le plan régional ou cantonal, car les émissions de l'agriculture, de la construction, des transports, des aéroports, de l'industrie et des chauffages varient d'une région à l'autre. Par exemple, les défis concernant l'agriculture, les chauffages (notamment au bois) ou les industries locales (p. ex. ciment ou graphite) sont très différents sur le plan régional. De plus, les nouveaux défis émergents tels que la gestion de la crise énergétique ne doivent pas occulter les dispositions de la LPE en matière de qualité de l'air et aussi de protection de la santé.

La politique suisse de protection de l'air a fait ses preuves, puisque la plupart des polluants (réglementés ou non) ont diminué. A titre d'exemple, les mesures de réduction des émissions de NO_x ont montré des conséquences favorables dans plusieurs domaines. D'une part, elles contribuent au respect des VLI appliquées au NO₂ et à une diminution des pics d'ozone. D'autre part, elles atténuent non seulement les nitrates, mais également les poussières fines (PM10 et PM2.5) formés de manière secondaire. Enfin, elles diminuent l'apport d'azote réactif dans les écosystèmes proches de l'état naturel (voir rapports de la CFHA, 2005 ; CFHA, 2014, 2020). En vertu de la LPE, ces écosystèmes doivent eux aussi être protégés de conséquences néfastes. En outre, la focalisation des mesures sur la réduction de la charge en poussières fines a porté ses fruits, même si cet indicateur de la qualité de l'air n'illustre que partiellement la complexité toxicologique de leurs composantes. Ainsi, les fractions ultrafines des particules, qui ne sont pas réglementées actuellement, ont également reculé.

L'ozone reste un sujet de préoccupation

Sur le plan national et en Europe également, la concentration d'ozone n'a de loin pas encore diminué dans les proportions requises, malgré une vaste politique de protection de l'air visant à réduire les gaz précurseurs tels que les NO_x et les COVNM (composés organiques volatils non méthaniques). On a néanmoins réussi à écrêter les pics d'ozone : durant les étés 2020 et 2022, ces pics sont demeurés sensiblement inférieurs à ceux de l'été 2003 en dépit de vagues de chaleur extrêmes. Les efforts pour diminuer les précurseurs tels que les NO_x, les COVNM, le méthane et le monoxyde de carbone doivent être intensifiés tant au niveau national qu'international. Les mesures devraient également être coordonnées avec la politique climatique, car la réduction des concentrations de méthane et d'ozone apparaît très efficace et importante pour la protection du climat.

L'importance d'une perspective internationale

Depuis des années, la Suisse s'engage sur le plan international pour la qualité de l'air. Elle a ainsi ratifié les huit protocoles de réduction des polluants atmosphériques qui ont été adoptés dans le cadre de la CLRTAP. L'OFEV participe activement à plusieurs comités de cette dernière. La Direction du développement et de la coopération (DDC) du Département fédéral des affaires étrangères (DFAE) soutient des trains de mesures innovants dans les États partenaires pour améliorer la qualité de l'air. Grâce aux nouvelles VLI recommandées, la collaboration internationale pour la protection de l'air gagnera encore en importance, car la part relative des « concentrations de fond » à grande échelle sera encore plus pertinente lors de charges faibles. En particulier, les régions frontalières sont tributaires de la politique de protection de l'air des pays voisins (p. ex. en raison des flux d'air atmosphériques ou de la contribution de la flotte de véhicules des frontaliers).

La qualité de l'air s'est régulièrement améliorée dans les pays voisins également. Par rapport à la Suisse, la diminution de la pollution atmosphérique dans les centres urbains de ces pays affiche toutefois un certain décalage, qui tient en partie au fait que contrairement à l'OPair suisse, la directive 2008/50/CE (Parlement européen et Conseil de l'UE, 2008) ne s'appuie pas directement sur les objectifs de protection de la santé induits par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air de 2005, notamment dans le domaine des poussières fines. Ainsi, les valeurs limites applicables à ces poussières dans l'UE sont deux à trois fois plus élevées que les niveaux recommandés en 2005 par l'OMS ou respectivement les VLI en Suisse.

Le 26 octobre 2022, la CFHA a pris acte avec intérêt de l'abaissement des valeurs limites proposé par la Commission européenne (Commission européenne, 2022 ; Parlement européen, 2022). Il convient de saluer dans cette proposition le fait que l'UE entend ne plus émettre de polluants à l'horizon 2050 dans le cadre de son pacte vert pour l'Europe (*EU Green Deal*, Commission européenne, 2019 et 2021). De plus, la directive NEC (Parlement européen et Conseil de l'UE, 2016) fixe aux États membres des obligations de réduction considérables d'ici à 2030 et au-delà. La concentration de polluants dans les pays voisins et, partant, le transport transfrontalier en Suisse devrait donc reculer sensiblement à moyen et long terme. En particulier, le Tessin et d'autres régions frontalières telles que Genève et Bâle devraient en bénéficier.

Toutefois, si la proposition actuelle de nouvelle directive sur la qualité de l'air formulée par la Commission européenne était acceptée, l'UE reprendrait uniquement les niveaux de qualité de l'air 2005 de l'OMS comme nouvelles valeurs limites. Sa réglementation n'accorderait ainsi pas une priorité suffisante aux exigences de protection de la santé, même à l'avenir. Par conséquent, en y inscrivant les nouvelles valeurs limites suggérées par la CFHA, la politique suisse de protection de l'air continuerait de diverger des dispositions réglementaires de l'UE. Pour comprendre le rythme plus lent de la politique européenne de protection de l'air, il convient de souligner une différence réglementaire majeure entre l'UE et la Suisse : contrairement à cette dernière, l'UE fixe non seulement des valeurs limites, mais également des délais dans lesquels ces objectifs doivent être atteints. Si ceux-ci ne sont pas réalisés, les États membres risquent des sanctions. En outre, les concentrations dans certains pays de l'UE demeurent sensiblement plus élevées qu'en Suisse. Dans ce contexte, les valeurs limites sont certes définies en se fondant sur des données scientifiques relatives à la santé publique, mais elles résultent de compromis politiques en matière de protection de la santé, et « d'objectifs intermédiaires » moins ambitieux.

En Suisse, la politique de protection de l'air ne fixe pour le respect des VLI ni délai contraignant sur le plan juridique ni sanctions pécuniaires, contrairement à l'UE. Cela pourrait expliquer pourquoi l'instauration de valeurs limites étayées scientifiquement et répondant aux objectifs de protection de la LPE n'a engendré jusqu'à présent aucune opposition réunissant une majorité. Par ailleurs, la proposition de la

CFHA est conforme à la LPE, aux principes qui y figurent et aux objectifs de protection de la politique environnementale de la Suisse, qui a suivi une voie s'avérant couronnée de succès.

L'OPair ne régit pas la concentration des polluants de l'air dans les espaces intérieurs

Concernant l'amélioration de la qualité de l'air, le rôle de la concentration dans l'air dans les espaces intérieurs fait l'objet d'interrogations croissantes, car la population passe en moyenne 90 % de son temps dans des locaux. Les niveaux recommandés par l'OMS se fondent sur la littérature scientifique relative aux conséquences d'une concentration de polluants dans l'air extérieur. Selon des ouvrages détaillés, il existe cependant aussi une forte corrélation entre la charge en polluants dans l'air intérieur, mais qui provient de l'extérieur et les concentrations dans l'air extérieur utilisées dans les études. Les charges supplémentaires venant de sources situées à l'intérieur des locaux (p. ex. tabagisme ou poêles à gaz) sont prises en compte dans les études sur les conséquences de l'air extérieur. Les polluants intérieurs n'ont donc guère d'incidence sur les résultats correspondants. En principe, les niveaux de qualité de l'air extérieur définis par l'OMS pourraient également s'appliquer à l'air intérieur pour ces substances.

Toutefois, la qualité de l'air dans les espaces intérieurs résulte non seulement des apports d'air extérieur, mais également des contributions importantes et parfois plus élevées de ces mêmes substances (et d'autres) provenant de sources à l'intérieur même des locaux. Le tabagisme, la cuisson des aliments, les grills, les chauffages au bois et les bougies sont des sources importantes qui influent fortement sur la qualité de l'air intérieur. Le champ d'application de la LPE et, dès lors, les valeurs limites de l'OPair concernent uniquement l'air extérieur. Il existe certes des dispositions légales sur l'air ambiant aux postes de travail et des valeurs limites pour l'émission de polluants issus des matériaux de construction dans les locaux (p. ex. formaldéhyde). De plus, il est désormais interdit de fumer dans les espaces publics intérieurs. Comme indiqué dans un précédent rapport de la CFHA (CFHA, 2010), l'art. 29 de la loi fédérale sur la protection contre les substances et les préparations dangereuses (loi sur les produits chimiques, LChim ; RS 813.1, état au 1^{er} janvier 2017) charge l'Office fédéral de la santé publique d'informer la population sur les polluants à l'intérieur des locaux. Globalement, les prescriptions relatives à l'émission de polluants atmosphériques à l'intérieur des locaux privés sont lacunaires en Suisse et réparties entre plusieurs actes fédéraux ou cantonaux.

Les expériences recueillies lors de la pandémie de coronavirus ont ravivé le débat sur un acte juridique concernant la qualité de l'air à l'intérieur des locaux. Une ventilation de ceux-ci qui serait viable en période pandémique réduirait non seulement la charge virale, mais également – selon la technologie choisie – la concentration de polluants réglementés dans l'OPair qui proviennent de sources à l'intérieur et à l'extérieur des locaux. L'identification de solutions souhaitables, réalisables et efficaces sur le plan sanitaire nécessite, d'une part, de vastes efforts de recherche multidisciplinaire et, d'autre part, une analyse et une évaluation détaillées des dispositions légales éventuelles sur l'air à l'intérieur des locaux.

15.3 Conséquences de la nouvelle méthodologie de l'OMS pour définir les niveaux de qualité de l'air

Adaptations diverses

Les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 et les recommandations de la CFHA qui s'en inspirent se traduisent par des adaptations plus ou moins profondes des niveaux préconisés. Par exemple, le niveau des PM_{2.5} a été réduit de moitié, tandis que celui du NO₂ est quatre fois plus faible que dans les lignes directrices de 2005 et trois fois plus bas que la VLI de l'OPair en vigueur. Ces différences ne résultent pas d'une modification des effets sur la santé ou de leur pondération ; elles

découlent uniquement de l'actualisation de la méthode servant à définir les niveaux recommandés. Des études de longue durée très volumineuses, dont les participants étaient exposés à des concentrations de NO₂ faibles à leur domicile, ont été publiées ces dernières années. Étant donné qu'une hausse régulière des effets sur la santé a été identifiée – comme pour les poussières fines – dès les plus petites concentrations observables sans qu'un seuil inoffensif ne puisse être déterminé, les niveaux recommandés ont été abaissés en conséquence. En revanche, les différences de concentration de PM_{2.5} entre les études précédentes et les plus récentes sont moindres, de sorte que le nouveau niveau préconisé n'a été réduit que de moitié.

Le lien de causalité des effets directs des différentes substances n'est pas établi au même degré pour toutes les conséquences sanitaires examinées jusqu'à présent. Si l'on considère l'exigence principale de protection de la santé pour fixer les niveaux recommandés par l'OMS ou les VLI de l'OPair, il suffit cependant, selon la LPE, de prouver à minima un lien de causalité pour une conséquence. Ainsi, le fait que le dioxyde d'azote provoque une augmentation des symptômes asthmatiques et des consultations d'urgence est réputé établi.

Importance d'une définition statistique des valeurs limites à court terme

Dans ses lignes directrices 2021, l'OMS a utilisé une nouvelle méthodologie pour fixer les valeurs à court terme. Les valeurs à long terme ont d'abord été déterminées selon des critères scientifiques de santé publique. Les valeurs à court terme applicables aux PM₁₀, aux PM_{2.5} et au NO₂ ont ensuite été calculées à partir de celles à long terme grâce à des principes statistiques de base. Les niveaux journaliers sont des valeurs définies sur le plan statistique qui ne peuvent être dépassées que quelques fois par an au plus. La nouvelle méthodologie des lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air vise à ce que les dispositions concernant la moyenne annuelle soient satisfaites lorsque les règles applicables à la moyenne journalière (soit, par exemple, trois dépassements de celle-ci par an au maximum) sont respectées (et inversement).

Une incohérence réglementaire entre les moyennes journalière et annuelle peut avoir des effets indésirables sur la politique de protection de l'air. En particulier, des valeurs à long terme moins strictes que les valeurs journalières seraient problématiques, car le dépassement de ces dernières pourrait se répéter, alors que les VLI annuelles sont respectées. On pourrait alors exiger des mesures axées sur les dépassements des valeurs journalières. Or, dans l'optique de la protection de la santé, la politique de protection de l'air devrait être axée en premier lieu sur la réduction à long terme des concentrations et le respect des valeurs limites correspondantes, donc des moyennes annuelles. Des « mesures d'urgence » visant à limiter les quelques dépassements (« pics ») observés permettent certes de sensibiliser les milieux politiques et la population au problème de la pollution de l'air, mais leurs avantages en termes de santé sont faibles par rapport aux mesures déployant leurs effets sur le long terme. En outre, les moyennes journalières dépendant très fortement des conditions météorologiques, l'influence des mesures à court terme sur les concentrations est incertaine et généralement marginale. Les nouvelles lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 entendent éviter ces incitations erronées en ajustant statistiquement les niveaux recommandés à court et à long termes.

Il faut néanmoins préciser que la définition statistique des moyennes journalières sert uniquement à illustrer le lien entre les moyennes annuelle et journalière. Bien que ce lien statistique entre la moyenne annuelle et le nombre de dépassements des moyennes journalières se fonde sur de très grands volumes de données internationales, il présente des différences locales et régionales. Selon une analyse détaillée des données NABEL, tous les sites caractéristiques de Suisse affichent une forte corrélation entre le respect des VLI applicables à la moyenne journalière d'une part, et à la moyenne annuelle d'autre part. Comme indiqué dans les annexes C.2, C.3 et F.2, cela vaut notamment pour les nouvelles VLI

proposées. On peut dès lors partir du principe que le respect de la VLI journalière implique celui de la moyenne annuelle, et inversement. Au niveau suisse, la VLI journalière tend néanmoins à être légèrement plus stricte, de sorte que la concentration pourrait dépasser la VLI à court terme un peu plus de trois jours sans enfreindre pour autant la VLI annuelle. Ces écarts éventuels ne sont pertinents ni pour l'exécution ni pour la protection de la santé.

15.4 Propositions différentes de celles de l'OMS et abrogation de valeurs limites

Les recommandations de la CFHA pour les valeurs limites applicables à l'ozone et au SO₂ diffèrent de celles de l'OMS. En ce qui concerne le SO₂ et le NO₂, la CFHA suggère même d'abroger des valeurs limites en vigueur. Les motifs sont à nouveau brièvement exposés ici.

Ozone

Jusqu'à présent, l'OPair réglemente les expositions à court terme à l'aide d'une moyenne horaire et du 98^e percentile des moyennes semi-horaires d'un mois, qui est axé sur les pics. Pour la CFHA, il n'y a pas lieu de déroger aux VLI de l'OPair en vigueur. Les différents paramètres à court terme présentent une forte corrélation statistique et les valeurs proposées par l'OMS et celles de l'OPair sont équivalentes (voir annexe E). On peut donc supposer que le respect des valeurs limites de l'OPair implique également celui des niveaux recommandés par l'OMS. Conserver les règles de l'OPair a un grand avantage pour les autorités suisses : les données restent comparables, de sorte que les tendances peuvent être suivies de manière fiable et les trains de mesures qui s'appuient sur ces données ne doivent pas être modifiés.

Les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air ne fixent aucune période précise pour le nouveau niveau de qualité de l'air applicable à la saison estivale. Elles recommandent juste un certain niveau pour les six mois affichant les concentrations les plus fortes, ce qui correspond aux mois d'été plus chauds, car les charges en ozone particulièrement élevées et prolongées se produisent généralement l'été. Dans certaines régions d'altitude en Suisse, le niveau d'ozone peut être plus haut entre mars et août que durant la saison estivale (d'avril à septembre). Par souci d'uniformité et de simplicité, la CFHA a décidé de proposer à l'échelle nationale une valeur limite axée sur la période allant d'avril à septembre, sans que cela influe sur la politique de protection de l'air ou les conséquences pour la santé.

NO₂

La mise en place d'une moyenne journalière sensiblement plus stricte rend superflue la valeur limite à court terme en vigueur pour vérifier les pics de concentration (95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année). Le respect de la nouvelle VLI recommandée implique également celui de la valeur applicable aux pics.

SO₂

Les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 ne mentionnent aucun niveau annuel moyen, tandis qu'une VLI annuelle de 30 µg/m³ s'applique déjà en Suisse. La CFHA propose à l'échelle nationale une moyenne annuelle et semestrielle de 20 µg/m³, qui correspond aux niveaux critiques (*critical levels*) fixés dans la CLRTAP pour protéger les écosystèmes proches de l'état naturel (CEE-ONU, 2017). Contrairement aux lignes directrices 2021 de l'OMS, les VLI suisses doivent également protéger la nature des influences nuisibles, conformément à la LPE. Les nouvelles valeurs limites plus strictes recommandées rendent superflu le 95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année, qui est respecté depuis plus de 20 ans sur tous les sites du réseau NABEL.

15.5 Lacunes au niveau de l'état des connaissances

Les bases scientifiques servant à la modification proposée des VLI sont très détaillées et cohérentes. Les débats de la CFHA ont cependant mis en lumière un besoin de recherche pour les années à venir. Les principaux points sont résumés ci-après :

- L'état des connaissances sur les effets combinés de plusieurs substances devrait être réévalué dans quelques années. Il est certes peu probable que les VLI doivent alors être modifiées, mais ces effets combinés pourraient inciter à revoir les priorités des mesures de protection de l'air. Par exemple, des indices laissent penser qu'une charge élevée en ozone accentue l'impact des poussières fines. Sa diminution aurait dès lors une incidence sur les conséquences des poussières fines pour la santé.
- Les autorités suisses devraient encourager l'établissement de normes internationales pour mesurer les PUF et le nombre de particules, condition indispensable à l'introduction éventuelle de VLI. Nocives pour la santé, les PUF pourraient alors être réglementées sur la base de la LPE. La recherche doit néanmoins se poursuivre dans ce domaine. La CFHA étudiera de nouveau une réglementation éventuelle des PUF dans les années à venir.
- En matière de santé, la pertinence de certaines caractéristiques des polluants ou de certaines sources devrait être examinée plus avant sur le plan scientifique. On peut citer à titre d'exemple le potentiel oxydatif des poussières fines ou les poussières fines engendrées par l'abrasion des freins. Ce faisant, il faudrait examiner tant les effets sur la santé que les objectifs de mesures éventuelles.
- Il est nécessaire de continuer à développer et à appliquer des méthodes pour déterminer la contribution de sources d'émission spécifiques à la concentration de poussières fines, car la réduction accrue de ces dernières est un défi majeur. Ces recherches exigeantes devraient être menées de manière ciblée pour soutenir les autorités dans la promotion et la priorisation de mesures efficaces et économiques.
- Il convient de soutenir la recherche sur les coûts et les avantages des mesures de protection de l'air en termes de qualité de l'air et de santé. La recherche devrait contribuer à ce que les nouvelles VLI proposées soient atteintes de manière aussi économique et durable que possible.

16 Conclusion

En résumé, conformément aux prescriptions de la LPE, les VLI de l'OPair en vigueur doivent être adaptées aux nouveaux niveaux recommandés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air en 2021, afin que la protection de la santé continue de s'appuyer sur les connaissances scientifiques les plus récentes. Le respect des nouvelles VLI proposées requiert une réduction accrue des émissions et, partant, la mise en œuvre systématique et rapide de mesures de protection de l'air. Compte tenu de la réussite de la politique suisse de protection de l'air, qui se caractérise par une collaboration constructive et ciblée entre les autorités locales, cantonales et nationales d'une part, et l'industrie, l'artisanat et l'agriculture d'autre part, la CFHA est convaincue que ces nouvelles VLI pourront être respectées à moyen terme. L'exécution doit continuer de prendre en compte les particularités locales et régionales et, en particulier, donner la priorité requise aux domaines dans lesquels les mesures ont été retardées (p. ex. agriculture) et aux sources dont l'importance croît (p. ex. chauffages au bois), tout en exploitant pleinement les synergies entre la protection de l'air et la politique climatique. En outre, une collaboration étroite au niveau international, notamment avec les pays voisins de la Suisse, continue de revêtir une grande importance.

Annexe

Annexe A – Lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air 2021

A.1 Méthode pour déterminer les nouvelles lignes directrices relatives à la qualité de l'air et effets sur la santé examinés

Les niveaux recommandés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 ont été définis selon les étapes suivantes :

- détermination du champ d'application des lignes directrices et formulation des questions de l'examen systématique ;
- examen systématique des données scientifiques et méta-analyse des estimations de l'effet quantitatif pour informer la mise à jour des niveaux de qualité de l'air ;
- évaluation du niveau de certitude des collections de données scientifiques résultant des examens systématiques des polluants ; et
- détermination des niveaux des lignes directrices sur la qualité de l'air, qui correspondent aux niveaux d'exposition les plus faibles pour lesquels il existe des preuves des effets nocifs pour la santé.

Le choix des polluants atmosphériques et des conséquences pour la santé à évaluer était primordial pour les examens systématiques commandés. Ceux-ci devaient fournir des renseignements sur l'étendue des conséquences, le type de relation entre la concentration et ces dernières et, partant, sur d'éventuels seuils et l'augmentation du risque (p. ex. linéaire) en cas d'exposition croissante. Dans un deuxième temps, la qualité scientifique des études disponibles a dû être estimée. En l'espèce, les chercheurs ont pu compter non seulement sur l'amélioration des méthodes de mesure et d'évaluation des concentrations, mais également sur un nombre accru d'études portant sur les conséquences sanitaires des charges désormais faibles en Europe et en Amérique du Nord.

Se fondant sur les résultats des examens systématiques, les experts scientifiques du *Guideline Development Group* ont évalué les données sur les liens étudiés et en ont tiré des niveaux de qualité de l'air selon leur propre procédure transparente. Lorsque les données scientifiques étaient suffisantes, la concentration la plus faible à laquelle des effets nocifs sur la santé avaient été observés dans les études a été déterminante pour les valeurs à long terme (moyennes annuelles recommandées). En l'absence d'indications relatives à un seuil, les niveaux préconisés à court terme (p. ex. moyennes journalières) ont été fixés à l'aide d'une valeur statistique présentant un rapport précis avec la valeur à long terme ou de valeurs correspondant, dans les études à court terme, aux concentrations maximales qui ne devraient être dépassées, au total, que trois à quatre fois par an.

Le tableau 11 recense les études portant sur une concentration faible qui ont permis de définir la valeur limite à long terme applicable aux PM_{2.5}. La moyenne des cinq valeurs les plus basses du 5^e percentile des études indiquant des effets sur la mortalité lors de concentrations faibles a été calculée. Le 5^e percentile de la concentration relevée dans les études de Pinault et al. (2016), Cakmak et al. (2018), Pinault et al. (2017), Di et al. (2017) et Hart et al. (2015) équivaut à 4,9 µg/m³. Arrondie à 5 µg/m³, cette valeur a été retenue comme niveau recommandé. Étant donné que l'étude de Weichenthal et al. (2014) ne montrait aucune progression du risque de mortalité, celle de Parker et al. (2018) ne révélait aucune hausse significative de ce risque et l'étude de Villeneuve et al. (2015) n'indiquait aucun risque accru en dessous de 8 µg/m³, elles n'ont pas été intégrées dans le calcul (voir OMS, 2021, p. 76, section « Step 2 »).

Tableau 11 : Études portant sur des concentrations faibles qui ont été incluses dans la méta-analyse de l'OMS exécutée par Chen et Hoek (2020). Cette analyse concernait la mortalité liée à une exposition à long terme aux PM2.5 (OMS, 2021). Classement en fonction de la concentration médiane.

HR= *hazard risk* (risque), estimations de l'effet ; CI de 95 % = intervalle de confiance de 95 %

Étude	Moyenne / médiane [µg/m ³]	Écart standard	5 ^e percentile	25 ^e percentile	HR (CI de 95 %) par 10 µg/m ³
Pinault et al. (2016)	5,9	–	3,0	4,2	1,26 (1,19–1,34)
Cakmak et al. (2018)	6,5	2,0	3,2	–	1,16 (1,08–1,25)
Pinault et al. (2017)	7,1	–	3,5	5,4	1,18 (1,15–1,21)
Weichenthal et al. (2014)	9,5	1,7	6,7	–	0,95 (0,76–1,19)
Villeneuve et al. (2015)	9,5	3,5	4,8	–	1,12 (1,05–1,20)
Di et al. (2017)	11,5	2,9	7,1	9,5	1,08 (1,08–1,09)
Parker et al. (2018)	11,8	–	–	10,1	1,03 (0,99–1,08)
Bowe et al. (2018)	11,8	–	7,9	10,2	1,08 (1,03–1,13)
Hart et al. (2015)	12,0	2,8	7,8	10,2	1,13 (1,05–1,22)

A.2 Effets sur la santé : aperçu réalisé par l'OMS

L'OMS a décidé d'étudier les polluants atmosphériques « classiques », à savoir les poussières fines PM10 et PM2.5, le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone, l'anhydride sulfureux (SO₂) et le monoxyde de carbone, et de se limiter aux valeurs cibles importantes pour la santé. Pour ce qui est des effets à long terme, les incidences sur la mortalité ont été examinées. Quant aux conséquences des concentrations accrues à court terme, l'analyse a porté non seulement sur la mortalité, mais également sur le risque d'infarctus en lien avec le monoxyde de carbone et les consultations d'urgence pour cause d'asthme en relation avec le NO₂, le SO₂ et l'ozone.

De nouvelles études épidémiologiques ont mis en évidence les effets sur la santé d'une gamme plus étendue de concentrations. Les études menées dans les pays à revenu faible et intermédiaire ont révélé les effets nocifs pour la santé d'une exposition à des niveaux très élevés de pollution atmosphérique, tandis que celles qui ont été réalisées dans des pays à haut revenu, où la qualité de l'air s'est améliorée au fil du temps, montrent encore des effets nocifs à des concentrations inférieures à celles qui avaient été identifiées précédemment.

Les résultats concernant une exposition à long terme aux poussières fines PM2.5 et PM10 (Chen et Hoek, 2020) ainsi qu'au NO₂ et à l'ozone (Huangfu et Atkinson, 2020) pendant les mois d'été (*peak season*) figurent dans le tableau 12. L'indication d'un lien entre différentes causes de décès et la concentration de PM2.5 est considérée comme très élevée, sauf pour la mortalité due aux affections des voies respiratoires, pour laquelle la probabilité d'un lien avec les PM10 est réputée élevée. Selon les méta-analyses, une hausse de la concentration de PM2.5 de 10 µg/m³ s'accompagne d'un risque de mortalité accru de 8 % à 10 % (en fonction de la maladie ou de la cause du décès).

Concernant le lien entre le NO₂ et la mortalité totale, d'une part, et celle due aux (différentes) affections des voies respiratoires, d'autre part, on observe une progression du risque de 2 % à 6 % par écart de concentration à long terme de NO₂ de 10 µg/m³. L'indication d'effets nocifs est jugée modérée. Cette appréciation découle des estimations très variables des effets (risques) dans les différentes études, qui se traduisent par des données scientifiques de moindre qualité. Ces estimations divergentes pourraient découler des différences d'appréciation des concentrations. Par exemple, certaines études se basent sur des mesurages effectués avec des appareils peu précis, tandis que d'autres disposent d'estimations beaucoup plus fiables des concentrations à l'adresse de domicile.

Pour la première fois, l'indication d'un lien entre la mortalité et une hausse de l'exposition prolongée à l'ozone pendant les mois d'été est jugée modérée, notamment car il existe peu d'études à ce sujet.

Tableau 12 : Risques de décès en cas d'exposition accrue prolongée à des polluants atmosphériques, par intervalle de 10 µg/m³ de PM10, de PM2.5 (Chen et Hoek, 2020) et de NO₂ et en cas d'exposition à l'ozone pendant les mois d'été (Huangfu et Atkinson, 2020).

Hausse de la mortalité en %	PM2.5 [par 10 µg/m ³]	PM10 [par 10 µg/m ³]	NO ₂ [par 10 µg/m ³]	Ozone ^a (<i>peak season</i>) [par 10 µg/m ³]
Mortalité due à une maladie	8 % (de 6 % à 9 %) 25 études	4 % (de 3 % à 6 %) 17 études	2 % (de 1 % à 4 %) 24 études ^b	1 % (de 0 % à 2 %) 7 études
Mortalité due à des affections cardiovasculaires	11 % (de 9 % à 14 %) 21 études	4 % (de -1 % à 10 %) 15 études	Non étudiée	Non étudiée
Mortalité due aux cardiopathies ischémiques (p. ex. infarctus)	16 % (de 10 % à 21 %) 22 études	6 % (de 1 % à 10 %) 13 études	Non étudiée	Non étudiée
Mortalité due à une attaque cérébrale	11 % (de 4 % à 18 %) 16 études	1 % (de -17 % à 21 %) 9 études	Non étudiée	Non étudiée
Mortalité due aux affections des voies respiratoires	10 % (de 3 % à 18 %) 17 études	12 % (de 6 % à 19 %) 13 études	3 % (de 1 % à 5 %) 15 études	2 % (de -1 % à 5 %) 4 études
Mortalité due à la BPCO	11 % (de 5 % à 17 %) 11 études	19 % (de -5 % à 49 %) 5 études	3 % (de 1 % à 4 %) 9 études	Non étudiée
Mortalité due à une inflammation des voies respiratoires inférieures (p. ex. pneumonie)	16 % (de 1 % à 34 %) 4 études	Non étudiée	6 % (de 2 % à 10 %) 5 études	Non étudiée
Mortalité due au cancer du poumon	12 % (de 7 % à 16 %) 15 études	8 % (de 4 % à 13 %) 13 études	Non étudiée	Non étudiée

Estimations du risque (intervalle de confiance de 95 %), nombre d'études prises en compte dans l'évaluation et indication d'effets nocifs (**en gras** = élevée, normal = modérée, en *italique* = faible, en rouge = hausse statistiquement insignifiante de l'estimation des effets).

^a Non représenté : le lien entre la moyenne annuelle de la concentration d'ozone et la mortalité totale, d'une part, et celle due à des affections des voies respiratoires, d'autre part, a été étudié en plus. Aucun lien n'a

été identifié (risque relatif [RR] de 0,97 pour un intervalle de confiance de 95 % : de 0,93 à 1,02 [9 études] ; RR de 0,99 pour un intervalle de confiance de 95 % : de 0,89 à 1,11 [4 études]). L'indication d'un lien de cause à effet est jugée faible.

^b Il y a en fait 23 études, mais l'une d'entre elles indiquait deux cohortes différentes pour l'estimation des effets.

Exemple d'interprétation pour la mortalité due à une maladie en relation avec les PM2.5 : une augmentation de l'exposition à long terme de 10 µg/m³ s'accompagnait d'une hausse du risque de décès de 8 % (intervalle de confiance de 6 % à 9 % ; en d'autres termes, l'estimation effective pouvait se situer entre 6 % et 9 %). L'analyse comprenait 25 études dont la qualité et, partant, l'indication d'un lien ont été considérées comme élevées.

Mortalité due à la BPCO en relation avec les PM10 : une augmentation de l'exposition à long terme de 10 µg/m³ s'accompagnait d'une hausse (non significative) du risque de décéder d'une BPCO de 19 % (intervalle de confiance compris entre -5 % et 49 %). L'analyse comprenait cinq études, dont la qualité et, partant, l'indication d'un lien ont été considérées comme modérées.

Les tableaux 13 et 14 répertorient les résultats des examens systématiques concernant les conséquences d'une hausse à court terme des concentrations de polluants atmosphériques (Orellano et al., 2021 ; Orellano et al., 2020 ; Zheng et al., 2021).

Tableau 13 : Estimations cumulées des risques de décès en cas de hausse à court terme (jours, semaines) des concentrations de polluants atmosphériques ; écart de concentration de 10 µg/m³ de PM10, de PM2.5 et de NO₂, concentration d'ozone pendant les mois d'été et SO₂

Mortalité	PM2.5 24 h	PM10 24 h	NO ₂ ^a 24 h	Ozone 8 / 24 h	SO ₂ ^b 24 h
Due à une maladie ou toutes les causes	0,65 % (de 0,44 % à 0,86 %) 29 études	0,41 % (de 0,34 % à 0,49 %) 66 études	0,72 % (de 0,59 % à 0,85 %) 54 études	0,43 % (de 0,34 % à 0,52 %) 48 études	0,59 % (de 0,46 % à 0,71 %) 36 études
Maladies cardiovasculaires	0,92 % (de 0,61 % à 1,23 %) 28 études	0,60 % (de 0,44 % à 0,77 %) 44 études	Non étudiée	Non étudiée	Non étudiée
Attaque cérébrale	0,72 % (de 0,12 % à 1,32 %) 7 études	0,44 % (de 0,22 % à 0,66 %) 20 études	Non étudiée	Non étudiée	Non étudiée
Affections des voies respiratoires	0,73 % (de 0,29 % à 1,16 %) 20 études	0,91 % (de 0,63 % à 1,19 %) 41 études	Non étudiée	Non étudiée	0,67 % (de 0,25 % à 1,09 %) 23 études

Estimations du risque (intervalle de confiance de 95 %), nombre d'études prises en compte dans l'évaluation et indication d'effets nocifs (**en gras** = élevée, normal = modérée).

^a Orellano et al. (2020) ; toutes les indications de lien ont été considérées comme élevées. Non représenté : en outre, l'indication d'un lien entre les concentrations à très court terme de NO₂, soit 1 heure au plus (moyenne horaire la plus élevée d'une journée), et la mortalité totale a été jugée modérée : dix études, 0,24 % (de -0,05 % à 0,53 %).

^b Non représenté : indication modérée d'un lien entre la concentration à court terme de SO₂ (1 heure au plus) et la mortalité totale ; quatre études, 0,16 % (de -0,7 % à -1,02 %) par hausse de 10 µg/m³ de SO₂ pendant 1 heure au plus. Indication élevée d'un lien entre la concentration à court terme de SO₂ et la mortalité due aux affections des voies respiratoires ; trois études, 0,52 % (de 0,13 % à 0,91 %) par hausse de 10 µg/m³ de SO₂ pendant 1 heure au plus (Orellano et al., 2021).

Tableau 14 : Estimations cumulées d'une mortalité accrue liée à une hausse à court terme des concentrations de polluants atmosphériques ; écart de concentration de 10 µg/m³ pour le NO₂, l'ozone et le SO₂ (Zheng et al., 2021) et écart de concentration de CO de 1 mg/m³ (Lee et al., 2020)

Conséquences pour la santé	PM10 / PM2.5	NO ₂ (24 h)	Ozone (8 / 24 h) ^a	SO ₂ (24 h) ^a	CO [mg/m ³]
Hospitalisations et consultations d'urgence pour cause d'asthme	Non étudiées	1,4 % (de 0,8 % à 1,2 %) 22 études	0,8 % (de 0,5 % à 1,1 %) 27 études	1,0 % (de 0,1 % à 2,0 %) 23 études	Non étudiées
Infarctus (total)	Non étudiées	Non étudiées	Non étudiées	Non étudiées	5,2 % (de 1,7 % à 8,9 %) 26 études

Estimation du risque (intervalle de confiance de 95 %), nombre d'études prises en compte dans l'évaluation et indication d'effets nocifs (**en gras** = élevée, normal = modérée).

^a Non représenté : lien avec une hausse à court terme de la concentration d'ozone (1 heure au plus) : RR de 1,7 % (de -2,7 % à 6,3 %, trois études) par 10 µg/m³ ; lien avec une hausse à court terme de la concentration de NO₂ (1 heure au plus) : RR de -0,01 % (de -4,3% à 3,3 %, cinq études) ; lien avec une hausse à court terme de la concentration de SO₂ (1 heure au plus) : RR de 0,3 % (de -0,8 % à 1,4 % ; quatre études).

Annexe B – Sources de polluants atmosphériques

D'après les données de l'OFEV sur les émissions en 2021, celles-ci sont générées à des degrés divers par les ménages, les transports, l'industrie, l'agriculture et la sylviculture. Plusieurs catégories d'émetteurs contribuent à certains processus à fortes émissions. Par exemple, tant les ménages que l'industrie, l'artisanat et l'agriculture brûlent du combustible bois (OFEV, 2023).

Tableau 15 : Part des émissions provenant de différentes sources en 2021 d'après le système d'information de l'OFEV sur les émissions en Suisse (EMIS), agrégation territoriale (en gras : principales catégories d'émetteurs)

Polluant	Transports	Ménages	Industrie et artisanat	Agriculture et sylviculture	Sources et processus principaux
Poussières fines primaires (PM10)	31 %	16 %	37 %	16 %	Chantiers, abrasion liée aux transports
Poussières fines primaires (PM2.5)	24 %	31 %	37 %	8 %	Combustion du bois
Oxyde d'azote (NO_x)^{a, b}	56 %	9 %	24 %	10 %	Moteurs diesel
Dioxyde de soufre (SO₂)^b	9 %	15 %	75 %	-	Industrie extractive
Monoxyde de carbone (CO)	43 %	23 %	24 %	10 %	Moteurs des véhicules
Ammoniac (NH₃)^b	2 %	2 %	2 %	94 %	Élevage
Suie (BC)	23 %	51 %	15 %	11 %	Combustion du bois, moteurs diesel
Benzo[a]pyrène (BaP)	12 %	62 %	16 %	10 %	Combustion du bois
Plomb (Pb)	23 %	55 %	22 %	-	
Cadmium (Cd)	17 %	39 %	42 %	2 %	Traitement des déchets
Mercuré (Hg)	5 %	20 %	75 %	1 %	Traitement des déchets

^a Contribue en tant que gaz précurseur à la formation d'ozone.

^b Contribue en tant que gaz précurseur aux poussières fines secondaires PM10 et PM2.5.

Annexe C – Informations complémentaires sur les PM10 et PM2.5

C.1 Composition et sources des poussières fines PM10 et PM2.5 en Suisse

Les poussières fines sont constituées d'un mélange complexe de substances chimiques très diverses. Elles peuvent être émises directement par une source (poussières fines primaires) ou se former dans l'atmosphère à partir de gaz précurseurs (poussières fines secondaires). Par conséquent, les poussières fines primaires ont une grande variabilité spatiale, tandis que les composantes des poussières fines secondaires se répartissent dans l'espace de manière plutôt homogène.

PM10

En Suisse, les PM10 se composent à peu près à parts égales de poussières fines primaires et secondaires, dont la proportion varie légèrement en fonction du type de lieu. Les composés organiques en représentent la plus grande part. Issus de plusieurs sources, ils se répartissent de manière quasiment égale entre une formation primaire et secondaire. Leur concentration a reculé ces 20 dernières années. Ces composés organiques constituent désormais 35 % à 40 % de la masse de poussières fines.

Les principales sources primaires de composés organiques sont les chauffages à bois, l'abrasion des pneumatiques et les émissions de combustion liées aux transports (OFEV, 2023). On trouve également des émissions liées à la cuisson des aliments et des composantes végétales dans les PM10. Dans les poussières fines organiques secondaires, les proportions de précurseurs biogènes et anthropogènes sont sensiblement similaires. Les premiers correspondent surtout aux émissions de terpène et d'isoprène des plantes, tandis que les seconds proviennent essentiellement des émissions gazeuses des chauffages à bois et des transports. Composants anorganiques, le nitrate et le sulfate se forment presque exclusivement de manière secondaire suite à l'oxydation du NO_x et du SO₂. Par réaction avec l'ammoniac, ils engendrent plusieurs sels dont les principales composantes sont le nitrate, le sulfate et l'ammonium. Les substances anorganiques dans l'atmosphère ont globalement diminué ces 20 dernières années. Leur part dans les PM10 représente désormais environ 30 %. Par exemple, la poussière minérale, les éléments traces, la suie et l'eau contribuent dans une moindre mesure aux PM10 (voir Hüglin et Grange, 2021).

Les transports demeurent la principale source de PM10, mais les émissions des moteurs dues à la combustion jouent désormais un rôle moins important que l'abrasion et la resuspension. Dans les régions comprenant de nombreux chauffages à bois, les émissions de ces derniers contribuent fortement à la charge en PM10 en hiver.

PM2.5

En Suisse, les transports et les chauffages à bois sont les principales sources de poussières fines primaires PM2.5, puisqu'ils en produisent près d'un quart chacun. Les fractions de poussières fines formées de manière secondaire à partir des gaz précurseurs jouent un rôle encore plus important que dans les PM10 et représentent plus de la moitié des PM2.5.

Composées essentiellement de particules fines, les poussières fines secondaires et la suie se retrouvent presque intégralement dans les PM2.5, qui comprennent en majeure partie des composés organiques (entre 30 % et 50 %). Les composés anorganiques (nitrate, sulfate et ammonium) constituent eux aussi près d'un tiers des PM2.5. La poussière minérale et les particules d'abrasion liées aux transports et à la construction jouent un rôle moins important dans les PM2.5 que dans les PM10. Par exemple, la poussière minérale, les éléments traces, la suie et l'eau apportent des contributions plus faibles (Daellenbach et al., 2020 ; Grange et al., 2021).

C.2 PM10 : rapport entre le nombre de moyennes journalières > 45 µg/m³ et les moyennes annuelles

Les figures 27 et 28 se fondent sur les données NABEL et illustrent la situation dans différents sites en Suisse. Lorsque plusieurs stations NABEL se situent dans le même type de lieu, leur moyenne est calculée (*urbain, trafic* : Berne-Bollwerk et Lausanne-César-Roux ; *suburbain* : Bâle-Binningen et Dübendorf-Empa ; *rural, nord* : Payerne et Tänikon ; *Préalpes* : Chaumont et Rigi-Seebodenalp).

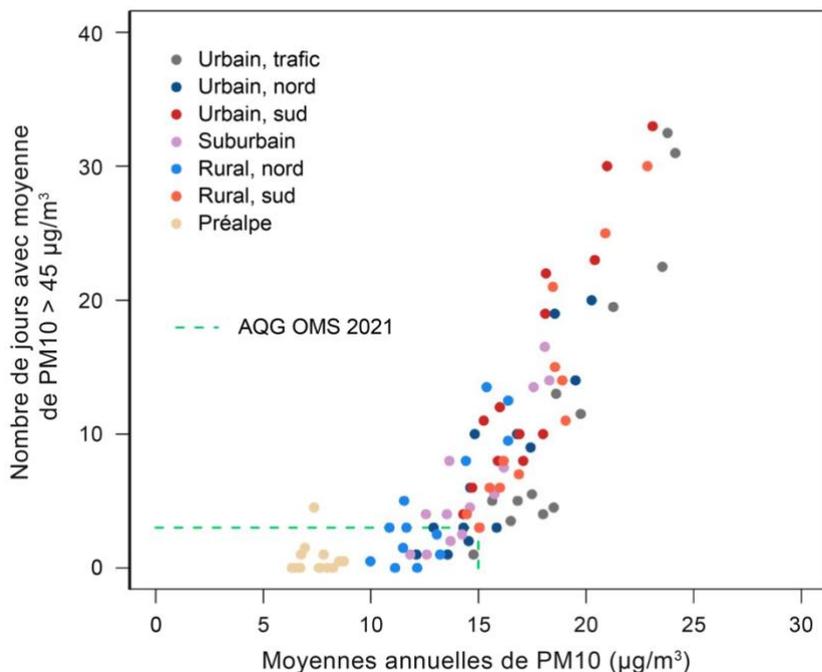


Figure 27 : Diagramme de dispersion des moyennes annuelles des PM10 et du nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures (45 µg/m³) entre 2010 et 2022, par site caractéristique

Les lignes pointillées vertes indiquent la plage dans laquelle les moyennes journalière et annuelle recommandées par l'OMS sont respectées. Il s'agit des dépassements maximums autorisés (99^e percentile sur 365 jours) de la moyenne journalière de 45 µg/m³ et de la moyenne annuelle de 15 µg/m³.

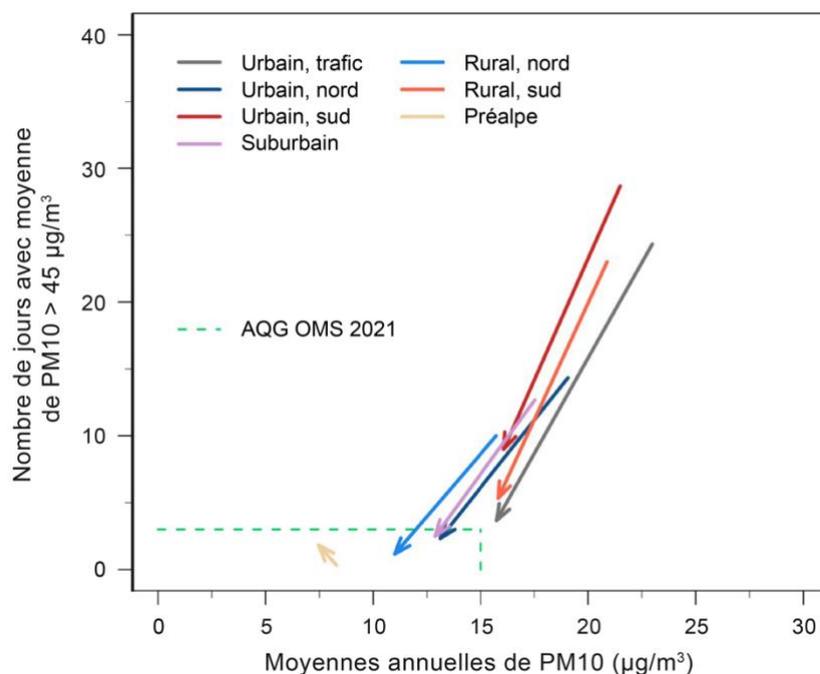


Figure 28 : Rapport entre les moyennes annuelles de PM10 et le nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$) entre 2010 et 2022, par site caractéristique

Les flèches commencent à la moyenne de la période 2010-2002 et se terminent à la moyenne de la période 2020-2022. Les lignes pointillées vertes indiquent la plage dans laquelle les moyennes journalière et annuelle recommandées par l'OMS sont respectées. Il s'agit des dépassements maximums autorisés (99^e percentile sur 365 jours) de la moyenne journalière de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de la moyenne annuelle de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les points de la figure 27 présentent une forte corrélation et les flèches de la figure 28 pointent vers le coin supérieur droit de la plage représentée par les lignes pointillées vertes. En d'autres termes, lorsque la concentration de polluants est inférieure à la moyenne annuelle, le nombre maximum de dépassements autorisés de la moyenne journalière est en général respecté. Il est un peu plus difficile de se conformer à cette dernière. En ce qui concerne les PM10, l'objectif est déjà atteint pour les Préalpes, les milieux ruraux et urbains nord et le milieu suburbain. Les niveaux recommandés par l'OMS sont encore dépassés dans les milieux urbains à fort trafic et au sud des Alpes. Les tempêtes de sable venant du Sahara peuvent également jouer un rôle dans les dépassements de la moyenne journalière des PM10, mais elles ne peuvent pas être influencées.

C.3 PM2.5 : rapport entre le nombre de moyennes journalières > 15 µg/m³ et les moyennes annuelles

Les figures 29 et 30 se fondent sur les données NABEL et illustrent la situation dans différents sites en Suisse. Lorsque plusieurs stations NABEL se situent dans le même type de lieu, leur moyenne est calculée (*urbain, trafic* : Berne-Bollwerk et Lausanne-César-Roux ; *suburbain* : Bâle-Binningen et Dübendorf-Empa ; *rural, nord* : Payerne et Tänikon ; *Préalpes* : Chaumont et Rigi-Seebodenalp).

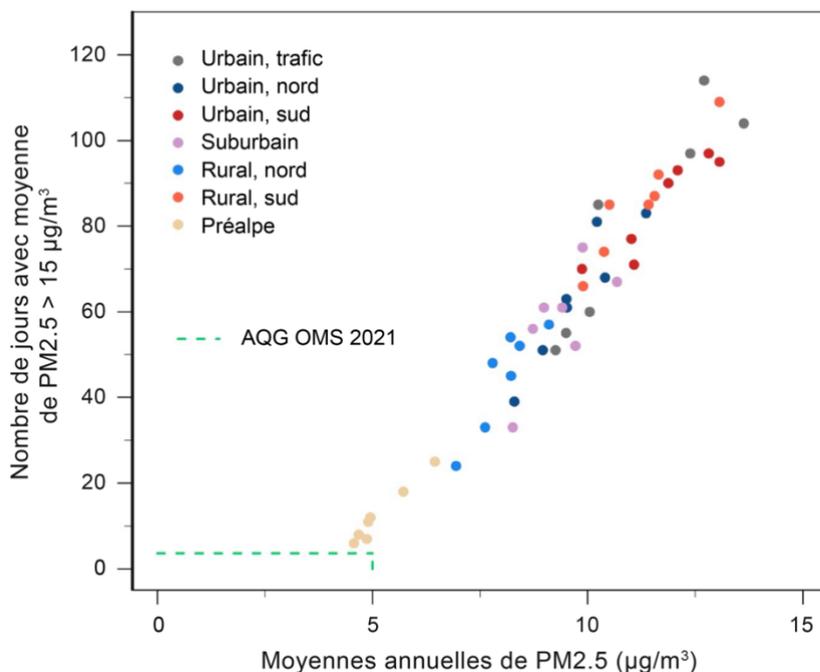


Figure 29 : Diagramme de dispersion des moyennes annuelles des PM2.5 et du nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures (15 µg/m³) entre 2016 et 2022, par site caractéristique

Les lignes pointillées vertes indiquent la plage dans laquelle les moyennes journalière et annuelle recommandées par l'OMS sont respectées. Il s'agit des dépassements maximums autorisés (99^e percentile sur 365 jours) de la moyenne journalière de 15 µg/m³ et de la moyenne annuelle de 5 µg/m³.

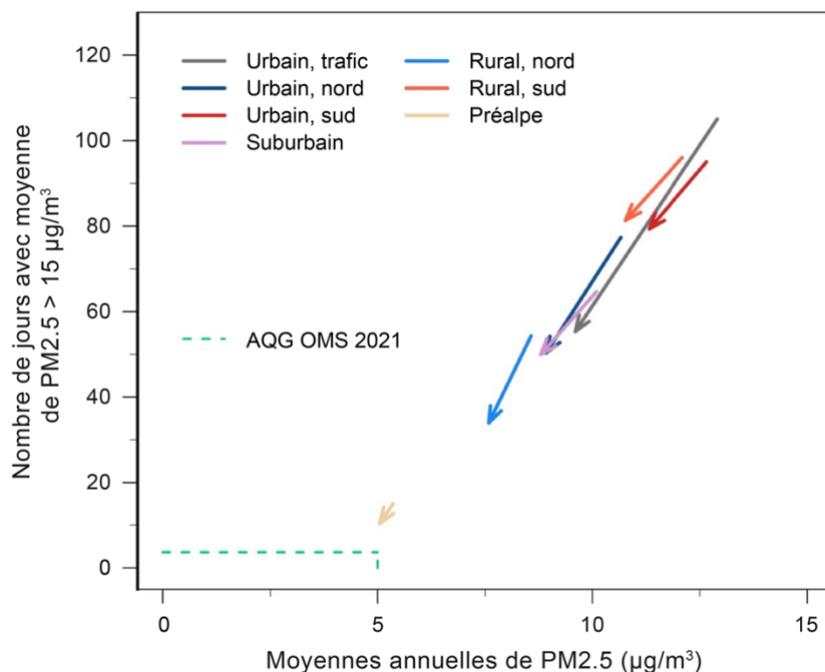


Figure 30 : Rapport entre les moyennes annuelles de PM2.5 et le nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) entre 2016 et 2022, par site caractéristique. Les flèches commencent à la moyenne de la période 2016–2019 et se terminent à la moyenne de la période 2020–2022.

Les lignes pointillées vertes indiquent la plage dans laquelle les moyennes journalière et annuelle recommandées par l'OMS sont respectées. Il s'agit des dépassements maximums autorisés (99^e percentile sur 365 jours) de la moyenne journalière de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de la moyenne annuelle de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les points de la figure 29 présentent une forte corrélation et les flèches de la figure 30 pointent vers le coin supérieur droit de la plage représentée par les lignes pointillées vertes. En d'autres termes, les deux critères sont équivalents dans une large mesure. Comme pour les PM10, la moyenne journalière recommandée par l'OMS tend à être un peu plus stricte que la moyenne annuelle. Les niveaux recommandés par l'OMS pour les PM2.5 sont encore nettement dépassés.

C.4 Mesurage des PM2.5

Dans les cantons, les moyennes journalières applicables aux PM2.5 sont déjà mesurées et évaluées parallèlement aux mesurages des PM10 dans de nombreux sites. Jugée raisonnable, la charge supplémentaire pour l'analyse ne constitue pas un obstacle technique ou financier majeur. En termes d'exécution, les cantons peuvent donc déjà mettre en œuvre une valeur limite journalière moyenne pour les PM2.5 avec les niveaux de concentration actuels. Si ceux-ci continuent de baisser, il faudra apporter une attention particulière à l'assurance-qualité. Les PM2.5 présentant une répartition spatiale très homogène, peu de mesures supplémentaires seront nécessaires en plus de celles du réseau NABEL pour estimer la concentration de PM2.5 à une large échelle.

Annexe D – Valeurs limites destinées à protéger la végétation dans les écosystèmes proches de l'état naturel

D.1 Ozone (O₃)

Dans le cadre de la Convention CEE-ONU sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CLRTAP), des niveaux critiques (*critical levels*) ont été fixés sous la forme de valeurs AOT40 (*accumulated exposure over a threshold of 40 ppb*) basées sur la concentration et de valeurs POD_Y (*phytotoxic ozone dose*) basées sur les flux d'ozone pour protéger la végétation des dommages de l'ozone (CEE-ONU, 2017).

Du point de vue scientifique, les valeurs POD_Y sont considérées comme plus pertinentes sur le plan biologique, car l'effet nocif de l'ozone est mis en relation avec son flux qui pénètre par les stomates des plantes et détermine la dose d'ozone phytotoxique. En l'espèce, un seuil Y spécifique à la végétation tient également compte de la concentration d'ozone qui ne provoque aucun effet nuisible en raison de la capacité de détoxification des plantes. Le calcul des flux d'ozone doit prendre en considération les facteurs spécifiques à la plante et plusieurs facteurs environnementaux (phénologie, luminosité, déficit de pression de vapeur, température et sécheresse du sol). Ces relevés complexes sont réalisables dans le cadre de projets, mais pas en permanence dans les réseaux existants de mesure de la qualité de l'air.

À l'inverse, les valeurs AOT40 mettent en relation la concentration d'ozone dans l'air ambiant accumulée pendant la période de végétation qui dépasse un seuil de 40 ppb et les effets observés de l'ozone sur les plantes.

Les niveaux critiques exprimés comme valeurs AOT40 ou POD_Y ne conviennent pas pour figurer comme VLI dans l'OPair. Dans le cadre de la CLRTAP, ils servent plutôt de valeurs cibles axées sur les résultats pour modéliser à l'échelle européenne la réduction nécessaire des précurseurs de l'ozone que sont les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV ; modélisation d'évaluation intégrée ou *integrated assessment modelling*). Des négociations sont en cours dans le cadre de la CLRTAP pour transposer la nécessité de réduire ces précurseurs en Europe dans des dispositions nationales visant à diminuer les émissions et atteindre ainsi les niveaux critiques. Pour protéger la végétation, la valeur AOT40 est également définie comme objectif à long terme dans la directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur en Europe (Parlement européen et Conseil de l'UE, 2008).

Les dépassements des niveaux critiques d'ozone (AOT40, POD_Y) sont modélisés à l'échelle européenne au sens d'une très vaste évaluation des risques dans le programme de coopération pour la surveillance continue et l'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe (*European Monitoring and Evaluation Programme*, EMEP) et documentés dans des rapports annuels par les Parties à la CLRTAP (EMEP, 2022).

Des analyses approfondies seraient nécessaires, notamment dans le cas des valeurs POD_Y, pour évaluer la relation quantitative entre les dépassements des niveaux d'ozone nouvellement recommandés par l'OMS en 2021 (moyenne saisonnière des moyennes journalières maximales d'ozone de 60 µg/m³ par 8 heures) et les dépassements des niveaux critiques d'ozone spécifiques à la végétation visés dans la CLRTAP (AOT40, POD_Y). On peut toutefois partir du principe qu'une réduction des émissions qui contribuerait au respect de la moyenne de 60 µg/m³ proposée par l'OMS pour la saison estivale (*peak season*) permettrait également de se rapprocher de l'objectif visé par les valeurs AOT40

ou POD_Y spécifiques à la végétation. Selon la figure 31, la valeur AOT40 applicable aux écosystèmes forestiers n'est plus dépassée lorsque la concentration d'ozone de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recommandée par l'OMS pour les mois d'été est respectée.

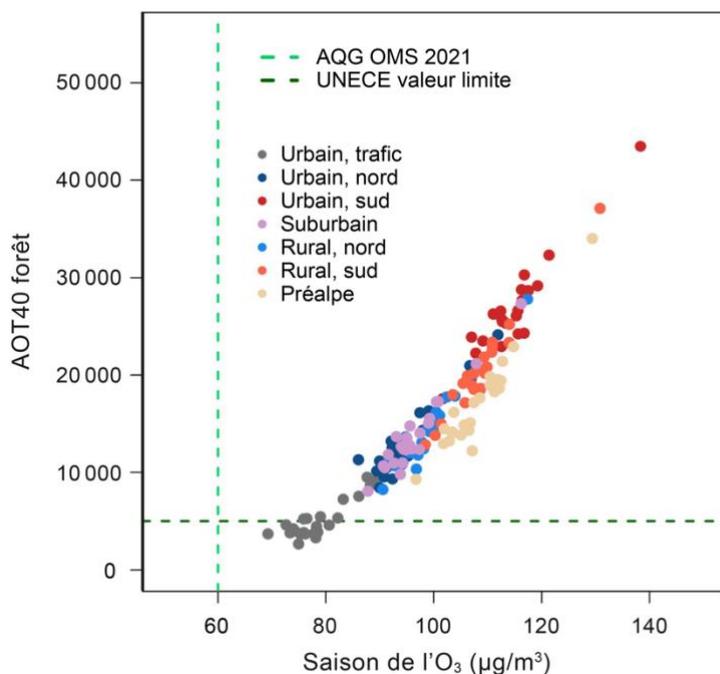


Figure 31 : Comparaison entre les niveaux d'ozone de la saison estivale (selon l'OMS) de 2000 à 2022 et la valeur AOT40 (*accumulated exposure over a threshold of 40 ppb*) pour les forêts, par site caractéristique

La ligne pointillée en vert foncé indique la plage respectant la valeur AOT40 basée sur la végétation et celle en vert clair, la plage concernant la valeur d'ozone à long terme de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant la saison estivale.

D.2 Dioxyde d'azote (NO_2)

Les VLI plus basses recommandées par la CFHA pour le NO_2 contribuent également à protéger les écosystèmes sensibles proches de l'état naturel qui sont menacés par des apports accrus d'azote dans l'atmosphère (oxydes d'azote, ammoniac et leurs produits de réaction) et par les effets directs des NO_x . On peut partir du principe que le respect de la moyenne annuelle de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ proposée pour le NO_2 protégera également la végétation contre les effets directs des oxydes d'azote et que les niveaux critiques fixés pour les NO_x dans le cadre de la CLRTAP et par l'OMS pour protéger la végétation ne seront plus dépassés (CEE-ONU, 2017 ; OMS, 2000).

D.3 Dioxyde de soufre (SO₂)

Les concentrations de SO₂ au-delà desquelles on observe des effets nocifs pour la végétation de plusieurs écosystèmes ont été évaluées par des groupes d'experts dans le cadre de la CLRTAP, sur la base d'études de terrain et d'expérimentations, et définies comme niveaux critiques (ou concentrations critiques) dès 1993. Elles sont récapitulées dans le tableau 16 ci-après (CEE-ONU, 2017). Pour les écosystèmes significatifs comme les forêts et d'autres écosystèmes proches de l'état naturel qui servent également de milieu naturel au lichen, le niveau critique de SO₂ s'inscrit à 20 µg/m³ (moyenne annuelle et moyenne du semestre d'hiver).

Tableau 16 : Niveaux de concentration critiques de SO₂, par type de végétation

Type de végétation	Niveau critique de SO ₂ [µg/m ³]	Période
Végétaux agricoles	30	Moyenne annuelle et moyenne du semestre d'hiver d'octobre à mars
Écosystèmes forestiers	20	Moyenne annuelle et moyenne du semestre d'hiver d'octobre à mars
Écosystèmes proches de l'état naturel (p. e. hauts-marais, bas-marais)	20	Moyenne annuelle et moyenne du semestre d'hiver d'octobre à mars
Lichens	10	Moyenne annuelle

Étant donné que la protection de l'environnement revêt également une importance pour la santé humaine, le Bureau régional de l'OMS pour l'Europe a inscrit en 2000 les concentrations critiques de SO₂ dans les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air en Europe et les a approuvées (OMS, 2000). De plus, la concentration critique de SO₂ de 20 µg/m³ (moyenne annuelle et moyenne du semestre d'hiver d'octobre à mars) a été reprise en 1999 comme valeur limite pour la protection des écosystèmes dans la directive 1999/30/CE du Conseil du 22 avril 1999 relative à la fixation de valeurs limites pour le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant (Conseil de l'UE, 1999). La valeur limite de SO₂ susmentionnée pour la protection de la végétation a été conservée telle quelle dans la directive 2008/50/CE (Parlement européen et Conseil de l'UE, 2008). Les moyennes annuelles présentées à la figure 19 sont sensiblement inférieures à 10 µg/m³ ; on peut donc en conclure que les valeurs ne dépassent pas 20 µg/m³ pendant le semestre d'hiver.

Annexe E – Informations complémentaires sur l'ozone : comparabilité des différentes valeurs d'évaluation de l'OMS et de la Suisse

Les figures se fondent sur les données NABEL et illustrent la situation dans différents sites en Suisse. Lorsque plusieurs stations NABEL se situent dans le même type de lieu, leur moyenne est calculée (*urbain, trafic* : Berne-Bollwerk et Lausanne-César-Roux ; *suburbain* : Bâle-Binningen et Dübendorf-Empa ; *rural, nord* : Payerne et Tänikon ; *Préalpes* : Chaumont et Rigi-Seebodenalp).

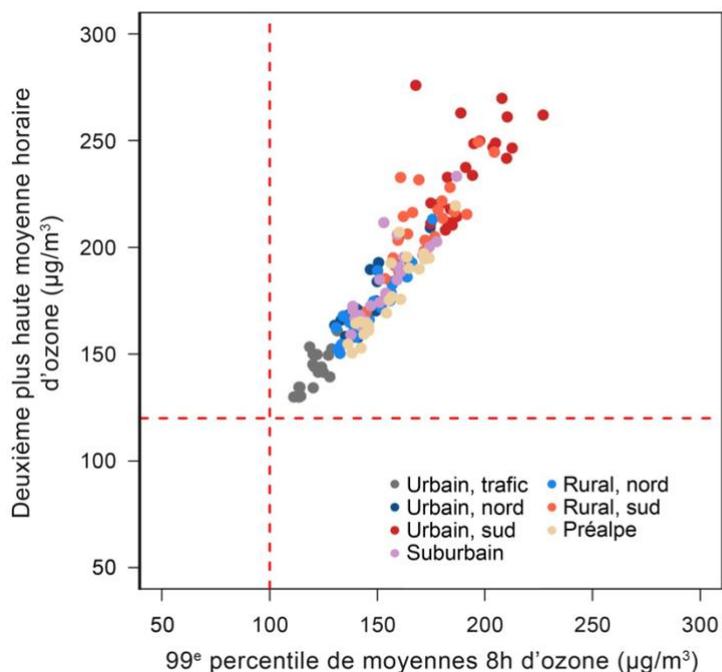


Figure 32 : 99^e percentile de la moyenne journalière maximale par 8 heures (niveau recommandé par les AQG de l'OMS) par rapport à la deuxième moyenne horaire la plus élevée de l'année pour l'ozone (O₃ ; VLI de l'OPair), entre 2000 et 2022, par site caractéristique

Les lignes pointillées en rouge indiquent la plage dans laquelle la moyenne par 8 heures de l'OMS et la VLI horaire de l'OPair sont respectées. Il s'agit des dépassements maximums autorisés (99^e percentile sur 365 jours) de la moyenne par 8 heures de 100 µg/m³ et de la deuxième moyenne horaire la plus élevée, qui ne doit pas être supérieure à 120 µg/m³.

Selon l'OPair, la moyenne horaire de l'ozone peut être supérieure à 120 µg/m³ une fois par an. La deuxième moyenne horaire la plus élevée doit donc être inférieure à 120 µg/m³.

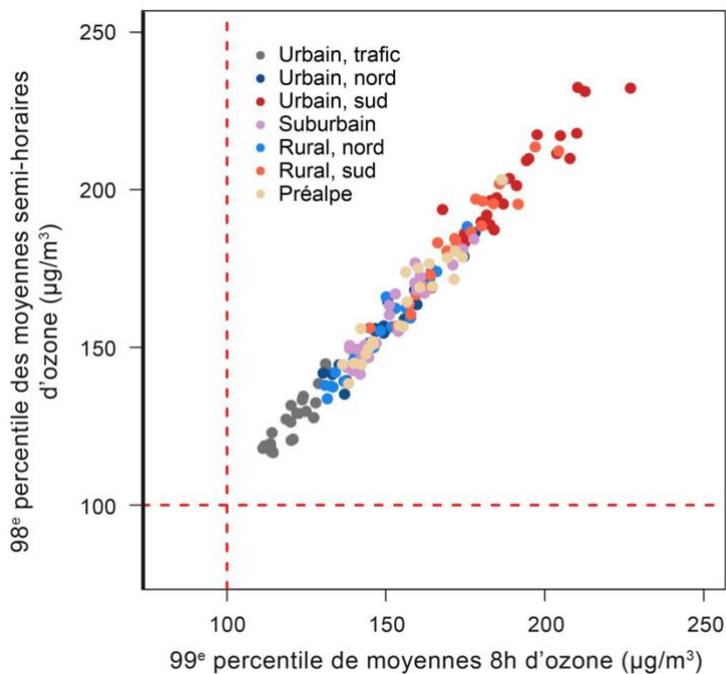


Figure 33 : 99^e percentile de la moyenne journalière maximale par 8 heures (niveau 2021 recommandé par l'OMS) par rapport au 98^e percentile de la moyenne semi-horaire d'un mois (VLI de l'OPair applicable à l'O₃), entre 2000 et 2022, par site caractéristique

Les lignes pointillées en rouge indiquent la plage dans laquelle la moyenne par 8 heures de l'OMS et le 98^e percentile des moyennes semi-horaires d'un mois (VLI de l'OPair) sont respectés. Il s'agit des dépassements maximums autorisés (99^e percentile sur 365 jours) de la moyenne par 8 heures de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et du 98^e percentile des moyennes semi-horaires d'un mois, qui ne doit pas être supérieur à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

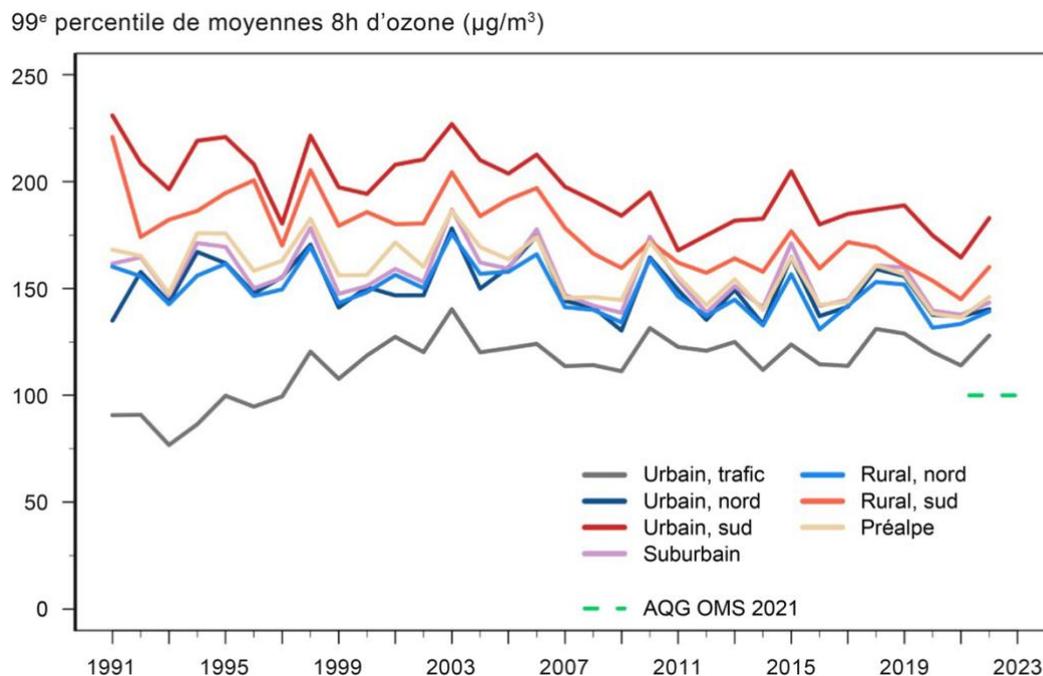


Figure 34 : Évolution du 99^e percentile de la moyenne journalière maximale d'O₃ par 8 heures (niveau recommandé par les AQG de l'OMS) entre 1991 et 2022, par site caractéristique

Annexe F – Informations complémentaires sur le NO₂

F.1 95^e percentile des moyennes semi-horaires

Les figures se fondent sur les données NABEL et illustrent la situation dans différents sites en Suisse. Lorsque plusieurs stations NABEL se situent dans le même type de lieu, leur moyenne est calculée (*urbain, trafic* : Berne-Bollwerk et Lausanne-César-Roux ; *suburbain* : Bâle-Binningen et Dübendorf-Empa ; *rural, nord* : Payerne et Tänikon ; *Préalpes* : Chaumont et Rigi-Seebodenalp).

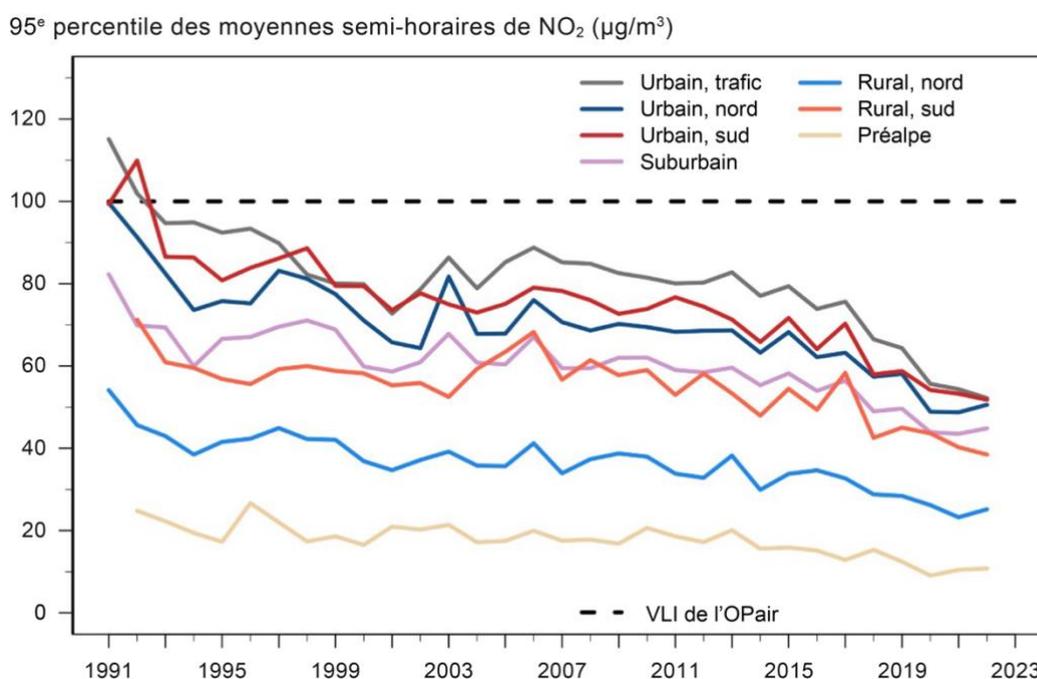


Figure 35 : Évolution du 95^e percentile des moyennes semi-horaires de NO₂ entre 1991 et 2022, par site caractéristique

La ligne pointillée correspond à la VLI de l'OPair.

F.2 Rapport entre les valeurs à court et à long termes

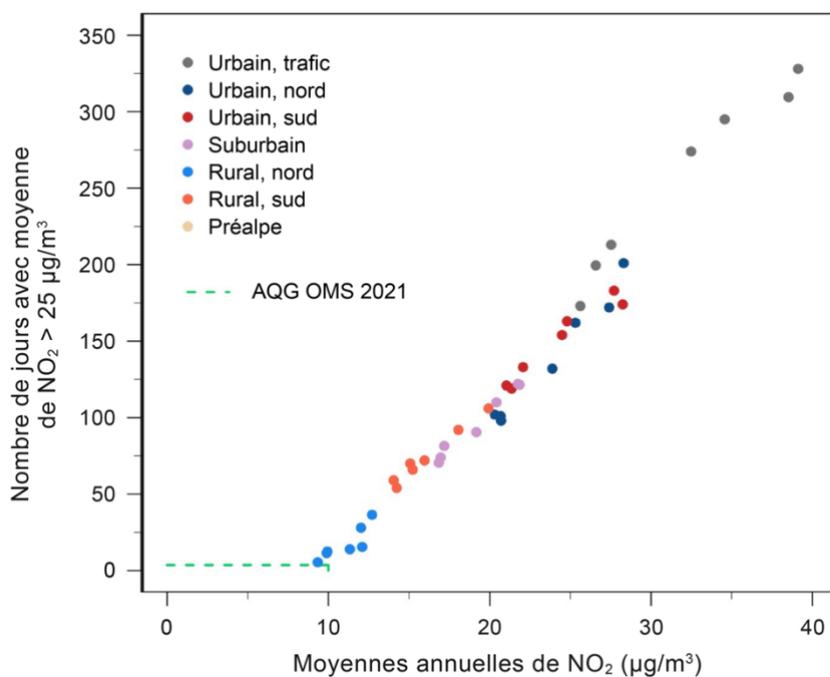


Figure 36 : Diagramme de dispersion des moyennes annuelles de NO₂ et du nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures (25 µg/m³ dans les AQG 2021 de l'OMS) entre 2016 et 2021, par site caractéristique

Les lignes pointillées vertes (trois dépassements de la valeur journalière de 25 µg/m³ et moyenne annuelle de 10 µg/m³) indiquent la plage dans laquelle les moyennes journalière et annuelle recommandées par l'OMS sont respectées.

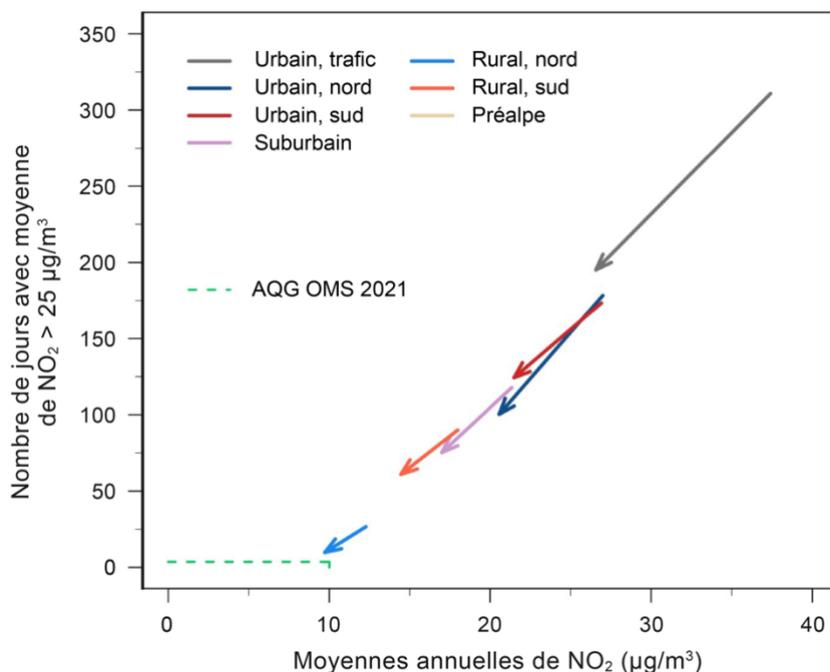


Figure 37 : Rapport entre les moyennes annuelles de NO₂ et le nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures (25 µg/m³ dans les AQG 2021 de l'OMS) entre 2016 et 2021, par site caractéristique (les flèches commencent à la moyenne de la période 2016–2018 et se terminent à la moyenne de la période 2019–2021)

Les lignes pointillées vertes (trois dépassements de la valeur journalière de 25 µg/m³ et moyenne annuelle de 10 µg/m³) indiquent la plage ciblée dans laquelle les moyennes journalière et annuelle recommandées par l'OMS sont respectées.

Les points de la figure 36 présentent une forte corrélation et les flèches de la figure 37 pointent vers le coin supérieur droit de la plage représentée par les lignes pointillées vertes. En d'autres termes, ces deux critères sont équivalents dans une large mesure. La moyenne journalière recommandée par l'OMS pour le NO₂ tend à être un peu plus stricte que la moyenne annuelle, en particulier en milieu rural (flèche orange). Les niveaux recommandés par l'OMS pour le NO₂ sont encore nettement dépassés, sauf dans les milieux ruraux au nord des Alpes et dans les Préalpes.

Annexe G – Informations complémentaires sur le SO₂

95^e percentile des moyennes semi-horaires d'ozone (µg/m³)

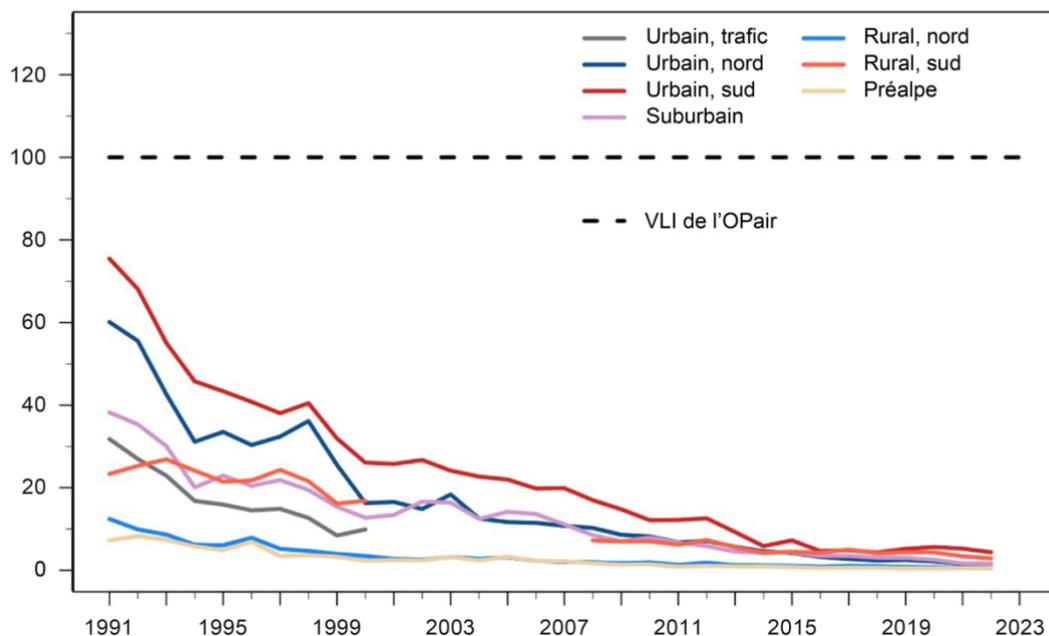


Figure 38 : Évolution du 95^e percentile des moyennes semi-horaires de SO₂ d'une année, entre 1991 et 2022, par site caractéristique

La figure 38 indique que la valeur à court terme du 95^e percentile des moyennes semi-horaires d'une année est respectée depuis 30 ans. Les autres VLI destinées à évaluer la qualité de l'air en fonction des immissions en Suisse sont donc suffisantes.

Annexe H – Informations complémentaires sur les HAP

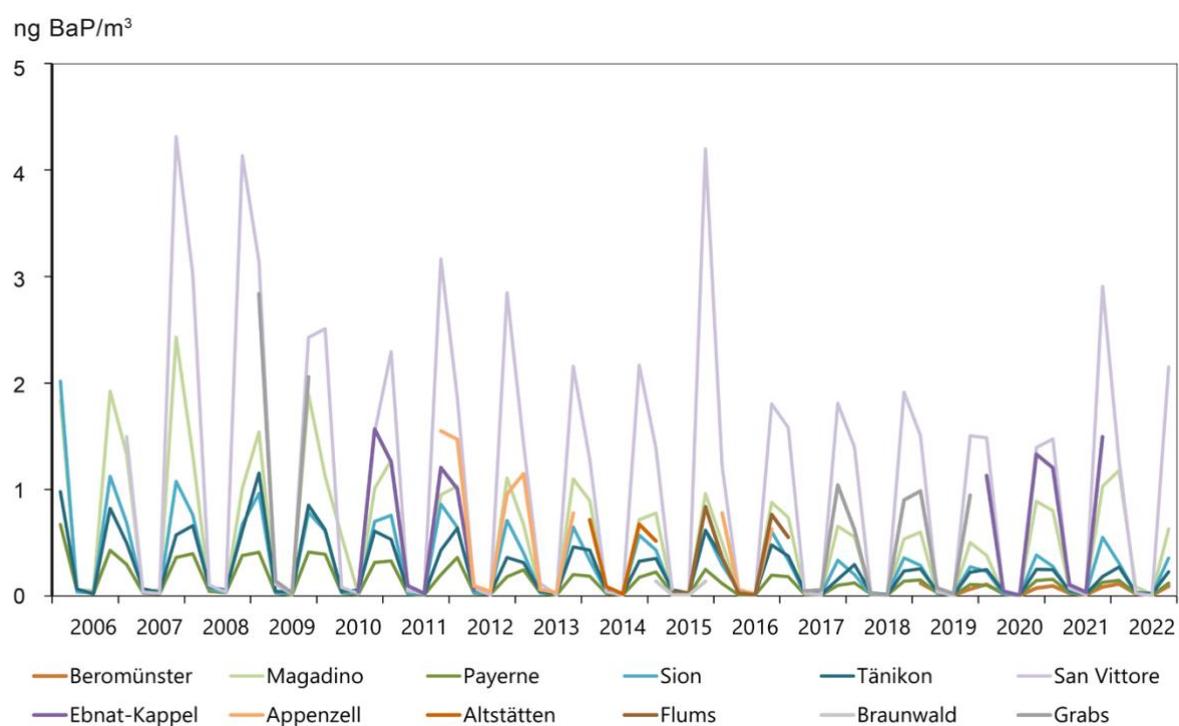
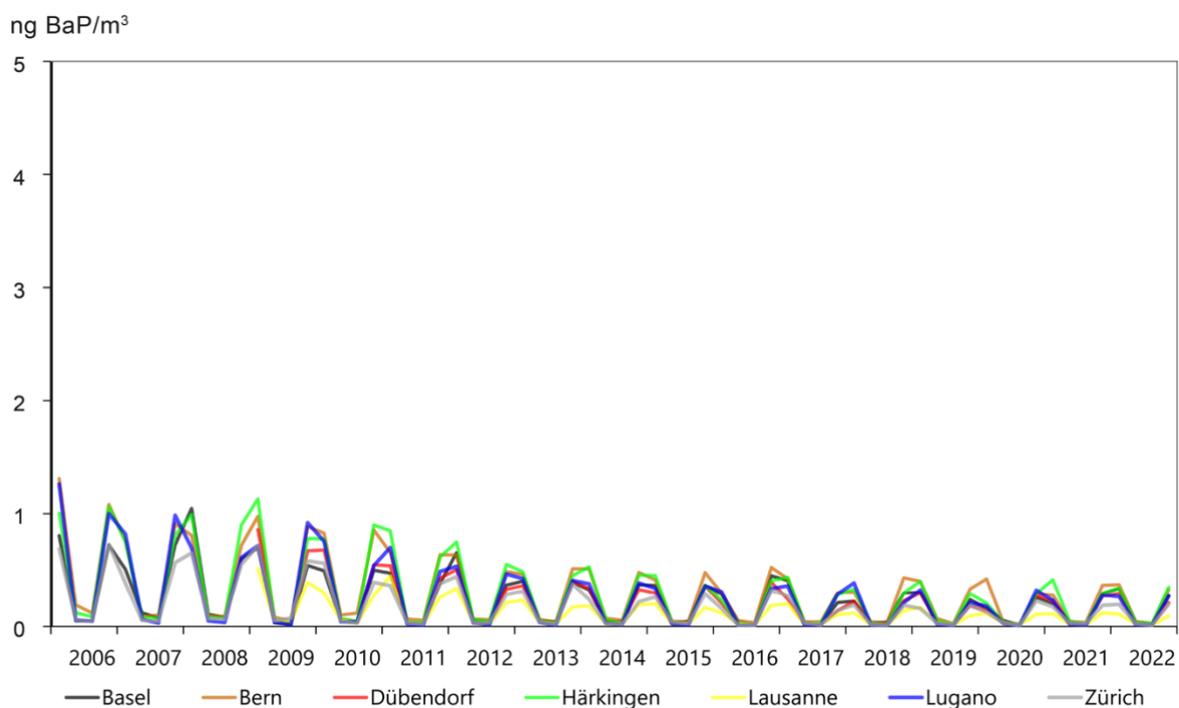


Figure 39 : Valeurs trimestrielles des concentrations de benzo[a]pyrène dans les PM10 entre 2006 et 2020. En haut : stations urbaines, suburbaines et lieux à fort trafic ; en bas : stations rurales (Fischer et Hüglin, 2023)

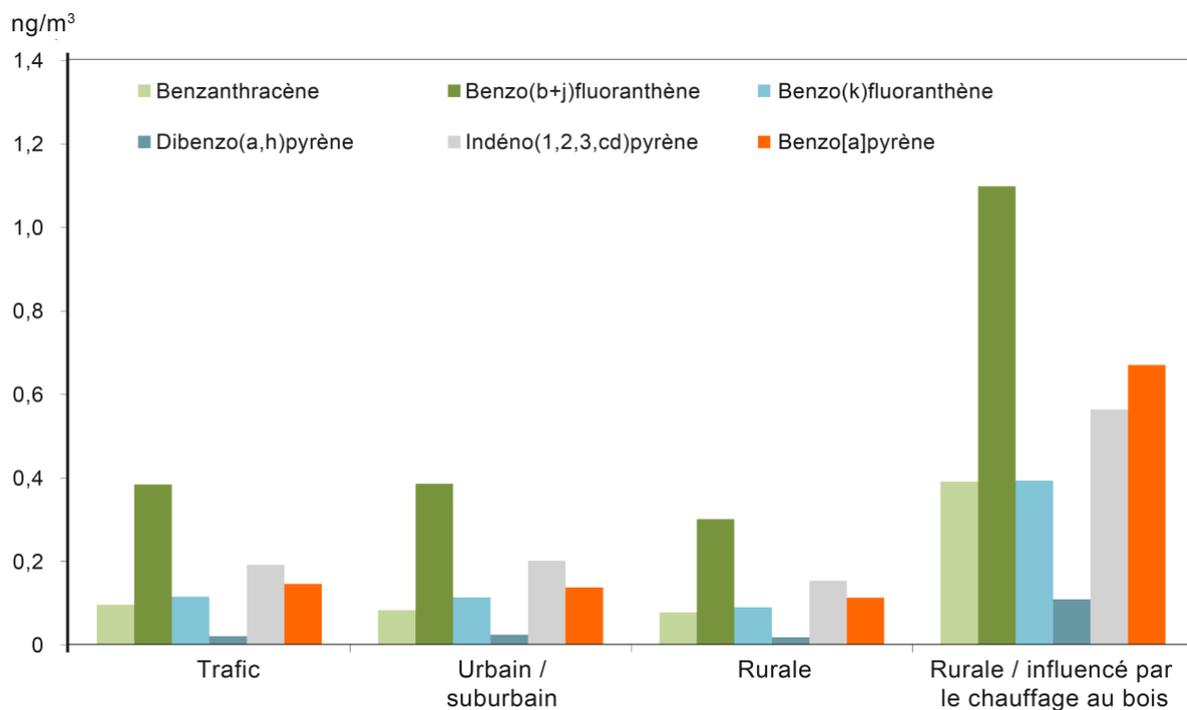


Figure 40 : Moyennes annuelles des concentrations de HAP pertinents sur le plan toxicologique dans les PM10 en 2020, par site caractéristique (Fischer et Hüglin, 2023)

Annexe I – Schémas des conséquences sur la santé attestées scientifiquement pour différents polluants

(Voir <https://www.swisstph.ch/fr/projects/ludok/healtheffects>)

I.1 Poussières fines

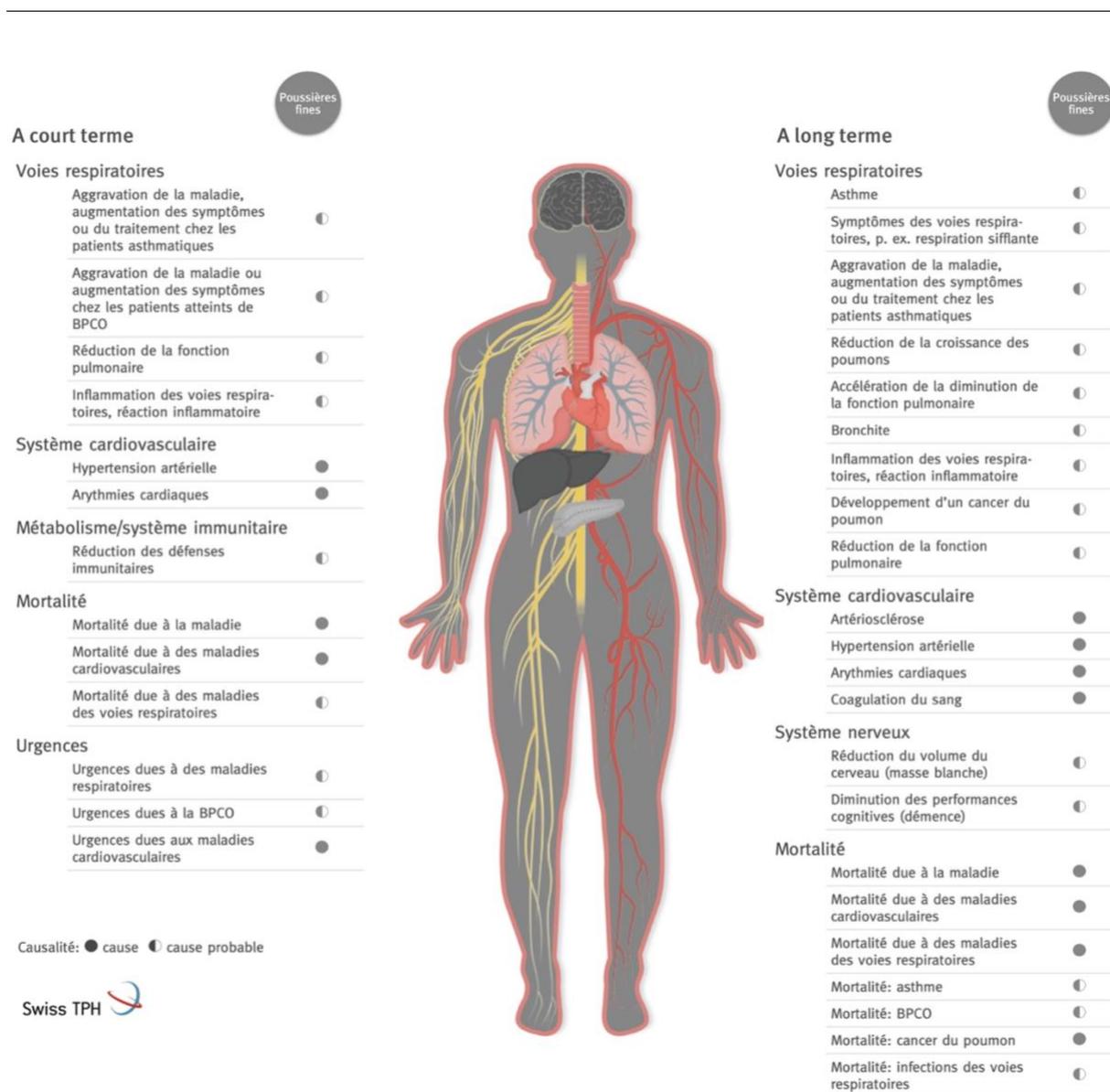


Figure 41 : Effets à court et à long termes d'une concentration accrue de poussières fines (Swiss TPH, 2022)

I.2 Ozone

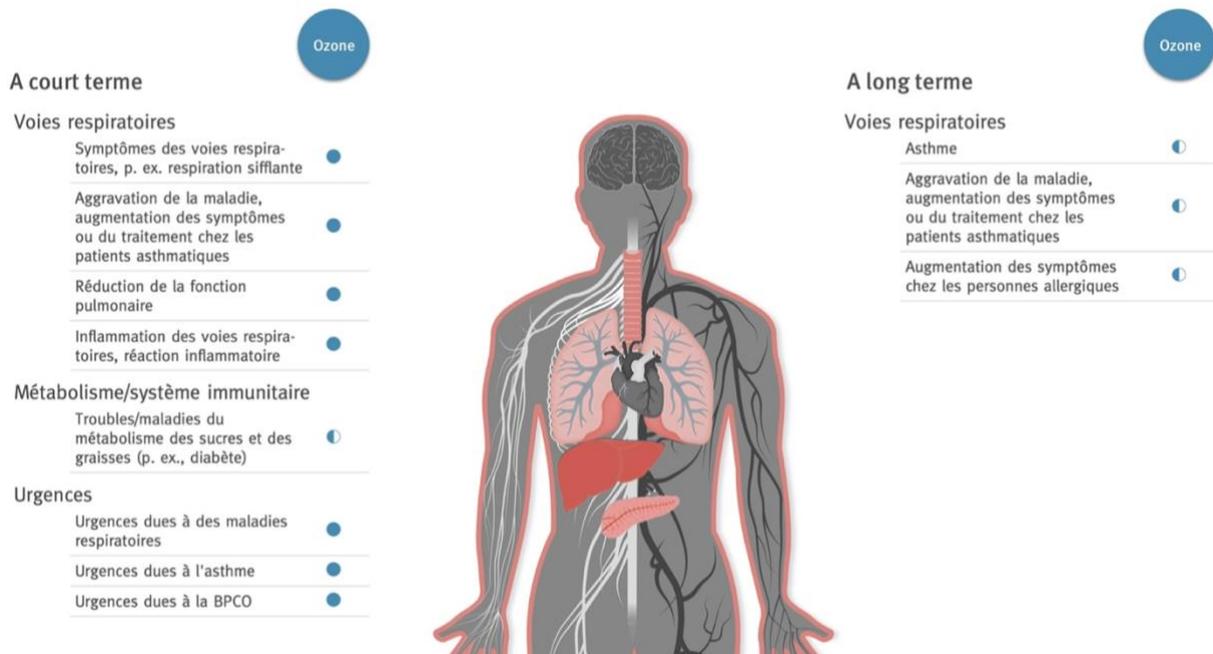


Figure 42 : Effets à court et à long termes d'une concentration accrue d'ozone (Swiss TPH, 2022)

I.3 NO₂

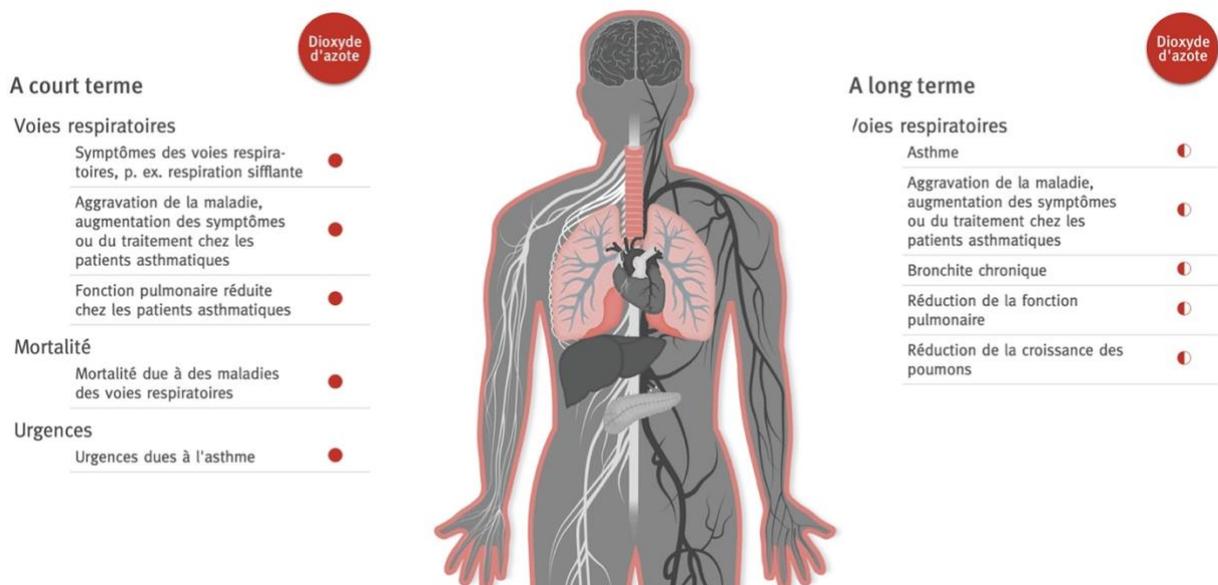


Figure 43 : Effets à court et à long termes d'une concentration accrue de NO₂ (Swiss TPH, 2022)

I.4 SO₂

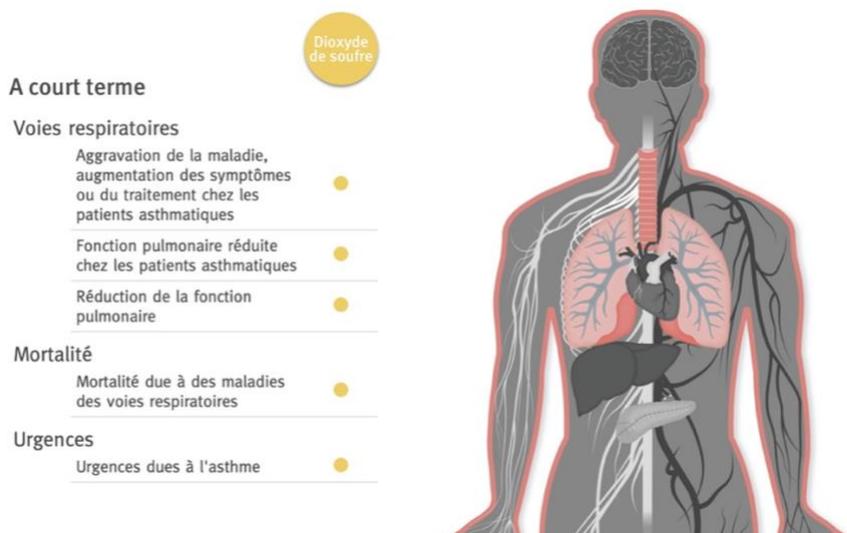


Figure 44 : Effets à court terme d'une concentration accrue de SO₂ (Swiss TPH, 2022)

I.5 CO

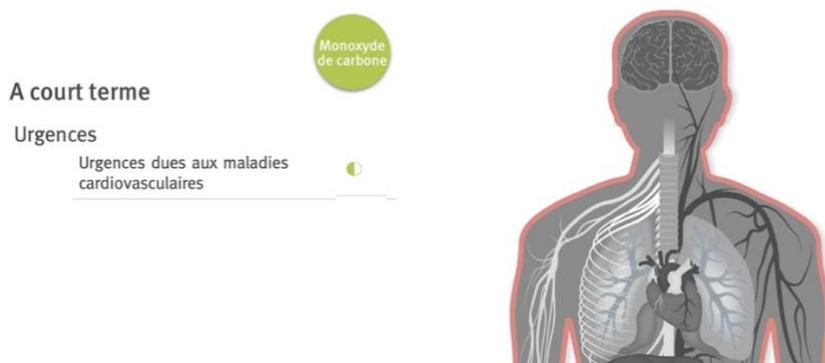


Figure 45 : Effets à court terme d'une concentration accrue de CO (Swiss TPH, 2022)

Liste des abréviations et définitions

Aérosol	Mélange de fines particules solides et/ou liquides et d'air
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, France
AOT40	<i>Accumulated Ozone exposure over a Threshold of 40 parts per billion (ppb)</i> ; accumulation des concentrations dépassant le seuil de 40 ppb. Indicateur d'une exposition chronique à long terme des plantes à l'ozone qui est calculé pour la période de végétation.
AQG	<i>Air Quality Guidelines</i> ; lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air. Abréviations utilisées dans les tableaux et les graphiques pour désigner les niveaux recommandés par ces lignes directrices.
ARE	Office fédéral du développement territorial
BaP	Benzo(a)pyrène (un hydrocarbure aromatique polycyclique)
BC	<i>Black carbon</i> ; carbone noir (CN) ou carbone suie (CS). Indicateur de la teneur en suie
BPCO	Broncho-pneumopathie chronique obstructive
CEN	Comité européen de normalisation
CFHA	Commission fédérale de l'hygiène de l'air
CLRTAP	<i>Convention on Long-range Transboundary Air Pollution</i> ; Convention CEE-ONU sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance
CO	Monoxyde de carbone
COV	Composés organiques volatils
COVNM	Composés organiques volatils non méthaniques
DDC	Direction du développement et de la coopération du Département fédéral des affaires étrangères (DFAE)
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
Diamètre aérodynamique	Diamètre d'une particule sphérique d'une densité de 1 g/cm ³ qui a la même vitesse de sédimentation dans un fluide que la particule étudiée
DTT	Dithiothréitol
EC	<i>Elemental carbon</i> ; carbone élémentaire. Fraction du carbone présente dans les poussières fines qui, lors d'un procédé thermo-optique, subsiste après un chauffage dans une atmosphère inerte (hélium). Indicateur de la teneur en suie
eCN	Équivalent carbone noir. Indicateur de la teneur en suie calculé en convertissant un coefficient d'absorption optique en une concentration massique. La section d'absorption utilisée pour la conversion doit être précisée.
ELAPSE	<i>Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe</i> ; étude épidémiologique qui estime, sur une base harmonisée, l'exposition à la pollution en s'appuyant sur les données d'études de cohorte venant de plusieurs pays européens

EMEP	<i>European Monitoring and Evaluation Programme</i> ; programme de coopération pour la surveillance continue et l'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe
EMIS	Système d'information sur les émissions en Suisse
EUSAAR	European Supersites for Atmospheric Aerosol Research ; projet de l'Union européenne mené de 2006 à 2011, https://www.eusaar.net
h	Heure
HAP	Hydrocarbure aromatique polycyclique
HR	<i>Hazard ratio</i> ; ratio de risques ou risque relatif. Coefficient de mortalité calculé à partir des risques de deux groupes. Il indique dans quelle mesure le taux de mortalité d'un groupe est supérieur à celui de l'autre groupe.
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i> ; Centre international de recherche sur le cancer (agence de l'OMS)
ISA	<i>Integrated Science Assessment</i>
LPE	Loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (loi sur la protection de l'environnement ; RS 814.01), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122_1122_1122/fr
LUDOK	Centre de documentation sur l'air et la santé de l'Institut Tropical et de Santé Publique Suisse, sur mandat de l'OFEV
mg/m ³	Milligramme par mètre cube d'air (1 mg = 0,001 g)
µg/m ³	Microgramme par mètre cube d'air (1 µg = 0,001 mg)
NABEL	Réseau national d'observation des polluants atmosphériques
ng/m ³	Nanogramme par mètre cube d'air (1 ng = 0,001 µg)
NO	Monoxyde d'azote
NO ₂	Dioxyde d'azote
NO _x	Oxydes d'azote, somme du monoxyde d'azote et du dioxyde d'azote
O ₃	Ozone
OC	<i>Organic carbon</i> ; carbone organique. Fraction du carbone présente dans les poussières fines qui, lors d'un procédé thermo-optique, devient gazeux ou fait l'objet d'une pyrolyse après un échauffement dans une atmosphère inerte (hélium).
OEHHA	<i>Office of Environmental Health Hazard Assessment</i> ; autorité californienne qui évalue les effets des facteurs de stress environnementaux sur la santé
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OMS	Organisation mondiale de la santé
OPair	Ordonnance du 16 décembre 1985 sur la protection de l'air (RS 814.318.142.1), état au 1 ^{er} janvier 2023 https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/fr

Percentile	Dans une distribution de données, pourcentage des valeurs qui sont inférieures ou égales à un niveau précis. Le 98 ^e percentile signifie que 98 % des valeurs sont en dessous de ce 98 ^e percentile. La valeur limite est donc respectée lorsque le 98 ^e percentile y est inférieur. Concernant la valeur limite d'immissions de l'ozone, le 98 ^e percentile des moyennes semi-horaires par mois signifie que 98 % des moyennes semi-horaires d'un mois précis doivent être inférieures ou égales à 100 µg/m ³ .
PM	<i>Particulate matter</i> ; poussières fines ou poussières en suspension
PM10	<i>Particulate matter</i> ; poussières fines ou poussières en suspension dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à 10 µm.
PM2.5	<i>Particulate matter</i> ; poussières fines ou poussières en suspension dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à 2,5 µm.
PO	Potentiel oxydatif des poussières fines
POD _Y	Dose d'ozone phytotoxique. Dose d'ozone accumulée pendant la période de végétation que la plante absorbe par les stomates (flux d'ozone). On tient compte d'un seuil Y spécifique à la végétation pour considérer la capacité de détoxification d'une plante.
ppb	<i>Parts per billion</i> (10 ⁻⁹) ; particules par milliard
ppm	<i>Parts per million</i> (10 ⁻⁶) ; particules par million
PUF	Particule ultrafine dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à 100 nanomètres (englobe souvent les particules allant jusqu'à 1 µm)
ROS	Dérivés réactifs de l'oxygène, tels que l'hydroperoxyde O ₂ ⁻ ou le radical hydroxyle très réactif OH
SAPALDIA	Étude de cohorte suisse qui examine les effets à long terme de la pollution de l'air sur la santé des adultes en Suisse
SCARPOL	Étude suisse qui examine les effets de la pollution de l'air sur la santé des enfants
SO ₂	Dioxyde de soufre
Suie	Résidu d'une combustion incomplète ou d'une pyrolyse d'hydrocarbures. En plus du carbone élémentaire, la suie comprend donc des fractions de carbone organique. Aux fins de simplification, on parle souvent de carbone élémentaire (y c. dans le présent rapport).
U.S. EPA	<i>U.S. Environmental Protection Agency</i> ; agence de protection de l'environnement des États-Unis
UNECE	Commission économique pour l'Europe des Nations unies

Liste des figures et des tableaux

Figure 1 : Effets sur la santé occasionnés ou probablement occasionnés par une exposition respectivement à court ou à long terme aux polluants atmosphériques (Swiss TPH, 2022)	22
Figure 2 : Aperçu des mécanismes d'action connus pouvant être déclenchés par des charges sur l'environnement (Peters et al., 2021).	23
Figure 3 : Rapport exposition/effets (ligne pleine, les marges de confiance supérieure et inférieure figurant en pointillé) entre le risque de mortalité (<i>hazard ratio</i> , HR) et l'exposition à long terme aux poussières fines PM _{2.5} , dans l'étude de cohorte américaine Medicare (Di et al., 2017)	25
Figure 4 : Moyenne annuelle des poussières fines PM ₁₀ entre 1991 et 2022, par site caractéristique	29
Figure 5 : Évolution du nombre de moyennes journalières de PM ₁₀ supérieures à 50 µg/m ³ entre 1991 et 2022	30
Figure 6 : Carte des immissions, moyenne annuelle des poussières fines PM ₁₀ en 2021	31
Figure 7 : Évolution du nombre de moyennes journalières de PM ₁₀ supérieures à 45 µg/m ³ entre 1991 et 2022.	31
Figure 8 : Moyenne annuelle des poussières fines PM _{2.5} entre 1998 et 2022, par site caractéristique	34
Figure 9 : Carte des immissions, moyenne annuelle des poussières fines PM _{2.5} en 2021	35
Figure 10 : Évolution du nombre de moyennes journalières de PM _{2.5} supérieures à 15 µg/m ³ entre 1991 et 2022.	35
Figure 11 : Évolution du 98 ^e percentile des moyennes semi-horaires d'ozone sur un mois, de 1991 à 2022	39
Figure 12 : Évolution du nombre de moyennes horaires d'ozone supérieures à 120 µg/m ³ entre 1991 et 2022	40
Figure 13 : Évolution du nombre de dépassements de la moyenne journalière maximale par 8 heures de 100 µg/m ³ pour l'ozone entre 1991 et 2022	41
Figure 14 : Évolution de la concentration d'ozone à long terme entre 1991 et 2022	42
Figure 15 : Moyennes annuelles de NO ₂ entre 1991 et 2022, par site caractéristique	45
Figure 16 : Évolution du nombre de moyennes journalières de NO ₂ supérieures à 80 µg/m ³ entre 1991 et 2022, par site caractéristique.	46
Figure 17 : Carte des immissions, moyenne annuelle du NO ₂ en 2021	47
Figure 18 : Évolution du nombre de moyennes journalières de NO ₂ supérieures à 25 µg/m ³ entre 1991 et 2022.	48
Figure 19 : Moyenne annuelle de SO ₂ entre 1991 et 2022, par site caractéristique	50

Figure 20 : Évolution des moyennes journalières maximales de SO ₂ entre 1991 et 2022, par site caractéristique	51
Figure 21 : Moyennes journalières maximales du monoxyde de carbone entre 1991 et 2022, par site caractéristique	53
Figure 22 : Moyennes annuelles de suie (eCN en µg/m ³ de PM _{2.5}) entre 2008 et 2022, par site caractéristique	55
Figure 23 : Immissions de suie en 2020 (hors effets des mesures relatives à la pandémie de coronavirus ; INFRAS, 2021)	56
Figure 24 : Moyennes annuelles des particules ultrafines entre 2005 et 2022, par site caractéristique	58
Figure 25 : Moyennes annuelles des benzo(a)pyrènes entre 2006 et 2021, par site caractéristique	62
Figure 26 : Moyenne annuelle de la concentration en cuivre dans les PM ₁₀ entre 2006 et 2022, par site caractéristique. Exemple destiné à illustrer l'évolution des métaux dans les PM ₁₀ au fil du temps	64
Figure 27 : Diagramme de dispersion des moyennes annuelles des PM ₁₀ et du nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures (45 µg/m ³) entre 2010 et 2022, par site caractéristique	87
Figure 28 : Rapport entre les moyennes annuelles de PM ₁₀ et le nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures (45 µg/m ³) entre 2010 et 2022, par site caractéristique	88
Figure 29 : Diagramme de dispersion des moyennes annuelles des PM _{2.5} et du nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures (15 µg/m ³) entre 2016 et 2022, par site caractéristique	89
Figure 30 : Rapport entre les moyennes annuelles de PM _{2.5} et le nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures (15 µg/m ³) entre 2016 et 2022, par site caractéristique	90
Figure 31 : Comparaison entre les niveaux d'ozone de la saison estivale (selon l'OMS) de 2000 à 2022 et la valeur AOT ₄₀ (<i>accumulated exposure over a threshold of 40 ppb</i>) pour les forêts, par site caractéristique	93
Figure 32 : 99 ^e percentile de la moyenne journalière maximale par 8 heures (niveau recommandé par les AQG de l'OMS) par rapport à la deuxième moyenne horaire la plus élevée de l'année pour l'ozone (O ₃ ; VLI de l'OPair), entre 2000 et 2022, par site caractéristique	95
Figure 33 : 99 ^e percentile de la moyenne journalière maximale par 8 heures (niveau 2021 recommandé par l'OMS) par rapport au 98 ^e percentile de la moyenne semi-horaire d'un mois (VLI de l'OPair applicable à l'O ₃), entre 2000 et 2022, par site caractéristique	96
Figure 34 : Évolution du 99 ^e percentile de la moyenne journalière maximale d'O ₃ par 8 heures (niveau recommandé par les AQG de l'OMS) entre 1991 et 2022, par site caractéristique	97
Figure 35 : Évolution du 95 ^e percentile des moyennes semi-horaires de NO ₂ entre 1991 et 2022, par site caractéristique	98

Figure 36 : Diagramme de dispersion des moyennes annuelles de NO ₂ et du nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures (25 µg/m ³ dans les AQG 2021 de l'OMS) entre 2016 et 2021, par site caractéristique	99
Figure 37 : Rapport entre les moyennes annuelles de NO ₂ et le nombre de dépassements du niveau recommandé par l'OMS pour 24 heures (25 µg/m ³ dans les AQG 2021 de l'OMS) entre 2016 et 2021, par site caractéristique.....	100
Figure 38 : Évolution du 95 ^e percentile des moyennes semi-horaires de SO ₂ d'une année, entre 1991 et 2022, par site caractéristique.....	101
Figure 39 : Valeurs trimestrielles des concentrations de benzo[a]pyrène dans les PM10 entre 2006 et 2020	102
Figure 40 : Moyennes annuelles des concentrations de HAP pertinents sur le plan toxicologique dans les PM10 en 2020, par site caractéristique (Fischer et Hüglin, 2023)	103
Figure 41 : Effets à court et à long termes d'une concentration accrue de poussières fines (Swiss TPH, 2022)	104
Figure 42 : Effets à court et à long termes d'une concentration accrue d'ozone (Swiss TPH, 2022)	105
Figure 43 : Effets à court et à long termes d'une concentration accrue de NO ₂ (Swiss TPH, 2022)	105
Figure 44 : Effets à court terme d'une concentration accrue de SO ₂ (Swiss TPH, 2022)	106
Figure 45 : Effets à court terme d'une concentration accrue de CO (Swiss TPH, 2022)	106
<hr/>	
Tableau 1 : Recommandations de la CFHA pour adapter les VLI dans l'OPair.....	9
Tabelle 1: Empfehlungen der EKL zur Anpassung der IGW in der LRV (p. 11)	
Tabella 1: Raccomandazioni della CFIAR per l'adeguamento dei VLI nell'OIAI (p. 13)	
Table 1: FCAH recommendations for changes to ambient limit values in the OAPC (p. 15)	
Tableau 2 : Niveaux recommandés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air (AQG) et objectifs intermédiaires (<i>cibles intermédiaires ou interim targets</i>), préconisées dans les lignes directrices 2005 (OMS, 2006) et 2021 (OMS, 2021) et VLI en vigueur selon l'OPair (RS 814.318.142.1, état au 1 ^{er} janvier 2023).....	19
Tableau 3 : Niveaux de PM10 à court et à long termes préconisés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport aux VLI de l'OPair et aux recommandations de la CFHA	28
Tableau 4 : Niveaux de PM2.5 à court et à long termes préconisés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport aux VLI de l'OPair et aux recommandations de la CFHA	33

Tableau 5 : Niveaux d'ozone à court et à long termes préconisés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport aux VLI de l'OPair et aux recommandations de la CFHA.....	37
Tableau 6 : Niveaux de NO ₂ à court et à long termes préconisés par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport aux VLI de l'OPair et aux recommandations de la CFHA.....	44
Tableau 7 : Niveau de SO ₂ à court terme préconisé par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport aux VLI à court et à long termes de l'OPair et aux recommandations de la CFHA.....	49
Tableau 8 : Niveau de CO à court terme préconisé par les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air 2021 (AQG) par rapport à la VLI de l'OPair et aux recommandations de la CFHA.....	52
Tableau 9 : Retombées de poussières (total) et métaux pour lesquels l'OPair fixe une VLI.....	63
Tableau 10 : Recommandations de la CFHA pour adapter les VLI de l'OPair.....	68
Tableau 11 : Études portant sur des concentrations faibles qui ont été incluses dans la méta-analyse de l'OMS exécutée par Chen et Hoek (2020). Cette analyse concernait la mortalité liée à une exposition à long terme aux PM _{2.5} (OMS, 2021). Classement en fonction de la concentration médiane.....	81
Tableau 12 : Risques de décès en cas d'exposition accrue prolongée à des polluants atmosphériques.....	82
Tableau 13 : Estimations cumulées des risques de décès en cas de hausse à court terme (jours, semaines) des concentrations de polluants atmosphériques.....	83
Tableau 14 : Estimations cumulées d'une mortalité accrue liée à une hausse à court terme des concentrations de polluants atmosphériques.....	84
Tableau 15 : Part des émissions provenant de différentes sources en 2021 d'après le système d'information de l'OFEV sur les émissions en Suisse (EMIS).....	85
Tableau 16 : Niveaux de concentration critiques de SO ₂ , par type de végétation.....	94

Bibliographie

ANSES (2019) : *Particulate matter in ambient air: Health effects according to components, sources and particle size and impact on air pollution of the technologies and composition of the motor vehicle fleet operating in France*. <https://www.anses.fr/en/system/files/AIR2014SA0156RaEN.pdf>

Atkinson, R. W., Samoli, E., Analitis, A., Fuller, G. W., Green, D. C., Anderson, H. R., Purdie, E., Dunster, C., Aithadj, L., Kelly, F. J. et Mudway, I. S. (août 2016) : Short-term associations between particle oxidative potential and daily mortality and hospital admissions in London. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 219(6), p. 566 à 572. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2016.06.004>

OFEV (2020) : *Graphiques des valeurs annuelles NABEL*. Office fédéral de l'environnement. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/luft/fachinfo-daten/grafiken_jahreswertenabel.pdf.download.pdf/graphiques_des_valeursannuellesnabel.pdf

OFEV (2023b) : *Contributions des sources calculées sur la base de l'inventaire des gaz à effet de serre 2021 de la Suisse*

OFEV et Empa (2022) : *La qualité de l'air en 2021 – Résultats du Réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL)*. Office fédéral de l'environnement. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/luft/uz-umwelt-zustand/nabel-luftqualitaet-2020.pdf.download.pdf/UZ-2114-F_Jahrbuch_NABEL2020.pdf

OFEV et Empa (2022b) : *La qualité de l'air en 2021 – Résultats du Réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL)*. Office fédéral de l'environnement. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/luft/uz-umwelt-zustand/luftqualitaet-2021.pdf.download.pdf/UZ-2227-F_NABEL2021.pdf

Bates, J. T., Fang, T., Verma, V., Zeng, L. H., Weber, R. J., Tolbert, P. E., Abrams, J. Y., Sarnat, S. E., Klein, M., Mulholland, J. A. et Russell, A. G. (16 avril 2019) : Review of Acellular Assays of Ambient Particulate Matter Oxidative Potential : Methods and Relationships with Composition, Sources, and Health Effects. *Environmental Science & Technology*, 53(8), p. 4003 à 4019. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03430>

Bowe, B., Xie, Y., Li, T., Yan, Y., Xian, H. et Al-Aly, Z. (juillet 2018) : The 2016 global and national burden of diabetes mellitus attributable to PM(2.5) air pollution. *Lancet Planet Health*, 2(7), e301-e312. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(18\)30140-2](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(18)30140-2)

Brunner, U. (2000) : *Rechtsgutachten betreffend Grundlagen für die Anordnung verschärfter Emissionsbegrenzungen bei kanzerogenen Luftschadstoffen*. CFHA. https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/dokumentation/Rechtsgutachten_Kanzerogene_Luftschadstoffe_U._Brunner_Stand_September_2000.pdf

Cakmak, S., Hebborn, C., Pinault, L., Lavigne, E., Vanos, J., Crouse, D. L. et Tjepkema, M. (février 2018) : Associations between long-term PM(2.5) and ozone exposure and mortality in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CANCHEC), by spatial synoptic classification zone. *Environment International*, vol. 111, p. 200 à 211. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.11.030>

Castro, A., Gotschi, T., Achermann, B., Baltensperger, U., Buchmann, B., Felber Dietrich, D., Fluckiger, A., Geiser, M., Galli Purghart, B., Gygas, H., Kutlar Joss, M., Luthi, L. M., Probst-Hensch, N., Strahl, P. et Kunzli, N. (mars 2020) : Comparing the lung cancer burden of ambient particulate matter using scenarios of air quality standards versus acceptable risk levels. *International Journal of Public Health*, 65(2), p. 139 à 148. <https://doi.org/10.1007/s00038-019-01324-y>

CEN (2016) : *CEN/TS 16976:2016 : Ambient air – Determination of the particle number concentration of atmospheric aerosol*.

CEN (2017) : *Air ambiant – Mesurage du carbone élémentaire (EC) et du carbone organique (OC) prélevés sur filtre*. EN 16909:2017.

Chen, J. et Hoek, G. (2020) : Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, vol. 143, 105974.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974>

Collaud Coen, M., Weingartner, E., Schaub, D., Hueglin, C., Corrigan, C., Henning, S., Schwikowski, M. et Baltensperger, U. (2004) : Saharan dust events at the Jungfraujoch: detection by wavelength dependence of the single scattering albedo and first climatology analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4(11/12), p. 2465 à 2480. <https://doi.org/10.5194/acp-4-2465-2004>

Daellenbach, K. R., Uzu, G., Jiang, J., Cassagnes, L. E., Leni, Z., Vlachou, A., Stefenelli, G., Canonaco, F., Weber, S., Segers, A., Kuenen, J. J. P., Schaap, M., Favez, O., Albinet, A., Aksoyoglu, S., Dommen, J., Baltensperger, U., Geiser, M., El Haddad, I., Jaffrezo, J. L. et Prévôt, A. S. H. (novembre 2020) : Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe. *Nature*, 587(7834), p. 414 à 419. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2902-8>

Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F. et Schwartz, J. D. (29.6.2017) : Air Pollution and Mortality in the Medicare Population. *New England Journal of Medicine*, 376(26), p. 2513 à 2522. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1702747>

AEE (2012) : *Particulate matter from natural sources and related reporting under the EU Air Quality Directive in 2008 and 2009*.
<https://www.eea.europa.eu/publications/particulate-matter-from-natural-sources>

CFHA (1989) : Ozone en Suisse. *Cahier de l'environnement n° 101*, 270 pages.

CFHA (2005) : Les polluants atmosphériques azotés en Suisse. *Cahier de l'environnement n° 384*.
https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/themen/les_polluants_atmospheriquesazotesensuisse.pdf

CFHA (2007) : *Les poussières fines en Suisse*. Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA).
<https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/dokumentation/f-bericht-feinstaub-2008.pdf>

CFHA (2010) : *25 ans de protection de l'air selon la loi sur la protection de l'environnement. Thèses et recommandations*. Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA).
https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/dokumentation/EKL_Protection_de_lair_2011-04-13.pdf

CFHA (2013) : *Les poussières fines en Suisse 2013*. Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA).
https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/themen/Les_poussieres_fines_en_Suisse_2013.pdf

CFHA (2014) : *Immissions d'ammoniac et dépôts d'azote*. Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA).
https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/themen/Immissions_d_ammoniac_et_depots_de_composes_azotes.pdf

CFHA (2020) : *Polluants atmosphériques azotés en Suisse. Situation en lien avec l'agriculture entre 2000 et 2018*. Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA).
https://www.ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/dokumentation/EKL-Stickstoffhaltige-Luftschadstoffe-in-der-Schweiz-200826-2_fr.pdf

EMEP (2022) : *Transboundary air pollution by sulphur, nitrogen, ozone and particulate matter in 2020*. Rapport sur la Suisse (11.5.2023), Data Note 1/2022.
https://www.emep.int/publ/emep2022_publications.html

Commission européenne (2019) : Le pacte vert pour l'Europe. COM(2019) 640 final (11.12.2019).
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&qid=1683811543435>

Commission européenne (2022) : Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe (refonte). 2022/0347(COD) (26.10.2022).

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022PC0542&qid=1683813000857>

Parlement européen et Conseil de l'UE (2004) : Directive 2004/107/CE du Parlement européen et du Conseil du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant. *Journal officiel de l'Union européenne*, L23/3 (26.1.2005).

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32004L0107&qid=1683808896396>

Parlement européen et Conseil de l'UE (2008) : Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air et un air pur pour l'Europe. *Journal officiel de l'Union européenne*, L152/1 (21.5.2008).

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0050&qid=1675349020477&from=FR>

Parlement européen et Conseil de l'UE (2016) : Directive 2016/2284 du Parlement européen et du Conseil du 14 décembre 2016 concernant la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques, modifiant la directive 2003/35/CE et abrogeant la directive 2001/81/CE. *Journal officiel de l'Union européenne*, L344/1 (17.12.2016).

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32016L2284>

Commission européenne (2021) : *Pacte vert pour l'Europe : atteindre nos objectifs*. Office des publications de l'Union européenne.

<https://op.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/762414e8-ee81-11eb-a71c-01aa75ed71a1>

Parlement européen (2022) : *Revision of the EU Ambient Air Quality Directives – Implementation Appraisal*.

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/734679/EPRS_BRI\(2022\)734679_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/734679/EPRS_BRI(2022)734679_EN.pdf)

Felber Dietrich, D. (2014) : *Pollution de l'air et santé. Aperçu des effets de la pollution atmosphérique sur la santé*.

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/air/publications-etudes/publications/pollution-de-l-air-et-sante.html>

Fischer, A. et Hüglin, C. (2023) : *Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM10 an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone. Messbericht 2022*.

<https://www.empa.ch/web/s503/weitere-dokumente>

Grange, S. K., Fischer, A., Zellweger, C., Alastuey, A., Querol, X., Jaffrezo, J. L., Weber, S., Uzu, G. et Hueglin, C. (décembre 2021) : Switzerland's PM10 and PM2.5 environmental increments show the importance of non-exhaust emissions. *Atmospheric Environment-X*, 12.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100145>

Grange, S. K., Uzu, G., Weber, S., Jaffrezo, J. L. et Hueglin, C. (2022) : Linking Switzerland's PM10 and PM2.5 oxidative potential (OP) with emission sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(10), p. 7029 à 7050. <https://doi.org/10.5194/acp-22-7029-2022>

Guerreiro, C. B. B., Horálek, J., de Leeuw, F. et Couvidat, F. (juillet 2016) : Benzo(a)pyrene in Europe: Ambient air concentrations, population exposure and health effects. *Environmental Pollution*, vol. 214, p. 657 à 667. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.081>

Hart, J. E., Liao, X., Hong, B., Puett, R. C., Yanosky, J. D., Suh, H., Kioumourtoglou, M. A., Spiegelman, D. et Laden, F. (1.5.2015) : The association of long-term exposure to PM2.5 on all-cause mortality in the Nurses' Health Study and the impact of measurement-error correction. *Environmental Health*, 14, article n° 38. <https://doi.org/10.1186/s12940-015-0027-6>

Health Effects Institute (HEI ; 2013) : *Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles*. <https://www.healtheffects.org/publication/understanding-health-effects-ambient-ultrafine-particles>

Huangfu, P. et Atkinson, R. (2020) : Long-term exposure to NO₂ and O₃ and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, vol. 144, 105998. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105998>

Hüglin, C. et Grange, S. K. (2021) : *Chemical characterisation and source identification of PM₁₀ and PM_{2.5} in Switzerland*. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/chemical-characterisation-and-source-identificationof-pm-in-switzerland.pdf.download.pdf/Characterisation-source-identification-PM.pdf>

INFRAS (2021) : *Black Carbon-Immissionen Schweiz und Liechtenstein. Resultate 2015, 2020 und 2030*. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/black-carbon-immissionen-schweiz-und-liechtenstein.pdf.download.pdf/BC-Immissionen-CH-FL.pdf>

Kutlar Joss, M., Kappeler, R., Probst-Hensch, N. et Künzli, N. (2019, 27.3.2019) : Air et santé en Suisse et ailleurs. *Swiss Medical Forum*, 19(1314), p. 213 à 218. <https://medicforum.ch/fr/detail/doi/fms.2019.08079>

Lee, K. K., Spath, N., Miller, M. R., Mills, N. L. et Shah, A. S. V. (2020) : Short-term exposure to carbon monoxide and myocardial infarction: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, vol. 143, 105901. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105901>

Liu, C., Cai, J., Chen, R., Sera, F., Guo, Y., Tong, S., Li, S., Lavigne, E., Correa, P. M., Ortega, N. V., Orru, H., Maasikmets, M., Jaakkola, J. J. K., Rytö, N., Breitner, S., Schneider, A., Katsouyanni, K., Samoli, E., Hashizume, M., Honda, Y., Ng, C. F. S., Diaz, M. H., la Cruz Valencia, C., Rao, S., Palomares, A. D., Pereira da Silva, S., Madureira, J., Holobâc, I. H., Fratanni, S., Scovronick, N., Garland, R. M., Tobias, A., Íñiguez, C., Forsberg, B., Åström, C., Vicedo-Cabrera, A. M., Ragettli, M. S., Guo, Y. L., Pan, S. C., Milojevic, A., Bell, M. L., Zanobetti, A., Schwartz, J., Gasparrini, A. et Kan, H. (15.10.2022) : Coarse Particulate Air Pollution and Daily Mortality: A Global Study in 205 Cities. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 206(8), p. 999 à 1007. <https://doi.org/10.1164/rccm.202111-2657OC>

Ohlwein, S., Kappeler, R., Kutlar Joss, M., Künzli, N. et Hoffmann, B. (mai 2019) : Health effects of ultrafine particles: a systematic literature review update of epidemiological evidence. *International Journal of Public Health*, 64(4), p. 547 à 559. <https://doi.org/10.1007/s00038-019-01202-7>

Orellano, P., Reynoso, J. et Quaranta, N. (2021) : Short-term exposure to sulphur dioxide (SO₂) and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, vol. 150, 106434. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106434>

Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A. et Ciapponi, A. (2020) : Short-term exposure to particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environment International*, vol. 142, 105876. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>

OSTLUFT (2021) : *OSTLUFT-Jahresbericht 2020*. OSTLUFT. <https://jahresbericht.ostluft.ch/2020/>

Parker, J. D., Kravets, N. et Vaidyanathan, A. (17.4.2018) : Particulate Matter Air Pollution Exposure and Heart Disease Mortality Risks by Race and Ethnicity in the United States: 1997 to 2009 National Health Interview Survey With Mortality Follow-Up Through 2011. *Circulation*, 137(16), p. 1688 à 1697. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.117.029376>

Peters, A., Nawrot, T. S. et Baccarelli, A. A. (18.3.2021) : Hallmarks of environmental insults. *Cell*, 184(6), p. 1455 à 1468. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.01.043>

Petzold, A., Ogren, J. A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S. M., Baltensperger, U., Holzer-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A. et Zhang, X. Y. (2013) : Recommendations for reporting "black carbon" measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(16), p. 8365 à 8379. <https://doi.org/10.5194/acp-13-8365-2013>

Pinault, L., Tjepkema, M., Crouse, D. L., Weichenthal, S., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Chen, H. et Burnett, R. T. (11.2.2016) : Risk estimates of mortality attributed to low concentrations of ambient fine particulate matter in the Canadian community health survey cohort. *Environmental Health* 15, article n° 18. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0111-6>

Pinault, L. L., Weichenthal, S., Crouse, D. L., Brauer, M., Erickson, A., Donkelaar, A. V., Martin, R. V., Hystad, P., Chen, H., Fines, P., Brook, J. R., Tjepkema, M. et Burnett, R. T. (novembre 2017) : Associations between fine particulate matter and mortality in the 2001 Canadian Census Health and Environment Cohort. *Environmental Research*, vol. 159, p. 406 à 415. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.037>

Piscitello, A., Bianco, C., Casasso, A. et Sethi, R. (20.4.2021) : Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures. *Science of the Total Environment*, vol. 766, 144440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>

Conseil de l'UE (1999) : Directive 1999/30/CE du Conseil du 22 avril 1999 relative à la fixation de valeurs limites pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant. *Journal officiel de l'Union européenne*, L164/41. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?qid=1676046184453&uri=CELEX:31999L0030>

Sintermann, J., Schaufelberger, U., Eugster, R. et Götsch, M. (2021) : *Ultrafeine Partikel in Kloten 2019 & 2020. Belastungssituation und Einfluss des Flugverkehrs*. OSTLUFT. https://www.ostluft.ch/fileadmin/intern/LZ_Information/Publikationen/Fachberichte/BE_UltrafeinePartikel_Kloten2019-2020_GeK_20210526.pdf

SN EN (2008) : *SN EN 15549:2008, Qualité de l'air – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration du benzo[a]pyrène dans l'air ambiant*

SN EN (2012a) : *SN EN 14211:2012, Air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en dioxyde d'azote et monoxyde d'azote par chimiluminescence*

SN EN (2012b) : *SN EN 14212:2012, Air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en dioxyde de soufre par fluorescence UV*

SN EN (2012c) : *SN EN 14625:2012, Air ambiant – Méthode normalisée de mesurage de la concentration en ozone par photométrie U.V.*

SN EN (2012d) : *SN EN 14626:2012, Air ambiant – Méthode normalisée de mesurage de la concentration en monoxyde de carbone par spectroscopie à rayonnement infrarouge non dispersif*

SN EN (2014) : *SN EN 12341:2014, Air ambiant – Méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la concentration massique MP10 ou MP2,5 de matière particulaire en suspension*

SN EN (2017a) : *SN EN 16450:2017, Air ambiant – Systèmes automatisés de mesurage de la concentration de matière particulaire (PM10 ; PM2.5)*

SN EN (2017b) : *SN EN 16909:2017, Air ambiant – Mesurage du carbone élémentaire (EC) et du carbone organique (OC) prélevés sur filtre*

Stafoggia, M., Oftedal, B., Chen, J., Rodopoulou, S., Renzi, M., Atkinson, R. W., Bauwelinck, M., Klompaker, J. O., Mehta, A., Vienneau, D., Andersen, Z. J., Bellander, T., Brandt, J., Cesaroni, G., de Hoogh, K., Fehcht, D., Gulliver, J., Hertel, O., Hoffmann, B., Hvidtfeldt, U. A., Jöckel, K.-H., Jørgensen, J. T., Katsouyanni, K., Ketzel, M., Kristoffersen, D. T., Lager, A., Leander, K., Liu, S., Ljungman, P. L. S., Nagel, G., Pershagen, G., Peters, A., Raaschou-Nielsen, O., Rizzuto, D., Schramm, S., Schwarze, P. E., Severi, G., Sigsgaard, T., Strak, M., van der Schouw, Y. T., Verschuren, M., Weinmayr, G., Wolf, K., Zitt, E., Samoli, E., Forastiere, F., Brunekreef, B., Hoek, G. et Janssen, N. A. H. (2022) : Long-term exposure to low ambient air pollution concentrations and mortality among 28 million people: results from seven large European cohorts within the ELAPSE project. *The Lancet Planetary Health*, 6(1), e9-e18. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00277-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00277-1)

Swiss TPH (2022) : LUDOK – Graphique interactif des effets de la pollution de l'air sur la santé [Interaktive Infografik]. <https://www.swisstph.ch/fr/projects/ludok/healtheffects>

Tobias, A., Karanasiou, A., Amato, F., Roqué, M. et Querol, X. (2019) : Health effects of desert dust and sand storms: a systematic review and meta-analysis. *Environmental Epidemiology*, 3, 396. <https://doi.org/10.1097/01.Ee9.0000610424.75648.58>

Traini, E., Huss, A., Portengen, L., Rookus, M., Verschuren, W. M. M., Vermeulen, R. C. H. et Bellavia, A. (juillet 2022) : A Multipollutant Approach to Estimating Causal Effects of Air Pollution Mixtures on Overall Mortality in a Large, Prospective Cohort. *Epidemiology*, 33(4), p. 514 à 522. <https://doi.org/10.1097/Ede.0000000000001492>

U.S. EPA (2010) : *Integrated Science Assessment (ISA) for Carbon Monoxide*

U.S. EPA (2015) : *Preamble to the Integrated Science Assessments*. <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=310244>

U.S. EPA (2016) : *Integrated Science Assessment (ISA) for Oxides of Nitrogen – Health Criteria*

U.S. EPA (2017) : *Integrated Science Assessment (ISA) for Sulfur Oxides – Health Criteria*

U.S. EPA (2019) : *Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter*

U.S. EPA (2020) : *Integrated Science Assessment (ISA) for Ozone and Related Photochemical Oxidants*

CEE-ONU (2017) : *Manual on methodologies and criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Chapter III on Mapping Critical Levels for Vegetation (version 2017)*. <https://www.umweltbundesamt.de/en/manual-for-modelling-mapping-critical-loads-levels?parent=68093>

Villeneuve, P. J., Weichenthal, S. A., Crouse, D., Miller, A. B., To, T., Martin, R. V., van Donkelaar, A., Wall, C. et Burnett, R. T. (juillet 2015) : Long-term Exposure to Fine Particulate Matter Air Pollution and Mortality Among Canadian Women. *Epidemiology*, 26(4), p. 536 à 545. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000294>

Weichenthal, S., Lavigne, E., Evans, G., Pollitt, K. et Burnett, R. T. (24.3.2016) : Ambient PM_{2.5} and risk of emergency room visits for myocardial infarction: impact of regional PM_{2.5} oxidative potential: a case-crossover study. *Environmental Health* 15, article n° 46. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0129-9>

Weichenthal, S., Lavigne, E., Traub, A., Umbrio, D., You, H., Pollitt, K., Shin, T., Kulka, R., Stieb, D. M., Korsiak, J., Jessiman, B., Brook, J. R., Hatzopoulou, M., Evans, G. et Burnett, R. T. (octobre 2021) : Association of Sulfur, Transition Metals, and the Oxidative Potential of Outdoor PM_{2.5} with Acute Cardiovascular Events: A Case-Crossover Study of Canadian Adults. *Environmental Health Perspectives*, 129(10), 107005. <https://doi.org/10.1289/ehp9449>

Weichenthal, S., Villeneuve, P. J., Burnett, R. T., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Jones, R. R., DellaValle, C. T., Sandler, D. P., Ward, M. H. et Hoppin, J. A. (juin 2014) : Long-term exposure to fine particulate matter: association with nonaccidental and cardiovascular mortality in the agricultural health study cohort. *Environmental Health Perspectives*, 122(6), 609-615. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307277>

OMS (2021) : *Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules (PM_{2.5} et PM₁₀), ozone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre et monoxyde de carbone. Résumé d'orientation*. Organisation mondiale de la santé. Bureau régional pour l'Europe. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/346555>

OMS (1987) : *Air quality guidelines for Europe*. Bureau régional de l'OMS pour l'Europe.
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/107364/9789289011143-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

OMS (2000) : *Air quality guidelines for Europe*. (2^e édition). Bureau régional de l'OMS pour l'Europe.
http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf?ua=1

OMS (2006) : *Air quality guidelines. Global update 2005*. Bureau régional de l'OMS pour l'Europe.
http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf?ua=1

OMS (2021) : *WHO Global Air Quality Guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. OMS.
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>

OMS Europe (2021) : *Human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons as ambient air pollutants: report of the Working Group on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of the Joint Task Force on the Health Aspects of Air Pollution*.
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/350636/9789289056533-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zheng, X. Y., Orellano, P., Lin, H. L., Jiang, M. et Guan, W. J. (2021) : Short-term exposure to ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide and emergency department visits and hospital admissions due to asthma: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, vol. 150, 106435.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106435>