

8<sup>e</sup> RAPPORT SUR L'ÉTAT DES ALPES

# LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES ALPES

SIGNAUX ALPINS – ÉDITION SPÉCIALE 8



ALPENKONVENTION  
CONVENTION ALPINE  
ALPSKA KONVENCIJA  
CONVENZIONE DELLE ALPI

## ÉDITEUR

### **Secrétariat permanent de la Convention alpine**

Herzog-Friedrich-Straße 15  
A-6020 Innsbruck  
Autriche

*Bureau de Bolzano/Bozen*  
Viale Druso/Drususallee 1  
I-39100 Bolzano/Bozen  
Italie

[www.alpconv.org](http://www.alpconv.org)  
[www.atlas.alpconv.org](http://www.atlas.alpconv.org)  
[info@alpconv.org](mailto:info@alpconv.org)

*Traductions* : **INTRALP** – Italie

*Photographie de couverture* : **Giorgio Debernardi**

*Conception de la couverture* : **HELIOS** – Italie

*Graphisme* : **De Poli & Cometto** – Italie

*Publication climatiquement neutre grâce à la contribution de **Rete Clima*** – Italie

*Impression* : **Grafiche Antiga** – Italie

ISBN : **9788897500643**

© SECRÉTARIAT PERMANENT DE LA CONVENTION ALPINE, 2021



Les émissions de gaz à effet de serre résultant de la production de cette publication ont été compensées à travers des actions de gestion forestière dans des forêts certifiées PEFC au sein de la région alpine



8<sup>e</sup> RAPPORT SUR L'ÉTAT DES ALPES

# LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES ALPES

---

SIGNAUX ALPINS – ÉDITION SPÉCIALE 8





La préparation du huitième rapport sur l'état des Alpes a été coordonnée par la présidence française du Groupe de travail ad hoc et le Secrétariat permanent de la Convention alpine.

Le texte a été rédigé par les membres du Groupe de travail ad hoc, avec le soutien de la Présidence française et du Secrétariat permanent.

Le huitième rapport sur l'état des Alpes, rédigé dans toutes les langues alpines ainsi qu'en anglais, peut être téléchargé ici : [www.alpconv.org](http://www.alpconv.org). Toutes les cartes peuvent être consultées sur [www.atlas.alpconv.org](http://www.atlas.alpconv.org).

---

## COORDINATION DU GROUPE DE TRAVAIL AD HOC

### PRÉSIDENTE

Éric Vindimian, Michel Pinet (*Conseil général de l'environnement et du développement durable, Ministère de la transition écologique, France*)

### SECRÉTARIAT PERMANENT DE LA CONVENTION ALPINE

Aureliano Piva

---

## MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL AD HOC

### ALLEMAGNE

Bryan Hellack (*Umweltbundesamt – Agence fédérale de l'environnement*)

Peter Frei (*Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz – Ministère bavarois de l'environnement et de la protection des consommateurs*)

Richard Schlachta (*Regierung von Oberbayern – Gouvernement de Haute-Bavière*)

### AUTRICHE

Andreas Bartel, Siegmund Boehmer (*Umweltbundesamt – Agence fédérale de l'environnement*)

Katharina Isepp, Thomas Parizek (*Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie – Ministère fédéral du climat, de l'environnement, de l'énergie, des mobilités, de l'innovation et de la technologie*)

### FRANCE

Hubert Holin, François Lamoise (*Ministère de la transition écologique*)

### ITALIE

Cristina Leonardi (*Ministero della transizione ecologica – Ministère de la transition écologique*)

Adriana Pietrodangelo (*Consiglio Nazionale delle Ricerche – Conseil national de la recherche*)

Giorgio Cattani (*Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – Institut supérieur pour la protection de l'environnement et la recherche*)



## LIECHTENSTEIN

Veronika Wolff (*Amt für Umwelt – Office de l'environnement*)

## MONACO

Laure Chevallier, Astrid Claudel-Rusin (*Gouvernement Princier, Principauté de Monaco*)

## SLOVÉNIE

Jože Jurša (*Ministrstvo za okolje in prostor – Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire*)

Rahela Žabkar (*Agencija Republike Slovenije za okolje – Agence slovène de l'environnement*)

## SUISSE

Matthias Rinderknecht (*Office fédéral des Transports – Bundesamt für Verkehr – Ufficio federale dei trasporti*)

---

### OBSERVATEURS DU GROUPE DE TRAVAIL AD HOC

Geneviève Borodine, Éric Fournier (*Région Auvergne-Rhône-Alpes*)

Thierry Billet, Claire Simon (*Association Villes des Alpes de l'année*)

Špela Berlot, Kristina Glojek, Matej Ogrin (*CIPRA*)

Ursula Schüpbach (*ISCAR : Comité scientifique international de la recherche alpine*)

---

### CONSULTANTS DU GROUPE DE TRAVAIL AD HOC

Laure Malherbe, Laurence Rouil, Morgane Salomon, Laurent Létinois (*INERIS – Institut national de l'environnement industriel et des risques*)

---

### AUTRES INSTITUTIONS ET PERSONNES AYANT CONTRIBUÉ AU RAPPORT

Susanne Lindahl, Viviane André, Andrea Bianchini, Nicola Ostertag (*Commission européenne, Direction générale Environnement – DG ENV*)

Panagiota Dilara (*Commission européenne, Direction générale Marché intérieur, industrie, entrepreneuriat et PME – DG GROW*)

Michael Bittner (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique*)

Michel Rostagnat (*Groupe de travail Transports de la Convention alpine ; Ministère de la transition écologique, France*)

Sylvia Medina (*Agence nationale de santé publique, France*)

Johannes Kiesel (*Bayerisches Staatsministerium für Gesundheit und Pflege – Ministère d'État bavarois pour la santé et les soins*)



---

## ÉDITION ET RELECTURE

Aureliano Piva, Gabriele Florà, Nora Leszczynski, Nathalie Morelle, Živa Novljan, Laura Wittkopp, Stephanie Wolff (*Secrétariat permanent de la Convention alpine*)

---

## POINTS FOCaux DE LA CONVENTION ALPINE

### ALLEMAGNE

Christian Ernstberger (*Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit – Ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature et de la sûreté nucléaire*)

### AUTRICHE

Katharina Zwettler (*Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie – Ministère fédéral du climat, de l'environnement, de l'énergie, des mobilités, de l'innovation et de la technologie*)

### FRANCE

Isabelle Paillet (*Ministère de la transition écologique*)

### ITALIE

Paolo Angelini (*Ministero della transizione ecologica – Ministère de la transition écologique*)

### LIECHTENSTEIN

Heike Summer (*Amt für Umwelt – Office de l'environnement*)

### MONACO

Wilfrid Deri (*Département des relations extérieures et de la coopération, Principauté de Monaco*)

### SLOVÉNIE

Majda Lovrenčič (*Ministrstvo za okolje in prostor – Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire*)

### SUISSE

Marc Pfister (*Office Fédéral du Développement Territorial – Bundesamt für Raumentwicklung – Ufficio Federale dello Sviluppo Territoriale*)

### UNION EUROPÉENNE (UE)

Andrea Bianchini (*Commission européenne, DG Environnement*)



## PRÉFACES

Le concept d'« air pur des Alpes » évoque un environnement vierge de toute intervention humaine. Or, ceci est bien simpliste : les Alpes, et par conséquent l'air alpin, sont exposés à des phénomènes météorologiques, des réactions chimiques survenant dans l'atmosphère et des activités anthropiques. Ces problématiques ne s'arrêtent pas aux frontières et il nous faut les aborder par le biais de la coopération transnationale. Il est par ailleurs important de se rappeler qu'il n'existe aucun seuil en-dessous duquel les polluants atmosphériques ne représentent pas une menace pour la santé humaine : associer l'arc alpin uniquement à une idée d'air pur signifie sous-évaluer les risques sanitaires auxquels sont exposées les populations locales et retarder, peut-être, le développement de politiques publiques solides.

Tous ces éléments montrent clairement pourquoi la Convention alpine a jugé essentiel de consacrer son huitième Rapport sur l'état des Alpes à la qualité de l'air. En tant que traité international signé entre les huit pays alpins et l'UE, qui réunit un réseau de politiques, de scientifiques et d'organisations civiles sur l'ensemble des Alpes, la Convention a, une fois encore, été l'enceinte idéale pour approfondir la recherche sur ce qu'est l'état actuel de la qualité de l'air alpin, identifier les principales sources spécifiques de polluants atmosphériques dans l'arc alpin, présenter les actions entreprises aux différents niveaux politiques et mettre en avant des recommandations pratiques et efficaces en vue d'améliorer la qualité de l'air. En bref, il ressort de l'analyse que la situation en la matière est bonne, mais pourrait – et doit – être améliorée. Il ressort également que les Alpes recèlent effectivement des défis et des facteurs de risque, notamment dans certaines zones et en ce qui concerne des polluants précis. Plus important encore, le Rapport démontre que, si l'on veut assurer la santé et le bien-être des résidents et des visiteurs, c'est ensemble et maintenant qu'il faut agir !

C'est pourquoi je tiens à exprimer ma gratitude à la présidence française de la Convention alpine pour avoir choisi ce thème, ainsi qu'au Groupe de travail international ad hoc pour avoir mené une investigation si détaillée, actuelle et approfondie de la situation, qui ouvre la voie à la mise en place de solutions plus précises et efficaces aux différents niveaux administratifs.

---

**Alenka Smerkolj**

*Secrétaire générale de la Convention alpine*



On associe rarement les Alpes à la pollution. Nos montagnes apparaissent, souvent à juste titre, comme des havres de respiration. Elles contrastent avec nos villes dont beaucoup sont polluées, notamment par les émissions du trafic automobile. Mais sommes-nous certains d'y trouver de l'air pur ? Que savons-nous en fait sur la pollution atmosphérique des vallées alpines ? Doit-on encore améliorer l'air des Alpes ? Quelles solutions pourraient être disponibles ?

C'est à ces questions que s'est attachée la Convention alpine avec le huitième Rapport sur l'état des Alpes dans le cadre de la présidence française de 2019-2020. Des données précises ont été recueillies, les mécanismes de la pollution et leurs effets sur la santé et la nature ont été explorés, les derniers résultats des recherches sur l'état de l'atmosphère des Alpes ont été compilés et présentés et, surtout, les bonnes pratiques ont été identifiées.

Le rapport confirme que la qualité de l'air dans les Alpes est plutôt bonne. Néanmoins, plusieurs vallées des Alpes subissent des pollutions excessives. De façon générale, les teneurs en particules de diamètre supérieur à 2,5 µm sont trop élevées au regard des valeurs préconisées par l'Organisation mondiale de la santé.

Le chauffage au bois, la circulation automobile et l'agriculture sont, selon les endroits et les périodes de l'année, les principaux responsables de ces pollutions. Différentes initiatives ont été prises par les collectivités locales et les États pour réduire la pollution. Certaines mesures offrent de multiples avantages, en réduisant également les émissions de gaz à effet de serre et les nuisances sonores.

Le rapport conclut son analyse par dix recommandations pour encore améliorer l'air des Alpes, protéger leurs habitants et attirer les visiteurs. Qu'il me soit permis d'espérer que ces recommandations seront entendues, que les autorités politiques s'appuieront sur cet arsenal de possibilités pour développer des mesures qui leur permettront de répondre aux aspirations des citoyens pour un air de qualité, prémisses notable pour une bonne santé.

Je voudrais aussi souligner que ce huitième Rapport sur l'état des Alpes est avant tout l'œuvre d'un collectif. Chaque membre de la Convention alpine a nommé des experts hautement qualifiés et motivés pour participer au patient travail de collecte des données et de synthèse des enseignements à en tirer. Des experts de haut niveau ont examiné la littérature scientifique la plus récente tant pour ce qui concerne les sources de pollution et les transferts dans l'atmosphère que les impacts sur la santé et sur les écosystèmes. L'esprit de coopération a prévalu lors de nos réunions, dont beaucoup se sont déroulées en visioconférence du fait du contexte sanitaire.

J'ai eu l'honneur de coordonner ce groupe, ce fut un plaisir de constater l'esprit collaboratif de tous, la recherche permanente du compromis et surtout l'empathie entre nous tous. C'est cet esprit qui fait la grandeur de la Convention alpine. Je voudrais remercier tous les membres du groupe ainsi que les Parties à la Convention alpine pour leur soutien sans relâche.

---

**Éric Vindimian**

*Coordonnateur du Groupe de travail ad hoc pour la préparation du RSA 8*

# TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	14
LISTE DES TABLEAUX	16
ACRONYMES, SYMBOLES ET FORMULES	18
RÉSUMÉ ANALYTIQUE	21
<hr/>	
<b>1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS</b>	<b>25</b>
<hr/>	
<b>2 CADRE LÉGISLATIF CONCERNANT LA QUALITÉ DE L'AIR AMBIANT</b>	<b>28</b>
<b>2.1 Législation de l'Union européenne</b>	<b>28</b>
2.1.1 Directives sur la qualité de l'air ambiant	28
2.1.2 Directive sur les objectifs nationaux de réduction des émissions	30
<b>2.2 Réglementations nationales en Autriche, au Liechtenstein, à Monaco et en Suisse</b>	<b>31</b>
2.2.1 NO <sub>2</sub>	32
2.2.2 Particules	32
<b>2.3 Planification de la qualité de l'air</b>	<b>32</b>
<b>2.4 Conventions, accords et coordination à l'échelon international</b>	<b>32</b>
2.4.1 Convention de la CEE-ONU sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance	33
2.4.2 Lignes directrices de l'OMS	33
2.4.3 Autres activités des Nations Unies	34
<hr/>	
<b>3 DESCRIPTION DES POLLUANTS ET DES PROCESSUS ATMOSPHÉRIQUES DANS LES ALPES</b>	<b>35</b>
<b>3.1 Processus météo-climatiques</b>	<b>35</b>
3.1.1 La météorologie des Alpes favorise la pollution atmosphérique	35
3.1.2 Régimes d'ozone	39
3.1.3 Transport à longue distance des masses d'air	39
3.1.4 Effets du changement climatique sur la qualité de l'air dans les Alpes	40
<b>3.2 Sources</b>	<b>41</b>
3.2.1 Combustion de biomasse	42
3.2.2 Transport routier	46
3.2.3 Pollution transfrontière	47
3.2.4 Sources de précurseurs d'aérosols secondaires	47
3.2.4.1 Aérosols secondaires inorganiques	48
3.2.4.2 Aérosols organiques secondaires	48



<b>4 Effets de la pollution atmosphérique</b>	<b>50</b>
4.1 Effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine : mortalité	50
4.2 Effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine : morbidité	50
4.3 Effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine dans la région alpine	52
4.4 Effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes	53
<b>5 ÉTAT DE LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES ALPES</b>	<b>55</b>
<b>5.1 Sources des données</b>	<b>55</b>
5.1.1 Répartition géographique : vue d'ensemble	55
5.1.2 Répartition géographique par polluant	58
<b>5.2 État des concentrations</b>	<b>61</b>
5.2.1 Comparaison avec les objectifs européens en matière d'environnement et les lignes directrices de l'OMS	61
5.2.2 Comparaison avec les seuils nationaux	67
<b>5.3 Analyse des tendances, corrélation avec les stratégies d'atténuation</b>	<b>70</b>
5.3.1 NO <sub>2</sub>	70
5.3.2 Ozone	71
5.3.3 MP <sub>10</sub>	71
5.3.4 MP <sub>2,5</sub>	71
5.3.5 BaP	71
<b>6 PROJETS DE RECHERCHE ET OBSERVATOIRES PERTINENTS POUR LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES ALPES</b>	<b>72</b>
6.1 Projet de recherche sur l'environnement « PureAlps »	72
6.2 Stations de mesure de l'environnement en haute altitude	73
6.3 Réseaux de surveillance existant dans le périmètre alpin (autres que ceux relevant des Directives 2008/50/CE et 2004/107/CE) axés sur l'évaluation de la pollution atmosphérique	74
6.3.1 Réseau allemand sur les particules ultrafines	74
6.3.2 Projet de recherche sur l'ozone NextData	74
6.4 Observation de la qualité de l'air dans la région alpine dans le cadre de l'Observatoire virtuel alpin (VAO) – Une contribution à la Convention alpine	75
6.4.1 Le système d'information bioclimatique (BioCliS)	78
6.4.2 Deux exemples de scénarios	78
6.5 Quel avenir pour la surveillance des polluants ambiants ?	79

<b>7</b>	<b>EXEMPLES ET SOLUTIONS INTELLIGENTES POUR RÉDUIRE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE</b>	<b>80</b>
<b>7.1</b>	<b>Combustion de biomasse et systèmes de chauffage urbain</b>	<b>80</b>
7.1.1	Incitations financières	80
7.1.1.1	<i>Réduction des émissions de particules des dispositifs de chauffage au bois dans les ménages, France</i>	80
7.1.2	Amélioration des connaissances	81
7.1.2.1	<i>Mesures concernant l'utilisation du bois pour le chauffage, Slovénie</i>	81
7.1.2.2	<i>Transfert de connaissances à différents niveaux administratifs : Cercl'Air – société suisse sur la qualité de l'air, Suisse</i>	81
7.1.2.3	<i>Accord sur les petits dispositifs de combustion du bois, Italie</i>	81
7.1.3	Chauffage urbain	82
7.1.3.1	<i>Mesures de chauffage des bâtiments conformément au Plan de maintien de la qualité de l'air, Slovénie</i>	82
7.1.3.2	<i>Système urbain de chauffage au bois à Disentis-Mustér, Suisse</i>	82
7.1.3.3	<i>Extension du système de chauffage urbain, Bavière, Allemagne</i>	82
7.1.3.4	<i>Programme de soutien à l'environnement pour le chauffage urbain à la biomasse, Autriche</i>	83
<b>7.2</b>	<b>Réduction des émissions de COV et d'autres précurseurs de l'ozone</b>	<b>83</b>
7.2.1.1	<i>Réglementation en matière de COVNM, Suisse</i>	83
7.2.1.2	<i>Législation plus stricte pour les installations émettrices de COV, Allemagne</i>	84
<b>7.3</b>	<b>Secteur des transports – focus sur la réduction du NO<sub>2</sub> et des MP</b>	<b>85</b>
7.3.1	Mesures réglementaires et politique de transfert modal de la route au rail : transport de marchandises et de passagers	85
7.3.1.1	<i>Transfert modal dans le transport de marchandises, à l'échelle des Alpes</i>	85
7.3.1.2	<i>Politique de transfert modal dans le transport transalpin de marchandises, Suisse</i>	87
7.3.1.3	<i>Transfert modal et politique d'interdiction des véhicules polluants dans le transport transalpin de marchandises et de passagers, Autriche</i>	88
7.3.1.4	<i>Zones à faibles émissions et bonus de conversion des véhicules, France</i>	89
7.3.1.5	<i>Exemple de bonnes pratiques maritimes : la Zone de contrôle des émissions de navigation maritime de Monaco, Principauté de Monaco</i>	89
7.3.1.6	<i>Mesures réglementaires dynamiques – BrennerLEC, Italie</i>	90
7.3.2	Gestion de la mobilité	90
7.3.2.1	<i>Cadre institutionnel pour la mobilité durable à travers un bureau de coordination, Suisse</i>	91
7.3.2.2	<i>SuisseMobile - pour des voyages sans voiture à travers le pays alliant tourisme, loisirs, hébergement hôtelier et points d'intérêt, Suisse</i>	91
7.3.2.3	<i>Concept de gestion de la mobilité en Carinthie, Autriche</i>	92
7.3.2.4	<i>Un système de transports publics plus attractif grâce au transport gratuit des scolaires, aux subventions accordées aux transports publics, à la gratuité des transports en commun pendant le week-end, Bavière, Allemagne</i>	92
7.3.2.5	<i>Concept de mobilité incluant un projet de train régional - Secteur des transports, Principauté du Liechtenstein</i>	93
7.3.2.6	<i>Promotion du cyclisme à Salzbourg, Autriche</i>	94



7.3.2.7	<i>Promotion générale de l'utilisation de vélos à la place des véhicules motorisés en Bavière, Allemagne</i>	94
7.3.2.8	<i>Promotion de la mobilité intelligente par Car Postal Suisse pour augmenter la part modale des transports publics, Suisse</i>	95
7.3.2.9	<i>Renforcer la mobilité douce, Principauté de Monaco</i>	95
<b>7.3.3</b>	<b>Mesures techniques : carburants/systèmes de propulsion alternatifs</b>	<b>95</b>
7.3.3.1	<i>Stratégie énergétique 2050/économies d'énergie, Suisse</i>	96
7.3.3.2	<i>Analyse approfondie de la promotion des modes de transport sans carburants fossiles sur les voies publiques, Suisse</i>	96
7.3.3.3	<i>Promotion de l'e-mobilité, Bavière, Allemagne</i>	97
<b>7.3.4</b>	<b>Évolution du transport routier de marchandises</b>	<b>98</b>
<b>7.4</b>	<b>Planification intégrée : planification de la mobilité et aménagement du territoire</b>	<b>99</b>
7.4.1.1	<i>Projet de territoire Suisse, Suisse</i>	99
7.4.1.2	<i>Plan intégré de protection de l'atmosphère, France</i>	100
7.4.1.3	<i>Programme commun régional pour l'air pur concernant différents secteurs, par exemple celui des transports, Italie</i>	101
<b>7.5</b>	<b>Réduction des émissions d'ammoniac provenant de l'agriculture dans les zones de montagne</b>	<b>101</b>
7.5.1.1	<i>Réduction des émissions d'ammoniac provenant de l'agriculture, Suisse</i>	101
<b>8</b>	<b>SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS STRATÉGIQUES</b>	<b>102</b>
<b>8.1</b>	<b>Réduire les émissions de particules (BaP compris) dues à la combustion du bois</b>	<b>102</b>
8.1.1	<i>Mesures et informations</i>	102
8.1.2	<i>Soutenir la mise à niveau des systèmes de chauffage à petite échelle</i>	102
<b>8.2</b>	<b>Promouvoir une mobilité propre</b>	<b>104</b>
8.2.1	<i>Adopter des politiques de mobilité ambitieuses</i>	104
8.2.2	<i>Investir dans le transport propre</i>	104
<b>8.3</b>	<b>Réduire les émissions de l'agriculture</b>	<b>105</b>
<b>8.4</b>	<b>Politiques sur la qualité de l'air</b>	<b>105</b>
8.4.1	<i>Mettre en place des initiatives de qualité de l'air dans les Alpes</i>	105
8.4.2	<i>Étendre l'utilisation des critères des conventions d'Espoo et CPATLD</i>	106
8.4.3	<i>Soutenir l'initiative du « Pacte vert pour l'Europe » dans le domaine de la pollution de l'air</i>	106
<b>8.5</b>	<b>Mieux connaître les causes anthropiques de la pollution atmosphérique</b>	<b>106</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>108</b>
<b>ANNEXE 1</b>	<b>APERÇU DES POLLUANTS LES PLUS COURANTS</b>	<b>116</b>
<b>ANNEXE 2</b>	<b>PROJETS D'INTÉRÊT DANS LA RÉGION ALPINE</b>	<b>120</b>

# LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1 :</b>	Carte montrant le périmètre de la Convention alpine.	25
<b>Figure 2 :</b>	Corrélation entre la différence de température à deux altitudes et les $MP_{10}$ dans la vallée de l'Arve.	36
<b>Figure 3 :</b>	Vue schématique des processus de transport de l'air pollué depuis la couche limite des plaines et vallées adjacentes jusqu'au niveau des plus hauts sommets alpins.	36
<b>Figure 4 :</b>	Tendances des concentrations hivernales de $CO$ , $NO_2$ et $O_3$ dans la vallée de l'Inn rapportées à leur distributions en fonction du temps et l'espace.	37
<b>Figure 5 :</b>	Schéma des processus chimiques et physiques responsables de l'ozone troposphérique.	38
<b>Figure 6 :</b>	Évolution des émissions dues aux poêles destinés à chauffer une seule pièce, en Suisse.	42
<b>Figure 7 :</b>	Résultats du projet « Sources » montrant les contributions des sources de $MP_{10}$ dans différents endroits de France.	49
<b>Figure 8 :</b>	Carte de la baisse de mortalité prévue dans un scénario sans pollution anthropique dans les différentes communes de la vallée de l'Arve.	52
<b>Figure 9 :</b>	Dépassement maximal en 2010, par $km^2$ , des charges critiques dans les forêts et les écosystèmes (semi-)naturels suisses suite à des dépôts d'azote.	54
<b>Figure 10 :</b>	Répartition géographique des stations de surveillance en opération dans la région alpine sur la période 2016-2018, y compris les stations des réseaux de surveillance cantonaux et communaux suisses pour la même période.	56
<b>Figure 11 :</b>	Histogramme montrant la répartition par altitude des stations de surveillance dans la région alpine, y compris les stations des réseaux de surveillance cantonaux et communaux suisses, en opération sur la période 2016-2018.	56
<b>Figure 12 :</b>	Carte de stations de mesure pour le dioxyde d'azote, l'ozone, les $MP_{10}$ , les $MP_{2,5}$ , le benzo[a]pyrène et les métaux lourds dans les Alpes.	58
<b>Figure 13 :</b>	Répartition des concentrations moyennes annuelles de $NO_2$ en 2016, 2017 et 2018 dans la région alpine.	62
<b>Figure 14 :</b>	Carte de l'évolution du dépassement de l'objectif à long terme pour l' $O_3$ pour la protection de la santé humaine dans la région alpine.	62
<b>Figure 15 :</b>	Distribution des concentrations moyennes annuelles de $MP_{10}$ en 2016, 2017 et 2018 dans la région alpine.	63
<b>Figure 16 :</b>	Dépassement de la valeur limite journalière de $MP_{10}$ pour la protection de la santé humaine en 2016, 2017 et 2018 dans les zones françaises et italiennes de la région alpine.	64
<b>Figure 17 :</b>	Distribution des concentrations moyennes annuelles de $MP_{2,5}$ en 2016, 2017 et 2018 dans la région alpine.	65
<b>Figure 18 :</b>	Carte de la concentration moyenne annuelle de $MP_{2,5}$ en 2018 dans les Alpes.	65
<b>Figure 19 :</b>	Distribution des concentrations moyennes annuelles de BaP dans les $MP_{10}$ en 2016, 2017 et 2018 dans la région alpine.	66
<b>Figure 20 :</b>	Carte de la concentration moyenne annuelle de BaP en 2018 dans la région alpine.	66



<b>Figure 21 :</b> Variation des concentrations moyennes annuelles, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , du $\text{NO}_2$ dans le périmètre de la Convention alpine, de 2009 à 2018.	68
<b>Figure 22 :</b> Variation du nombre de jours où la concentration d'ozone a dépassé la limite de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant plus de 8h dans le périmètre de la Convention alpine, de 2009 à 2018.	68
<b>Figure 23 :</b> Évolution des concentrations moyennes annuelles d' $\text{O}_3$ par classification des stations entre 2009 et 2018.	69
<b>Figure 24 :</b> Variation des concentrations moyennes annuelles de $\text{MP}_{10}$ , en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , dans le périmètre de la Convention alpine, de 2009 à 2018.	69
<b>Figure 25 :</b> Évolution de la moyenne annuelle de $\text{MP}_{2,5}$ , en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , dans les stations de fond urbaines et suburbaines dans le périmètre de la Convention alpine, de 2009 à 2018.	70
<b>Figure 26 :</b> Tendances récentes du BaP à une station de surveillance italienne dans les Alpes.	70
<b>Figure 27 :</b> Résultat de la mesure liée à la masse de l'air : impact sur les pics alpins depuis trois directions dominantes.	73
<b>Figure 28 :</b> La station de recherche Schneefernerhaus sur le Zugspitze.	73
<b>Figure 29 :</b> Observatoire du Sonnblick.	74
<b>Figure 30 :</b> Concentration moyenne de la colonne de $\text{NO}_2$ troposphérique pour la période de janvier à juin 2019 sur la région alpine.	75
<b>Figure 31 :</b> Système d'information bioclimatique par district.	76
<b>Figure 32 :</b> Simulation de l'influence du doublement du trafic routier pendant une période de 10 jours en février 2018 sur la concentration de $\text{NO}_2$ et sur la concentration de poussières fines ( $\text{MP}_{10}$ ).	77
<b>Figure 33 :</b> Différence entre les concentrations de $\text{NO}_2$ mesurées dans 25 stations au sol en Lombardie et le modèle WRF-POLYPHEMUS/DLR pour la période du 1er février 2020 au 13 avril 2020.	78
<b>Figure 34 :</b> Itinéraires de transport dans les Alpes.	85
<b>Figure 35 :</b> Comparaison des facteurs de coûts externes supplémentaires pour le transport routier et le transport ferroviaire dans les zones alpines.	86
<b>Figure 36 :</b> Évolution des polluants atmosphériques et des émissions de $\text{CO}_2$ entre 2004 et 2018 sur les autoroutes A2 et A13 dans la région alpine.	87
<b>Figure 37 :</b> Évolution des facteurs d'émission de $\text{NO}_x$ et $\text{NO}_2$ sur l'autoroute A12 en Autriche.	88
<b>Figure 38 :</b> Observation et analyse des flux transalpins de transport de marchandises dans deux tunnels transalpins.	98

# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1 :</b>	Normes de qualité de l'air pour la protection de la santé humaine et de la végétation, telles qu'édictées dans les Directives de l'UE sur la qualité de l'air ambiant.	<b>29</b>
<b>Tableau 2 :</b>	Comparaison entre les normes de qualité de l'air pour les matières particulaires, le dioxyde d'azote et le benzo[a]pyrène dans la région alpine.	<b>31</b>
<b>Tableau 3 :</b>	AQG et niveaux de référence estimés.	<b>33</b>
<b>Tableau 4 :</b>	Contribution de la combustion de biomasse, du trafic et de la formation d'aérosols secondaires à la concentration de MP <sub>10</sub> dans certaines vallées alpines.	<b>41</b>
<b>Tableau 5 :</b>	Facteurs d'émissions pour certaines technologies de combustible utilisées pour l'inventaire national autrichien sur les émissions atmosphériques.	<b>44</b>
<b>Tableau 6 :</b>	Comparaison entre les valeurs d'émission existantes des systèmes de chauffage au bois et les exigences futures de la Directive sur les produits liés à l'énergie.	<b>45</b>
<b>Tableau 7 :</b>	Dépassement des charges critiques d'azote nutritif dans différents écosystèmes protégés en Suisse en 1990, 2000 et 2010.	<b>54</b>
<b>Tableau 8 :</b>	Répartition, par type de milieu, des 234 stations de surveillance.	<b>55</b>
<b>Tableau 9 :</b>	Stations de mesure de la qualité de l'air dans le périmètre de la Convention alpine.	<b>57</b>
<b>Tableau 10 :</b>	Valeurs limites d'émissions pour les installations de chauffage urbain à la biomasse.	<b>83</b>
<b>Tableau 11 :</b>	Comparaison des émissions entre le transport de marchandises ferroviaire et routier. Année de référence : 2018.	<b>86</b>



# ACRONYMES, SYMBOLES ET FORMULES

<b>AEE :</b>	Agence européenne pour l'environnement	<b>CPATLD :</b>	Convention CEE-ONU sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance
<b>AlpEnDAC :</b>	Alpine Environmental Data Analysis Center	<b>DE :</b>	Allemagne
<b>AOP :</b>	Aérosol organique primaire	<b>DLR :</b>	Centre allemand pour l'aéronautique et l'aérospatiale ( <i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i> )
<b>AOS :</b>	Aérosol organique secondaire	<b>FL :</b>	Principauté du Liechtenstein
<b>AQG :</b>	Lignes directrices relatives à la qualité de l'air ( <i>Air Quality Guidelines</i> )	<b>FR :</b>	France
<b>As :</b>	Arsenic	<b>GNC :</b>	Gaz naturel comprimé
<b>AS :</b>	Aérosol secondaire	<b>HAP :</b>	Hydrocarbure aromatique polycyclique
<b>AT :</b>	Autriche	<b>Hg :</b>	Mercure
<b>AVP :</b>	Années de vie perdues	<b>HULIS :</b>	Substances atmosphériques de type humique
<b>BaP :</b>	Benzo[a]pyrène	<b>IEM :</b>	Indicateur d'exposition moyenne
<b>BioClis :</b>	Système d'information bioclimatique	<b>IT :</b>	Italie
<b>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> :</b>	Benzène	<b>MC :</b>	Principauté de Monaco
<b>Cd :</b>	Cadmium	<b>MP :</b>	Matières particulaires
<b>CE :</b>	Commission européenne	<b>MP<sub>10</sub> :</b>	Matières particulaires d'un diamètre inférieur à 10 µm
<b>CEE-ONU :</b>	Commission économique pour l'Europe des Nations-Unies	<b>MP<sub>2,5</sub> :</b>	Matières particulaires d'un diamètre inférieur à 2,5 µm
<b>CH :</b>	Suisse	<b>NH<sub>3</sub> :</b>	Ammoniac
<b>CIRC :</b>	Agence internationale de recherche sur le cancer	<b>Ni :</b>	Nickel
<b>CO :</b>	Monoxyde de carbone	<b>NO :</b>	Oxyde nitrique
<b>COV :</b>	Composé organique volatil	<b>NO<sub>2</sub> :</b>	Dioxyde d'azote
<b>COVNM :</b>	Composé organique volatil non méthanique	<b>NO<sub>x</sub> :</b>	Oxydes d'azote



<b>O<sub>3</sub> :</b>	Ozone	<b>UFS :</b>	Station de recherche sur l'environnement du Schneefernerhaus Zugspitze ( <i>Umweltforschungsstation Schneefernerhaus Zugspitze</i> )
<b>OFEV :</b>	Office fédéral de l'environnement (CH)	<b>US EPA :</b>	Agence de protection de l'environnement des États-Unis
<b>OMM :</b>	Organisation météorologique mondiale	<b>VAG :</b>	Veille de l'atmosphère globale
<b>OMS :</b>	Organisation mondiale de la santé	<b>VAO :</b>	Observatoire virtuel alpin ( <i>Virtual Alpine Observatory</i> )
<b>OPair :</b>	Ordonnance sur la protection de l'air (CH)	<b>ZFE :</b>	Zone à faibles émissions
<b>Pb :</b>	Plomb		
<b>PCB :</b>	Polychlorobiphényles		
<b>PEN :</b>	Plafonds d'émission nationaux		
<b>PERC :</b>	Perchloroéthylène		
<b>PNUE :</b>	Programme des Nations Unies pour l'Environnement		
<b>POC :</b>	Pesticides organochlorés		
<b>POP :</b>	Polluant organique persistant		
<b>ppb :</b>	Partie par milliard ( <i>Part per billion</i> )		
<b>PUF :</b>	Particules ultrafines, d'un diamètre inférieur à 0,1 µm		
<b>SI :</b>	Slovénie		
<b>SO<sub>2</sub> :</b>	Dioxyde de soufre		
<b>SOMO35 :</b>	Pour l'ozone, somme des moyennes journalières maximales sur huit heures supérieures à 35 parties par milliard		
<b>SUERA :</b>	Stratégie de l'Union européenne pour la région alpine		
<b>UE :</b>	Union européenne		

**UN APERÇU DES POLLUANTS LES PLUS COMMUNS EST FOURNI EN ANNEXE 1**





## RÉSUMÉ ANALYTIQUE

Les dispositions légales sur la qualité de l'air en Europe et dans les pays alpins, ainsi que les conventions internationales en matière de pollution atmosphérique, stimulent l'augmentation de la connaissance de ces phénomènes, la compréhension de leurs mécanismes sous-jacents et leurs tendances et la prise de mesures politiques appropriées pour améliorer la qualité de l'air.

Si ces règlements et accords à grande échelle fixent un cadre très utile, ils ne sont toutefois pas nécessairement adaptés à la situation alpine. Généralement, les Alpes se caractérisent par une haute qualité de l'air, dont bénéficient tant la population résidente que les visiteurs : l'air pur est à la fois une *commodité* pour les habitants et un élément attractif pour les touristes, qui apprécient les paysages et les activités récréatives qui s'offrent à eux. N'oublions pas par ailleurs qu'une mauvaise qualité de l'air est préjudiciable à la santé humaine. La pollution atmosphérique est le principal facteur de risque environnemental pour la santé humaine et a un impact négatif sur une grande partie des écosystèmes, comme en fait état la littérature scientifique.

L'analyse des données fournies par toutes les stations de surveillance fixes présentes dans les Alpes montre clairement que, pour la plupart, les niveaux de pollution sont inférieurs aux limites établies par l'Union européenne (UE). Toutefois, la situation change lorsque l'on mesure la pollution de l'air dans les Alpes à l'aune d'autres objectifs de qualité, tels que ceux que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) prend en compte pour la protection de la santé humaine : par exemple, et bien qu'elle diminue depuis peu, la concentration de particules fines d'un diamètre inférieur à  $2,5 \mu\text{m}$  ( $\text{MP}_{2,5}$ ) dépasse dans certains cas les niveaux recommandés par l'OMS. La même chose peut être observée dans certaines stations pour le benzo[a]pyrène (Bap), un hydrocarbure aromatique polycyclique cancérigène, lié aux particules. En outre, dans certaines forêts alpines, les dépôts d'azote liés aux émissions d'ammoniac issues de l'agriculture dépassent les charges critiques. Toutefois, une analyse des tendances a été effectuée, qui montre que la situation s'est généralement améliorée au cours de la dernière décennie pour tous les polluants considérés, à l'exception de l'ozone.

Ce rapport analyse les mécanismes de pollution atmosphérique tels que décrits dans la littérature scientifique récente. Plusieurs programmes de recherche ont été menés dans les Alpes au cours de la dernière décennie et leurs résultats, publiés dans la littérature scientifique, ont été examinés afin d'identifier les sources de pollution atmosphérique. Dans les Alpes, les émissions de polluants se produisent plus particulièrement là où se concentrent le trafic et les villes. Le chauffage est souvent basé sur la combustion du bois, ce qui est positif en termes d'atténuation du changement climatique, mais exige des précautions pour éviter l'émission de pollution particulaire. Les aérosols secondaires (AS) provenant de sources multiples, dont l'agriculture, augmentent la pollution particulaire et les dépôts d'azote dans les sols. La région alpine présente également des conditions météorologiques particulières. Il s'y produit notamment des inversions de température qui empêchent les masses d'air de se mélanger verticalement ; de ce fait, la pollution est renvoyée vers le sol, d'où la présence dans les Alpes de niveaux de pollution élevés sur certains sites. En général, il devrait être possible d'améliorer la qualité de l'air pour atteindre le très haut niveau exigé par la Convention alpine dans son objectif c) : « obtenir une réduction drastique des émissions de polluants et de leurs nuisances dans l'espace alpin [...] à un taux non nuisible aux hommes, à la faune et à la flore » (Convention alpine, 2018).

Ce rapport énumère également un certain nombre de bonnes pratiques et de solutions intelligentes mises en œuvre dans les pays alpins par les autorités régionales et locales, ainsi que par les municipalités. Bien que non exhaustif, cet ensemble de solutions intelligentes montre clairement que les habitants des Alpes s'engagent activement pour améliorer la qualité de leur air. Ces mesures couvrent toute une série de volets : des systèmes de chauffage à la gestion du trafic et aux politiques de mobilité, de la promotion des technologies propres à des législations locales.

Enfin, et principalement sur la base de ces exemples de solutions intelligentes, un ensemble de recommandations est proposé ci-après afin d'aider les décideurs politiques à améliorer la qualité de l'air dans les Alpes.

### RECOMMANDATION 1

Soutenir les organisations concernées afin de :

- mesurer in situ les particules fines et en particulier le benzo[a]pyrène provenant des poêles et chaudières à bois ;
- informer la population de l'incidence de la combustion du bois de chauffage sur la santé.

### RECOMMANDATION 2

Réduire les émissions du chauffage domestique en améliorant les performances énergétiques globales des bâtiments et en remplaçant les dispositifs de chauffage par des appareils à faibles émissions, à travers le support et l'appui à tous les opérateurs en matière :

- d'amélioration des performances énergétiques des bâtiments ;
- de remplacement des dispositifs de chauffage et chaudières anciens et fortement polluants ;
- de remplacement des combustibles traditionnels par des combustibles plus propres.

### RECOMMANDATION 3

Après concertation et évaluation environnementale, adopter des initiatives régionales et locales de mobilité pour le transport de passagers et de marchandises en favorisant les transports en commun et les modes actifs, tout en couplant incitations et restrictions lorsqu'un impact important sur la qualité de l'air est attendu.

### RECOMMANDATION 4

Promouvoir une stratégie de mobilité propre et de véhicules zéro émission, par exemple en utilisant un système équilibré de taxation et d'incitations pour internaliser les coûts externes de la pollution dans les coûts réels du transport, et renforcer les signaux du marché en faveur d'une mobilité propre et de véhicules zéro émission.

### RECOMMANDATION 5

Promouvoir l'utilisation de la gestion intelligente du trafic, par exemple des limites de vitesse, de la tarification routière, de la favorisation des véhicules propres sur les autoroutes et tunnels alpins, pour réduire les émissions, ainsi que :

- encourager la mise en œuvre de technologies de transport alternatif et de transport combiné ;
- intégrer les transports publics dans les systèmes de mobilité multimodale ;
- créer des incitations pour le transfert modal du transport de passagers et de marchandises.

**RECOMMANDATION 6**

Soutenir le développement de bonnes pratiques agricoles limitant les émissions de composés azotés, comme l'ammoniac, et la combustion à ciel ouvert des déchets verts et des résidus de coupe dans la région alpine.

**RECOMMANDATION 7**

Les Parties contractantes de la Convention alpine sont encouragées à mettre en place des initiatives pour la qualité de l'air intégrant des mesures visant à s'attaquer à leurs principales sources de pollution atmosphérique comme le chauffage domestique, la mobilité, l'énergie, l'industrie et l'agriculture.

**RECOMMANDATION 8**

Les Parties contractantes de la Convention alpine devraient se concerter avec les pays et régions voisins pour stimuler la réduction des transports transfrontière de polluants dans la zone géographique couverte par la Convention alpine.

**RECOMMANDATION 9**

Les Parties contractantes de la Convention alpine devraient :

- soutenir le chapitre sur la qualité de l'air du Pacte vert pour l'Europe ;
- s'efforcer de satisfaire aux lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air.

**RECOMMANDATION 10**

Développer des études approfondies et spécifiques sur la qualité de l'air dans les Alpes visant à étudier l'influence des sources de pollution atmosphérique, en particulier lorsque la surveillance fait apparaître ou laisse envisager des problèmes de qualité de l'air ambiant, ainsi que sur les questions sociales et politiques qui y sont liées.



# 1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Les Alpes sont la région de montagne centrale de l'Europe. Quatorze millions de personnes y vivent et des millions de touristes apprécient leurs merveilleux paysages, leur patrimoine culturel et leurs installations de loisirs, ainsi que l'air pur que l'on y respire. La Convention alpine couvre une surface de 190 700 km<sup>2</sup>, répartie sur huit pays et comprenant plusieurs villes de plus de 100 000 habitants ; la région est également entourée de grandes villes européennes. Ce rapport traite de la qualité de l'air dans le périmètre de la Convention alpine tel qu'indiqué sur la carte (figure 1).

Globalement, dans la région alpine, la qualité de l'air est d'un assez bon niveau. Toutefois, il s'y trouve aussi des sources de polluants atmosphériques : par exemple, les agglomérations et les autoroutes, ainsi que les émissions issues de la combustion du bois et de l'industrie. En outre, les

masses d'air régionales et celles transportées à longue distance pourraient contribuer à la pollution de l'air alpin. Bien que certaines émissions naturelles soient liées à des phénomènes chimiques atmosphériques, les activités humaines sont la cause principale de la dégradation de la qualité de l'air dans les Alpes.

L'orographie particulière des Alpes se traduit également par une distribution complexe et par une concentration des polluants dans les vallées densément peuplées. Les vallées et les contreforts constituent une sorte de piège géographique et météorologique pour les polluants atmosphériques. De plus, la région alpine est un système écologique extrêmement sensible. Un air pur dans les Alpes revêt une grande importance, en particulier pour le tourisme, des activités de loisirs saines et la protection des écosystèmes. C'est pourquoi

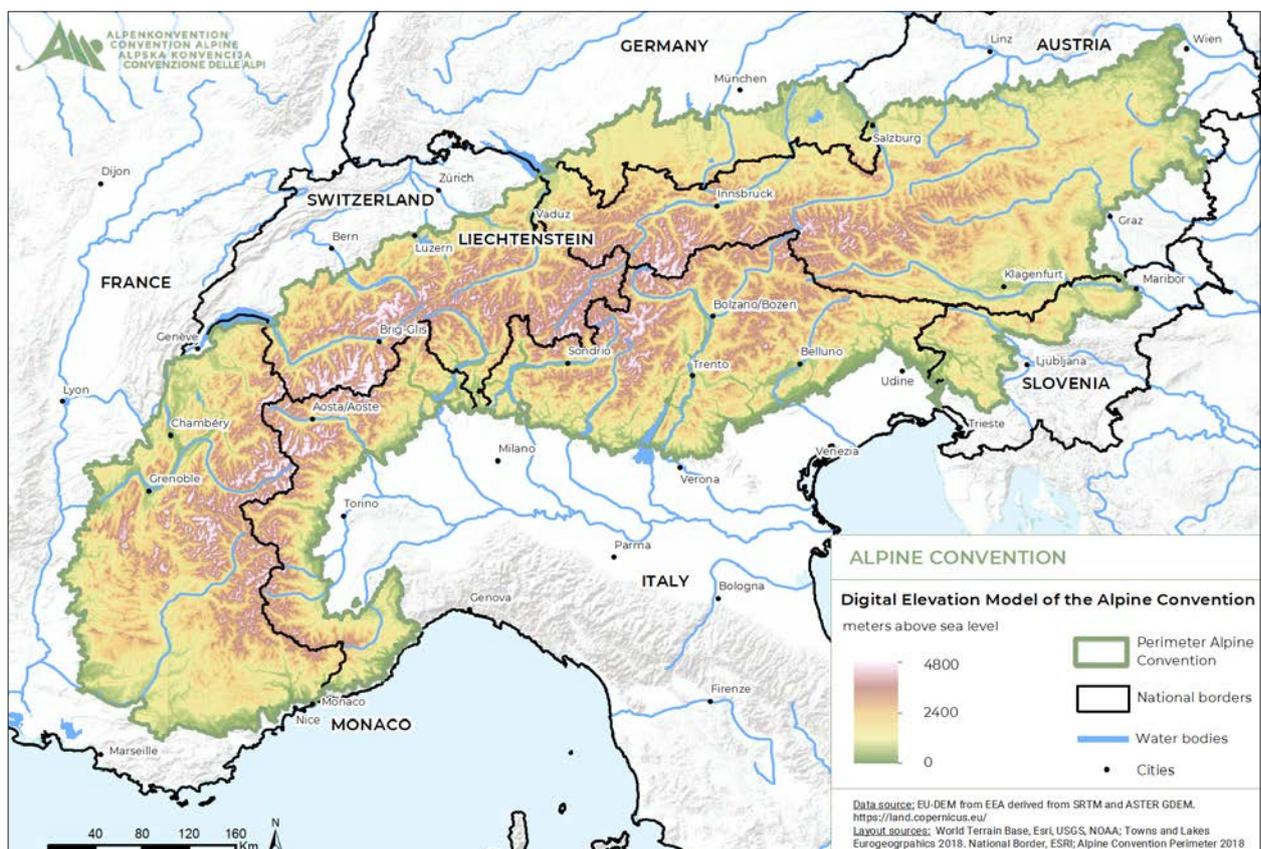


Figure 1 : Carte du périmètre de la Convention alpine.

L'analyse de la qualité de l'air dans les Alpes et l'amélioration de cette qualité sont considérées comme des priorités par les Parties contractantes de la Convention alpine.

Pour ce qui est de la santé et de la conservation de la nature, les principaux polluants sont contrôlés par la législation de l'UE et celle de la Suisse. En outre, les États membres de l'UE et leurs partenaires, ainsi que la Suisse, font partie de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CPATLD), au sein de laquelle plusieurs protocoles régulent d'autres substances comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polluants organiques persistants (POP) ou les métaux lourds.

Suite à une proposition de la présidence française entrante, la XV<sup>e</sup> Conférence alpine (Innsbruck, AT, 4 avril 2019) a établi que le huitième Rapport sur l'état des Alpes aborderait le thème de la qualité de l'air dans les Alpes. Un groupe de travail *ad hoc* composé d'experts de tous les pays alpins a été chargé de s'acquitter de cette tâche : au cours de la période suivante, le groupe a rédigé le présent rapport et l'a soumis à la XVI<sup>e</sup> Conférence alpine (10 décembre 2020), qui l'a approuvé officiellement. Dans sa proposition, la présidence française relevait que, depuis 2006, année du premier Rapport sur l'état des Alpes, qui avait pour thème les transports et la mobilité, la qualité de l'air n'avait pas été suffisamment abordée par la Convention alpine. Or, une haute qualité de l'air constitue aujourd'hui, en même temps que l'atténuation du changement climatique, l'adaptation au changement climatique, la protection de la biodiversité et la promotion d'une économie circulaire, un objectif central des politiques environnementales et sanitaires. L'objectif de la Convention alpine est que « Les Parties contractantes, dans le respect des principes de précaution, du pollueur-payeur et de coopération, assurent une politique globale de préservation et de protection des Alpes » (Convention alpine, 2018). L'alinéa c des obligations générales de la Convention (article 2) énonce quant à lui : « qualité de l'air – [les Parties contractantes prennent des mesures appropriées] en vue d'obtenir une réduction drastique des émissions de polluants et de leurs nuisances dans l'espace alpin ainsi que des apports externes de polluants de manière à parvenir à un taux non nuisible aux hommes, à la faune et à la flore ».

Protéger la santé des citoyens est une préoccupation majeure et la priorité des politiques de qualité de l'air ; pour autant, les impacts de la pollution atmosphérique sur les cultures et les écosystèmes

demeurent eux aussi des questions importantes. Les polluants atmosphériques sont transportés sur de longues distances, indépendamment des frontières nationales, et ont un impact négatif sur la santé humaine et les écosystèmes : ils sont responsables, entre autres, de l'acidification, de l'eutrophisation et de la pollution par l'ozone troposphérique. Le huitième Rapport sur l'état des Alpes se penche sur les cinq problèmes spécifiques requis par la XV<sup>e</sup> Conférence alpine :

- obtenir une vue d'ensemble de la qualité de l'air dans les Alpes, permettant la compréhension des mécanismes complexes qui sous-tendent sa dégradation ;
- dresser une liste des législations internationales, nationales ou locales pertinentes ;
- fournir des informations synthétiques sur les questions sanitaires liées à la pollution de l'air, ainsi que sur ses impacts sur les écosystèmes ;
- identifier de bonnes pratiques pour améliorer la qualité de l'air dans le cadre spécifique des Alpes ;
- formuler un ensemble de recommandations à l'intention des décideurs.

Le cadre réglementaire est analysé dans le premier chapitre du texte afin d'identifier les dispositions légales fixant les seuils (valeurs limites des concentrations dans l'air, valeurs cibles, limites d'émissions, etc.) des concentrations de polluants atmosphériques, les régimes de surveillance, les obligations de présentation de rapports et les règlements d'intervention en cas de dépassement. L'analyse met en évidence les objectifs environnementaux formels de référence devant servir de base de comparaison pour les rapports et les données actuels sur la qualité de l'air.

Toutefois, en s'appuyant sur une combinaison d'études sur l'épidémiologie, la toxicologie et l'exposition, des groupes d'experts ont établi que les êtres humains subissent les impacts négatifs de la pollution atmosphérique même lorsque celle-ci est bien en-dessous des niveaux prévus par les prescriptions légales. Pour certains polluants tels que les particules, il n'y a aucune preuve de l'existence d'un seuil en-dessous duquel aucun effet sur la santé n'est à craindre. Pour les cas où la probabilité d'effet augmente proportionnellement à la concentration d'exposition, l'on peut conventionnellement fixer les objectifs de qualité à des concentrations donnant, pour les effets indésirables, une probabilité de 1/100 000. C'est aussi pour cette raison que l'OMS a formulé un en-



semble de lignes directrices relatives à la qualité de l'air (AQG), qui sont actuellement en cours de révision. Dans son nouveau Pacte vert pour l'Europe (CE, 2019), la Commission européenne a annoncé qu'elle proposerait de *revoir les normes de qualité de l'air de l'UE afin de les aligner plus étroitement sur les lignes directrices de l'OMS*.

La pollution de l'air est définie comme un mélange de polluants gazeux, liquides et solides. Beaucoup d'entre eux, connus sous le nom de **polluants primaires**, sont des substances directement émises dans l'atmosphère. Les **polluants** dits **secondaires** résultent, quant à eux, de réactions chimiques des précurseurs dans l'atmosphère, y compris par l'interaction avec l'eau ou l'irradiation solaire. Il est très important pour une compréhension globale du sujet de la qualité de l'air de savoir quels sont les polluants présents dans l'air ambiant et quels sont les mécanismes qui sous-tendent leur émission, leur dispersion, leur formation, leur altération et leur exposition. Le Rapport se penche sur ces différentes questions à la suite du chapitre consacré au cadre législatif. L'analyse réalisée par les experts du groupe de travail *ad hoc* s'appuie sur les résultats de plusieurs projets de recherche récents portant sur la qualité de l'air dans les Alpes.

Un chapitre important est consacré à l'analyse de l'état de la qualité de l'air dans les Alpes, pour laquelle on s'est appuyé, entre autres, sur la base de données de l'Agence européenne pour l'environnement (AEE).

La compilation des informations et l'analyse des données ont été effectuées de manière à assurer l'homogénéité de la collecte et du calcul des données. Ce chapitre fournit des informations et des cartes à jour concernant la qualité de l'air dans les Alpes et les tendances de cette pollution. S'il confirme que la qualité de l'air a commencé à s'améliorer progressivement dans les Alpes et que les valeurs limites légales sont généralement respectées, il montre également que certains objectifs de qualité plus protecteurs, en particulier en ce qui concerne les  $MP_{2,5}$ , ne sont toujours pas atteints.

Le Rapport donne ensuite un aperçu des projets de recherche pertinents et des observatoires de la qualité de l'air dans les Alpes et analyse les enjeux qui pourraient se poser à l'avenir.

L'identification de bonnes pratiques est une autre contribution importante du Groupe de travail, qui les a qualifiées de *solutions intelligentes*. Le chapitre suivant montre ainsi des exemples de mesures mises en œuvre dans les Alpes, pour affronter à différents niveaux politiques les problèmes soulevés dans les premières parties du rapport.

Dans sa partie finale, le Rapport énumère plusieurs recommandations sur le sujet de la qualité de l'air dans les Alpes, principalement basées sur les solutions intelligentes, qui tentent d'aborder toutes les questions mises en évidence dans le texte.

## 2. CADRE LÉGISLATIF CONCERNANT LA QUALITÉ DE L'AIR AMBIANT

Ce chapitre fournit un aperçu du cadre juridique, en présentant la législation existante pertinente concernant la qualité de l'air dans la région alpine. Il met l'accent sur la qualité de l'air ambiant et se reporte principalement à la législation de l'Union européenne (UE) et à des législations similaires dans les États membres de la Convention alpine mais non de l'UE.

### 2.1 LEGISLATION DE L'UNION EUROPÉENNE

Le cadre législatif en matière de qualité de l'air sur le territoire de la Convention alpine relève dans une large mesure de la législation de l'UE qui, dès le début des années 1970, a développé un cadre juridique pour améliorer la qualité de l'air.

La politique de l'UE sur la qualité de l'air repose sur trois piliers principaux :

- les normes en matière de qualité de l'air ambiant, sous forme de valeurs limites et de valeurs cibles des niveaux de concentration de polluants, énoncées dans les Directives afférentes, dans le but de protéger la santé humaine et l'environnement dans son ensemble.
- les émissions nationales globales de certains polluants atmosphériques, dont traite la Directive sur les objectifs nationaux de réduction des émissions (PEN). Cette Directive énonce entre autres les conditions à remplir pour pouvoir respecter ces engagements au niveau, par exemple, des inventaires nationaux des émissions, des engagements nationaux de réduction des émissions pour cinq polluants clés et des

programmes nationaux de lutte contre la pollution atmosphérique.

- Les normes d'émission et d'efficacité énergétique pour les principales sources de pollution atmosphérique, y compris les émissions automobiles, les produits et l'industrie. Ces normes sont énoncées dans la législation de l'UE visant, par exemple, les émissions industrielles, les émissions des centrales électriques, des véhicules et des carburants destinés aux transports, ainsi que le rendement énergétique des produits et des engins mobiles non routiers.

#### 2.1.1 DIRECTIVES SUR LA QUALITÉ DE L'AIR AMBIANT

Les principaux instruments du premier pilier du cadre de l'UE en matière de qualité de l'air sont deux Directives fixant des normes de qualité de l'air ambiant : la Directive 2008/50/CE et la Directive 2004/107/CE telle que modifiée pour la dernière fois par la Directive de la Commission (UE) 2015/1480. Ces Directives s'appuient sur la législation qui s'est progressivement développée depuis le début des années 80. Elles établissent des normes d'air ambiant pour une série de polluants, dont notamment l'ozone (O<sub>3</sub>), les matières particulaires (MP<sub>10</sub> et MP<sub>2,5</sub>)<sup>1</sup> et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), ainsi que l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques<sup>2</sup> (Directive 2004/107/CE). Ensemble, elles fournissent le cadre actuel<sup>3</sup> pour l'amélioration de la qualité de l'air dans l'UE et établissent des normes (voir tableau 1) à atteindre dans toute l'Europe pour 13 polluants atmosphériques. Le défi de la qualité de l'air étant loin d'être résolu<sup>4</sup>, le cadre juridique actuel a récemment fait l'objet d'un Bilan de qualité<sup>5</sup> se concentrant sur

1. Les MP<sub>10</sub> sont des particules de taille inférieure à 10 µm ; la taille de MP<sub>2,5</sub> est inférieure à 2,5 µ.

2. <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/air-pollution/s>.

3. La Directive-cadre et les trois premières Directives-filles ont été regroupées en 2008 en une seule Directive.

4. Des procédures d'infraction ont été engagées contre plusieurs États membres.

5. Plus d'informations peuvent être trouvées en ligne : [https://ec.europa.eu/environment/air/quality/aqd\\_fitness\\_check\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/air/quality/aqd_fitness_check_en.htm). À la suite du bilan de qualité, les normes de qualité de l'air ont été jugées essentielles pour entraîner les concentrations à la baisse et réduire les niveaux de dépassement. Toutefois, il y a un potentiel d'amélioration sur deux points : les normes de qualité de l'air de l'UE ne sont pas entièrement alignées sur certaines recommandations sanitaires bien établies (et ne comportent pas non plus de mécanisme explicite pour adapter les normes de qualité de l'air aux derniers progrès techniques et scientifiques) et les États membres ont également largement tardé à prendre des mesures appropriées et efficaces pour respecter les normes de qualité de l'air ou au moins pour faire en sorte que la période de dépassement reste la plus courte possible.



Polluant	Période d'établissement de la moyenne	Concentration	Nature juridique	Commentaires
<b>NORMES DE QUALITÉ DE L'AIR POUR LA PROTECTION DE LA SANTÉ HUMAINE</b>				
MP <sub>10</sub>	1 jour	50 µg/m <sup>3</sup>	Valeur limite	À ne pas dépasser plus de 35 fois par année calendaire
	Année calendaire	40 µg/m <sup>3</sup>		
MP <sub>2,5</sub>	Année calendaire	25 µg/m <sup>3</sup>	Valeur limite	Indicateur d'exposition moyenne (IEM) <sup>6</sup> en 2015 (moyenne 2013-2015)  IEM en 2020 ; la réduction en pourcentage dépend de l'IEM initial
		20 µg/m <sup>3</sup>	Obligation en matière de concentration relative à l'exposition	
		0-20 % de réduction de l'exposition	Objectif national de réduction de l'exposition	
Ozone (O <sub>3</sub> )	Maximum journalier de la moyenne sur 8 heures	120 µg/m <sup>3</sup>	Valeur cible	À ne pas dépasser plus de 25 jours par année calendaire, en moyenne calculée sur 3 ans
		120 µg/m <sup>3</sup>	Objectif à long terme	
	1 heure	180 µg/m <sup>3</sup>	Seuil d'information	
		240 µg/m <sup>3</sup>	Seuil d'alerte	
Dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> )	1 heure	200 µg/m <sup>3</sup>	Valeur limite	À ne pas dépasser plus de 18 fois par année calendaire  À mesurer sur trois heures consécutives sur au moins 100 km <sup>2</sup> ou une zone entière
		400 µg/m <sup>3</sup>	Seuil d'alerte	
	Année calendaire	40 µg/m <sup>3</sup>	Valeur limite	
Benzo[a]pyrène (BaP) <sup>7</sup>	Année calendaire	1 ng/m <sup>3</sup>	Valeur cible	Concentration totale dans la fraction MP <sub>10</sub>
Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	1 heure	350 µg/m <sup>3</sup>	Valeur limite	À ne pas dépasser plus de 24 fois par année calendaire  À mesurer sur trois heures consécutives sur au moins 100 km <sup>2</sup> ou une zone entière  À ne pas dépasser plus de 3 fois par année calendaire
		500 µg/m <sup>3</sup>	Seuil d'alerte	
	1 jour	125 µg/m <sup>3</sup>	Valeur limite	
Monoxyde de carbone (CO)	Maximum journalier de la moyenne sur 8 heures	10 mg/m <sup>3</sup>	Valeur limite	
Benzène	Année calendaire	5 µg/m <sup>3</sup>	Valeur limite	
Plomb (Pb)	Année calendaire	0,5 µg/m <sup>3</sup>	Valeur limite	Teneur totale dans la fraction MP <sub>10</sub>
Arsenic (As)	Année calendaire	6 ng/m <sup>3</sup>	Valeur cible	Teneur totale dans la fraction MP <sub>10</sub>
Cadmium (Cd)	Année calendaire	5 ng/m <sup>3</sup>	Valeur cible	Teneur totale dans la fraction MP <sub>10</sub>
Nickel (Ni)	Année calendaire	20 ng/m <sup>3</sup>	Valeur cible	Teneur totale dans la fraction MP <sub>10</sub>
<b>NORMES DE QUALITÉ DE L'AIR POUR LA PROTECTION DE LA VÉGÉTATION</b>				
O <sub>3</sub>	AOT40 <sup>8</sup> accumulé de mai à juillet	18 000 µg/m <sup>3</sup> · h	Valeur cible	Moyenne sur 5 ans
		6 000 µg/m <sup>3</sup> · h	Objectif à long terme	
Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> )	Année calendaire	30 µg/m <sup>3</sup>	Niveau critique	
SO <sub>2</sub>	Année calendaire et hiver (10/1 au 03/31)	20 µg/m <sup>3</sup>	Niveau critique	

**Tableau 1** : Normes de qualité de l'air pour la protection de la santé humaine et de la végétation, telles qu'édictées dans les Directives de l'UE sur la qualité de l'air ambiant (AEE, 2019).

6. IEM : indicateur basé sur des mesures prises dans les milieux urbains choisis à cette fin par les États membres, calculé en tant que concentration moyenne annuelle sur trois années calendaires consécutives.

7. Le BaP (Benzo[a]pyrène) est considéré comme le principal traceur des hydrocarbures aromatiques polycycliques à potentiel cancérigène.

8. L'AOT40 est une indication de l'exposition cumulée à l'O<sub>3</sub>, exprimée en µg/m<sup>3</sup>/h, au-delà d'un seuil de 40 parties par milliard (ppb). Il s'agit de la somme des différences entre les concentrations horaires > 80 µg/m<sup>3</sup> (40 ppb) et 80 µg/m<sup>3</sup> cumulées sur l'ensemble des valeurs horaires mesurées entre 08:00 et 20:00 (CET).

la période 2008-2018.

Les Directives sur la qualité de l'air ambiant ont été adoptées dans le but d'établir des mesures visant<sup>9</sup> :

- à définir et à fixer des objectifs concernant la qualité de l'air ambiant, afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs pour la santé humaine et pour l'environnement dans son ensemble ;
- à évaluer la qualité de l'air ambiant dans les États membres sur la base de méthodes et de critères communs ;
- à obtenir des informations sur la qualité de l'air ambiant afin de contribuer à lutter contre la pollution de l'air et les nuisances et de surveiller les tendances à long terme et les améliorations obtenues grâce aux mesures nationales et communautaires ;
- à faire en sorte que ces informations sur la qualité de l'air ambiant soient mises à la disposition du public ;
- à préserver la qualité de l'air ambiant, lorsqu'elle est bonne, et à l'améliorer dans les autres cas ;
- à promouvoir une coopération accrue entre les États membres en vue de réduire la pollution atmosphérique ;
- à mettre en place des plans de qualité de l'air afin d'assurer, en cas de dépassement et dans les plus brefs délais, le respect des valeurs limites de l'air ambiant.

Pour atteindre l'objectif ultime de minimiser les effets néfastes de la pollution sur la santé humaine et sur l'environnement dans son ensemble, la législation européenne en matière de qualité de l'air s'appuie sur plusieurs principes. Pour contrôler les concentrations de polluants et s'assurer que les normes applicables sont effectivement respectées, les États membres doivent définir sur l'ensemble de leur territoire des zones et des agglomérations qu'ils doivent ensuite classer selon les seuils d'évaluation prescrits, afin de déterminer la méthode applicable d'évaluation de la qualité de l'air : mesures, modélisation et/ou autres techniques d'estimation objective. À cet égard, les Directives fixent des méthodes et des critères communs pour situer les points de prélèvement, afin de prendre en compte la protection de la santé humaine, de la végétation et des écosystèmes naturels. Les États membres

ont l'obligation de faire rapport à la Commission européenne sur les données recueillies en matière de qualité de l'air (voir chapitre 5).

Lorsque les niveaux dépassent les valeurs limites ou les valeurs cibles, les États membres doivent établir un plan sur la qualité de l'air axé sur les sources responsables, afin d'assurer le respect de la valeur limite ou valeur cible associée. En cas de dépassement de valeurs limites, ces plans doivent définir des mesures appropriées pour s'assurer que le dépassement en question puisse être résorbé dans les plus brefs délais. De plus, les informations sur la qualité de l'air doivent être communiquées au public.

### 2.1.2 DIRECTIVE SUR LES OBJECTIFS NATIONAUX DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS

Le principal instrument législatif du deuxième pilier du cadre européen pour la qualité de l'air est la Directive (UE) 2016/2284 concernant la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques (encore souvent appelée Directive PEN<sup>10</sup>), qui a abrogé la Directive 2001/81/CE. En traitant des émissions nationales globales de cinq polluants clés, la Directive PEN s'attache à atteindre les objectifs de la politique de l'UE en matière d'air, dont l'objectif est de réduire de moitié les impacts de la pollution atmosphérique sur la santé en 2030 par rapport à 2005, et de réduire les impacts environnementaux.

À cette fin, les États membres font rapport des inventaires nationaux des émissions passées et des projections d'émissions pour les années à venir. Cette procédure de rapport est tout à fait conforme aux lignes directrices pour les rapports prévues aux termes de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CPATLD) présentée au chapitre 2.4.1.

Ces inventaires d'émissions servent à surveiller et à analyser la situation de la pollution atmosphérique et à vérifier le respect des engagements de réduction des émissions nationales respectivement fixés pour 2020-2029 et pour 2030 et au-delà. Les engagements de réduction pour 2020-2029 correspondent aux engagements pris par les États membres de l'UE dans le cadre du protocole révisé de Göteborg, adopté en 2012, et de la CPATLD, tandis

9. Conformément à l'article 1er de la Directive sur la qualité de l'air ambiant 2008/50/CE.

10. Directive sur les Plafonds d'émission nationaux.



que la Directive PEN établit aussi des objectifs de réduction plus ambitieux à atteindre d'ici 2030.

La Directive PEN exige également des États membres qu'ils établissent, mettent en œuvre et actualisent régulièrement un « programme national de lutte contre la pollution atmosphérique » (PNLPA)<sup>11</sup> qui définit les mesures qui seront prises par les États membres pour assurer le respect des engagements de réduction des émissions pour 2020-2029 et pour 2030 et au-delà (Annexe II de la Directive (UE) 2016/2284).

Enfin, la Directive PEN exige également des États membres qu'ils veillent à assurer la surveillance des impacts de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes en s'appuyant sur un réseau de sites de surveillance et en présentant des rapports sur les indicateurs clés en vue de fournir des informations qui appuieront les efforts visant à faire en sorte que la pollution atmosphérique ne conduise pas à des concentrations supérieures aux charges et niveaux critiques dans les différents types d'écosystèmes de l'UE.

## 2.2 RÉGLEMENTATIONS NATIONALES EN AUTRICHE, AU LIECHTENSTEIN, À MONACO ET EN SUISSE

En général, la Suisse, Monaco et le Liechtenstein appliquent des règles similaires, fondées sur les Directives de l'UE sur la qualité de l'air ambiant. Les polluants atmosphériques sont réglementés par l'Ordonnance suisse sur la protection de l'air<sup>12</sup> (OPair), qui est basée sur la Loi fédérale sur la protection de l'environnement. L'Ordonnance (état de 2018) définit des normes de qualité de l'air en matière de polluants atmosphériques conformément aux lignes directrices de l'OMS de 2005, qui, pour certains de ces polluants, sont plus strictes que les valeurs limites actuelles fixées par le cadre de l'UE pour la qualité de l'air, comme le montre le tableau 2 ci-dessous.

Au titre de l'article 193 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne et concernant les actes juridiques adoptés conformément à son

Polluant	Période d'établissement de la moyenne, nature juridique	Pays d'application	Concentration	Commentaires
MP <sub>10</sub>	1 jour, valeur limite	Suisse, Liechtenstein	50 µg/m <sup>3</sup>	À ne pas dépasser plus de 3 jours par année calendaire
		Autriche		À ne pas dépasser plus de 25 jours par année calendaire
		Tous les autres pays		À ne pas dépasser plus de 35 jours par année calendaire
	Année calendaire, valeur limite	Suisse, Liechtenstein	20 µg/m <sup>3</sup>	
Tous les autres pays		40 µg/m <sup>3</sup>		
MP <sub>2,5</sub>	Année calendaire, valeur limite	Suisse, Liechtenstein	10 µg/m <sup>3</sup>	
		Tous les autres pays	25 µg/m <sup>3</sup>	
NO <sub>2</sub>	1/2 heure, valeur limite	Suisse, Liechtenstein	100 µg/m <sup>3</sup>	À ne pas dépasser plus de 18 heures par année calendaire
		Autriche	200 µg/m <sup>3</sup>	
	1 heure, valeur limite	Tous les autres pays	200 µg/m <sup>3</sup>	À ne pas dépasser plus de 18 heures par année calendaire
		Année calendaire, valeur limite	Autriche, Suisse, Liechtenstein	30 µg/m <sup>3</sup>
Tous les autres pays	40 µg/m <sup>3</sup>			
BaP	Année calendaire, valeur limite	Autriche	1 ng/m <sup>3</sup>	

**Tableau 2 :** Comparaison entre les normes de qualité de l'air pour les matières particulaires, le dioxyde d'azote et le benzo[a]pyrène dans la région alpine.

11. Pour consulter en ligne les PNLPA : <https://ec.europa.eu/environment/air/reduction/NAPCP.htm>.

12. OPair, RS 814.318.142.1. En ligne : [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208\\_208\\_208/fr](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/fr).

article 192 dans le cadre de la politique environnementale de l'UE, les États membres peuvent maintenir ou introduire des mesures de protection renforcées, pourvu qu'elles soient compatibles avec les traités de l'UE. La loi fédérale autrichienne sur la qualité de l'air ambiant transposant les Directives sur la qualité de l'air ambiant, par exemple, a fait usage de cette disposition et a continué à fixer pour le  $\text{NO}_2$ , les  $\text{MP}_{10}$  et le BaP des valeurs limites nationales plus strictes (voir le tableau 2 ci-dessous). Ces normes sont basées sur des concentrations limites d'impact développées par l'Académie autrichienne des sciences dans les années 1970 et 1980.

Au sein de son cadre pour la qualité de l'air ambiant, la Principauté de Monaco, sur la base de méthodes et de critères communs, compare les données sur la qualité de l'air avec les valeurs limites, les seuils d'information et les seuils d'alerte fixés par les Directives européennes sur la qualité de l'air pour les polluants  $\text{MP}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{CO}$ , avec un objectif à long terme d'adéquation aux critères de l'OMS pour 2030.

### 2.2.1 $\text{NO}_2$

Concernant le  $\text{NO}_2$ , les pays présentent des différences non seulement au niveau des seuils, mais aussi au niveau de la période d'établissement de la moyenne. Les valeurs limites pour la concentration moyenne annuelle varient entre  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Autriche<sup>13</sup>, Suisse et Liechtenstein) et  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (tous les autres États membres de l'UE). En ce qui concerne les seuils à court terme, la Suisse et le Liechtenstein fixent une valeur limite de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  établie sur une demi-heure, avec une limite de dépassement de 18 heures/an. En Autriche, une valeur limite de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  est fixée pour la moyenne établie sur une demi-heure, alors que tous les autres États membres de l'UE appliquent la valeur limite de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la moyenne établie sur une heure. D'autres différences portent sur le nombre de dépassements autorisés par année pour les valeurs limites à court terme : les autres États membres de l'UE permettent, conformément à la Directive sur la qualité de l'air ambiant, 18 dépassements par année calendaire de la valeur limite établie sur une heure, alors que l'Autriche n'autorise aucun dépassement de la valeur limite établie sur la demi-heure.

### 2.2.2 PARTICULES

Pour les  $\text{MP}_{10}$ , les normes annuelles de qualité de l'air en Suisse et au Liechtenstein sont fixées à une moyenne annuelle de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , conformément aux lignes directrices de l'OMS, et à une moyenne annuelle de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans les États membres de l'UE. La valeur limite des  $\text{MP}_{10}$  en moyenne journalière est fixée à  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour tous les pays de l'arc alpin ; cependant, le nombre de dépassements autorisés par année calendaire varie entre 3 jours en Suisse, 25 en Autriche et 35 dans tous les autres États membres de l'UE.

Pour les  $\text{MP}_{2,5}$ , les limites supérieures des normes de qualité de l'air sont fixées à  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (moyenne annuelle) en Suisse, ce qui correspond aux lignes directrices de l'OMS, et à  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (moyenne annuelle) dans les États membres de l'UE.

## 2.3 PLANIFICATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Conformément à la Directive de l'UE sur la qualité de l'air, des plans de qualité de l'air pour les cas de dépassement des valeurs limites doivent être préparés, avec des mesures appropriées visant à assurer leur résorption dans les plus brefs délais. La responsabilité de la préparation des plans varie d'un État membre à l'autre. Par exemple, en Bavière, elle incombe aux gouvernements de district (autorité régionale), tandis qu'en Italie et en Autriche ce sont respectivement les administrations régionales et les gouvernements provinciaux qui sont chargés de la planification et la mise en œuvre en matière de qualité de l'air.

## 2.4 CONVENTIONS, ACCORDS ET COORDINATION À L'ÉCHELON INTERNATIONAL

Des organisations internationales, autorités nationales et locales, ONG et autres parties prenantes ont commencé à prendre des mesures, suite à la sensibilisation accrue envers les effets de la pollution atmosphérique et ses coûts croissants (voir chapitre 1). En particulier, la Commission économique des

13. Une marge résiduelle de tolérance de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  s'applique depuis le 1.1.2010.

Nations Unies pour l'Europe (CEE-ONU), l'OMS et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) ont défini une action mondiale pour lutter contre la pollution atmosphérique.

#### 2.4.1 CONVENTION DE LA CEE-ONU SUR LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE TRANSFRONTIÈRE À LONGUE DISTANCE<sup>14</sup>

Adoptée en 1979, la Convention de la CEE-ONU sur l'air (ou CPATLD) traite de la protection de l'environnement humain contre la pollution atmosphérique et de la réduction progressive et la prévention de la pollution atmosphérique, y compris la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance. Elle a été complétée par huit protocoles traitant des différents polluants atmosphériques, dont le dernier<sup>15</sup> est un instrument « multi-polluants » et « multi-effets » conçu pour réduire l'acidification, l'eutrophisation et l'ozone troposphérique. Pour ses Parties contractantes, ce protocole fixe des valeurs limites pour un certain nombre de sources

majeures d'émission, ainsi que des engagements nationaux de réduction des émissions pour cinq des principaux polluants, qui correspondent aux engagements de réduction 2020-2029 établis par la Directive PEN de l'UE.

La Convention Air donne accès à des données sur les émissions, les mesures et la modélisation, ainsi qu'à des informations sur les effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes, la santé humaine, les cultures et les matériaux. En outre, elle constitue un cadre législatif important pour différents groupes de travail, centres et programmes coopératifs internationaux chargés de fournir des évaluations scientifiques et de recherche sur les questions pertinentes de qualité de l'air.

#### 2.4.2 LIGNES DIRECTRICES DE L'OMS

L'OMS travaille sur les normes mondiales en matière de qualité de l'environnement et a élaboré des lignes directrices relatives à la qualité de l'air

Polluant	Période d'établissement de la moyenne	AQG	Niveau de référence	Commentaires
MP <sub>10</sub>	1 jour	50 µg/m <sup>3</sup>		99 <sup>e</sup> centile (3 jours par année calendaire)
	Année calendaire	20 µg/m <sup>3</sup>		
MP <sub>2,5</sub>	1 jour	25 µg/m <sup>3</sup>		99 <sup>e</sup> centile (3 jours par année calendaire)
	Année calendaire	10 µg/m <sup>3</sup>		
O <sub>3</sub>	Maximum journalier de la moyenne sur 8 heures	100 µg/m <sup>3</sup>		
NO <sub>2</sub>	1 heure	200 µg/m <sup>3</sup>		
	Année calendaire	40 µg/m <sup>3</sup>		
BaP	Année calendaire		0,12 ng/m <sup>3</sup>	
SO <sub>2</sub>	10 minutes	500 µg/m <sup>3</sup>		
	1 jour	20 µg/m <sup>3</sup>		
CO	1 heure	30 mg/m <sup>3</sup>		
	Maximum journalier de la moyenne sur 8 heures	10 mg/m <sup>3</sup>		
Benzène	Année calendaire		1,7 µg/m <sup>3</sup>	
Pb	Année calendaire	0,5 µg/m <sup>3</sup>		
As	Année calendaire		6,6 ng/m <sup>3</sup>	
Cd	Année calendaire	5 ng/m <sup>3</sup>		
Ni	Année calendaire		25 ng/m <sup>3</sup>	

**Tableau 3 :** AQG et niveaux de référence estimés. Lorsqu'aucune recommandation n'a été fixée, on estime les niveaux de référence en assumant un risque acceptable additionnel de cancer pendant la vie entière d'environ 1 sur 100 000 (AEE, 2019, p. 13).

14. Également désignée sous le nom de « Convention Air ». En ligne : <https://www.unece.org/env/lrtap/welcome.html.html> <https://www.unece.org/env/lrtap/welcome.html.html>.

15. Protocole de 1999 relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique (protocole de Göteborg) tel qu'amendé en 2012.

(*Air Quality Guidelines – AQG*), publiées en 1987 et révisées en 1997 et 2005. La logique qui sous-tend ces AQG est expliquée au chapitre 4.1. Le tableau 3 résume les valeurs (actuellement en cours de révision) proposées par l'OMS pour réduire les effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine et les écosystèmes naturels.

Pour la révision 2013 des politiques européennes de qualité de l'air, la Commission européenne a adressé à l'OMS un certain nombre de questions<sup>16</sup> susceptibles de l'aider dans le processus de révision. Les réponses à ces questions ont été formulées dans le cadre des projets « Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP » et « Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE »<sup>17</sup>, suite à quoi l'OMS s'est lancée, en 2016, dans une révision de ses propres lignes directrices relatives à la qualité de l'air<sup>18</sup>. D'après le dernier rapport de l'Équipe spéciale mixte des aspects sanitaires de la pollution atmosphérique OMS/CEE-ONU<sup>19</sup>, cette révision inclut les MP<sub>2,5</sub>, MP<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> et CO. Un examen systématique des données probantes concernant les effets de ces polluants atmosphériques sur la santé a formé la base de la deuxième phase du processus de mise à jour, à savoir en dériver des valeurs numériques de référence en matière d'exposition et fixer des objectifs provisoires et d'autres recommandations. Cette deuxième phase a eu lieu en 2020, et les nouvelles lignes directrices seront publiées en 2021.

En 2018, la première Conférence mondiale de l'OMS sur la pollution de l'air et la santé s'est tenue à Genève<sup>20</sup>, lançant le Programme d'action de Genève pour lutter contre la pollution de l'air (OMS, 2018), qui comprend la mise en œuvre de solutions pour : réduire la combustion sous quelque forme que ce soit ; renforcer les mesures visant à protéger les po-

pulations les plus vulnérables (par ex. les enfants) ; soutenir les villes dans leurs efforts d'amélioration de la qualité de l'air urbain ; renforcer l'action conjointe entre les secteurs financier, sanitaire et environnemental pour rendre possibles des actions spécifiques pour améliorer la qualité de l'air et atténuer le changement climatique ; poursuivre les efforts communs de surveillance harmonisée de la pollution atmosphérique.

Dans le contexte du Pacte vert pour l'Europe, la Commission européenne a annoncé son intention de renforcer les dispositions relatives à la surveillance et à la modélisation de la qualité de l'air ainsi que la création de plans relatifs à la qualité de l'air. La Commission présentera également une proposition visant à aligner davantage les normes de qualité de l'air de l'UE sur les lignes directrices de l'OMS (COM/2019/640).

#### 2.4.3 AUTRES ACTIVITÉS DES NATIONS UNIES

L'Assemblée des Nations Unies pour l'environnement a adopté deux résolutions en 2014<sup>21</sup> et en 2017<sup>22</sup> et une déclaration ministérielle en 2019<sup>23</sup>, encourageant les États membres à prendre des mesures significatives pour lutter contre la pollution atmosphérique et améliorer la qualité de l'air à l'échelle mondiale. La déclaration ministérielle s'appuie sur ces résolutions et s'engage à améliorer les systèmes et technologies nationaux de surveillance de l'air ambiant et à encourager les capacités nationales de gestion des données environnementales. Elle demande également au PNUE de renforcer la coopération et l'échange d'informations entre les États membres à tous les niveaux, pour lutter contre la pollution atmosphérique transfrontière.

16. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/activities/health-aspects-of-air-pollution-and-review-of-eu-policies-the-revihaap-and-hrapie-projects/key-questions-for-guidance-of-eu-policies>.

17. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/activities/health-aspects-of-air-pollution-and-review-of-eu-policies-the-revihaap-and-hrapie-projects>.

18. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/activities/update-of-who-global-air-quality-guidelines>.

19. [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2019/AIR/EMEP\\_WGE\\_Joint\\_Session/CEE\\_EB\\_AIR\\_GE.1\\_2019\\_17-1909805E.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2019/AIR/EMEP_WGE_Joint_Session/CEE_EB_AIR_GE.1_2019_17-1909805E.pdf)

20. <https://www.who.int/airpollution/events/conference/en/>.

21. Résolution 1/7 on Air Quality ([https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17135/UNEA1\\_Resolution7AirQuality.pdf?sequence=1&%3BisAllowed=](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17135/UNEA1_Resolution7AirQuality.pdf?sequence=1&%3BisAllowed=)).

22. Résolution 3/8 Prévention et réduction de la pollution atmosphérique pour améliorer la qualité de l'air à l'échelle mondiale (<https://papersmart.unon.org/resolution/uploads/k1800223.french.pdf>).

23. Déclaration ministérielle : Vers une planète sans pollution (<https://papersmart.unon.org/resolution/uploads/k1800399.french.pdf>).



### 3. DESCRIPTION DES POLLUANTS ET DES PROCESSUS ATMOSPHÉRIQUES DANS LES ALPES

La qualité de l'air de la région alpine et sa variabilité spatio-temporelle sont le résultat complexe des émissions ainsi que de la météorologie d'échelle locale et de méso-échelle et la topographie. Dans l'ensemble de la région, les montagnes affichent des altitudes variant de moyennes/hautes à hautes, avec de nombreuses vallées de différentes formes, souvent étroites et relativement longues. Les grandes différences d'altitude entre les fonds de vallée et les sommets se traduisent par la présence de versants extrêmement abrupts. Les quelque 14 millions d'habitants de la région alpine vivent, pour la plupart, dans les vallées, où sont situées les routes principales et les autoroutes. De ce fait, les émissions anthropiques dans les Alpes sont majoritairement limitées aux vallées. Leur distribution spatiale relève de deux facteurs : a) la distribution de la population résidente et b) la présence d'autoroutes où se concentre le trafic suprarégional. Environ 45 % de la population alpine totale vivant dans des communes de moins de 5 000 habitants (Price M.F. et al., 2011), plus de la moitié des habitants vit soit dans des villes de taille moyenne ou dans les très rares grandes villes, soit à proximité.

#### 3.1 PROCESSUS MÉTÉO-CLIMATIQUES

Un certain nombre de processus météorologiques doivent être considérés lors de l'interprétation de la pollution et des dépôts atmosphériques dans les Alpes :

- le transport à longue distance (> 100 km), vers la région alpine, de polluants émis à l'extérieur des Alpes, l'élévation et le transport de masses d'air, l'augmentation des dépôts par effet des précipitations dues à la topographie ou l'orographie ;

- le transport de polluants depuis les basses terres situées à proximité des Alpes vers les vallées et en remontant le long des versants ;
- la circulation diurne des vents de vallée et des vents de pente qui transportent et diluent la pollution au sein des systèmes de vallée ;
- les conditions de dispersion atmosphérique, provoquées par la distribution verticale de la température ;
- les interactions complexes du transport, de la formation et de la dégradation de l'ozone à différentes échelles spatiales et temporelles.

Les dynamiques liées à la pollution atmosphérique dépendent également de la largeur et de la longueur des vallées, ainsi que de leur orientation par rapport aux vents synoptiques<sup>24</sup>.

##### 3.1.1 LA MÉTÉOROLOGIE DES ALPES FAVORISE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Les situations météorologiques typiques des Alpes suivent des tendances saisonnières. L'été et l'hiver affichent des différences significatives qui influent sur les mouvements des masses d'air, sur le type et l'intensité des émissions primaires et sur les phénomènes menant à la formation, au transport, à la dilution et à la dégradation des polluants.

Huit régions climatiques très diverses ont été identifiées dans les Alpes européennes (Sturman A., Wanner H., 2001) : la *haute région alpine*, caractérisée par un temps froid et humide ; les hautes *Alpes continentales*, au climat généralement plus sec ; les *Alpes sud-occidentales*, les *contreforts du nord* et les *Préalpes occidentales*, tous sous l'influence

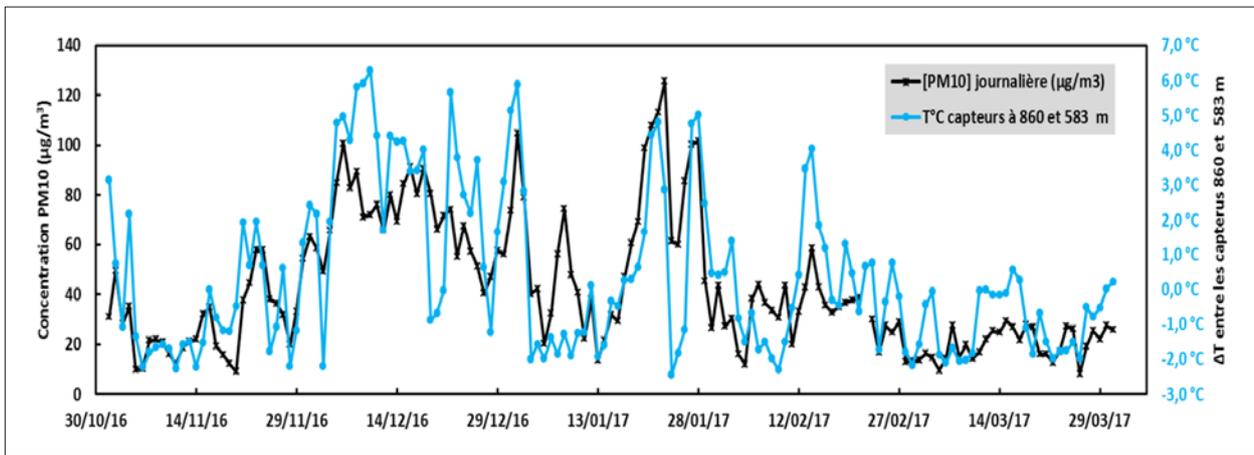
24. Le vent synoptique est le vent créé par les différences de pression en dehors de tout effet lié au relief ou à la convection (comme par exemple le foehn).

de masses d'air chaud du sud méditerranéen, avec des hivers généralement humides et des étés secs ; les *vallées alpines internes*, caractérisées par un climat continental sec ; les *Préalpes orientales et septentrionales*, au climat continental et aux étés pluvieux ; les *contreforts sud-ouest*, avec des saisons de transition marquées par les pluies (Egger I., Hoinka K.P., 1992).

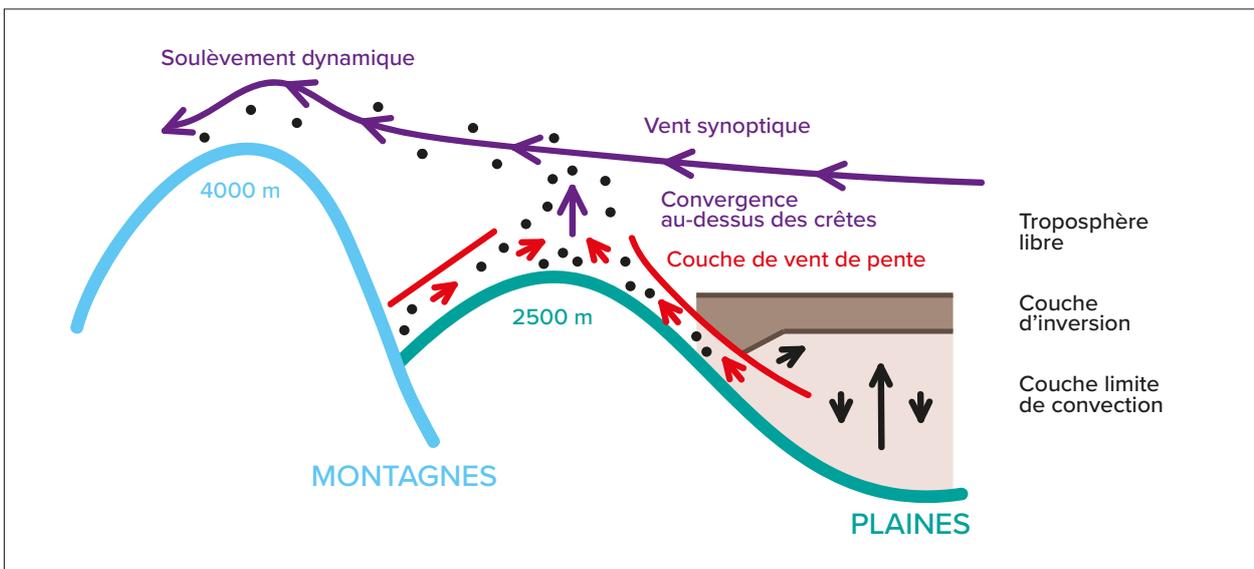
La barrière constituée par les Alpes, dont la forme rappelle celle d'une corne, contribue fréquemment à générer trois différents systèmes de vent froid, qui résultent d'un ensemble complexe d'effets de blocage et de canalisation : le mistral dans la vallée du Rhône occidental, la bise entre le Jura et les

Alpes du Nord et la bora sur la côte adriatique E-S-E des Alpes (Tibaldi S., Buzzi A., Speranza A., 1990). En outre, les situations météorologiques advectives causées par le vent de grande échelle, résultant lui-même de grands systèmes de pression, conduisent au foehn du nord et du sud.

L'environnement alpin présente une autre caractéristique importante : les vents locaux d'origine thermique, en particulier sous de faibles gradients de pression (Sturman A., Wanner H., 2001). Pendant l'été, la couche de mélange évolue rapidement pendant la journée, en raison d'une forte insolation, ce qui permet une dilution et un mélange rapides des polluants produits localement.



**Figure 2 :** Corrélation entre la différence de température à deux altitudes et les  $MP_{10}$  dans la vallée de l'Arve (Favez O. et al., 2017a). La ligne bleue montre la différence de température (en degrés Celsius) entre les altitudes de 583 m et de 860 m et la ligne noire reporte la concentration moyenne journalière de  $MP_{10}$  dans la vallée. Les deux lignes varient ensemble, ce qui laisse penser que des différences de température plus élevées entre le bas et le sommet de la vallée correspondent à une pollution plus élevée de  $MP_{10}$ .

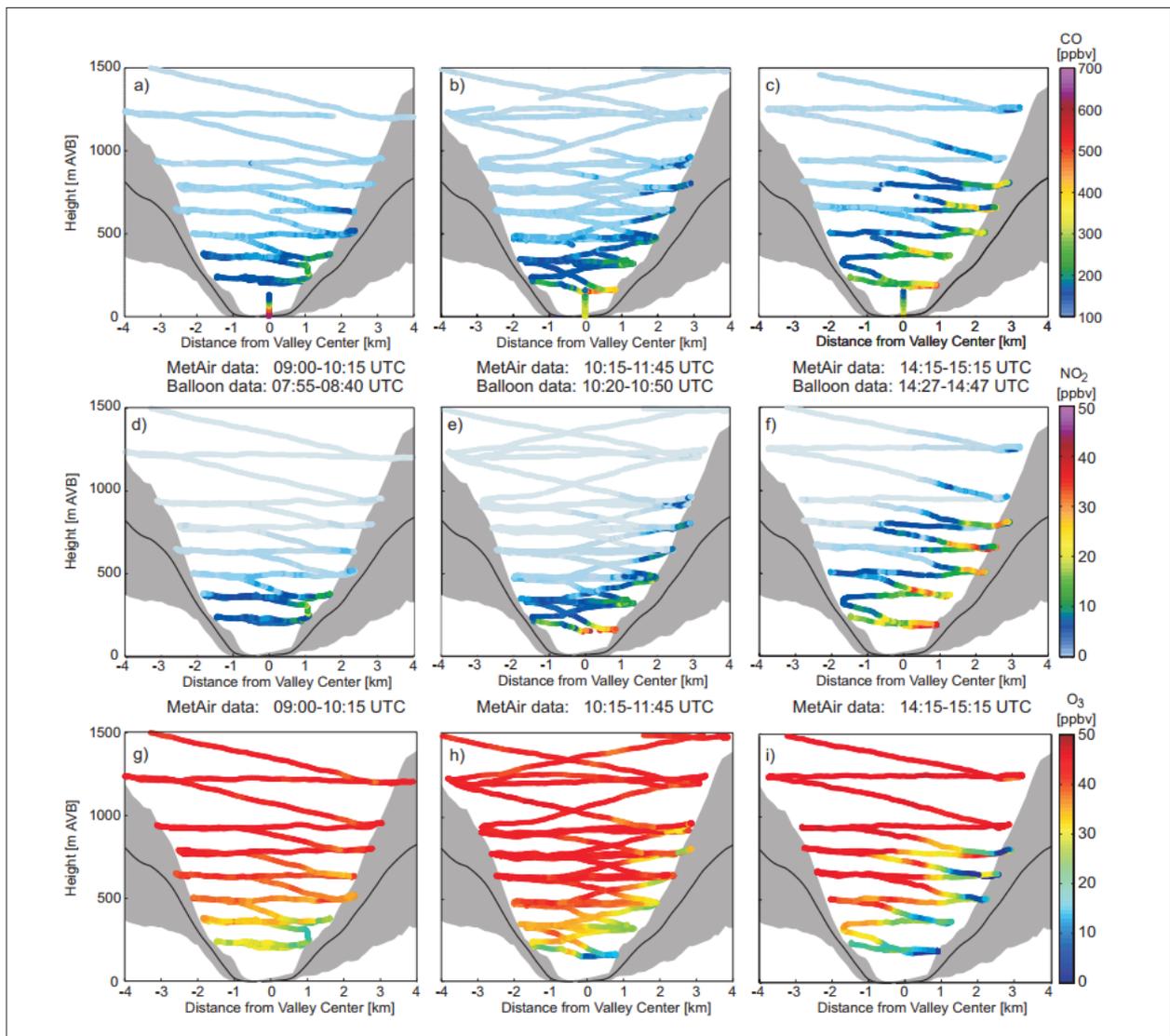


**Figure 3 :** Vue schématique des processus de transport de l'air pollué depuis la couche limite des plaines et vallées adjacentes jusqu'au niveau des plus hauts sommets alpins, d'où les polluants peuvent ensuite entrer dans l'atmosphère libre (adaptation. Aimable autorisation de Seibert P. et al., 1996).

Pendant l'hiver (et moins fréquemment en automne), les régimes de vent calme associés à des conditions de haute pression étendues sont assez fréquents (voir par exemple Diemoz H. *et al.*, 2019a) et mènent à une situation de stabilité atmosphérique : les inversions de température persistent pendant plusieurs jours, affectant fortement la qualité de l'air, car une faible hauteur de couche de mélange combinée à un faible mélange vertical en-dessous de l'inversion réduit les dispersions et la dilution des polluants (figure 2). Il est à noter que, dans la région alpine, une hauteur d'inversion de 800 m au-dessus du niveau de la mer peut correspondre à une hauteur de moins de 200 m au-dessus des vallées, ce qui rend le phénomène particu-

lièrement critique en terme d'accumulation et de concentration de pollution relevée dans la couche d'atmosphère située à proximité du sol dans les vallées. De plus, si le sol est enneigé, l'air peut rester stablement stratifié tout au long de la journée, et même pendant plusieurs jours d'affilée. Pendant la journée, les couches inférieures se mélangent généralement bien, mais il arrive souvent qu'une inversion persistante dans la vallée empêche le mélange vertical de se réaliser complètement (Heimann D. *et al.*, 2007 ; ALPNAP report Ch.4).

Un état prolongé de stabilité atmosphérique, avec des couches stables d'air froid au sol qui persistent sur le fond de vallée, se caractérise par une inver-

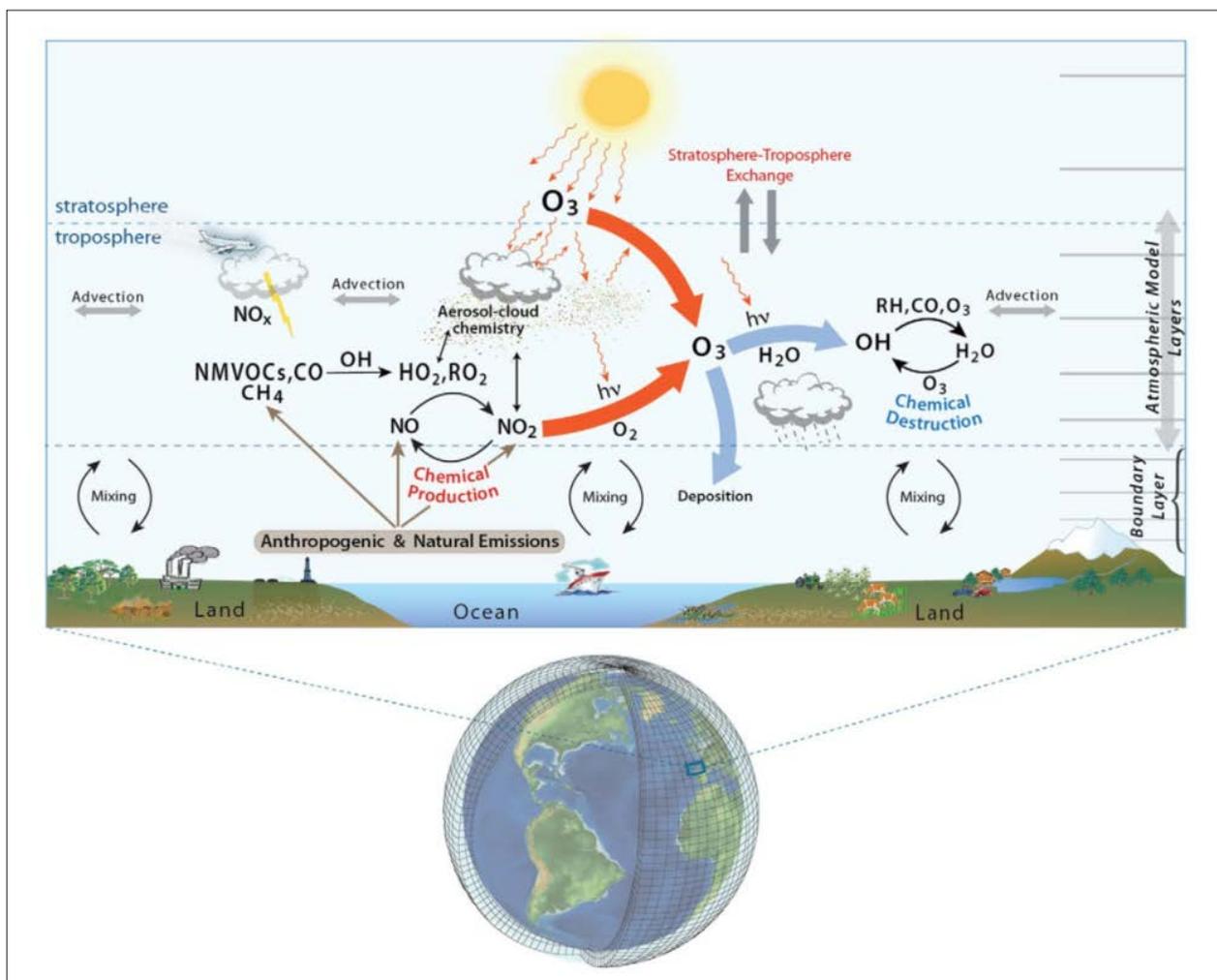


**Figure 4 :** Tendances des concentrations hivernales de CO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> dans la vallée de l'Inn rapportées à leur distributions en fonction du temps et l'espace. Les trois rangées rapportent la distribution des concentrations de CO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> dans la vallée de l'Inn (Tyrol, AT) le 1er février 2006 : le matin (première colonne), avant midi (deuxième colonne) et dans l'après-midi (troisième colonne). La vue est vers le haut de la vallée, en direction sud-ouest. Le côté ensoleillé est donc sur la droite (aimable autorisation de Schnitzhofer R. *et al.*, 2009).

sion de température fortement stratifiée. Cela inhibe le mélange vertical des polluants et mène à une accumulation de polluants dans la basse troposphère (Chemel C. *et al.*, 2016). Dans la région alpine, les vallées sont principalement caractérisées par des conditions de stabilité atmosphérique, ce qui, s'ajoutant à la présence de nombreuses sources d'émissions, provoque d'importantes concentrations d'aérosols secondaires dans les vallées.

Comme le montre la figure 3, selon les schémas diurnes montagne-vallée typiques de mélange de l'air, des couches d'air fortement polluées sont observées en matinée dans les fonds de vallée, en raison de la stabilité atmosphérique hivernale, tandis que les vents de pente commencent vers midi, permettant alors un échange d'air vertical. En conséquence, les concentrations de polluants dans les fonds de vallée diminuent dans l'après-midi, tandis

que, le long du côté ensoleillé de la vallée et jusqu'à 1300 m au-dessus de celle-ci, les niveaux de pollution augmentent (Schnitzhofer R. *et al.*, 2009). La figure 4 montre les tendances pour les concentrations de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  et  $\text{O}_3$ , en hiver, sur la base de leur distribution en termes de temps (du début de matinée à l'après-midi) et d'espace (le long d'un transect allant de la vallée jusqu'au sommet de la montagne). Le côté ensoleillé de la montagne se trouve à droite sur la figure. Pour le  $\text{CO}$  et le  $\text{NO}_2$ , une augmentation progressive de la concentration (l'échelle de couleur se déplace vers le jaune-rouge, correspondant à des valeurs plus élevées) est observée le long du côté ensoleillé de la montagne, du début de matinée à l'après-midi. Parallèlement, du même côté (et dans la vallée), la concentration d' $\text{O}_3$  diminue. Cela est dû à la réaction de formation (titration) de  $\text{NO}_2$  à partir de  $\text{NO}$  et d' $\text{O}_3$  fraîchement émis, le  $\text{NO}$  réagissant avec l' $\text{O}_3$  pour produire le  $\text{NO}_2$ .



**Figure 5 :** Schéma des processus chimiques et physiques responsables de l'ozone troposphérique.

Les processus physiques comprennent le transport par advection, convection, turbulence, mélange de couches limites, ainsi que la température, l'humidité, la couverture nuageuse, l'angle solaire/latitude et la période de l'année. Les processus chimiques comprennent la production et la destruction photochimiques de l'ozone, les interactions aérosols-nuages, les dépôts humides et secs et les émissions de précurseurs provenant de sources anthropiques et naturelles. Les précurseurs de l'ozone subissent des processus physiques similaires à l'ozone lui-même (aimable autorisation de Young P.J. *et al.*, 2018).



### 3.1.2 RÉGIMES D'OZONE

Pendant l'été, les polluants photochimiques, notamment l'ozone, sont particulièrement préoccupants. En règle générale, les processus qui influent de manière effective sur la variation des concentrations d'ozone sont le transport à longue distance par advection, le mélange vertical, la formation d'ozone déclenchée par le rayonnement UV et le dépôt sec. La figure 5 donne un aperçu général des principaux mécanismes de production et de destruction de l'ozone.

Les niveaux alpins de concentration d'ozone de fond relèvent principalement du transport sur méso-échelle et de la formation d'ozone dans la couche limite par effet des émissions de précurseurs en Europe centrale (sans oublier certains apports régionaux notables, par exemple au niveau du bassin du Pô, dans le sud de l'Allemagne et dans certaines régions de l'est, ainsi qu'une part élevée venant du fond continental et hémisphérique (Wotawa G. *et al.*, 2000 ; Wierzbicka A. *et al.*, 2005).

À l'échelle sous-régionale, les niveaux d'ozone et leur schéma temporel sont déclenchés par le modèle de circulation diurne (circulation des vents de vallée et de pente, voir figure 4 et section 3.1.1). De même, la présence d'émissions de précurseurs anthropiques, ainsi que de composés organiques volatils (COV) biogéniques (tels que le terpène, l'isoprène, etc.), dans les vallées voisines peut avoir un fort impact. Il a été démontré que le rapport entre la disponibilité des précurseurs, le modèle temporel et spatial et les réactions chimiques de formation/appauvrissement de l'ozone est complexe et non linéaire. Différentes études ont relevé que la production d'ozone était partiellement affectée par la présence de COV et NO<sub>x</sub> (Mazzuca G.M. *et al.*, 2016 et références y contenues). Par exemple, le terpène et l'isoprène peuvent influencer de manière significative sur la production d'ozone en réagissant avec le radical hydroxyle (Derognat C. *et al.*, 2003) : plusieurs études se sont intéressées à l'impact des émissions biogéniques d'isoprène et de terpène sur les niveaux des espèces photochimiques (Agence allemande de l'environnement, 2019). Par exemple, une étude réalisée dans la région de Grenoble a montré une forte contribution (environ 59 %) des COV biogéniques aux composés volatils organiques non méthaniques (COVNM). De fait, la ville étant entourée de montagnes couvertes de forêts de feuillus et de pins, les émissions biogéniques pourraient jouer un rôle dans la pollution par l'ozone, en particulier dans des conditions d'extrême sécheresse telles que celles qui caractérisent les vagues de chaleur (Chaxel E., Chollet J.P., 2009).

Il s'agit là d'un élément important, qui montre bien que, pour traiter correctement les stratégies de réduction, il s'impose de bien comprendre au niveau local les principaux processus.

Les concentrations maximales d'ozone s'observent vers midi, sa formation dans les panaches s'ajoutant alors à un niveau d'ozone de fond déjà élevé provenant d'un mélange intense. En fin d'après-midi, le vent de vallée s'affaiblit progressivement : l'atmosphère devient stable et les concentrations d'ozone s'abaissent, conséquence de la titration de l'ozone par l'oxyde nitrique accumulé dans la couche superficielle et les dépôts secs. Bien que l'ozone de fond soit en grande partie dû à des phénomènes de méso-échelle, les sources locales de précurseurs peuvent occasionnellement jouer un rôle important dans le cycle d'ozone journalier observé.

Le réchauffement climatique pourra conduire à une plus grande fréquence des vagues de chaleur. Ces événements se caractérisent par la persistance des températures et de la sécheresse du sol, avec des températures nocturnes élevées et un couvert végétal du sol qui devient de plus en plus sec au cours de l'épisode. Des simulations de modélisation ont permis de mettre en évidence l'influence possible des hausses de température sur l'augmentation des concentrations d'ozone. Une étude simulant une augmentation de température de 1 °C dans le modèle a révélé que les dynamiques de l'atmosphère demeuraient presque inchangées. On en a donc déduit que l'augmentation de l'ozone était due à la cinétique chimique. Des auteurs ont notamment observé que les températures élevées déclenchent la formation de radicaux, ce qui accélère la production d'ozone, sauf dans les centres-villes, où prédomine la titration de l'ozone par le NO (Chaxel E., Chollet J.P., 2009).

### 3.1.3 TRANSPORT À LONGUE DISTANCE DES MASSES D'AIR

Le transport à longue distance peut advecter les masses d'air pollué vers les Alpes, où se produit une élévation qui déclenche la distribution verticale des polluants le long du transect de la montagne.

#### *Polluants organiques persistants (POPs)*

L'advection des masses d'air à travers le transport à longue distance est considérée, dans la littérature, comme le principal facteur contribuant à la quantité supérieure de POP présents dans l'air, la neige, l'eau et le sol des sites de haute montagne. Les POP

peuvent y être retenus du fait des températures froides que l'on trouve à ces altitudes (Finizio A. *et al.*, 2006). Les polluants organiques présents dans des sites forestiers alpins reculés d'Autriche, d'Allemagne, d'Italie, de Slovénie et de Suisse ont fait l'objet d'une surveillance dans le cadre du projet MONARPOP (Offenthaler I. *et al.*, 2009 ; Weiss P. *et al.*, 2015). Il a été constaté que les concentrations de HAP dans les aiguilles d'épicéa et dans le sol étaient plus élevées que les émissions correspondantes dans la région alpine, ce qui indique que les Alpes constituent un réservoir pour les HAP advectés depuis les zones environnantes.

Dans les systèmes alpins, les forêts peuvent représenter un compartiment important, capable d'intercepter les POP en déplacement vers des altitudes plus élevées et de les retenir dans la matière organique des sols forestiers riches (McLachlan M.S. *et al.*, 1998 ; Wania F. *et al.*, 2001 ; Meijer S.N. *et al.*, 2003). La végétation constitue un compartiment intermédiaire pour l'échange de POP entre l'atmosphère et les sols (Jaward F.M. *et al.*, 2005).

### **Matières particulaires**

L'impact du transport à longue distance sur la concentration et la composition des MP ambiantes dans les sites de fond européens de haute altitude a également été étudié dans le cadre du projet CARBOSOL. Lors d'une analyse de la trajectoire des masses d'air, il a été découvert que des épisodes avec impact d'émissions issues de processus de combustion de combustibles fossiles et de biomasse en provenance des Pays baltes, du Bélarus, des régions occidentales de la Russie et du Kazakhstan contribuaient à des niveaux élevés de composants de MP au printemps et en automne (Salvador P. *et al.*, 2010).

Par ailleurs, la région alpine est également proche du bassin de la vallée du Pô, d'où l'on a observé des arrivées de masses d'air enrichies d'aérosols secondaires inorganiques (sulfate d'ammonium et nitrate) et organiques (Diemoz H. *et al.*, 2019b). La phénoménologie des épisodes récurrents d'arrivée de couches d'aérosols poussées par le vent jusqu'aux Alpes du nord-ouest de l'Italie a fait l'objet d'une étude approfondie, dans le cadre de laquelle on a utilisé un système de mesure multisite et multi-capteur avec des outils de modélisation (Diemoz H. *et al.*, 2014 ; Diemoz H. *et al.*, 2019a ; Diemoz H. *et al.*, 2019b), en se concentrant sur la Vallée d'Aoste. Les conditions favorables au développement des advections se vérifient en moyenne sur plus de 50 % des journées (sur la base de trois années d'ob-

servations) ; surtout pendant la saison froide, les vents synoptiques soufflent principalement d'est (bassin du Pô) en ouest. Dans ces conditions, les concentrations en masse de MP<sub>10</sub> peuvent augmenter jusqu'à une moyenne journalière de 80 µg/m<sup>3</sup>. Les particules advectées dans le mode d'accumulation (particules comprises entre 0,07 et 1 µm) ont surtout contribué à des concentrations en masse accrues. Les analyses chimiques révèlent une augmentation de la fraction inorganique secondaire, composée de nitrate, de sulfate et d'ammonium, confirmant l'origine supposée (à savoir la vallée du Pô) de ces particules.

### **3.1.4 EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES ALPES**

Le climat influence particulièrement l'écosystème mais également les processus d'échange (émissions et dépôts) avec l'atmosphère. Le changement climatique affectera la distribution des masses d'air, le mélange et la structure verticale de l'atmosphère, ainsi que sa cinétique chimique, mais l'on ne possède pour l'instant que des informations et des données limitées quant à l'influence du changement climatique sur la qualité de l'air, et donc aussi sur la santé humaine. Le changement climatique apportera vraisemblablement des modifications en matière de transport à l'échelle régionale, de ventilation des vallées alpines et de mélange vertical, suite à l'évolution des zones climatiques et végétales caractérisant les pentes des vallées alpines. Cela aura certes une incidence sur tous les constituants atmosphériques, mais différents indicateurs de la qualité de l'air subiront des impacts plus spécifiques.

Vraisemblablement, les NO<sub>x</sub>, et en particulier le NO<sub>2</sub>, diminueront en concordance avec la réduction des émissions anthropiques de NO<sub>x</sub> associée aux modifications du secteur du trafic et de l'énergie (voir section 3.2.2). L'éventuelle modification de la chimie radicalaire ayant un impact sur la durée de vie des NO<sub>x</sub> est jugée moins importante (voir ci-dessous).

Concernant l'ozone, nous connaissons deux éléments contradictoires dont la tendance est néanmoins encore floue. D'un côté, compte tenu des réductions anthropiques des émissions de NO<sub>x</sub>, l'on s'attend à une réduction de la production photochimique d'ozone régionale et locale, qui est principalement limitée par les NO<sub>x</sub>. D'un autre côté, la baisse des émissions de NO entraîne une titration plus faible et, par conséquent, des niveaux d'ozone plus élevés à proximité des zones d'émission. En outre, une augmentation des vagues de chaleur associées aux sécheresses devrait réduire la vitesse de

dépôt de l'ozone, du fait de la résistance stomatique plus élevée d'une végétation soumise au stress hydrique (Lin M. *et al.*, 2020). D'autres aspects tels que l'évolution de la chimie radicalaire due aux modifications des UV, des niveaux de polluants et de la cinétique relèvent de la pure spéculation et ne peuvent pas encore être estimés de manière fiable. Dans l'ensemble, il convient de surveiller le système d'ozone dont les précurseurs et le mode de transport se modifieront pendant les changements climatiques.

Le changement climatique influera aussi sur les MP. La hausse des températures en hiver réduira les émissions de particules liées au chauffage.

L'évolution de la composition et de la distribution de la végétation sur les pentes des vallées alpines, la hausse des températures et des périodes de végétation plus longues modifieront et pourraient accroître les émissions de COV biogéniques et contribuer à des niveaux supérieurs d'aérosols organiques secondaires (AOS).

### 3.2 SOURCES

Les principales sources de polluants atmosphériques de la région alpine sont liées aux activités

ANNÉE (saison <sup>(a)</sup> )	Site (Pays)	Vallée ou zone	Contribution aux MP <sub>10</sub> (en % de la masse de MP)			Références
			Combustion de biomasse %	Trafic %	Aérosols secondaires % <sup>(b)</sup>	
2008 (h)	Erstfeld (CH)	Erstfeld	21 - 30	15 - 30	15 - 25	Ducret-Stich R.E. et al., 2013a. Projet financé par l'Office fédéral suisse de l'environnement (OFEV)
2008 (e)			8 - 15	13 - 15	35 - 40	
2010 (a)	Lanslebourg (FR)	Maurienne	57	31	9	Projets Lanslebourg 2010-2014 (in : Favez O. <i>et al.</i> , 2017a ; SOURCES Rapport de projet)
2010 (a)	Lescheraines (FR)	Auvergne-Rhône-Alpes	58	6	n.d.	PARTICUL'AIR (in : Favez O. <i>et al.</i> , 2017a ; SOURCES Rapport de projet)
2010 (a)	Grenoble (FR)	Auvergne-Rhône-Alpes	42	10	n.d.	FORMES (in : Favez O. <i>et al.</i> , 2017a ; SOURCES Rapport de projet)
2013-14	Air RA (FR)	Auvergne-Rhône-Alpes	21	2	~ 20	AERA (in : Favez O. <i>et al.</i> , 2017a ; SOURCES Rapport de projet)
2013-14 (h)	Chamonix (FR)	Arve	70	5	15	Favez O. <i>et al.</i> , 2017a ; SOURCES Rapport de projet
2013-14 (e)			10	5	35	
2013-14 (h)	Marnaz (FR)	Arve	64 - 71	4 - 8	8 - 12	DECOMBIO (in : Favez O. <i>et al.</i> , 2017a ; SOURCES Rapport de projet)
2013-14 (e)			< 3	8	30 - 35	
2013-14 (h)	Passy (FR)	Arve	66 - 74	4 - 8	12 - 15	
2013-14 (e)			< 3	5 - 10	40 - 50	
2013-14 (h)	Chamonix (FR)	Arve	57 - 62	3 - 14	18 - 21	
2013-14 (e)			5 - 10	7 - 12	38 - 43	

**Tableau 4 :** Contribution de la combustion de biomasse, du trafic et de la formation d'aérosols secondaires à la concentration de MP<sub>10</sub> dans certaines vallées alpines. (a) Hiver = h ; été = e ; annuel = a. (b) La valeur AS est reportée comme la somme de tous les composants organiques et inorganiques disponibles dans chaque étude.

anthropiques locales, dont, en tête, la combustion de biomasse et le trafic routier (Price M.F. *et al.*, 2011).

Les autres sources locales comprennent l'agriculture, et, dans un nombre limité de sites, l'industrie, les centrales électriques ou les centrales de chauffage urbain. En outre, dans certaines parties des Alpes, les émissions biogéniques de COV, telles que celles des canopées forestières, peuvent être importantes. S'y ajoute le fait que les dynamiques et les processus atmosphériques, en particulier le transport à longue distance et la stabilité atmosphérique, interagissent de façon déterminante avec les sources de pollution, du fait de la topographie particulière à la région alpine.

Pour élaborer des politiques de qualité de l'air principalement axées sur les causes de la pollution atmosphérique, il est essentiel de cerner la responsabilité revenant à chacune des sources de cette pollution. Concernant, par exemple, les matières particulaires, dans de nombreux sites alpins la combustion de biomasse contribue aux  $MP_{10}$  dans une mesure comparable (voire supérieure) au trafic routier (Gianini M.F.D. *et al.*, 2012). Cet aspect est illustré dans le tableau 4, où les résultats provenant d'études de répartition des sources et de projets

axés sur la région alpine sont reportés pour des sites de vallées, montrant les contributions quantitatives (en pourcentage de la masse de  $MP_{10}$ ) des trois principales sources contribuant à la masse de MP, à savoir la combustion de biomasse, le trafic routier et les aérosols secondaires.

### 3.2.1 COMBUSTION DE BIOMASSE

La biomasse est utilisée depuis des siècles dans les régions alpines pour la cuisine, le chauffage et la production d'eau chaude. Au cours des deux dernières décennies, son utilisation a été favorisée en vue de remplacer les combustibles fossiles et de stimuler l'économie locale. Des incitations juridiques, financières et institutionnelles ont augmenté la part de la biomasse dans le bouquet énergétique du secteur ménager ainsi que du secteur de l'énergie (production d'électricité et chauffage urbain). En revanche, les systèmes de chauffage au bois sont responsables de la déforestation dans certaines régions et sont une source d'émission de matières particulaires, de carbone suie, de COV et de HAP (p. ex., de BaP). De nombreuses études ont démontré l'importance de la combustion de biomasse en tant que source de polluants gazeux et

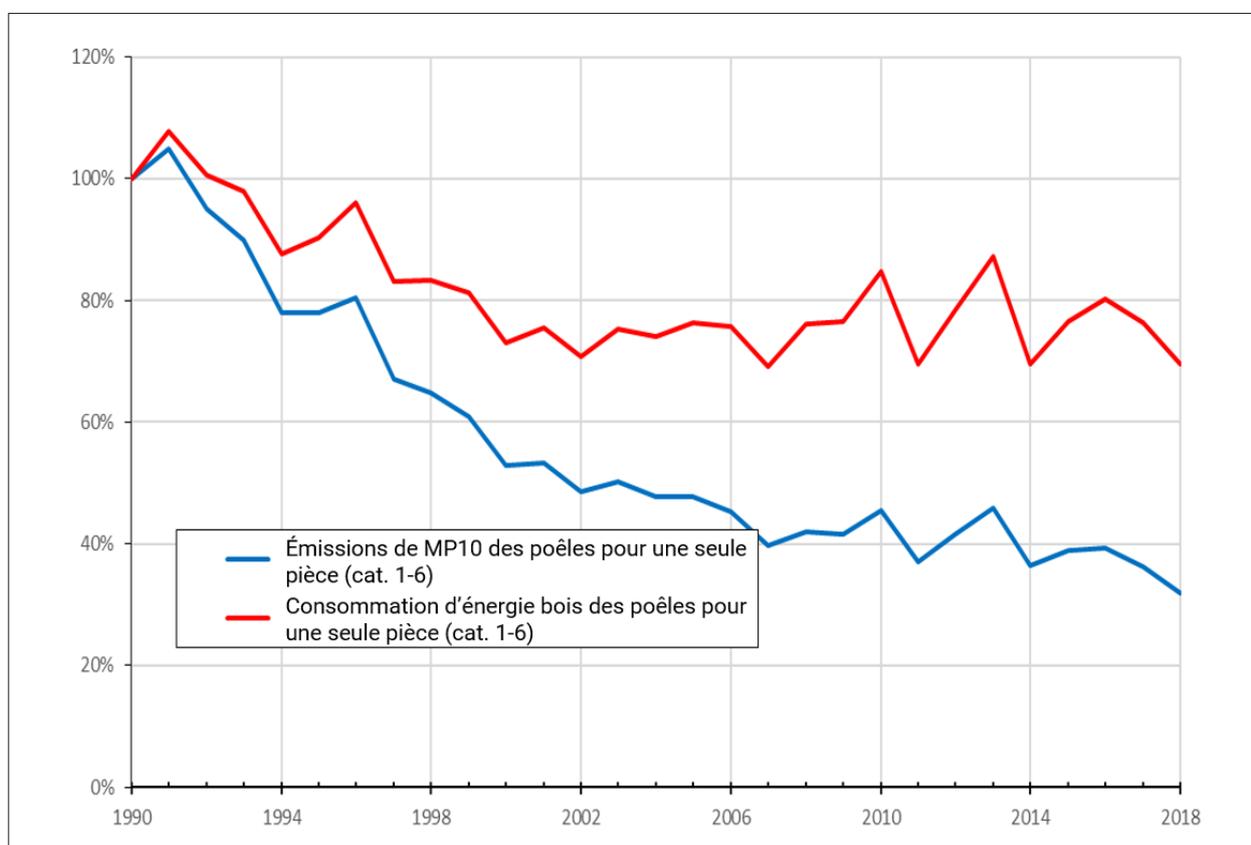


Figure 6 : Évolution des émissions dues aux poêles destinés à chauffer une seule pièce, en Suisse.



particulaires ; elles indiquent que dans la région alpine, elle constitue la source prédominante d'aérosols carbonés pendant la saison froide. En effet, la combustion du bois dans les poêles domestiques est largement répandue comme source principale ou d'appoint pour le chauffage résidentiel (Szidat S. *et al.*, 2007 ; Gilardoni S. *et al.*, 2011 ; Pietrodangelo A. *et al.*, 2014, Piot C., 2011, Herich H. *et al.*, 2014). Afin de réduire les effets néfastes de la combustion de biomasse, un cadre juridique a été mis en place, qui inclut des valeurs limites pour les petits appareils domestiques, les centrales de chauffage urbain de grandes et moyennes dimensions et les centrales électriques.

Les statistiques récentes concernant les émissions particulières des poêles à bois affichent des chiffres variables. En Autriche, par exemple, les émissions tant de  $MP_{10}$  que de  $MP_{2,5}$  ont baissé, respectivement, de 30 % et 40 % entre 1990 et 2017, de même que les émissions du secteur domestique, qui ont baissé de 32-34 %. En Suisse, les émissions de  $MP_{10}$  et de  $MP_{2,5}$  provenant de poêles à bois ont diminué d'environ deux tiers entre 1990 et 2018, comme le montre la figure 6, tandis que leur consommation d'énergie a diminué de 30 %. Cette réduction résulte d'un ensemble de mesures, dont notamment des mesures de sensibilisation, des programmes de soutien, le développement technologique et des instruments juridiques. Pour autant, il existe en Autriche des différences entre certaines provinces ; au Tyrol et au Vorarlberg (deux provinces autrichiennes de la région alpine), par exemple, la baisse des émissions du secteur domestique a été moins marquée que dans d'autres provinces autrichiennes. En fait, si, au cours des dix dernières années, les émissions de particules ont généralement diminué, la contribution relative de la combustion de biomasse aux émissions totales dans les régions alpines doit encore être approfondie.

Les émissions provenant de la combustion de biomasse sont fortement enrichies en espèces organiques et en métaux (Zhang W. *et al.*, 2014 ; Pietrodangelo A. *et al.*, 2014 ; Hasan M. *et al.* 2009 ; Wierzbicka A. *et al.*, 2005 ; Avakian M.D. *et al.*, 2002 ; Lighty, J.S. *et al.*, 2000), les premières dans les deux

phases, gazeuse et particulaire, les seconds (c'est-à-dire les métaux) principalement dans la phase particulaire. Tous les composants particuliers des fumées de combustion de biomasse (matières organiques, métaux et, dans une moindre mesure, particules élémentaires de carbone et de minéraux) entrent parmi les particules aéroportées fines ( $MP_{2,5}$ ,  $MP_{10}$ ) ou ultrafines (PUF : moins de 100  $\mu m$ ) et peuvent donc être inhalés et atteindre les voies les plus profondes du système respiratoire. Par conséquent, l'efficacité de combustion des poêles domestiques qui brûlent de la biomasse est essentielle dès lors qu'il s'agit de protéger la santé humaine.

Dans le cadre d'une étude réalisée dans une zone semi-rurale d'Italie, de 30 à 70 % des HAP présents dans les  $MP_{10}$  de l'air ambiant ont été identifiés comme provenant de la combustion du bois en automne et en hiver (Van Drooge B.L and Ballesta P.P., 2009). Pendant la période de chauffage, la contribution de la combustion du bois à la masse de  $MP_{10}$  peut parfois augmenter de plus de 80 % pendant la nuit, en ligne avec les résultats obtenus à Augsburg (Bavière, Allemagne), où les concentrations maximales de HAP liés à la combustion du bois ont été relevées pendant la nuit, étroitement corrélées avec le lévoglucosane, un traceur commun des aérosols de combustion du bois dans les particules de l'air ambiant (Schnelle-Kreis J. *et al.*, 2010 ; Elsasser M. *et al.*, 2012, in Belis C.A. *et al.*, 2014). Il est très difficile de réaliser une spéciation chimique complète des composants organiques dans les émissions provenant de la combustion de biomasse, car les familles de composés organiques qui s'y trouvent peuvent être très variées ; pour autant, Stefanelli G. *et al.* (2019) ont récemment effectué la spéciation chimique des composants organiques présents dans les émissions de différents poêles à bois<sup>25</sup>. Quoiqu'il en soit, la contribution de la combustion des biomasses à la teneur en carbone élémentaire des particules aéroportées n'est pas négligeable.

En 2014, une étude a comparé les concentrations de carbone élémentaire, de carbone organique et de  $MP$  relevées dans le cadre de différentes recherches ; 23 sites de mesure, la plupart dans la région alpine, ont été examinés pour les années

25. Les fumées comprennent généralement un mélange complexe de gaz organiques non méthaniques peu volatils (voir section 3.3.3.2), de carbone brun (aérosol organique primaire - AOP) et de carbone noir. Les principales familles de composés organiques identifiées dans les AOP sont les furanes, les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les substances de type humique (HULIS) et les espèces aromatiques oxygénées. Les furanes sont émis par pyrolyse de la cellulose, les HAM et les HAP sont générés par combustion incomplète (en particulier à partir de bois enflammé) et les espèces aromatiques oxygénées sont principalement émises par pyrolyse de la lignine. La partie restante des fumées est riche en gaz organiques oxygénés, qui agissent comme précurseurs dans la formation, dans l'atmosphère, d'aérosols organiques secondaires (AOS), comme cela est décrit à la section 3.2.3. Les HULIS sont un composant majeur du carbone brun et jouent un rôle clé dans les processus atmosphériques (par exemple en agissant comme noyaux de condensation des nuages, noyaux de glace, en contribuant à la croissance hygroscopique, etc.), dans les échanges radiatifs (forte absorption de la lumière U.V.) et dans les effets des particules ambiantes sur la santé, en raison de l'action du stress oxydatif cellulaire (Fang *et al.*, 2019 ; Tuet *et al.*, 2019).

2005-2010. Pour ce qui est du carbone élémentaire provenant de la combustion du bois, les concentrations moyennes les plus élevées ont été observées sur les sites de Cantù (IT), Chamonix (FR), Graz (AT), Ispra (IT), Lanslebourg (FR), Lescheraines (FR), Milan (IT), Passy (FR) et Sondrio (IT). La plupart de ces sites sont directement situés dans les vallées alpines, les stations de Cantù, Graz, Ispra et Milan se trouvant, quant à elles, au pied des Alpes. On relève aussi des concentrations élevées de carbone élémentaire sur les sites d'Ebnat Kappel (CH), Grenoble (FR), Magadino (CH), Molenò (CH), Roveredo (CH), Zagorje (SI) et Zurich (CH). Tous les sites, à l'exception de Zurich, sont situés dans des vallées alpines ou préalpines, où les couches d'inversion pourraient conduire à de fortes concentrations de MP (Herich H. et al., 2014).

Le tableau 5 résume les facteurs d'émission relatifs à certaines technologies de combustibles utilisées pour l'inventaire national autrichien des émissions atmosphériques. L'utilisation de gazole, de GPL ou de gaz dans les technologies modernes entraîne des émissions moyennes de  $\text{NO}_x$ , de très faibles émissions de  $\text{MP}_{2,5}$ , de  $\text{SO}_2$  et de COVNM et des émissions nulles de BaP. La combustion du

charbon s'accompagne de rejets élevés de tous les polluants. Quant aux émissions résultant des technologies de combustion du bois, elles dépendent dans une grande mesure de la technologie et de la biomasse utilisées : les émissions les plus faibles sont celles dégagées par les chaudières modernes à granulés. Toutefois, il existe sur le marché des technologies fonctionnant par combustion mixte de bois et copeaux de bois, qui affichent des émissions moins élevées que les anciens systèmes. Il convient de noter qu'en installant par exemple de petits précipitateurs électrostatiques, il serait possible de réduire davantage encore les émissions de  $\text{MP}_{2,5}$ . Il faut prendre en compte le fait que ces technologies en bout de chaîne détermineront des coûts d'investissement et d'exploitation supérieurs.

La Suisse, l'Autriche et l'Allemagne ont déjà introduit une législation visant à minimiser les émissions polluantes issues de la combustion de biomasse et il existe des réglementations strictes en matière d'installations à bois, en fonction de la taille de celles-ci. Les valeurs limites résumées dans le tableau 6 devraient aider à réduire les émissions de MP dans les zones intéressées.

Technologie de combustible	MP <sub>2,5</sub>	NO <sub>x</sub>	COVNM	BaP	SO <sub>2</sub>
	kg/TJ	kg/TJ	kg/TJ	g/TJ	kg/TJ
Gazole : brûleurs à flamme bleue à technologie basse température ou condensation	1,2	33,1	0,17	0,0	0,5
Brûleurs gaz naturel à tirage forcé	0,2	36,6	0,20	0,0	0,3
Poêles à GPL	1,8	51,0	2,00	0,0	6,0
Poêles à charbon	122,4	132,0	333,30	33,4	543,0
Poêles et cuisinières à bois	118,4	106,0	583,59	121,0	11,0
Chaudières à bois à combustibles mixtes	113,8	122,1	422,99	29,8	11,0
Chaudières à bois à tirage forcé	40,0	80,0	325,00	0,2	11,0
Chaudières à copeaux de bois de type conventionnel	80,0	107,0	432,40	8,4	11,0
Chaudières à copeaux de bois avec contrôle des émissions par capteur d'oxygène	44,0	80,0	78,00	0,6	11,0
Poêles à granulés	24,0	60,0	39,00	10,0	11,0
Chaudières à granulés	15,2	60,0	32,50	0,6	11,0

**Tableau 5 :** Facteurs d'émissions pour certaines technologies de combustible utilisées pour l'inventaire national autrichien sur les émissions atmosphériques (par térajoule d'énergie produite) (à noter : la distinction entre les technologies de combustible varie d'un pays à l'autre, de sorte qu'une comparaison directe des ensembles nationaux de facteurs d'émission peut aboutir à des interprétations erronées).

Pays	Dispositifs de chauffage décentralisés à combustible solide	Valeurs limites à 13 % d'oxygène	
		CO [mg/m <sup>3</sup> ]	MP
Règlement de l'Union européenne (UE) 2015/1185 Prise d'effet 01.01.2022	Foyer ouvert	2.000	50
	Foyer fermé	1 500	40
	Foyer fermé à granulés	300	20
	Cuisinières <sup>(a)</sup>	1 500	40
Autriche <sup>(b)</sup>	Foyer ouvert	640	120
	Foyer fermé	640	120
	Foyer fermé à granulés	640	120
	Cuisinières		
France Normes d'application volontaire du label <i>Flamme verte</i> - nouveaux appareils depuis le 01.01.2020	Foyer ouvert	1 250	
	Foyer fermé	1 500	40
	Foyer fermé à granulés	250	30
	Cuisinières	1 500	40
Allemagne BimSchVStufe 2 (nouveaux appareils depuis le 01.01.2015)	Foyer ouvert	1 250	40
	Foyer fermé	1 250	40
	Foyer fermé à granulés	250	20/30
	Cuisinières	1 500	40
Italie <sup>(c)</sup> DM 7 novembre 2017, n° 186 Déjà en vigueur, contenant des normes d'application volontaire	Foyer ouvert	1 500 - 1 250 - 650	40 - 30 - 25
	Foyer fermé	1 500 - 1 250 - 650	40 - 30 - 25
	Foyer fermé à granulés	364 - 250 - 250	40 - 30 - 15
	Cuisinières	1 500 - 1 250 - 650	40 - 30 - 25
Liechtenstein	Foyer ouvert	1 500	75
	Foyer fermé	1 500	75
	Foyer fermé à granulés	500	40
	Cuisinières	3.000	90
Monaco	Foyer ouvert	Non applicable	Non applicable
	Foyer fermé	Non applicable	Non applicable
	Foyer fermé à granulés	Non applicable	Non applicable
	Cuisinières	Non applicable	Non applicable
Slovénie	Foyer ouvert	1 250	40
	Foyer fermé	1 250	40
	Foyer fermé à granulés	400	30 - 20 <sup>(d)</sup>
	Cuisinières	1 500	40
Suisse <sup>(e)</sup>	Foyer ouvert	1 500	75
	Foyer fermé	1 500	75
	Foyer fermé à granulés	500	40
		3 000	90

**Tableau 6 :** Comparaison entre les valeurs d'émission existantes des systèmes de chauffage au bois et les exigences futures de la Directive sur les produits liés à l'énergie (Erp) 2009/125/CE, dont le règlement (UE) 2015/1185 porte application.

(a) « cuisinière » désigne un dispositif de chauffage décentralisé à combustible solide, qui intègre, d'une part, dans un compartiment, la fonction d'un dispositif de chauffage décentralisé à combustible solide et, d'autre part, un plan de cuisson ou un four, ou les deux, destinés à être utilisés pour cuire des aliments, et qui est raccordé de façon étanche à un conduit de cheminée ou à une sortie de foyer, ou qui nécessite un conduit de fumée pour l'évacuation des produits de la combustion ; (b) Les valeurs d'émission limites autrichiennes se réfèrent à la mesure initiale ; pour la procédure d'homologation, des valeurs limites d'émission plus strictes s'appliquent ; (c) Données pour l'Italie régulées par un système d'étiquetage avec des valeurs distinctes pour les étiquettes portant 3, 4 ou 5 étoiles ; (d) Première valeur pour la chaleur directe, deuxième valeur pour le chauffage d'un fluide ; (e) Pour la Suisse, l'ordonnance sur la protection de l'air annexe 4 Numéro 212 s'applique. À partir du 1.1.2022, les exigences du règlement 2015/1185 de l'UE pour la mise sur le marché de telles installations s'appliqueront également (voir Annexe 1.19 EnEV).

La Directive 2009/125/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits liés à l'énergie est entrée en vigueur le 1er janvier 2020 pour les systèmes de combustion de biomasse (tels que les dispositifs de chauffage aux granulés). D'après le Règlement UE 2015/1185, elle doit prendre effet le 1er janvier 2022 pour les petits dispositifs de chauffage au bois indiqués sous le nom de « dispositifs de chauffage décentralisés à combustible solide ». À travers cette Directive, les exigences minimales au sein des États membres de l'UE sont strictement normalisées. Toutefois, les résultats dépendront des différents régimes de contrôle et d'inspection. Il y a une grande différence selon que les mesures sont effectuées sur site ou sur banc d'essai, et selon l'entité qui effectue la mesure (auto déclaration du fabricant ou laboratoire compétent indépendant). La mise en œuvre de la Directive sur l'écoconception doit s'accompagner de régimes efficaces de contrôle du marché, sinon elle permettra que s'y frayent un passage des poêles à meilleur marché et plus polluants.

### 3.2.2 TRANSPORT ROUTIER

Le transport routier est une source importante de polluants gazeux ( $\text{NO}_2$ , COV) et particulaires. Les MP provenant des émissions des véhicules sont principalement composées de carbone élémentaire et de HAP et, selon l'OMS<sup>26</sup>, les gaz d'échappement diesel sont des agents cancérigènes avérés. En outre, la circulation routière des véhicules contribue à la masse des  $\text{MP}_{10}$  par effet des poussières fines et grossières libérées par l'abrasion des freins et des pneus et par la remise en suspension de la poussière des routes.

Les impacts et émissions dus à la circulation automobile ne se limitent pas aux principaux axes de transit et aux routes urbaines des vallées, mais concernent aussi les routes périphériques reliant les petits villages et de nombreux chemins hors route permettant d'accéder à des zones de montagne semi-naturelles situées à haute altitude. La figure 34 (chapitre 7) indique l'emplacement des principaux axes de transport à travers les Alpes. Outre les personnes qui y vivent à titre permanent, de nombreux touristes empruntent les chemins de montagne hors route en voiture privée pour s'y rendre (Convention alpine, 2007 : 8, 33, 129), aussi

bien en hiver qu'en été, par exemple pour le ski et pour les activités de randonnée (voir par exemple Blasco M. *et al.*, 2006, 2008 ; Nascimbene J. *et al.*, 2014). D'après les mesures effectuées par des stations mobiles dans et près des villages et des routes de vallée, le trafic constitue la source dominante (en termes numériques) de particules ultrafines, notamment de  $\text{MP} < 50 \text{ nm}$ , tandis que la masse de particules ultrafines a pour principale origine la combustion de biomasse (Weimer S. *et al.* 2009).

Des études publiées dans la littérature révèlent que, alors que la combustion du bois occupe une place comparable dans de nombreuses vallées alpines, l'importance des émissions des véhicules automobiles ne devient substantielle que dans les sites avec des flux de trafic très importants (Szidat S. *et al.*, 2007 ; Gianini M.F.D. *et al.*, 2012 ; Zotter P. *et al.*, 2014). Le mode de transport de passagers le plus utilisé localement est le transport individuel motorisé, ce qui constitue une inquiétude pour la région alpine, car il est vraisemblablement destiné à augmenter dans un proche avenir (Convention alpine, 2007 : 64). En outre, le trafic transalpin de fret le long des vallées alpines a un impact significatif sur la qualité de l'air, car il vient s'ajouter au transport de marchandises régional et local intra-alpin (Heimann D. *et al.*, 2007). Les sites des vallées alpines sont en effet de plus en plus touchés par les gaz d'échappement (Ducret-Stich R.E. *et al.*, 2013a ; Ducret-Stich R.E. *et al.*, 2013b). De nombreuses études font état d'une augmentation substantielle, près des autoroutes ou le long des principales routes traversant les villages, des concentrations de polluants atmosphériques liés à la circulation, tels que le  $\text{NO}_2$ , le carbone élémentaire et les particules. Chez les personnes vivant près des routes, on relève des augmentations statistiquement significatives des symptômes respiratoires fortement associés à l'exposition aux polluants (Ducret-Stich R.E. *et al.*, 2013b ; Hazenkamp-von Arx M.E. *et al.*, 2011).

Du fait de la topographie complexe des Alpes, l'infrastructure de transport est limitée à un petit nombre de corridors le long des vallées et à travers les cols, où se concentrent les émissions dues au trafic. Étant donné que de nombreux villages et villes des Alpes sont eux aussi regroupés le long des vallées, en particulier celles où se trouvent les principales autoroutes et lignes de chemin de fer (Heimann D. *et al.*, 2007), l'impact du trafic routier est susceptible d'affecter une grande partie de la population alpine.

26. WHO-IARC 2012: Diesel engine exhaust carcinogenic ([https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr213\\_E.pdf](https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr213_E.pdf)).



L'électrification des véhicules par secteurs (logistique urbaine), la démarche vers l'hybridation et la diversification d'éléments tels que les technologies, les carburants alternatifs, les systèmes de propulsion, sont déjà en cours. Des lignes électriques aériennes destinées au secteur des poids lourds électriques pourraient être installées le long des sections planes. Les camions diesel auront encore un avenir à moyen terme en optimisant les moteurs et les systèmes de nettoyage des filtres d'échappement (voir chapitre 7.3.4). Par conséquent, l'on peut s'attendre à des améliorations de la qualité de l'air dans les vallées alpines surtout s'il est possible de renforcer encore le ferroutage.

### 3.2.3 POLLUTION TRANSFRONTIÈRE

Alors que différentes études disponibles dans la littérature traitent de l'impact de l'industrie charbonnière en dehors de l'Europe, une seule publication fait état de résultats concernant l'Europe (Valverde V. *et al.*, 2016). La combustion du charbon peut être une source de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, MP et métaux lourds (mercure, plomb, arsenic et cadmium) et bien sûr de dioxyde de carbone (Global energy monitor, 2019). Ces émissions peuvent être transportées sur une longue distance.

De nombreux pays européens ont annoncé leur volonté d'exclure le charbon de leurs sources de production d'énergie. Ceci correspond à 48 % du budget carbone de l'UE. Parmi les membres de la Convention alpine, l'Autriche, le Liechtenstein, Monaco et la Suisse n'ont pas de centrale à charbon en 2020, la France a annoncé qu'elle va les interdire d'ici 2022, l'Allemagne va progressivement supprimer les siennes d'ici 2038 au plus tard et l'Italie a l'intention d'éliminer progressivement le charbon d'ici 2025. La Slovénie exploite la nouvelle unité (la 6e) de 600 MWe de la centrale à charbon de Šoštanj, construite en 2016 et qu'il est prévu d'utiliser jusqu'en 2054.

Après un contrôle approfondi de la littérature scientifique, il ressort qu'aucune des études actuellement publiées sur la pollution atmosphérique et la répartition des sources portant sur des zones de la région alpine ne mentionne de contribution des centrales à charbon à la pollution atmosphérique mesurée. Selon la littérature scientifique, ces installations ont donc un impact négligeable ou nul sur la qualité de l'air dans la région alpine.

Bien que cette analyse ne laisse apparaître aucune préoccupation spécifique, la pollution transportée à longue distance est un sujet important sur lequel se penche la Convention CEE-ONU sur la pollution at-

mosphérique transfrontière à longue distance. Il est important d'utiliser les observations, enquêtes sur les émissions et modélisations telles que celles de l'Observatoire virtuel alpin, présenté dans le chapitre 6.4 pour comprendre les mécanismes susceptibles de déclencher le transport des polluants et lancer un avertissement précoce aux décideurs et au public sur les problèmes touchant à la qualité de l'air.

### 3.2.4 SOURCES DE PRÉCURSEURS D'AÉROSOLS SECONDAIRES

Les précurseurs d'AS sont des espèces gazeuses (par ex., l'ammoniac NH<sub>3</sub>, le SO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub>, les COV) qui subissent des réactions chimiques et une conversion gaz/particule, formant des particules directement dans l'atmosphère. La combustion de biomasse et le trafic routier (sections 3.2.1 et 3.2.2) font partie des principales sources d'émission de précurseurs d'AS. Les autres sources clés présentes dans la région alpine comprennent notamment l'agriculture et les canopées forestières. En plus des sources d'émission, le facteur déterminant de la formation d'AS est la stabilité atmosphérique (voir section 3.1.1), grâce à laquelle les réactions chimiques menant à la formation des particules peuvent se poursuivre et augmenter ainsi les concentrations dans l'air ambiant (Hao L. *et al.*, 2018).

La composition chimique des AS reflète la prédominance saisonnière des différentes sources de précurseurs et les différentes conditions physiques et météorologiques qui favorisent leurs réactions de formation dans l'atmosphère. Les AS sont une composante majeure des particules aéroportées dans la région alpine, tant en hiver qu'en été, en raison de deux facteurs principaux : l'augmentation des émissions provenant des sources anthropiques primaires (principalement le trafic et le chauffage domestique) pendant l'hiver, et l'augmentation des émissions provenant de sources biogéniques (canopées forestières) pendant l'été. La composition des AS comprend des espèces tant inorganiques qu'organiques.

La formation des AS inorganiques (principalement ammonium, nitrates, sulfates) dans l'atmosphère est due à des sources anthropiques émettant, comme précurseurs, du NH<sub>3</sub> (agriculture), du NO<sub>x</sub> et du SO<sub>2</sub> (trafic, chauffage domestique, combustion de biomasse). Quant à la formation des AS organiques (un mélange de nombreuses familles d'espèces organiques) dans l'atmosphère, elle est due à des sources à la fois anthropiques (principalement la combustion de biomasse, le trafic) et biogéniques (canopées forestières) émettant, comme précur-

seurs, des COV (Rouvière A. *et al.*, 2006 ; Srivastava D. *et al.*, 2019 ; Stefenelli G. *et al.*, 2019).

#### 3.2.4.1 Aérosols secondaires inorganiques

Les aérosols secondaires (AS) inorganiques sont principalement composés de nitrate d'ammonium pendant l'hiver et de sulfate d'ammonium en été, selon les équilibres chimiques entre ces espèces (Squizzato *et al.*, 2013). Les contributions typiques des AS inorganiques à la masse totale de  $MP_{10}$  dans les sites de vallée de la région alpine varient entre 5 et 15 %, comme l'ont montré des observations faites à Aoste (Diemoz H. *et al.*, 2019a), Chamonix et Grenoble (Weber S. *et al.*, 2019), Lanslebourg (Besombes J.L. *et al.*, 2014) et d'autres vallées, mais l'on observe parfois des contributions atteignant 30 % (Favez O. *et al.*, 2017a). Le poids des AS inorganiques dans la composition des matières particulaires en masse est étroitement lié aux concentrations d'ammonium (et de son précurseur, l'ammoniac). Dans les vallées alpines, les concentrations d'ammonium dans l'air varient approximativement entre 0,1 et 0,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ; dans cette fourchette, les valeurs les plus élevées sont observées en automne et en hiver (Favez O. *et al.*, 2017a ; Diemoz H. *et al.*, 2019a). On a relevé des valeurs similaires également pour l'ammoniac dans l'air de sites alpins. Thimonier A. *et al.* (2019) ont comparé les mesures de l'ammoniac dans l'air ambiant en Suisse, pour les années 2000 et 2014, effectuées dans différents pâturages alpins et dans deux champs d'agriculture intensive : Lausanne et Vordemwald. Les concentrations étaient inférieures à 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dans les pâturages alpins et de 2 à 4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dans les sites d'agriculture intensive, sans présenter de différence significative entre 2000 et 2014. Étant donné que l'ammonium (comme son précurseur, l'ammoniac) provient principalement des activités agricoles, ces valeurs montrent que l'agriculture a un impact généralement faible sur la qualité de l'air dans la région alpine, comme indiqué précédemment (Lighty J.S. *et al.*, 2000 ; Price M.F. *et al.*, 2011).

Dans les zones fortement intéressées par les activités agricoles, comme la vallée du Pô, les concentrations d'ammonium sont beaucoup plus élevées, à savoir entre 5 et 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , avec des moyennes de 5-15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (e.g. Larsen *et al.*, 2012) ; des fourchettes similaires ont également été signalées dans des exploitations agricoles d'Autriche et de Bavière pour l'ammoniac présent dans l'air ambiant (Löflund M. *et al.*, 2002). Cependant, les mêmes auteurs ont constaté une rapide diminution des concentrations d'ammoniac dans un rayon de 500 m autour des exploitations, ce qui laisse penser que l'ammo-

niac est rapidement prélevé et dilué et que, de ce fait, la charge de  $\text{NH}_3$  reste seulement localisée.

#### 3.2.4.2 Aérosols organiques secondaires

Dans la région alpine, des espèces organiques d'AS se forment, en hiver, à partir des émissions de COV dues à la combustion de biomasse et du trafic, tandis qu'en été elles se forment à partir des canopées forestières, qui émettent de grandes quantités de COV en raison des températures ambiantes plus élevées. En général, une fois émis, les COV subissent des réactions d'oxydation au contact d'oxydants atmosphériques tels que les radicaux hydroxyles (OH), l'ozone ( $\text{O}_3$ ) et les radicaux nitrates ( $\text{NO}_3$ ) pour former des particules secondaires.

Rouvière A. *et al.* (2006) ont analysé les fumées de la combustion du bois de pin dans la vallée de Chamonix, où la végétation est en grande partie composée de conifères. Les résultats des analyses indiquent la présence d'agents aromatiques (benzène, toluène, xylènes), d'alcanes (heptane, octane, nonane) et de terpènes (isoprène, limonène,  $\alpha$ -pinène). Comme mentionné, la composition des AOS est très complexe et il est difficile de détecter la totalité des familles biologiques présentes dans les SA. Néanmoins, Squizzato *et al.* (2013) ont récemment réussi à distinguer différentes contributions des sources aux AOS et à identifier les différences de composition chimique et de quantité dans un site rural de la région parisienne. Parmi ces contributions, deux au moins provenaient d'émissions de combustion de biomasse et une autre était liée au trafic, ce qui représente, en tout, environ 15 % du total des AOS, ces derniers représentant eux-mêmes environ 75 % du total des aérosols organiques.

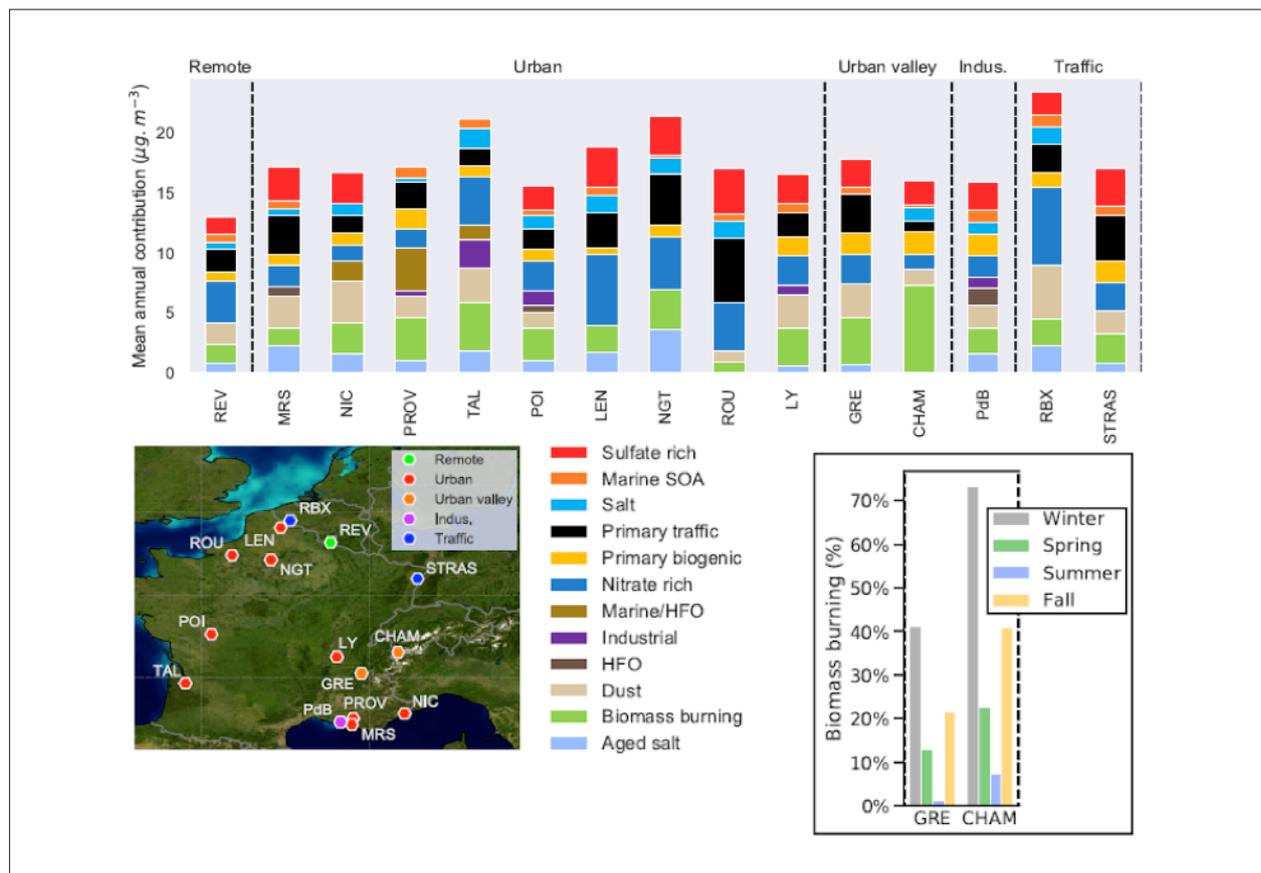
Le rôle des émissions biogéniques dans la formation d'AOS en Suisse et en Italie en 2003 a été étudié par Andreani-Aksoyoglu S. *et al.* (2008). Les simulations de modèles ont laissé penser que la contribution des AOS biogéniques (formés à partir des précurseurs émis par les arbres) au total des AOS était assez élevée, à savoir environ 80 % dans le nord de la Suisse. Dans cette zone, la contribution biogénique est due aux forêts d'épicéas de Norvège, qui y sont très importantes et présentent des émissions élevées de monoterpène. En revanche, la contribution des émissions biogéniques aux AOS s'est avérée sensiblement plus faible (environ 40 %) dans le sud de la Suisse, où les émissions de monoterpène sont plus faibles, et dans la zone polluée du nord de l'Italie (Milan : 15-25 %), où les sources anthropiques contribuent beaucoup plus que la végétation à la formation des AOS. De même, dans le cadre du

projet DECOMBIO, on a trouvé des AOS d'origine biogénique représentant de 10 à 30 % de la masse totale des  $MP_{10}$  à Marnaz, Chamonix et Passy, (Favez O. *et al.*, 2017a).

Il convient de noter que ce n'est que récemment que des études sur la répartition des sources ont démontré que la contribution des espèces organiques à la composition totale des AS est généralement comparable à celle des espèces inorganiques (Favez O. *et al.*, 2017a ; Srivastava D. *et al.*, 2019). Toutefois, si les sources et les réactions responsables de la formation de particules secondaires inorganiques dans l'atmosphère sont largement reconnues, ce qui conforte les décisions visant à prendre des mesures de réduction pour prévenir les épisodes de pollution élevée, on en sait encore très peu sur ces mêmes aspects pour ce qui est des particules secondaires organiques. Il faudrait notamment améliorer les connaissances à la fois sur les profils de sources chimiques des COV (à sa-

voir : quelles espèces de COV sont principalement émises par quelles sources) et sur les réactions atmosphériques responsables de la formation d'espèces secondaires à partir des COV (en particulier pendant les réactions chimiques nocturnes, par exemple avec le radical nitrate).

L'un des résultats importants du projet SOURCES pour les politiques de qualité de l'air est qu'il permet d'assigner des sources de pollution aux concentrations globales de  $MP_{10}$  dans l'air ambiant, de telle sorte qu'il est possible de réduire la pollution à son origine. La figure 7 montre clairement l'importance de la combustion de biomasse sur l'exemple de vallées alpines françaises. Bien que cette étude ne laisse pas apparaître une grande contribution des particules riches en nitrates et sulfates liées à l'agriculture intensive, cette contribution semble être importante dans d'autres régions et doit être vérifiée avec soin dans les zones d'agriculture intensive des Alpes.



**Figure 7 :** Résultats du projet « SOURCES » montrant les contributions des sources de  $MP_{10}$  sur différents sites en France. En haut : le graphique montre l'importante contribution de la combustion de biomasse dans les deux sites alpins de Grenoble (GRE) et Chamonix (CHAM) par rapport à d'autres sites (les acronymes des autres villes figurent dans la référence). HFO = Heavy fuel oil (fioul lourd) ; Sulfate rich = contenant du  $SO_4^{2-}$  ; Nitrate rich = contenant du  $NO_3^-$  ; la poussière (Dust) est un mélange d'aérosols terrigènes et de particules minérales relevant des activités humaines (par exemple, travaux de construction, remise en suspension due au transport routier, etc.). En bas : le graphique de droite montre les variations saisonnières de la combustion de biomasse à Grenoble et à Chamonix, révélant l'importance de son impact en hiver (Weber S. *et al.*, 2019).

## 4. EFFETS DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Les polluants les plus importants du point de vue de leur effet sur la santé sont les matières particulaires (MP<sub>2,5</sub>, MP<sub>10</sub>), le NO<sub>2</sub> et l'ozone. D'autres polluants préoccupants sont le carbone suie, les HAP et d'autres familles de composés organiques (furanes, HULIS, agents aromatiques oxygénés) et les métaux lourds rentrant dans les MP. Les preuves scientifiques quant aux différents effets néfastes sur la santé se fondent sur des études épidémiologiques et toxicologiques et sur des études d'exposition humaine en milieu contrôlé. Afin d'évaluer le poids des effets néfastes sur la santé liés à la pollution atmosphérique, l'OMS a élaboré des lignes directrices relatives à la qualité de l'air basées sur l'évaluation de la littérature scientifique par des experts (voir tableau 3).

### 4.1 EFFETS DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE SUR LA SANTÉ HUMAINE : MORTALITÉ

La mortalité due à la pollution atmosphérique est évaluée par le biais d'études épidémiologiques. Les estimations fournies par ce genre de calculs peuvent varier largement d'une étude à l'autre ; cela dépend notamment : du choix des méthodes utilisées pour évaluer l'exposition ; des fonctions mathématiques utilisées, qui mettent en relation le niveau d'exposition à la pollution atmosphérique et ses effets en termes de mortalité, tout en tenant compte de différents facteurs ; du niveau d'exposition auquel le risque minimal a été observé (scénario de référence).

L'éventail des estimations portant sur la réduction de l'espérance de vie due à la pollution de l'air va de plusieurs semaines à quelques années, suivant la méthode d'étude adoptée et la région prise en compte. Les estimations à l'échelon mondial résultent de la moyenne des taux de mortalité dus à la pollution atmosphérique relevés dans toutes les régions (par exemple, zones rurales, villes polluées) ;

aussi leur pouvoir explicatif est-il limité.

Au niveau mondial, le Health Effects Institute (HEI) estime que la pollution de l'air réduit de 20 mois l'espérance de vie pour les enfants nés aujourd'hui (Health Effects Institute, 2019). En Europe, la pollution de l'air représente le premier risque environnemental pour la santé (AEE, 2019). L'Agence européenne pour l'environnement (AEE) a évalué, pour 2016, le nombre d'années de vie perdues (AVP) attribuable à l'exposition aux MP<sub>2,5</sub>, au NO<sub>2</sub> et à l'O<sub>3</sub>. Les informations sur les AVP pour 41 pays européens sont résumées dans le rapport 2019 de l'AEE sur la qualité de l'air. Ces calculs sont basés sur des concentrations moyennes annuelles, pondérées par population, de 14,4 µg/m<sup>3</sup> pour les MP<sub>2,5</sub> et de 16,3 µg/m<sup>3</sup> pour le NO<sub>2</sub>. Dans le cas de l'ozone, l'indicateur SOMO35 (somme des moyennes journalières maximales sur huit heures supérieures à 35 PPB<sup>27</sup>) avec une concentration de 3 811 µg/m<sup>3</sup> a été utilisé. Au total, pour l'Europe, 4,22 millions d'AVP sont attribuables aux MP<sub>2,5</sub>, 707 000 au NO<sub>2</sub> et 160 000 à l'ozone. Les AVP moyennes pour 100 000 habitants, dans toute l'Europe, sont de 900, 100 et 30, imputables respectivement aux MP<sub>2,5</sub>, au NO<sub>2</sub> et à l'ozone. Certaines publications plus récentes reportent des estimations deux fois plus élevées (Leivelde J. *et al.*, 2020).

Bien que la mortalité due à la pollution de l'air soit importante, la morbidité – terme indiquant l'ensemble des maladies causées ou exacerbées par la pollution atmosphérique – influe de manière déterminante dans la diminution de la qualité de vie des personnes, parfois dès l'enfance.

### 4.2 EFFETS DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE SUR LA SANTÉ HUMAINE : MORBIDITÉ

Les effets néfastes de la pollution atmosphérique sur la santé résultent de différents mécanismes

27. PPB = parts per billion (parties par milliard).



physiopathologiques. En premier lieu, le fait que les polluants exercent une toxicité directe sur les cellules et le matériel génétique. Les polluants ont également des effets indirects, à travers des processus inflammatoires, un stress oxydatif et un affaiblissement des mécanismes de défense du corps. Tous ces processus agissent sur les systèmes cardio-vasculaire et respiratoire, ainsi que sur d'autres organes, ce qui se traduit par différents troubles : variabilité réduite de la fréquence cardiaque, augmentation de la tension artérielle et de la coagulabilité, progression de l'athérosclérose, capacité respiratoire réduite, réactivité bronchique accrue, dans certains cas croissance cellulaire anormale, troubles de la reproduction, troubles du développement de l'enfant, troubles neurologiques et métaboliques. Ces effets indésirables dépendent du type d'exposition, de la profondeur de pénétration des polluants dans les poumons et du pouvoir irritant ou oxydant de ces polluants<sup>28</sup>.

C'est dans le système respiratoire que se manifestent le plus clairement les effets des polluants atmosphériques sur la santé, le polluant entrant directement en contact avec le corps humain par inhalation. Par la suite, l'inflammation systémique et le stress oxydatif causés par l'inflammation des poumons pourraient provoquer d'autres effets néfastes sur la santé, tels que les maladies cardiovasculaires et le cancer. Les seuls effets sur la santé décrits dans les sections suivantes sont ceux pour lesquels l'EPA (Environmental Protection Agency), l'agence des États-Unis pour la protection environnementale, a conclu à une relation causale ou susceptible d'être causale.

L'ozone, le dioxyde d'azote et le dioxyde de soufre sont des gaz irritants et oxydants et ont des effets néfastes sur la santé, augmentant les risques de maladies pulmonaires, d'asthme et de bronchite. Parmi les différentes fractions en taille des MP, les démonstrations scientifiques les plus substantielles quant aux effets néfastes sur la santé concernent les MP<sub>2,5</sub>. En général, pour la plupart des effets sur la santé et l'exposition aux particules MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub> et ultrafines, les disciplines scientifiques présentent différentes limitations et incertitudes qui compliquent l'interprétation des résultats (U.S. EPA, 2019). Néanmoins, des recherches récentes montrent le rôle que jouent les espèces organiques d'aérosols primaires et secondaires (AOP et AOS, voir sections 3.2.1 et 3.2.4.2) dans les MP en générant des espèces réactives endo-

gènes de l'oxygène ou de l'azote qui sont directement responsables du stress oxydatif cellulaire, y compris dans les tissus pulmonaires. On observe généralement aussi que les métaux lourds inclus dans les MP agissent comme médiateurs de la génération endogène d'espèces réactives d'oxygène ou d'azote dans les cellules (Fang *et al.*, 2019 ; Tuet *et al.*, 2019).

Il est probable qu'il y ait un lien de causalité entre l'exposition à court terme (moyenne journalière) aux MP<sub>2,5</sub> et les effets au niveau du système respiratoire, y compris l'exacerbation de l'asthme, l'aggravation de la bronchopneumopathie obstructive chronique et les affections respiratoires combinées. Les résultats d'études épidémiologiques indiquent des associations entre l'exposition à long terme (moyenne annuelle) aux MP<sub>2,5</sub> et le développement et la prévalence de l'asthme chez l'enfant, la respiration sifflante chez l'enfant et l'inflammation pulmonaire (U.S. EPA, 2019).

Concernant les effets cardiovasculaires, l'U.S. EPA conclut à une relation causale entre l'exposition à court terme aux MP<sub>2,5</sub> et les visites aux urgences cardiovasculaires ou hospitalisations, en particulier pour maladies cardiaques ischémiques et insuffisance cardiaque. L'exposition à long terme aux MP<sub>2,5</sub> (relation causale) peut être la cause de diverses maladies cardio-vasculaires, notamment la progression de plaques d'athérome, une réduction de la contractilité et du débit cardiaques, et des changements dans la tension artérielle.

Il existe également une probable relation causale entre l'exposition à long terme aux MP<sub>2,5</sub> et toute une série d'effets sur le système nerveux, dont, entre autres : neuro-inflammation et stress oxydatif, neurodégénérescence, effets de nature cognitive (réduction des fonctions cognitives, démence) et effets sur le neurodéveloppement. Les démonstrations tant expérimentales qu'épidémiologiques sont bien étayées et cohérentes, en ligne avec un raisonnement impliquant une neuro-inflammation de certaines régions spécifiques du cerveau (U.S. EPA, 2019).

En ce qui concerne le cancer, il est probable qu'il y ait un lien de causalité avec l'exposition à long terme aux MP<sub>2,5</sub>. Outre des résultats expérimentaux et épidémiologiques récents indiquant la génotoxicité, les effets épigénétiques et le potentiel cancérigène de l'exposition aux MP<sub>2,5</sub>, de solides résultats épidémiologiques font état d'une augmentation du

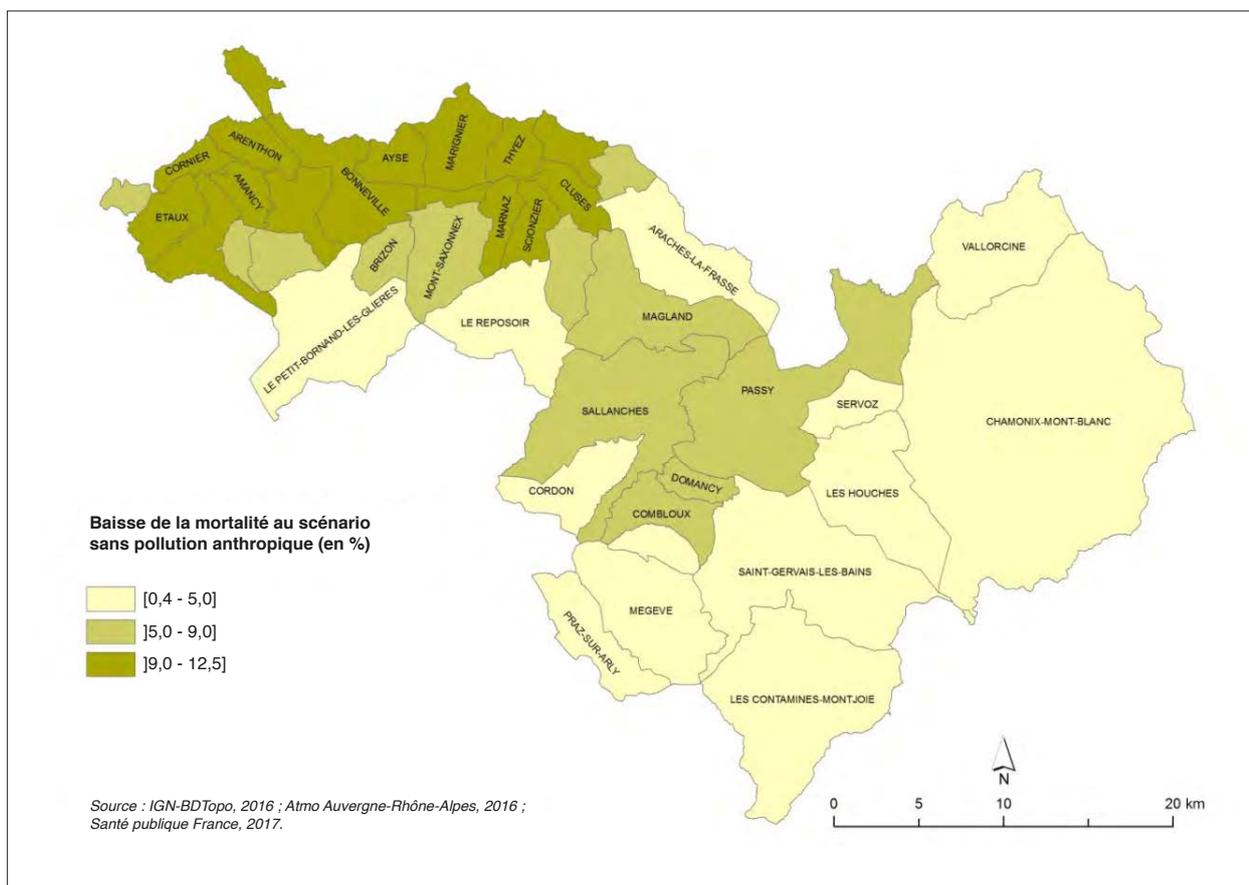
28. Agence Santé publique France, Sylvia Medina, juin 2019, présentation au groupe de travail du RSA 8.

risque d'incidence du cancer du poumon, en particulier chez les personnes n'ayant jamais fumé (U.S. EPA, 2019). En 2013, jugeant qu'il existe suffisamment de preuves que l'exposition à la pollution atmosphérique cause le cancer du poumon, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), un organisme spécialisé de l'OMS, a classé la pollution de l'air ambiant comme cancérigène pour l'homme (OMS Europe, 2013b). Les  $MP_{10}$  et  $MP_{2,5}$  ont été évaluées séparément par le CIRC et également classées comme cancérigènes.

Des scientifiques ont récemment discuté de l'impact de la pollution atmosphérique sur la propagation et la mortalité de la COVID-19. Deux modes d'impact font débat : la propagation du virus par les particules fines et une mortalité plus élevée due à une déficience pulmonaire préexistante chez des personnes vivant dans des zones très polluées. Alors que la première hypothèse est largement rejetée, la seconde n'est pas encore clarifiée et doit être étudiée plus avant; de nombreux projets de recherche à travers le monde se penchent actuellement sur cette question.

### 4.3 EFFETS DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE SUR LA SANTÉ HUMAINE DANS LA RÉGION ALPINE

La relation entre la pollution de l'air liée au trafic, la perception des gaz d'échappement et l'impact comportemental ou les symptômes de maladies a été étudiée en 1995 dans deux enquêtes menées auprès de 1 989 adultes et 796 enfants dans 13 petites communes alpines du Tyrol (AT), par le biais de réponses à un questionnaire et de mesures de la pollution atmosphérique. Parmi les symptômes, il a été possible d'établir une association significative entre des sensations de fatigue, épuisement, mauvaise humeur, nervosité, l'irritation des yeux et des maux d'estomac et la qualité nominale de l'air. Les enfants vivant dans des zones exposées à la circulation passent moins de temps à l'extérieur et la perception signalée des gaz d'échappement a été significativement associée à des rhumes récurrents, des bronchites chroniques et un index d'hyper-réactivité des voies respiratoires (Lercher P. *et al.*, 1995).



**Figure 8 :** Carte de la baisse de mortalité prévue dans un scénario sans pollution anthropique dans les différentes communes de la vallée de l'Arve (Pascal, M. *et al.*, 2017).



Une étude transversale menée auprès de 1 839 adultes de 10 communes situées le long des corridors routiers alpins suisses a été réalisée en 2005 en vue d'étudier l'incidence des gaz d'échappement sur les symptômes respiratoires. Des associations ont pu être établies entre le fait de vivre près d'une autoroute et une respiration sifflante en l'absence de rhume ou une toux chronique. Les symptômes rejoignaient les niveaux de fond chez les populations vivant à 400-500 m de l'autoroute (Hazenkamp-von Arx M.E. *et al.*, 2011).

Dans le cadre d'un vaste projet mené sur trois ans (2005-2007), le consortium ALPNAP a recueilli et décrit des méthodes scientifiques actuelles pour observer et prévoir la pollution atmosphérique et sonore le long des corridors de transport transalpins et en évaluer les effets connexes sur la santé et le bien-être. En combinant les données de population avec un modèle de dispersion de l'air, il a été possible d'établir des cartes de répartition des populations exposées. L'utilisation des fonctions de réaction à l'exposition a ensuite permis de quantifier les effets sur la santé et leur répartition sur le territoire examiné (Heimann D *et al.*, 2007).

Une étude sur la pollution de l'air, la mortalité et l'espérance de vie dans la vallée de l'Arve (Alpes françaises) a été réalisée en 2017 par Santé publique France (Pascal M *et al.*, 2017). Cette vallée présente des conditions topographiques et climatiques défavorables, avec des variations saisonnières marquées et de fréquents pics de pollution atmosphérique en hiver. L'étude s'est concentrée sur les  $MP_{2,5}$  au titre de traceurs de pollution pour lesquels il existe suffisamment d'éléments pour qu'il soit possible d'évaluer le risque de mortalité ; la pollution due aux  $MP_{2,5}$  est répandue dans les Alpes, comme on le verra au chapitre 5.2. L'étude a modélisé séquentiellement : la météorologie de la vallée, les émissions liées aux transports, à l'industrie et aux activités domestiques, la dispersion et la transformation chimique des polluants, et enfin l'exposition moyenne des personnes aux particules à l'échelle de la commune. Des données sur la mortalité non accidentelle des personnes de plus de 30 ans ont été recueillies dans la même région. Il a été possible d'établir un modèle classique log-linéaire (voir chapitre 4.1 ci-dessus) reliant la mortalité à l'exposition aux  $MP_{2,5}$ , d'où l'on a pu inférer la diminution de la mortalité en fonction de la diminution des  $MP_{2,5}$ . Les décideurs ont maintenant la possibilité d'utili-

ser le modèle en question pour tester plusieurs options politiques et anticiper les bénéfices en termes de mortalité ou d'espérance de vie (figure 8).

L'étude a conclu que la pollution atmosphérique aux  $MP_{2,5}$  dans la vallée a un impact de la même ampleur que dans des agglomérations françaises de taille moyenne, soit 8 % de la mortalité totale. Cet impact est très significatif, mais reste inférieur à celui observé dans les grandes villes les plus polluées de France (13 %). Une réduction de 30 % des concentrations de  $MP_{2,5}$  se traduirait par un gain de cinq mois en espérance de vie moyenne. Un nouveau projet de coopération entre les partenaires locaux suisses et français vient de démarrer dans la région du Grand Genevois pour évaluer les effets de la pollution atmosphérique en termes de santé et de coûts.

#### 4.4 EFFETS DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE SUR LES ÉCOSYSTÈMES

La pollution de l'air a également des impacts sérieux sur les écosystèmes et la biodiversité. On utilise le concept de « charge critique » pour évaluer l'exposition des écosystèmes terrestres et aquatiques au dépôt de polluants atmosphériques au-dessus du seuil d'effet délétère<sup>29</sup> (Nilsson J. *et al.*, 1988).

Le  $SO_2$  semble ne plus être un problème en Europe : en 2010, les dépôts de soufre étaient de 90 % inférieurs aux valeurs de 1980 et se trouvaient en-dessous de leur charge critique. Cependant, l'ozone, le  $NH_3$  et les oxydes d'azote ( $NO_x$ ) sont les agents ayant les effets les plus néfastes sur la faune, les plantes, l'eau et le sol, tandis que les métaux toxiques (tels que l'arsenic, le cadmium, le plomb, le nickel et le mercure) et les POP présentent des risques importants, car ils peuvent subsister dans l'environnement et certains peuvent s'accumuler au travers de la chaîne alimentaire (AEE, 2019).

Le dépôt de l'azote atmosphérique se combine à la lixiviation de l'azote des sols et provoque l'eutrophisation des rivières et des lacs, altérant ainsi la biodiversité. Paerl H.W. (2003) a montré que le dépôt d'azote atmosphérique peut représenter jusqu'à 60 % de l'ajout total d'azote dans la mer. L'ozone, qui

29. Charge critique : une estimation quantitative de l'exposition à un ou plusieurs polluants au-dessous de laquelle n'apparaissent pas, en l'état actuel des connaissances, d'effets néfastes significatifs indésirables sur des éléments sensibles de l'environnement. Le dépassement d'une charge critique est défini comme un dépôt atmosphérique du polluant supérieur à la charge critique.

est un puissant oxydant, interagit avec les cellules végétales, réduisant leur croissance et perturbant leur reproduction, portant ainsi préjudice aux forêts, aux cultures et aux prairies.

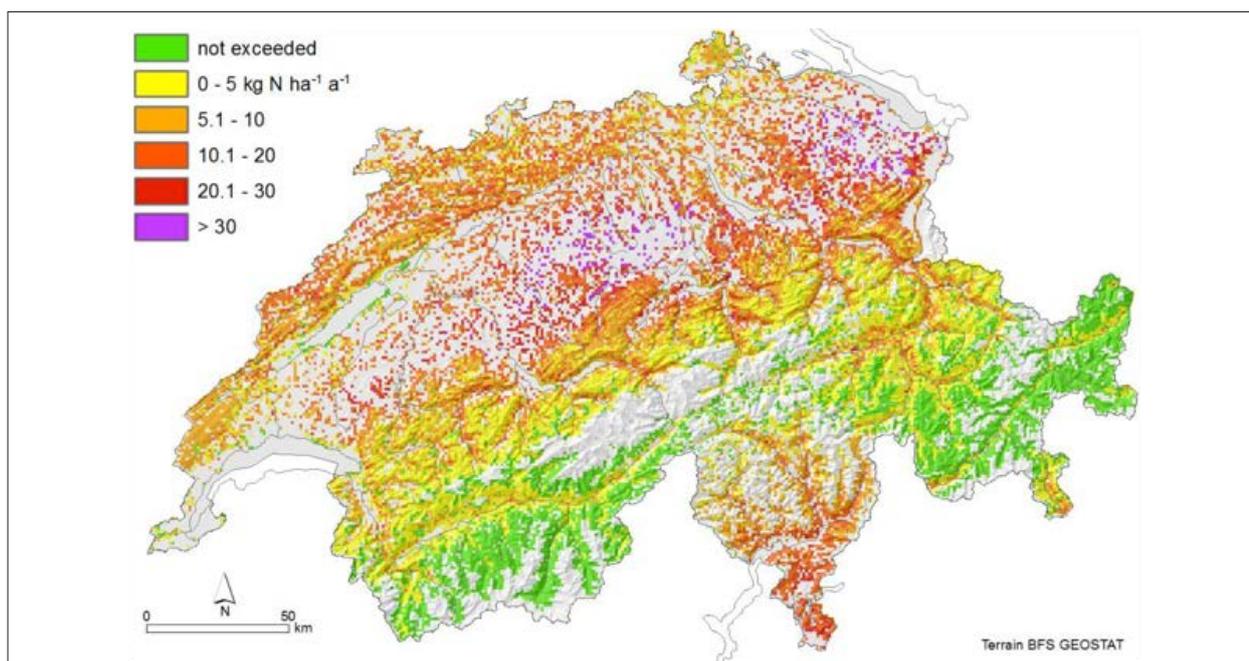
Les  $\text{NO}_x$  acidifient également les sols, les lacs et les rivières. L'ammoniac et les oxydes d'azote agissent sur les écosystèmes par eutrophisation (accumulation excessive de nutriments azotés) et par acidification (transformation dans l'air en acide nitreux qui retourne dans le sol avec les précipitations). L'impact sur la biodiversité est important. Il a été prouvé qu'en Europe atlantique les dépôts d'azote, lorsqu'ils atteignent 30 kg/ha/an, réduisent de 50 % la richesse en espèces des prairies (Stevens *et al.*, 2010). D'après le rapport 2016 de la CPATLD, les mesures utiles prises à ce jour pour réduire les émissions de composés azotés ont été insuffisantes pour assurer des conditions permettant aux écosystèmes de commencer à se remettre de l'eutrophisation ; d'autres réductions sont nécessaires (Maas R., Grennfelt P., 2016).

La pollution azotée dans les Alpes n'est pas souvent abordée de manière spécifique dans la littérature scientifique. Elle peut dépendre de la situation locale dans les zones d'agriculture intensive. Toutefois, une étude approfondie des dépôts d'azote en Suisse entre 1990 et 2010 a été publiée en 2016 (Rihm B. *et al.*, 2016). Elle montre que la charge critique d'azote est dépassée dans la plus grande partie du pays, quoiqu'un lent rétablissement semble être en cours (tableau 7). La figure 9 fournit une carte du dépassement de la charge critique d'azote en Suisse.

Une étude expérimentale a montré que, lorsque les dépôts d'azote prendront fin, le rétablissement des écosystèmes des prairies ne pourra se faire que lentement (Bowman W.D. *et al.*, 2018). Dans cette étude, une seule espèce nitrophile est revenue à son niveau antérieur, neuf ans après l'arrêt du dépôt expérimental. Un tel résultat renforce l'exigence d'améliorer les politiques de lutte contre la pollution atmosphérique due aux  $\text{NO}_x$  et à  $\text{NH}_3$  pour prévenir la perte de biodiversité.

Écosystème	Surface en km <sup>2</sup>	1990	2000	2010
Haut-marais	52	100 %	100 %	98 %
Bas-marais	188	91 %	82 %	76 %
Prairies sèches (TWW) <sup>(a)</sup>	200	81 %	62 %	49 %
Forêt	10 290	99 %	96 %	95 %

**Tableau 7 :** Dépassement des charges critiques d'azote nutritif dans différents écosystèmes protégés en Suisse en 1990, 2000 et 2010 (Rihm B. *et al.*, 2016). (a) TWW : Trockenwiesen und -weiden (prairies et pâturages secs).



**Figure 9 :** Dépassement maximal en 2010, par km<sup>2</sup>, des charges critiques dans les forêts et les écosystèmes (semi-)naturels suisses suite à des dépôts d'azote (Rihm B. *et al.*, 2016).



## 5. ÉTAT DE LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES ALPES

Dans ce chapitre, des données issues de mesures régulières sont utilisées pour donner une image globale de l'état de la qualité de l'air dans la région alpine. La distribution spatiale des stations de surveillance dont disposent les pays de la région alpine est analysée sur base géographique, ainsi qu'en termes de milieu environnant. Les concentrations des polluants au cours des dernières années sont ensuite évaluées par comparaison des statistiques annuelles avec les normes européennes de qualité de l'air et les lignes directrices de l'OMS mentionnées dans les sections 2.1 et 2.4.2 du présent rapport. Dans une optique de plus long terme, l'évolution des concentrations est examinée à travers l'analyse des tendances.

### 5.1 SOURCES DES DONNÉES

Les métadonnées des stations et les statistiques en matière de concentrations concernant l'Allemagne, l'Autriche, la France, l'Italie, la Slovénie et la Suisse ont été extraites du Portail européen consacré à la qualité de l'air (*European Air Quality Portal*), géré par l'AEE, qui rassemble les données officielles sur la qualité de l'air fournies par les États membres ainsi que les autres membres de l'AEE et les pays coopérants.

Les métadonnées des stations pour le Liechtenstein ont été fournies par l'Office de l'environnement de la Principauté du Liechtenstein et les statistiques correspondantes ont été téléchargées à partir du site web Ostluft ([www.ostluft.ch](http://www.ostluft.ch)). Les métadonnées des stations et les statistiques en matière de concentrations concernant Monaco ont été fournies par le gouvernement de la Principauté de Monaco (Département de l'équipement, de l'environnement et de l'urbanisme).

En outre, les données concernant les réseaux suisses cantonaux et municipaux de surveillance

ont été obtenues auprès de l'Office fédéral suisse de l'environnement (OFEV) et les statistiques correspondantes ont été téléchargées depuis le site web de l'OFEV. Sauf indication expresse, seules les stations et les statistiques du réseau national suisse sont représentées.

#### 5.1.1 RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE : VUE D'ENSEMBLE

234 stations de surveillance opérant au cours de la période 2016-2018 ont été identifiées dans la région alpine pour la mesure des polluants suivants :  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ ,  $NO_x$  (dont le  $NO_2$ ),  $SO_2$ ,  $C_6H_6$  (benzène),  $O_3$ , Pb, BaP, Ni, As, CO, Cd. Comme le montre le tableau 8, les deux tiers de ces stations se trouvent en milieu urbain ou suburbain et un tiers en milieu rural.

Type de milieu	Nombre de stations	Pourcentage (%)
Rural (non spécifié)	38	16,2
Rural reculé	11	4,7
Rural régional	19	8,1
Rural périurbain	10	4,3
Suburbain	72	30,8
Urbain	84	35,9

**Tableau 8 :** Répartition, par type de milieu, des 234 stations de surveillance.

La figure 10 illustre leur répartition géographique, ainsi que celle de 39 stations additionnelles appartenant aux réseaux locaux suisses de surveillance et en opération sur la même période. 14 % et 8 % d'entre elles sont situées à des altitudes supérieures à 1 000 m et 1 500 m, respectivement.

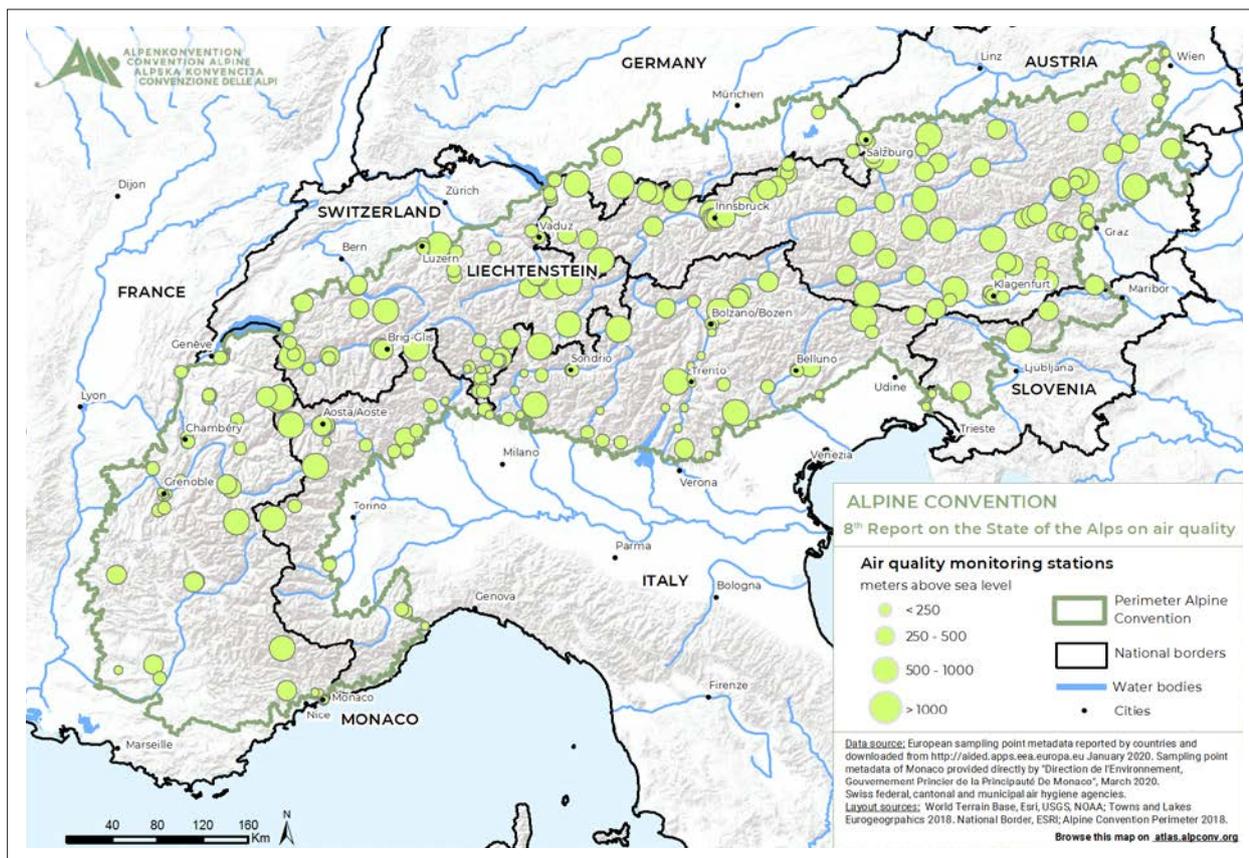


Figure 10 : Répartition géographique des stations de surveillance en opération dans la région alpine sur la période 2016-2018, y compris les stations des réseaux de surveillance cantonaux et communaux suisses pour la même période<sup>30</sup>.

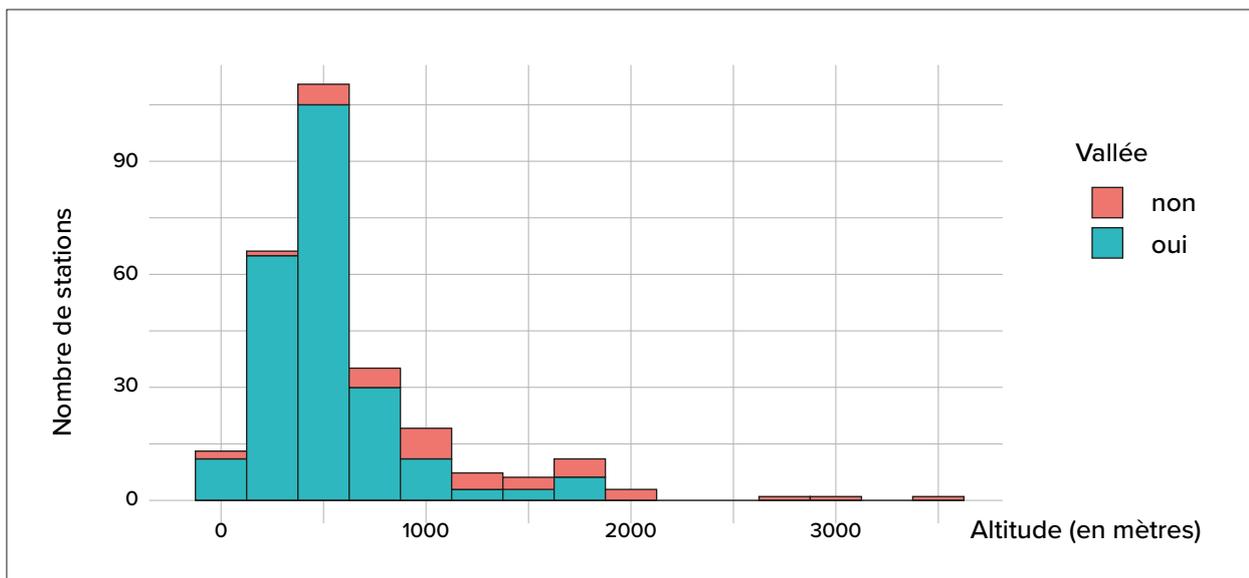


Figure 11 : Histogramme montrant la répartition par altitude des stations de surveillance dans la région alpine, y compris les stations des réseaux de surveillance cantonaux et communaux suisses, en opération sur la période 2016-2018.

30. Les points d'échantillonnage des réseaux de surveillance cantonaux et communaux en Suisse figurent uniquement sur cette carte. Les cartes suivantes se basent sur les données officielles de l'AEE.



Pays	Polluant	Classification des stations						
		Rural	Rural périurbain	Rural régional	Rural reculé	Sub-urbain	Urbain	Total
Autriche	NO <sub>2</sub>	12	1	10	2	31	20	76
	MP <sub>10</sub>	10	0	6	1	22	19	58
	MP <sub>2,5</sub>	1	0	0	1	4	8	14
	O <sub>3</sub>	11	2	12	7	19	7	58
	BaP	4	0	0	0	5	8	17
	Métaux lourds	2	0	1	0	1	1	5
France	NO <sub>2</sub>	0	1	0	1	5	22	29
	MP <sub>10</sub>	0	3	0	1	5	22	31
	MP <sub>2,5</sub>	0	2	0	1	1	9	13
	O <sub>3</sub>	0	2	2	2	5	15	26
	BaP	0	1	0	1	1	4	7
	Métaux lourds	0	0	0	1	0	2	3
Allemagne	NO <sub>2</sub>	0	2	1	1	2	2	8
	MP <sub>10</sub>	0	1	1	1	1	1	5
	MP <sub>2,5</sub>	0	1	0	0	2	1	4
	O <sub>3</sub>	0	1	1	1	2	1	6
	BaP	0	0	0	0	1	0	1
Italie	NO <sub>2</sub>	12	2	0	1	18	29	62
	MP <sub>10</sub>	9	1	0	0	15	27	52
	MP <sub>2,5</sub>	2	1	0	0	7	14	24
	O <sub>3</sub>	15	2	0	1	14	18	50
	BaP	3	0	0	0	9	12	24
	Métaux lourds	2	0	0	0	6	6	14
Liechtenstein	NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	1	0	1
	MP <sub>10</sub>	0	0	0	0	1	0	1
	O <sub>3</sub>	0	0	0	0	1	0	1
Monaco	NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	5	5
	MP <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	2	2
	O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	2	2
	Métaux lourds	0	0	0	0	0	2	2
Slovénie	MP <sub>10</sub>	0	0	0	0	1	0	1
	O <sub>3</sub>	2	0	0	0	0	0	2
	Métaux lourds	0	0	0	0	1	0	1
Suisse	NO <sub>2</sub>	4	0	0	0	2	2	8
	MP <sub>10</sub>	4	0	0	0	2	2	8
	MP <sub>2,5</sub>	2	0	0	0	0	1	3
	O <sub>3</sub>	4	0	0	0	2	1	7
	BaP	1	0	0	0	0	1	2
	Métaux lourds	4	0	0	0	0	1	5

**Tableau 9 :** Stations de mesure de la qualité de l'air dans le périmètre de la Convention alpine.

Par adaptation d'une méthodologie existante<sup>31</sup>, il a été estimé qu'environ 86 % des stations représentées sur la figure 10 sont situées dans des vallées (figure 11).

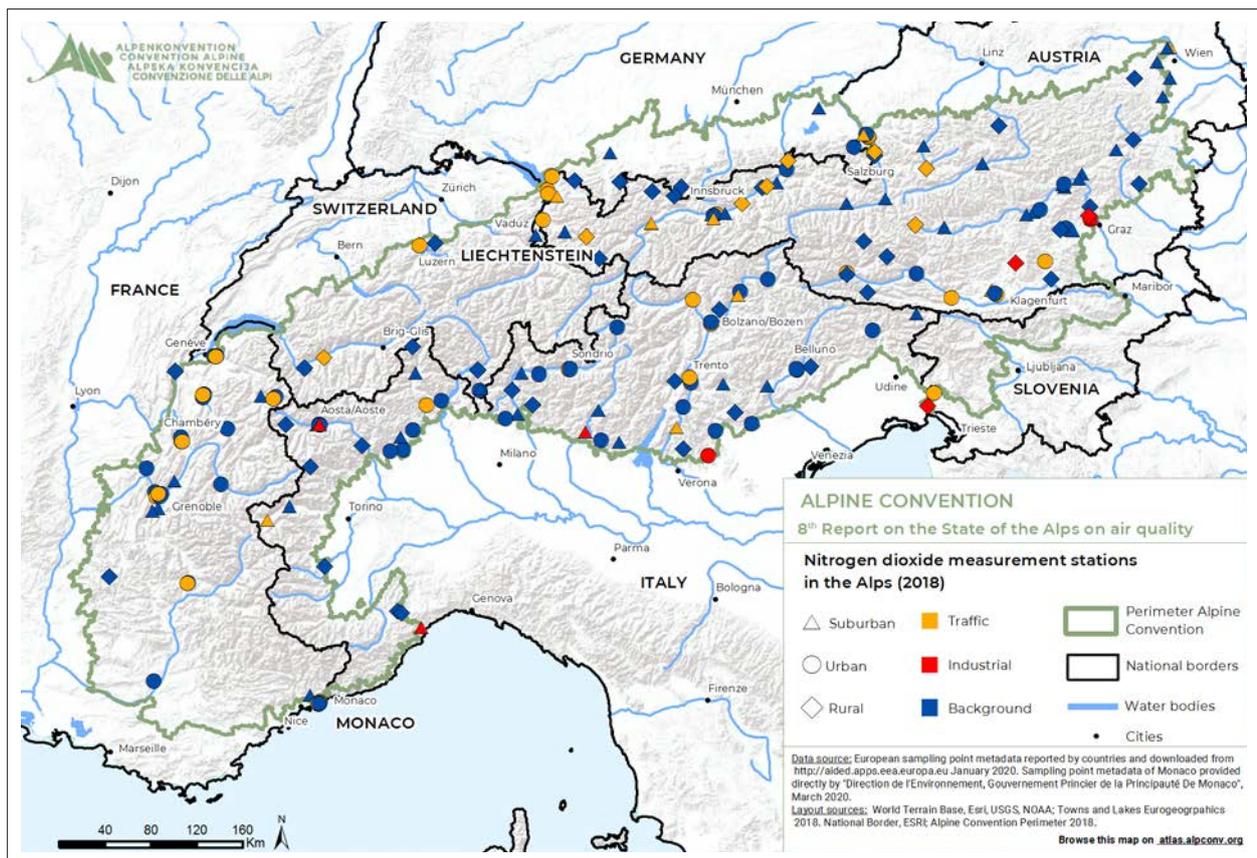
Il est important de savoir que, dans certains pays, des campagnes de mesure mobile et des méthodes d'échantillonnage passif (NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, benzène, toluène, éthylbenzène, xylène) sont mises en œuvre sur base temporaire ou sur le long terme afin de compléter les sites de surveillance permanente et d'obtenir une description plus détaillée de la qualité de l'air. Elles n'ont pas été prises en compte dans cette analyse, qui repose principalement sur les informations disponibles sur le site web de l'AEE.

### 5.1.2 RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE PAR POLLUANT

Dans cette section, la distribution spatiale des stations de surveillance est examinée sur la base des

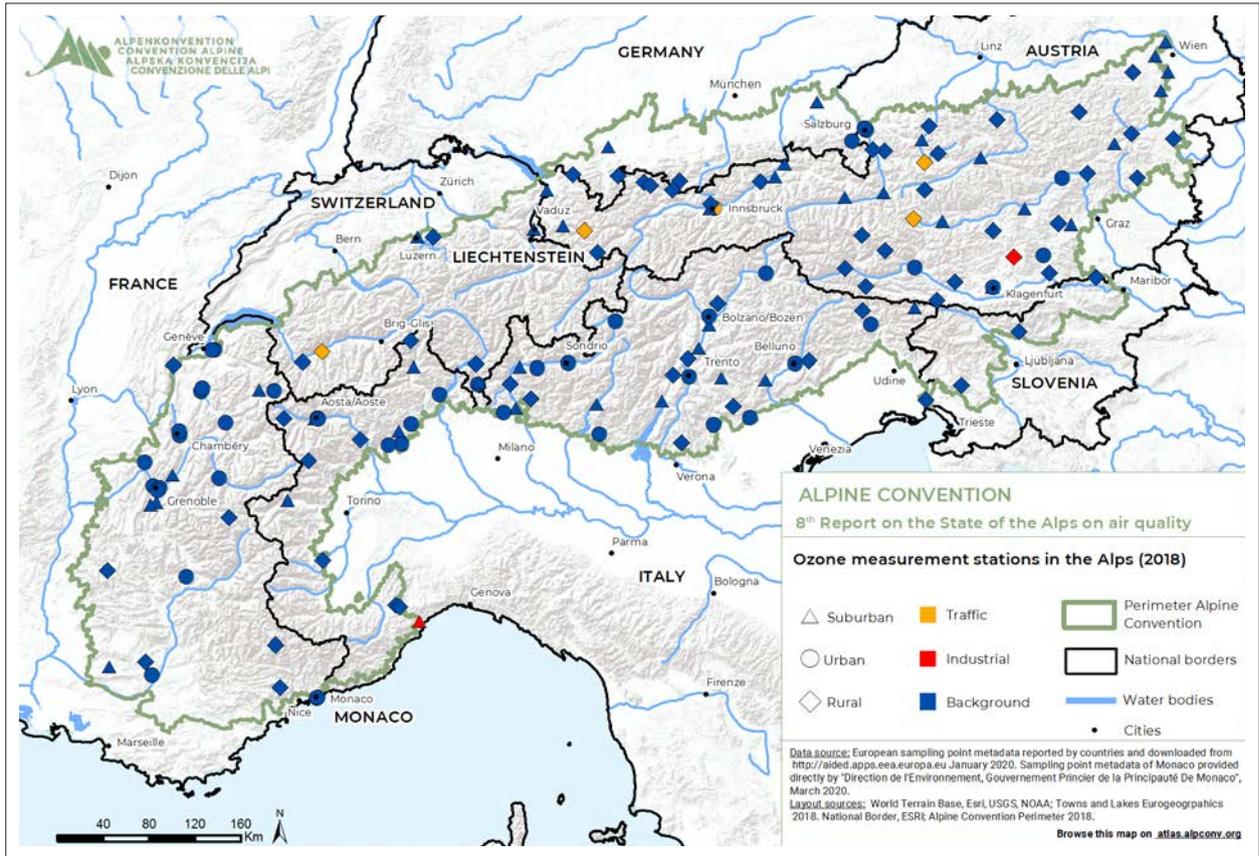
polluants, d'après la classification des stations (tableau 9).

On notera que le type de station, qui caractérise la principale source d'influence, est spécifique à un polluant donné. Le NO<sub>2</sub>, l'O<sub>3</sub> et les MP<sub>10</sub> sont les agents ayant la plus forte densité de points de mesure, comme le montre la figure 12. Ces points sont répartis sur l'ensemble de la région, à l'exception des zones très montagneuses ou moins densément peuplées, et leur nombre reste stable au cours des années examinées (2016 à 2018). Alors que l'ozone est principalement mesuré dans les zones rurales ou (sub)urbaines, la surveillance du NO<sub>2</sub> et des MP<sub>10</sub> cible également des sites axés sur le trafic et, dans une moindre mesure, des sites industriels. Les substances précurseurs de l'ozone visées à la Directive sur la qualité de l'air 2008/50/CE sont mesurées sur un site urbain de fond (Grenoble). La série complète des cartes par polluant et par année (2016, 2017, 2018) est disponible en ligne sur <http://www.atlas.alpconv.org>.



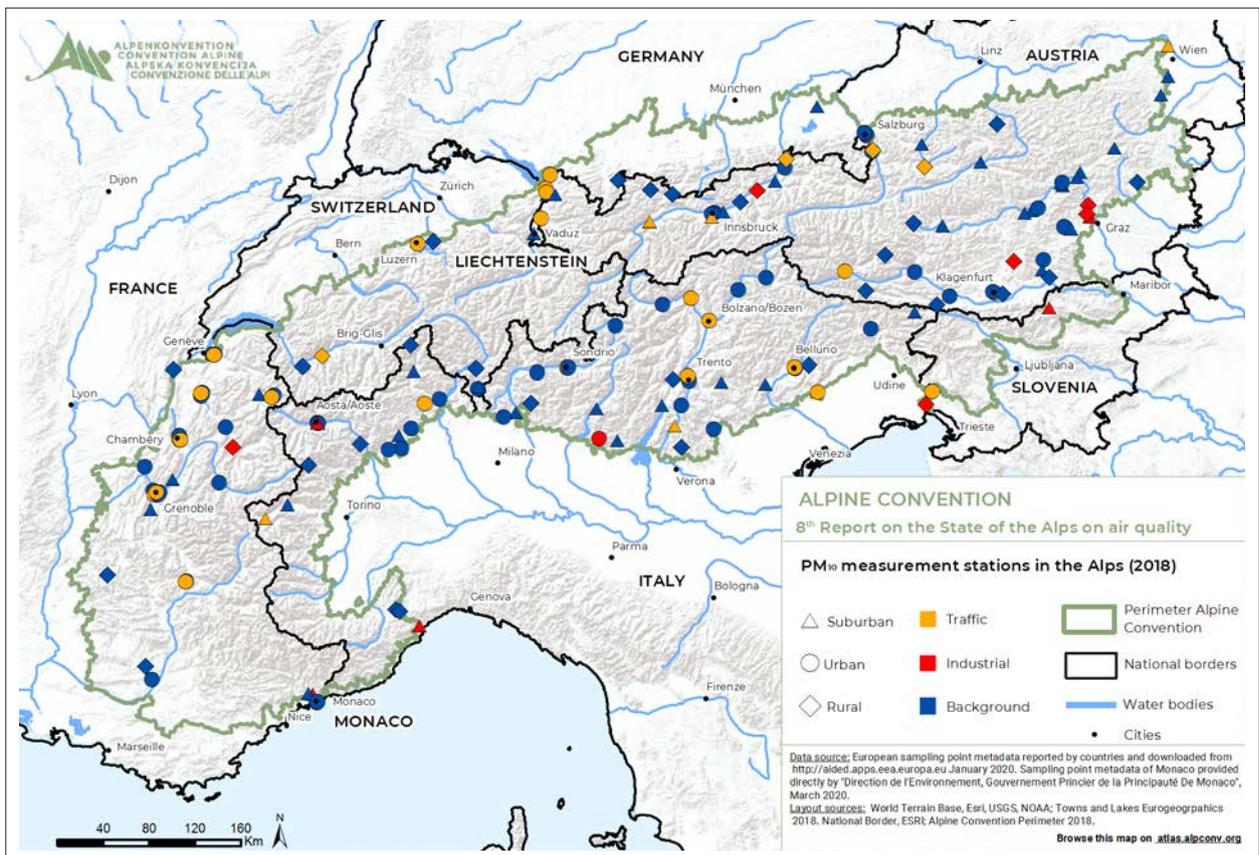
**Figure 12a :** Carte de stations de mesure pour le dioxyde d'azote dans les Alpes.  
Suburban = Suburbain ; Urban = Urbain ; Rural = rural ; Traffic = Trafic ; Industrial = Industriel ; Background = Fond.

31. Pour déterminer quelles sont les stations qui se trouvent dans des vallées, la méthodologie proposée par A. Simcox, D. Morse et G. Hamilton, 2016 (<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=646ebe715800410d9e5c02aa3653546d>) a été adaptée à la situation européenne. Les vallées (zones d'altitude inférieure à celle des zones voisines) ont été obtenues au moyen d'un modèle numérique de terrain (European Digital Elevation Model EU-DEM - version 1.1, résolution de 25 m) par identification de l'altitude moyenne locale dans un rayon donné, soustraction de l'altitude réelle à cette moyenne et sélection des zones où l'altitude réelle était inférieure à la moyenne. Le paysage a été référencé à cinq échelles (cercles de 1, 2, 4, 7 et 11 km de rayon) pour prendre en compte la diversité des formes et des dimensions des vallées. Les zones sélectionnées dans au moins trois échelles ont été désignées comme vallées.



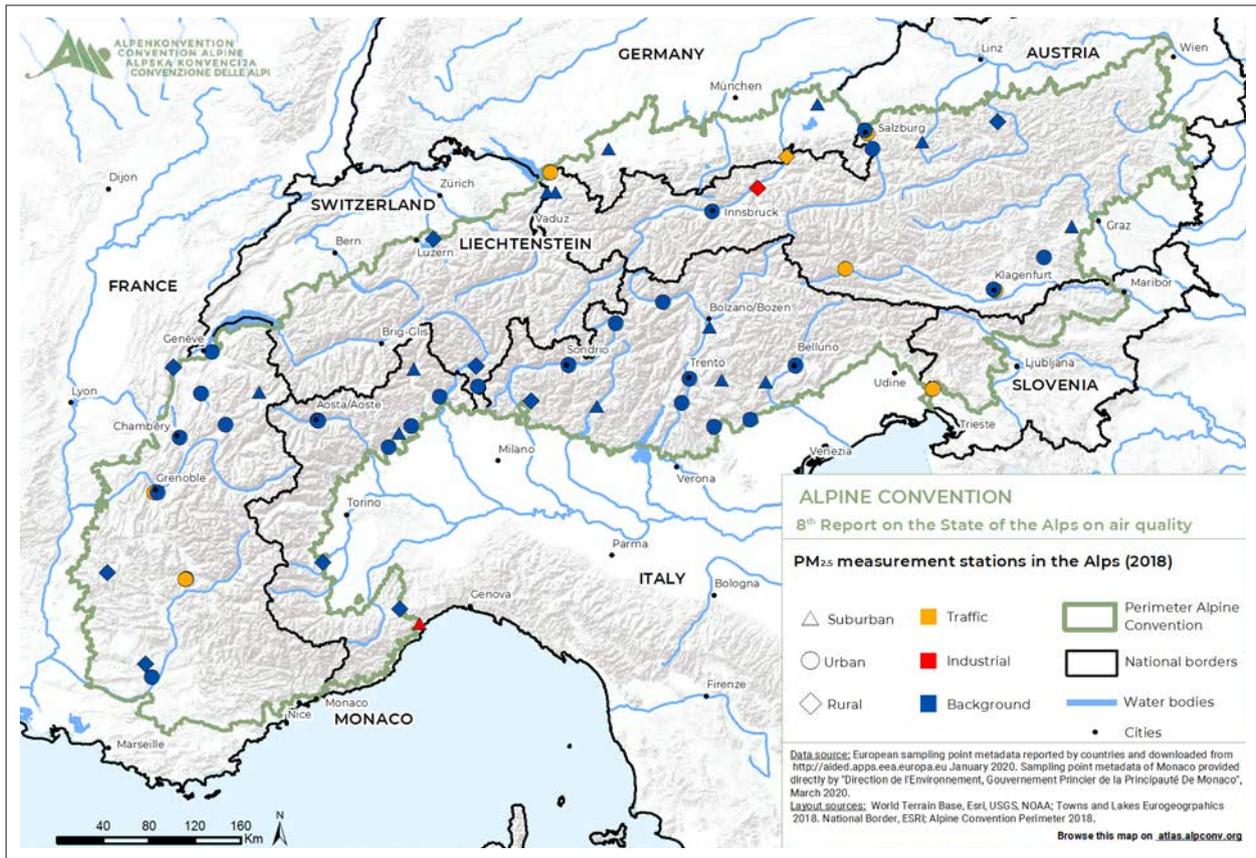
**Figure 12b :** Carte de stations de mesure pour l'ozone dans les Alpes.

Suburban = Suburbain ; Urban = Urbain ; Rural = rural ; Traffic = Trafic ; Industrial = Industriel ; Background = Fond.

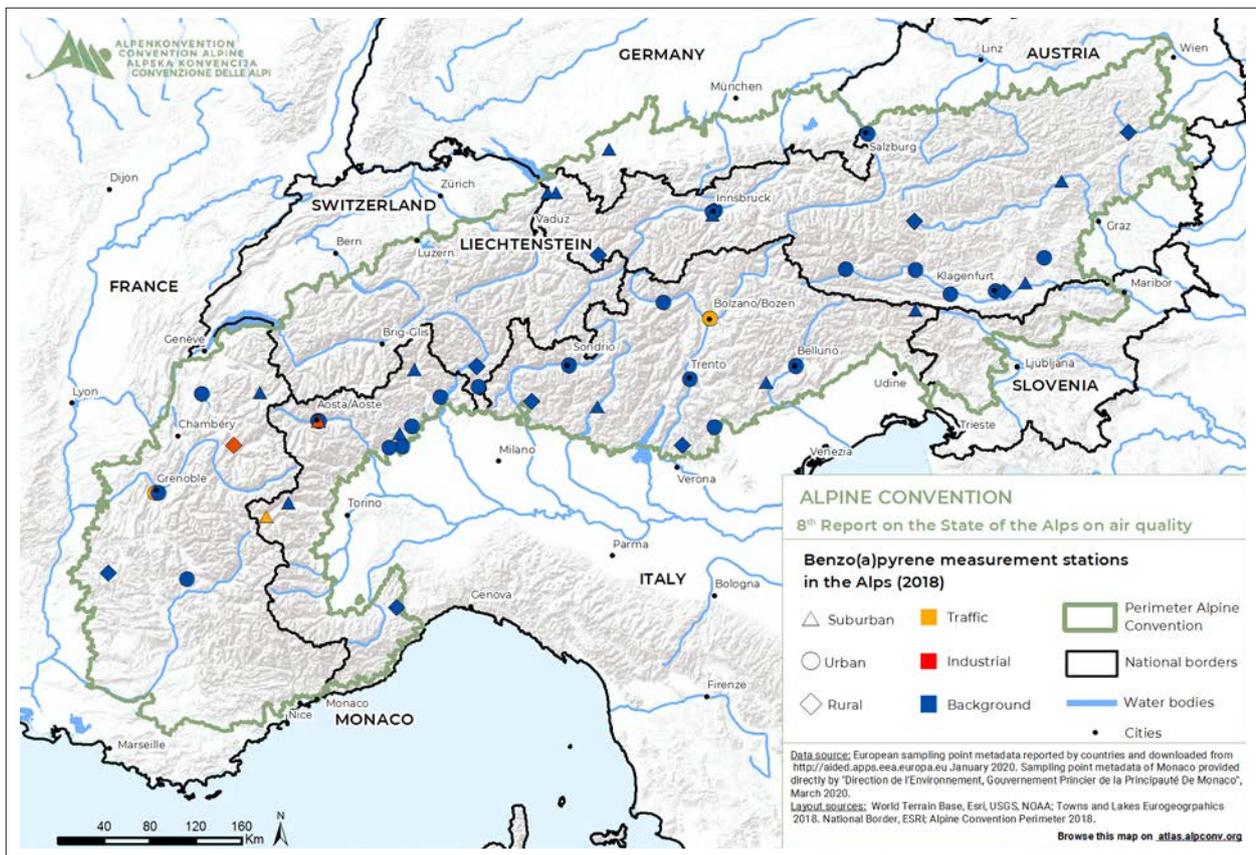


**Figure 12c :** Carte de stations de mesure pour les MP<sub>10</sub> dans les Alpes.

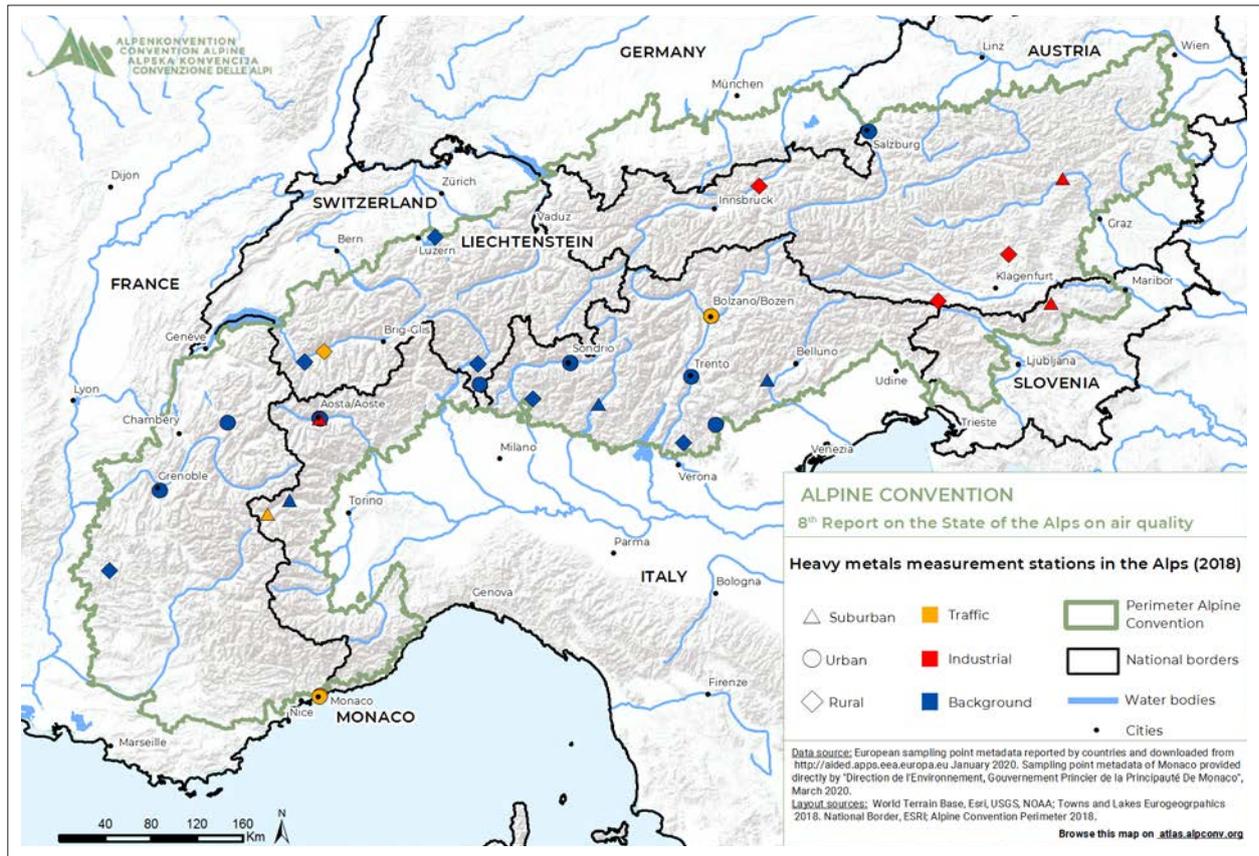
Suburban = Suburbain ; Urban = Urbain ; Rural = rural ; Traffic = Trafic ; Industrial = Industriel ; Background = Fond.



**Figure 12d :** Carte de stations de mesure pour les  $MP_{2.5}$  dans les Alpes.  
Suburban = Suburbain ; Urban = Urbain ; Rural = rural ; Traffic = Trafic ; Industrial = Industriel ; Background = Fond.



**Figure 12e :** Carte de stations de mesure pour le benzo[a]pyrène dans les Alpes.  
Suburban = Suburbain ; Urban = Urbain ; Rural = rural ; Traffic = Trafic ; Industrial = Industriel ; Background = Fond.



**Figure 12f** : Carte de stations de mesure pour les métaux lourds dans les Alpes.

Suburban = Suburbain ; Urban = Urbain ; Rural = rural ; Traffic = Trafic ; Industrial = Industriel ; Background = Fond.

Une surveillance plus éparpillée, mais encore assez étendue, des  $MP_{2,5}$  et du BaP est également effectuée dans toute la région alpine, principalement dans les localisations urbaines ou suburbaines. En outre, des mesures des HAP autres que le BaP sont signalées pour plusieurs sites de surveillance en France et en Italie.

Le monoxyde de carbone et le benzène sont rarement surveillés, ce qui est cohérent avec les faibles concentrations observées pour ces polluants (voir section 5.2.2), qui permettent, au titre des Directives européennes, de mettre en œuvre des méthodes d'évaluation moins strictes (mesures indicatives, modélisation, estimation objective). La situation est presque la même pour le  $SO_2$ , pour lequel, toutefois, un plus grand nombre de stations continuent à fonctionner dans certaines régions (dans les parties autrichiennes et italiennes de la région).

Les métaux lourds entrent également dans la catégorie des polluants ayant de faibles concentrations par rapport aux seuils fixés par l'UE et font l'objet d'une surveillance réduite. Ils sont généralement mesurés dans des sites de fond, sauf en Autriche, où les mesures des métaux lourds s'orientent principalement vers les sites industriels. Une surveillance supplémentaire de tous ces polluants est

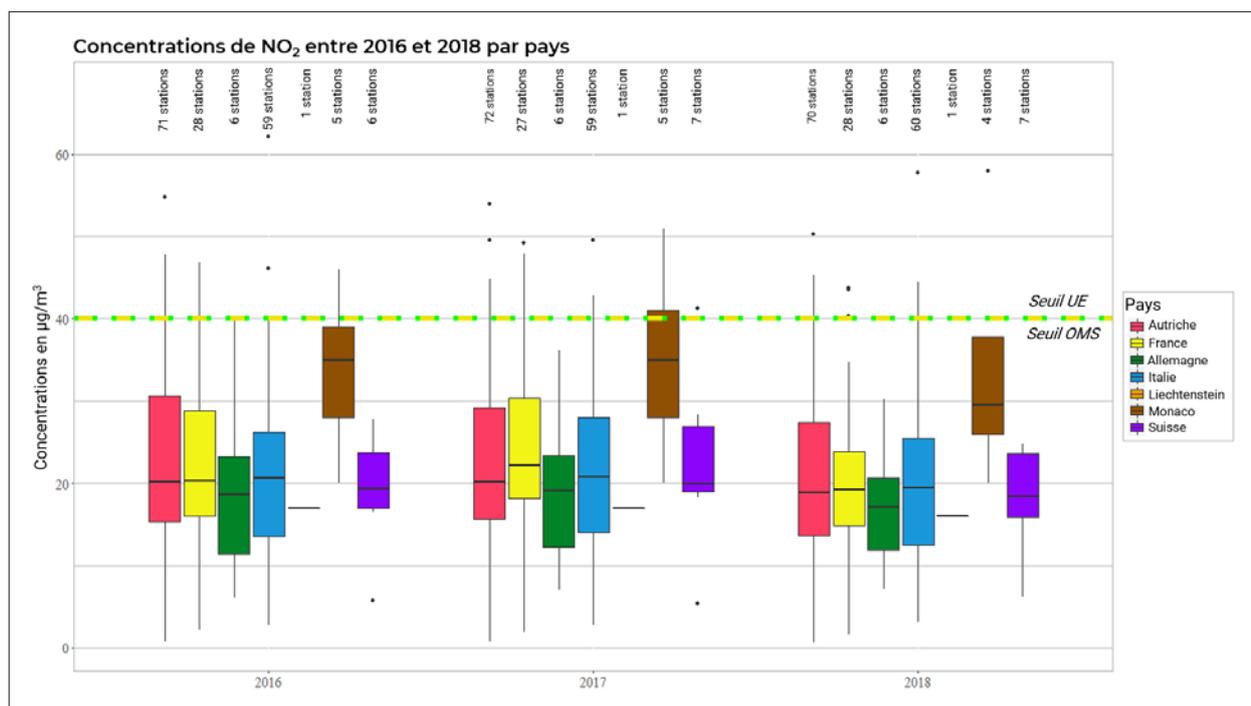
également intégrée sur les réseaux locaux suisses.

D'autres mesures sont effectuées dans des stations de haute altitude, dans le cadre de programmes axés sur la recherche. Ils ne font pas l'objet de ce chapitre et les informations sur cette activité figurent dans la section 6.2.

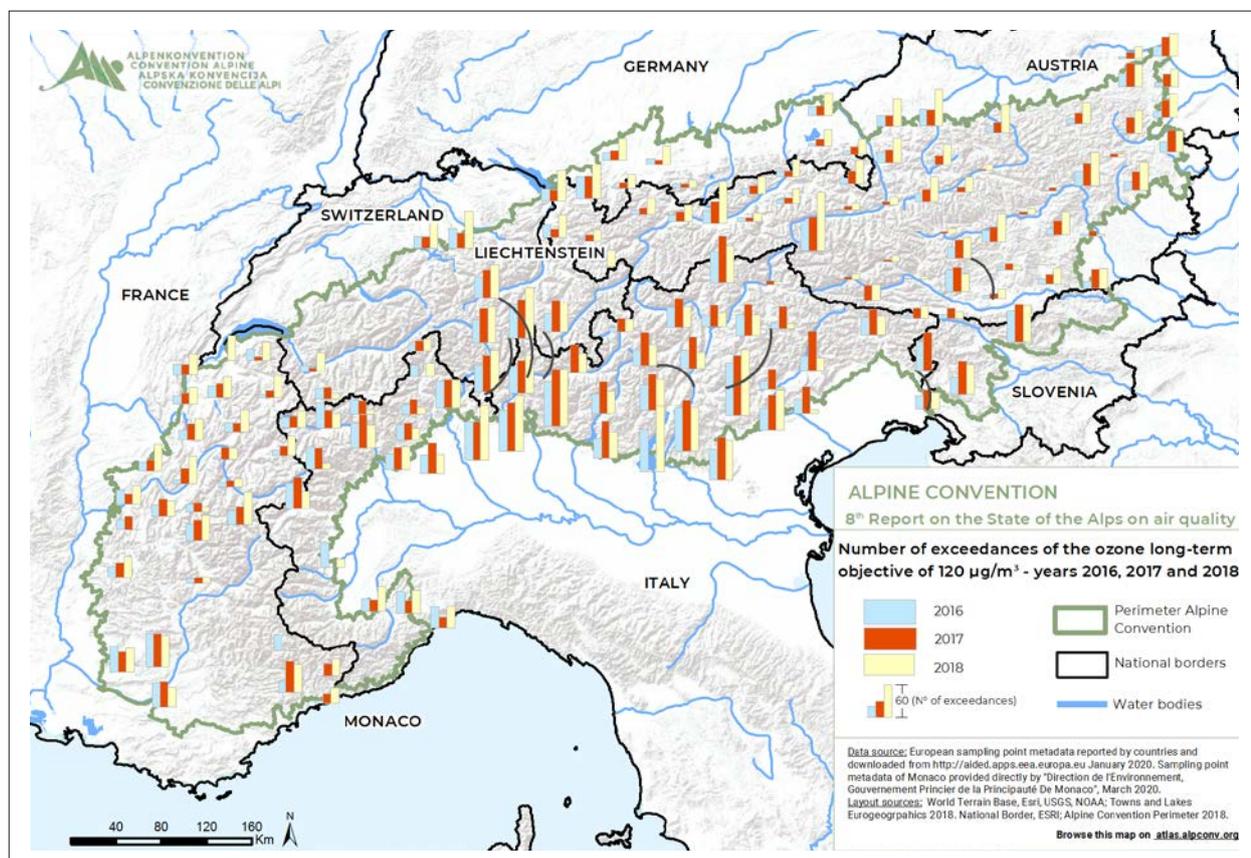
## 5.2 ÉTAT DES CONCENTRATIONS

### 5.2.1 COMPARAISON AVEC LES OBJECTIFS EUROPÉENS EN MATIÈRE D'ENVIRONNEMENT ET LES LIGNES DIRECTRICES DE L'OMS

Cette comparaison se base sur les sources de statistiques mentionnées dans l'introduction du présent chapitre. Les statistiques disponibles auprès des réseaux locaux suisses sont considérées comme des documents supplémentaires permettant de compléter les résultats. L'ensemble complet des graphiques est disponible en ligne ([www.atlas.alpconv.org](https://www.atlas.alpconv.org)). Les concentrations présentées ici sont mises en parallèle avec les limites de la Directive 2008/50/CE, qui est la base régle-



**Figure 13 :** Répartition des concentrations moyennes annuelles de NO<sub>2</sub> en 2016, 2017 et 2018 dans la région alpine. La ligne pointillée jaune et la ligne pointillée verte représentent respectivement la valeur limite annuelle fixée par la Directive UE (2008/50/CE) et celle fixée par les lignes directrices de l’OMS pour la protection de la santé humaine. Le bas et le haut de chaque rectangle coloré représentent le premier et le troisième quartiles, la ligne horizontale à l’intérieur du rectangle représente la médiane et les extrémités des lignes verticales représentent les valeurs les plus basses et les plus élevées, les valeurs aberrantes étant exclues. Les points sont des valeurs isolées qui ne rentrent pas dans la distribution.



**Figure 14 :** Carte de l'évolution du dépassement de l'objectif à long terme pour l'O<sub>3</sub> pour la protection de la santé humaine dans la région alpine.

mentaire dans l'Union européenne (voir chapitre 2.1) et avec les lignes directrices de l'OMS sur la qualité de l'air établies pour protéger la santé humaine (voir chapitre 2.4.2).

### Dioxyde d'azote

La figure 13 représente la distribution des concentrations moyennes annuelles de  $\text{NO}_2$  en 2016, 2017 et 2018. Quelle que soit l'année, tous les dépassements de la valeur limite annuelle de l'UE ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), qui coïncide avec la ligne directrice de l'OMS pour l'année en question, ont été enregistrés sur les sites liés au trafic (soit, respectivement, 12, 14 et 7 dépassements en 2016, 2017 et 2018). Toutes les stations concernées par ces dépassements sont situées dans des vallées où la conjonction des émissions de  $\text{NO}_x$  et des situations d'inversion peut mener à une augmentation des niveaux de concentration  $\text{NO}_2$ , tels que décrit dans le chapitre 3.1.1.

Des dépassements du seuil de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (ligne directrice de l'OMS sur base horaire) ont été occasionnellement enregistrés dans quelques stations (respectivement 5, 4 et 3 stations en 2016, 2017 et 2018). La norme de l'UE ( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , à ne pas dépasser plus de 18 fois par an) n'a été dépassée qu'une seule fois, en 2016, sur un site français de trafic.

### Ozone

La pollution à l'ozone affecte largement la région alpine. La figure 14 représente le nombre annuel de dépassements, par station, de l'objectif de qualité à long terme de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , pour les années 2016, 2017 et 2018.

La valeur cible pour la protection de la santé humaine est dépassée dans la plupart des sites et sur la plus grande partie du territoire, l'Allemagne et Monaco étant toutefois des exceptions. On peut observer une variabilité interannuelle dans ces zones, l'année 2018 affichant un nombre plus élevé de dépassements que les années précédentes.

L'objectif à long terme pour la protection de la santé humaine ( $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et la ligne directrice de l'OMS ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sont dépassés presque partout. En ce qui concerne la valeur cible et l'objectif à long terme pour la protection de la végétation, ils sont dépassés dans de nombreux sites ruraux et sites suburbains de fond dans l'ensemble de la région.

### Matières particulaires – $\text{MP}_{10}$

La figure 15 représente la distribution des concentrations moyennes annuelles de  $\text{MP}_{10}$  en 2016, 2017 et 2018. Malgré une variabilité spatiale entre les régions, elles sont toutes significativement en-des-

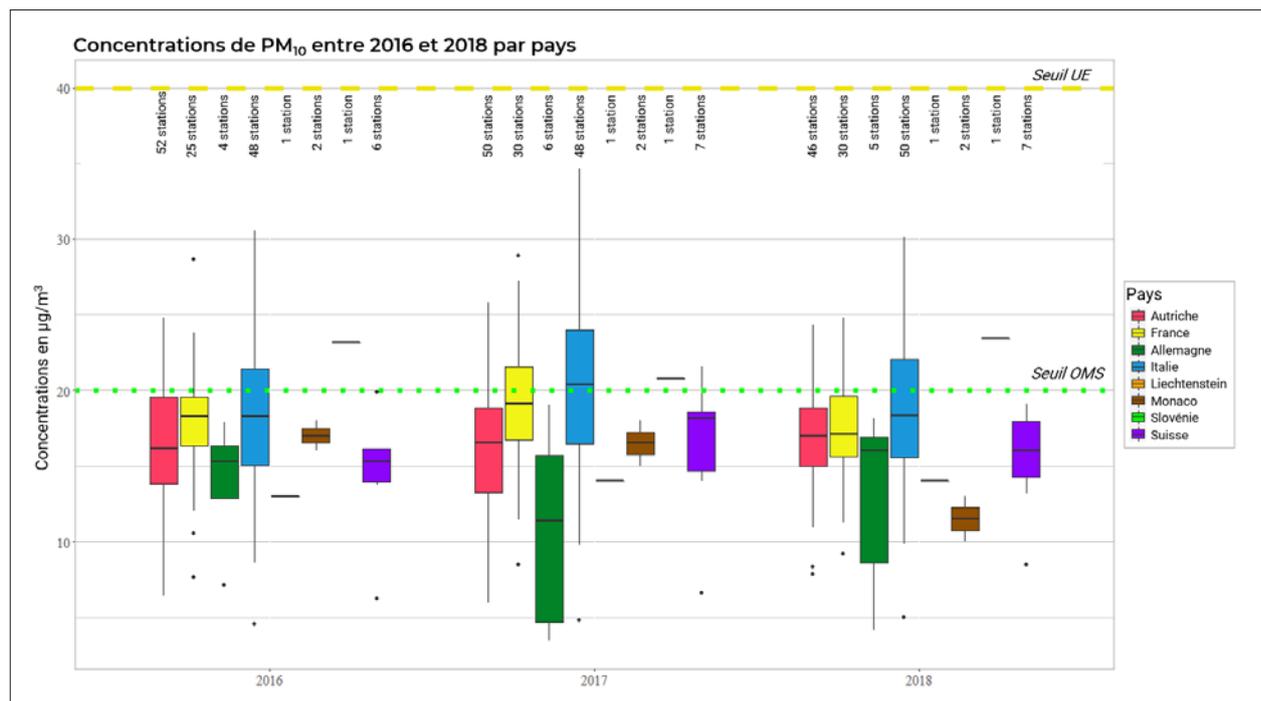
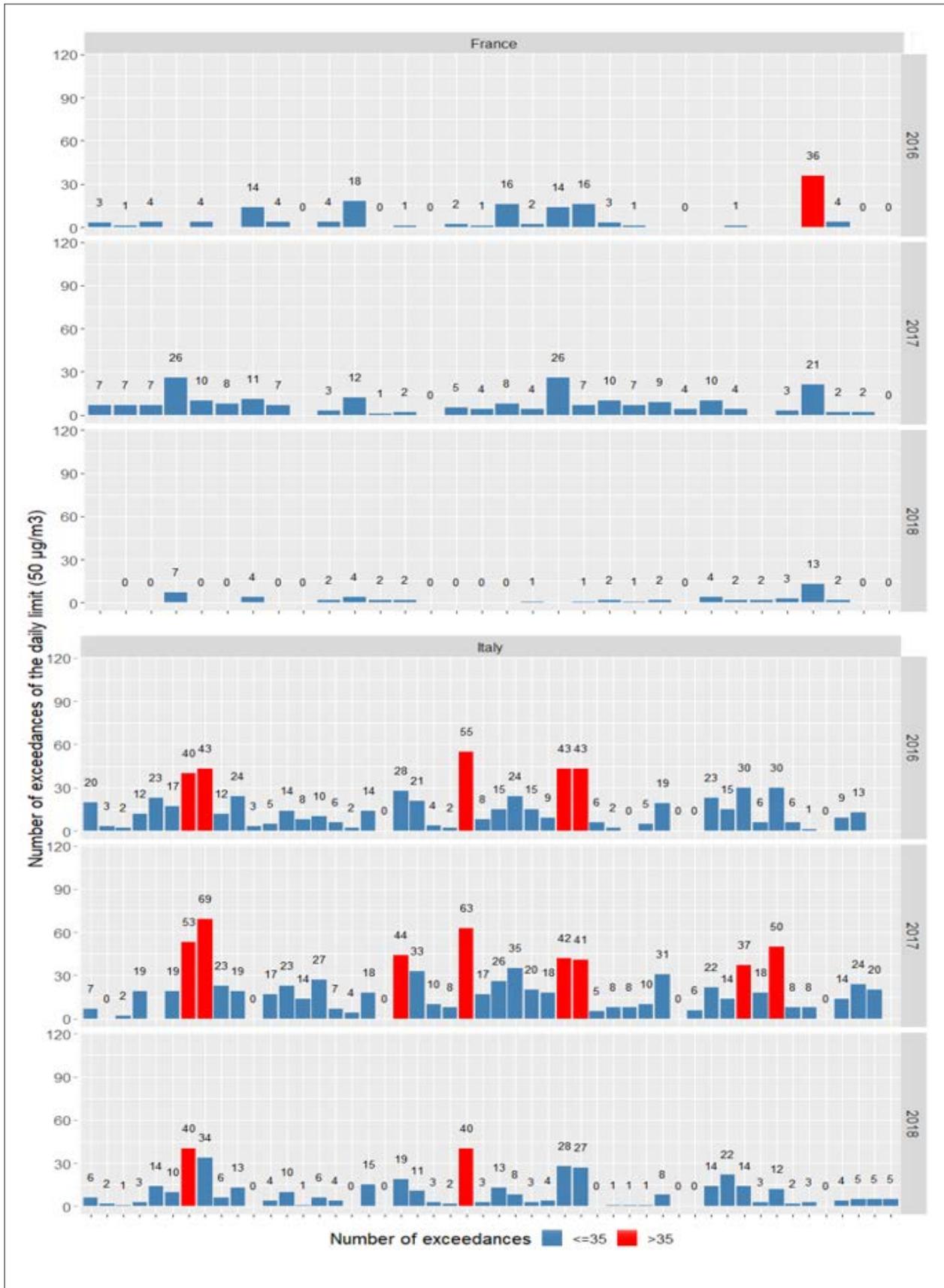
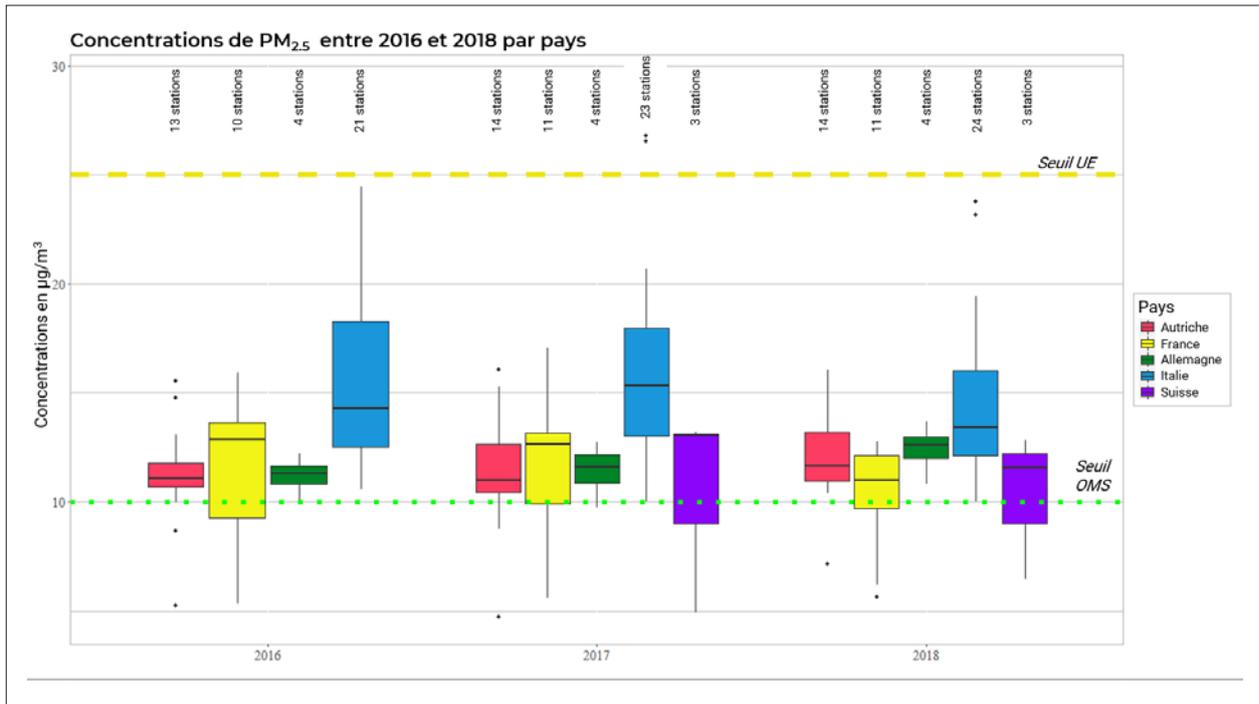


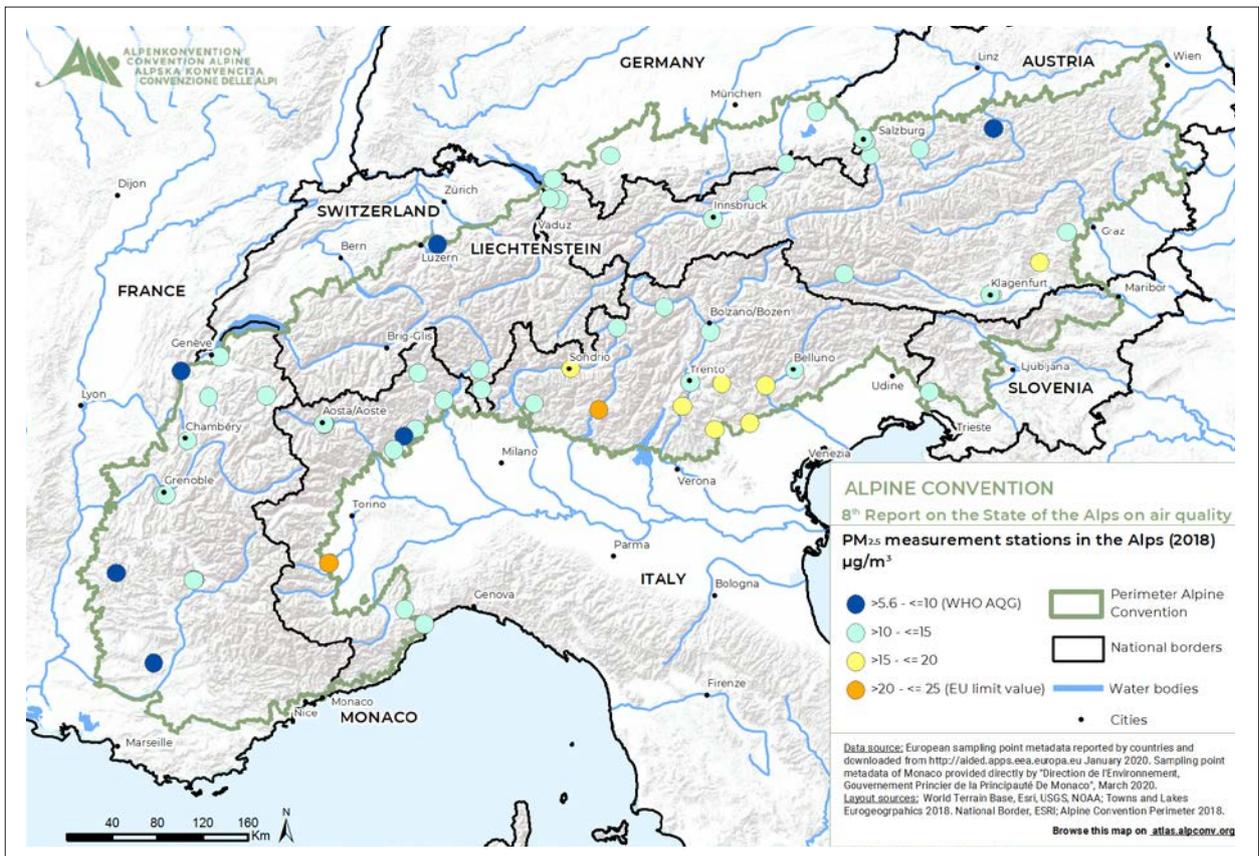
Figure 15 : Distribution des concentrations moyennes annuelles de  $\text{MP}_{10}$  en 2016, 2017 et 2018 dans la région alpine.



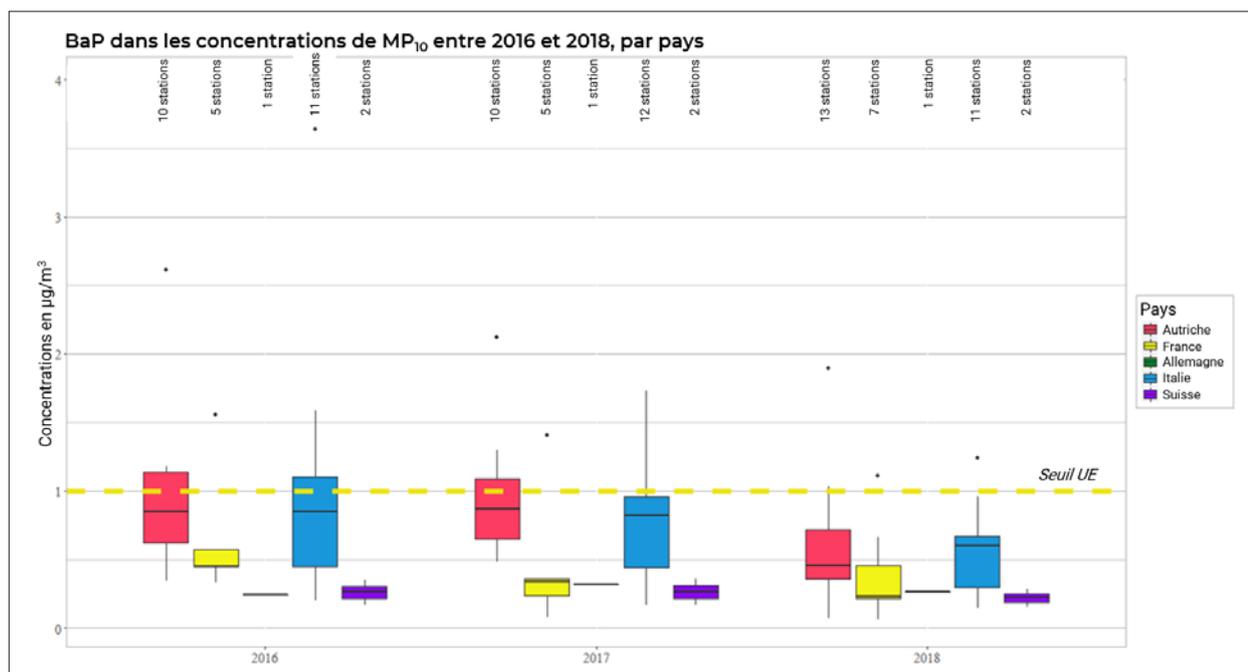
**Figure 16 :** Dépassement de la valeur limite journalière de  $MP_{10}$  pour la protection de la santé humaine en 2016, 2017 et 2018 dans les zones françaises et italiennes de la région alpine. En-dehors de ces pays, toutes les autres zones de la région alpine ont moins de 35 jours de dépassement.



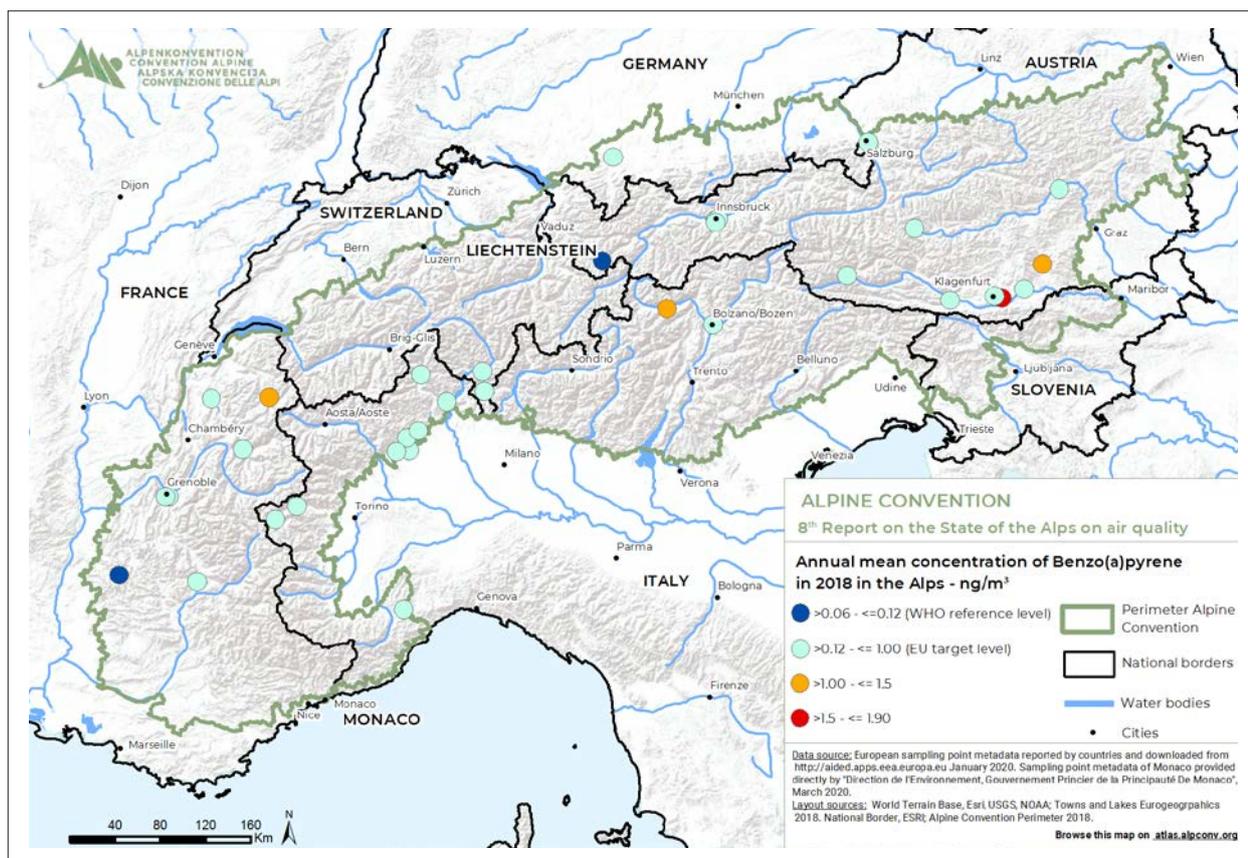
**Figure 17 :** Distribution des concentrations moyennes annuelles de MP<sub>2.5</sub> en 2016, 2017 et 2018 dans la région alpine. La ligne pointillée jaune et la ligne pointillée verte représentent respectivement la valeur limite annuelle fixée par la Directive UE (2008/50/CE) et celle fixée par les lignes directrices de l’OMS pour la protection de la santé humaine.



**Figure 18 :** Carte de la concentration moyenne annuelle de MP<sub>2.5</sub> en 2018 dans les Alpes.



**Figure 19 :** Distribution des concentrations moyennes annuelles de BaP dans les  $MP_{10}$  en 2016, 2017 et 2018 dans la région alpine. La ligne pointillée jaune représente la valeur limite annuelle fixée par la Directive UE (2008/50/CE).



**Figure 20 :** Carte de la concentration moyenne annuelle de BaP en 2018 dans la région alpine. Les dépassements des valeurs cibles de l'UE sont indiqués en orange et rouge.<sup>32</sup>

32. Conformément à la Directive 2004/107/CE, pour les valeurs  $>1$  et  $<1,5$ , la moyenne annuelle est arrondie à  $1 \text{ ng/m}^3$  et n'est de ce fait pas considérée comme un dépassement selon les règles de l'UE pour les rapports ; pour les valeurs  $\geq 1,5$ , la moyenne annuelle est arrondie à  $2 \text{ ng/m}^3$ .



sous de la valeur limite annuelle moyenne prévue par la Directive UE 2008/50/CE ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Toutefois, la valeur fixée par les AQG de l'OMS ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) est dépassée chaque année dans environ un quart des stations.

La figure 16 représente le nombre annuel de dépassements du seuil journalier de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  par station et indique, en rouge, les stations pour lesquelles ce nombre est strictement supérieur à 35 fois par an, la valeur limite européenne. Ces stations sont peu nombreuses (en 2018, deux d'entre elles seulement ont dépassé la limite de l'UE) et la quasi-totalité d'entre elles se trouvent en Italie, dans des sites (sub)urbains ou industriels. Cependant, près de la moitié des stations (75 sur 162) ont dépassé la ligne directrice, plus exigeante, de l'OMS ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , pas plus de 3 jours par an).

### **Matières particulaires – $\text{MP}_{2,5}$**

De même que pour les concentrations de  $\text{MP}_{10}$ , on relève une variabilité spatiale également pour les concentrations moyennes annuelles de  $\text{MP}_{2,5}$  dans la région alpine. La figure 17 montre que toutes se trouvent significativement en-dessous de la valeur limite annuelle ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Il n'y a pas de dépassement des valeurs limites légales de la Directive UE 2008/50/CE dans les Alpes. Toutefois, en termes de santé humaine, la valeur visée à l'AQG de l'OMS ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) est dépassée dans la majorité des stations et seulement quelques sites de fond (entre 7 et 10 selon l'année), principalement ruraux ou suburbains, y sont conformes.

Les résultats de la surveillance de la qualité de l'air dans les Alpes démontrent clairement que la pollution aux  $\text{MP}_{2,5}$  est un enjeu majeur dans tout le périmètre de la Convention alpine. Bien que le nombre de stations dépassant la valeur limite de l'UE ait diminué, le dépassement des valeurs AQG de l'OMS est très répandu, comme le montre la carte de la figure 18.

### **Benzo[a]Pyrène**

Les niveaux de concentration sont conformes à la valeur cible ( $1 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) dans la majorité des sites et l'on peut observer une diminution globale de la concentration en 2018 (figure 19). Toutefois, des valeurs moyennes annuelles supérieures à  $1 \text{ ng}/\text{m}^3$  ont été observées dans certaines stations de fond urbaines ou suburbaines d'Autriche et d'Italie, avec

des dépassements enregistrés, respectivement, dans 5, 10 et 1 stations en 2016, 2017 et 2018, comme le montre la carte de la figure 20.

### **Autres polluants**

Pour le  $\text{SO}_2$ , le benzène, le CO et les métaux lourds observés, les niveaux de concentration observés sont faibles et ne dépassent pas les valeurs limites européennes. Ce n'est que pour le  $\text{SO}_2$  que la ligne directrice journalière, plus protectrice, de l'OMS ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) est parfois dépassée.

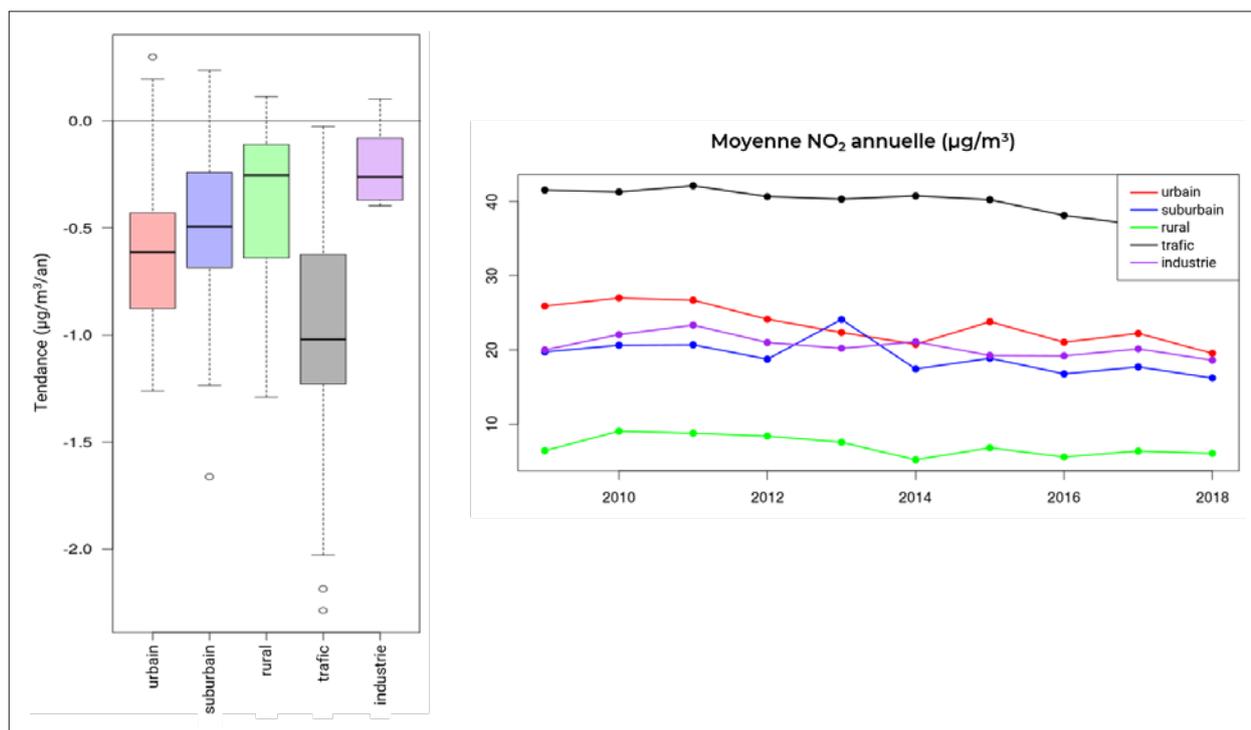
### **5.2.2 COMPARAISON AVEC LES SEUILS NATIONAUX**

Il a été expliqué, au chapitre 2.2, que l'Autriche, le Liechtenstein et la Suisse ont fixé des limites nationales de pollution de l'air inférieures aux limites de l'UE pour le  $\text{NO}_2$ , les  $\text{MP}_{10}$ , les  $\text{MP}_{2,5}$  (et, uniquement pour l'Autriche, le BaP) (voir tableau 2 pour une vue d'ensemble). La comparaison de ces limites nationales avec les données observées révèle les faits suivants.

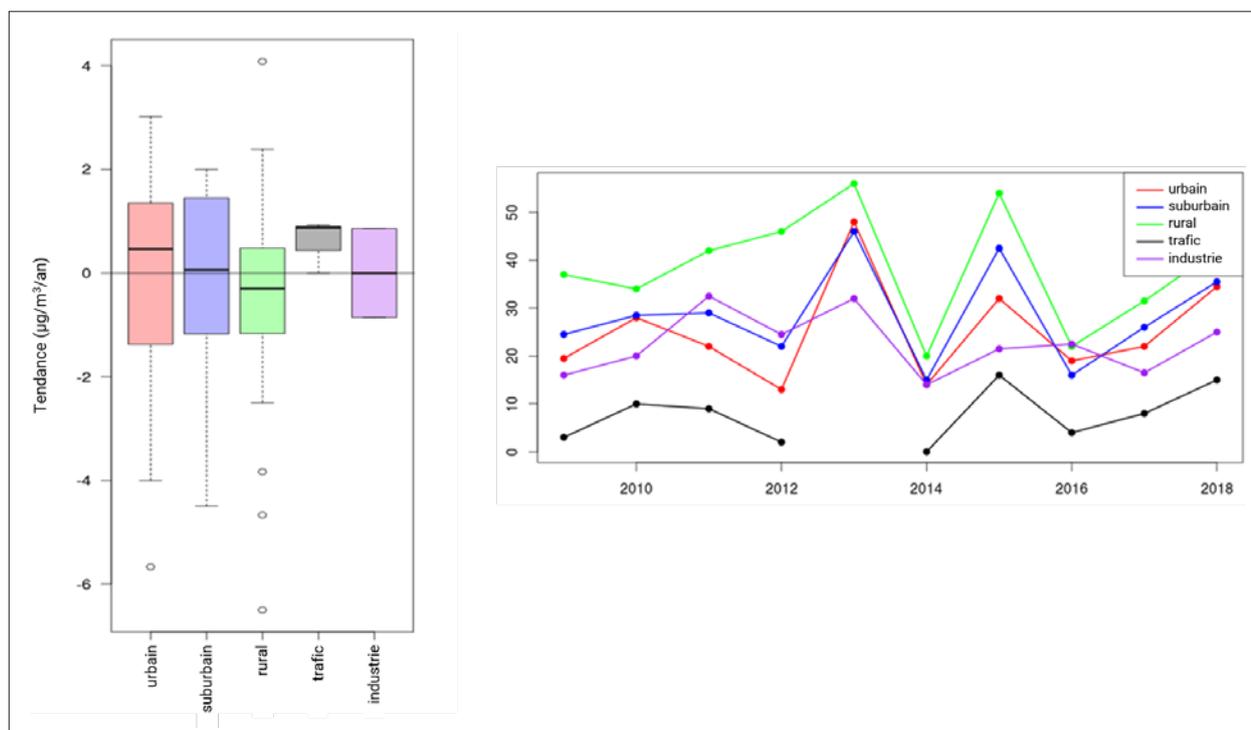
Tout d'abord, les concentrations de  $\text{NO}_2$  dans les Alpes sont assez similaires dans tous les pays alpins et tous les pays de la Convention alpine répondent aux limites légales nationales les plus protectrices, à l'exception du site urbain de Monaco. Aucune différence n'est démontrée entre les pays dont les limites sont plus strictes et les autres.

En revanche, les concentrations de  $\text{MP}_{10}$  montrent des valeurs plus diversifiées. En France et, au moins en 2017, en Italie, plusieurs stations ont montré un dépassement de la valeur, plus protectrice, visées dans les AQG de l'OMS. Au vu de la figure 7, et compte tenu des conclusions de la section 3.2, cela pourrait être dû, du moins à Grenoble et à Chamonix, à la combustion de biomasse, au trafic et à l'agriculture, en association avec des conditions de dispersion défavorables.

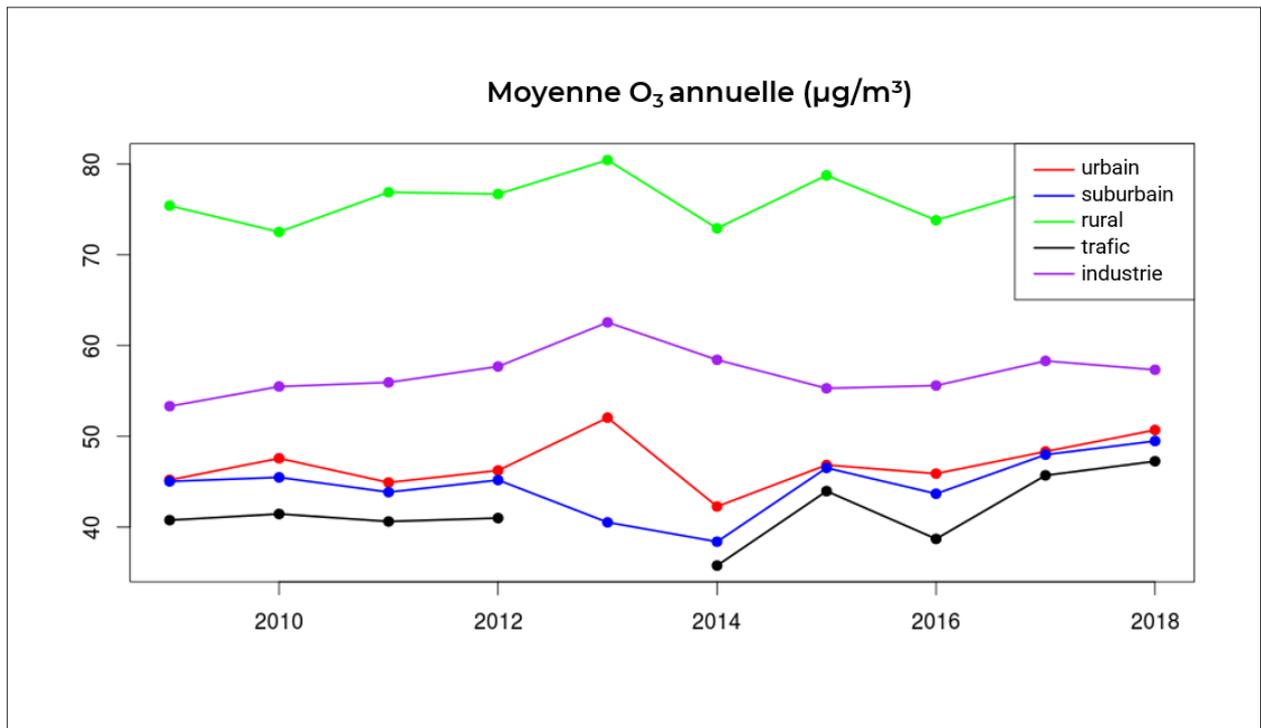
Enfin, et comme précédemment indiqué, la situation pour les  $\text{MP}_{2,5}$  est différente. Tous les niveaux de pollution mesurés dans la zone de la Convention alpine sont dans la limite de l'UE, mais dépassent en même temps les limites nationales de l'Autriche, du Liechtenstein et de la Suisse. La Suisse semble être un peu moins polluée : cela pourrait être lié au fait que, depuis toujours, les limites y sont plus drastiques et que le pays possède donc une stratégie de limitation des émissions.



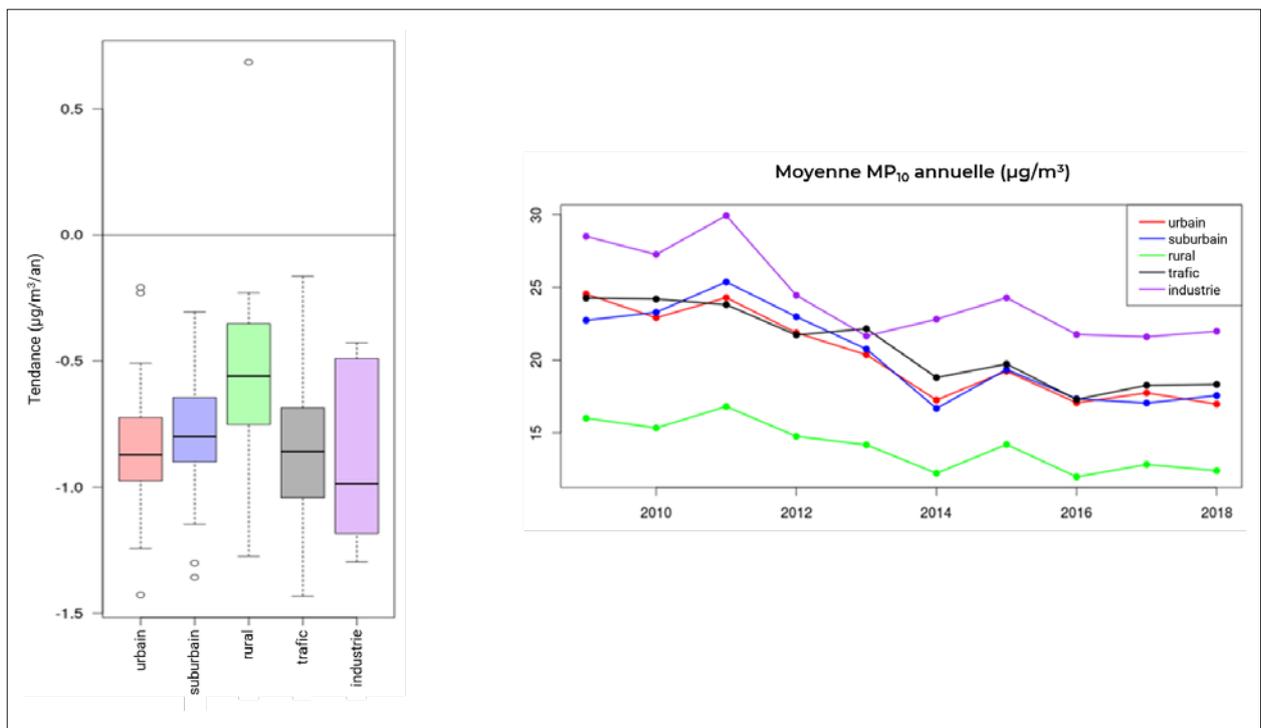
**Figure 21 :** Variation des concentrations moyennes annuelles, en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , du  $\text{NO}_2$  dans le périmètre de la Convention alpine, de 2009 à 2018. Graphique de gauche : distribution de la pente de la tendance par classification des stations. Graphique de droite : Evolution de la moyenne annuelle du  $\text{NO}_2$ , en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , par classification des stations, entre 2009 et 2018. Les stations qualifiées comme zones rurales, suburbaines et urbaines sont des stations de fond.



**Figure 22 :** Variation du nombre de jours où la concentration d'ozone a dépassé la limite journalière moyenne maximale sur 8h de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pendant plus de 8h dans le périmètre de la Convention alpine, de 2009 à 2018. Graphique de gauche : distribution de la pente de la tendance par classification des stations. Graphique de droite : évolution du nombre de jours par classification des stations entre 2009 et 2018. Les stations qualifiées comme zones rurales, suburbaines et urbaines sont des stations de fond.



**Figure 23 :** Évolution des concentrations moyennes annuelles d'O<sub>3</sub> par classification des stations entre 2009 et 2018. Les stations qualifiées de zones rurales, suburbaines et urbaines sont des stations de fond.



**Figure 24 :** Variation des concentrations moyennes annuelles de MP<sub>10</sub> en µg/m<sup>3</sup>, dans le périmètre de la Convention alpine, de 2009 à 2018. Graphique de gauche : distribution de la pente de la tendance par classification des stations. Graphique de droite : évolution de la moyenne annuelle du MP<sub>10</sub> en µg/m<sup>3</sup> par classification des stations entre 2009 et 2018. Les stations qualifiées comme zones rurales, suburbaines et urbaines sont des stations de fond.

### 5.3 ANALYSE DES TENDANCES, CORRÉLATION AVEC LES STRATÉGIES D'ATTÉNUATION

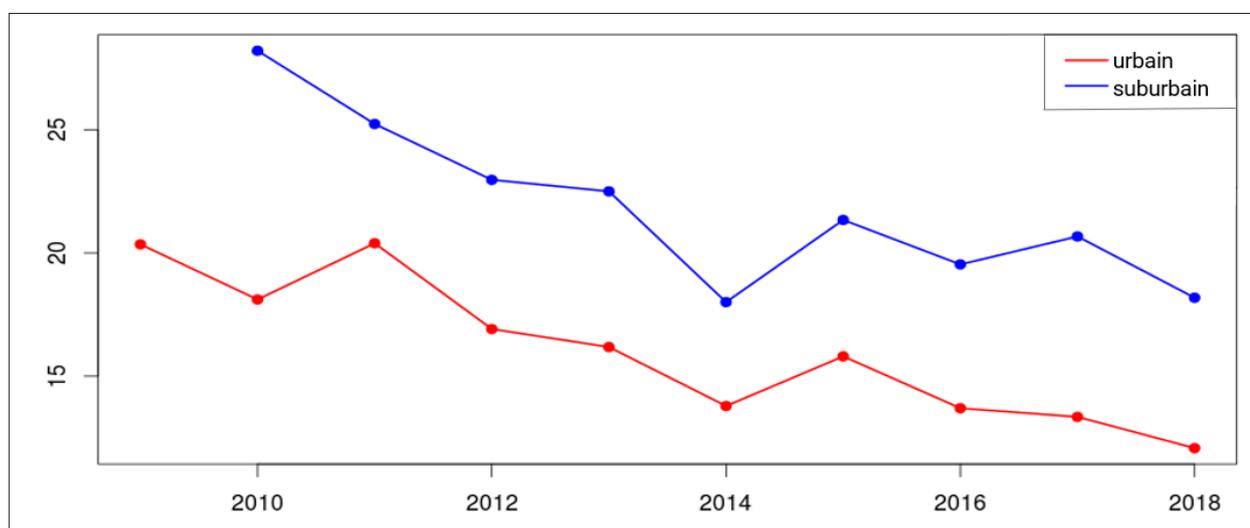
Dans cette section, les données des années 2009 à 2018 ont été analysées pour déterminer la tendance de la pollution atmosphérique dans les Alpes. La pente des tendances et sa signification ont été estimées à l'aide des tests statistiques de l'estimateur de pente de Mann-Kendall et Sen. Pour le  $\text{NO}_2$ , l' $\text{O}_3$ , les  $\text{MP}_{10}$  et les  $\text{MP}_{2,5}$ , les stations ont été sélectionnées selon les critères d'exhaustivité des données établis dans les études précédentes. Les résultats par site de surveillance ont ensuite été agrégés

suivant la classification des stations. Pour le BaP, l'analyse a été effectuée par station, car elle se basait sur un ensemble réduit de données.

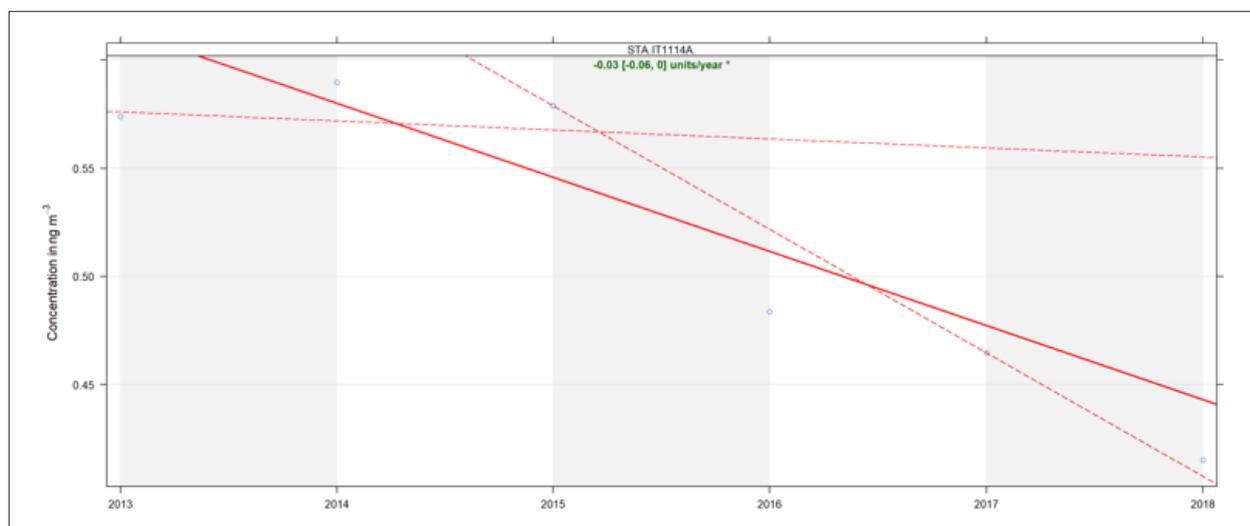
La plupart des tendances sont à la baisse, ce qui indique une amélioration de la qualité de l'air au cours de la dernière décennie, sauf pour l'ozone. Une évolution similaire est observée en moyenne dans toute l'Europe.

#### 5.3.1 $\text{NO}_2$

Les graphiques de la figure 21 montrent que la tendance est à une lente amélioration de la qualité de



**Figure 25 :** Évolution de la moyenne annuelle de  $\text{MP}_{2,5}$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , dans les stations de fond urbaines et suburbaines dans le périmètre de la Convention alpine, de 2009 à 2018.



**Figure 26 :** Tendence récente du BaP à une station de surveillance italienne dans les Alpes. La ligne rouge continue montre l'estimation de tendance et les lignes rouges pointillées montrent les intervalles de confiance à 95 % pour la tendance. La tendance globale est indiquée en haut à gauche comme  $-0,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$  par an et l'intervalle de confiance à 95 % est de  $-0,06-0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  par an. Le symbole \* indique que la tendance est significative au niveau 0,05.



l'air en ce qui concerne le  $\text{NO}_2$ , dont la valeur est plus particulièrement en baisse lorsqu'elle est mesurée aux stations de trafic.

### 5.3.2 OZONE

Les données disponibles dans les stations des Alpes ne révèlent aucune tendance nette quant aux concentrations d'ozone. Pour la plupart des sites, la tendance n'est pas significative. De fortes variations interannuelles sont observées, comme on peut le voir sur la figure 22. Elles sont très probablement liées à la météorologie, la formation d' $\text{O}_3$  à partir de ses précurseurs étant catalysée par la lumière solaire.

### 5.3.3 $\text{MP}_{10}$

La tendance des  $\text{MP}_{10}$  montre que leur concentration a fortement diminué de 2009 à 2014, mais semble s'être stabilisée entre 2014 et 2018. La tendance de la moyenne annuelle sur la période 2009-2018 est significative pour la majorité des sites. Il n'y a pas de différence de situation entre les stations rurales et urbaines ou dans les stations représentatives de l'industrie ou du trafic (figure 24).

### 5.3.4 $\text{MP}_{2,5}$

Les stations de mesure des  $\text{MP}_{2,5}$  se trouvent uniquement en zone urbaine et suburbaine. Toutefois, la tendance nette observée dans la figure 25 est une diminution des concentrations de  $\text{MP}_{2,5}$  dans les stations alpines.

### 5.3.5 BaP

Les tendances n'ont pu être évaluées que pour 10 stations (1 en Allemagne, 3 en Autriche et 6 en Italie), les autres ne disposant pas de données historiques suffisantes pour évaluer une tendance. Celle-ci est généralement à la baisse, mais non significative dans la plupart des cas, sauf pour une station, en Italie, où elle est significativement négative (figure 26).

L'analyse des tendances a été focalisée sur les polluants affichant des dépassements des limites ou valeurs cibles européennes et des lignes directrices de l'OMS. En ligne avec ce qui a été observé en Europe, l'analyse réalisée sur la période 2009-2018 montre une amélioration globale de la qualité de l'air pour plusieurs polluants. Comme l'illustrent les graphiques, les changements interannuels de concentration varient au fil du temps. Toutefois, au cours de la décennie considérée, le taux moyen de variation des concentrations moyennes annuelles est négatif à la fois pour le  $\text{NO}_2$  (respectivement -2,7 % par an et -3,1 % par an dans les stations de trafic et les stations de fond urbaines) et pour les  $\text{MP}_{10}$  (-3,1 % par an et -4,0 % par an dans les mêmes types de stations). Les concentrations de  $\text{MP}_{2,5}$  affichent le plus fort taux moyen de diminution : -5,6 % par an dans les stations de fond urbaines. Aucune tendance n'a pu être identifiée pour l'ozone. Les concentrations de benzo[a]pyrène semblent indiquer une tendance à la baisse, mais cela exige une confirmation. Cette évolution globalement favorable, combinée à seulement de rares dépassements persistants des seuils de l'UE ou des lignes directrices de l'OMS, est une incitation à poursuivre les efforts et les actions contre la pollution atmosphérique.

## 6. PROJETS DE RECHERCHE ET OBSERVATOIRES PERTINENTS POUR LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES ALPES

Outre les polluants atmosphériques légalement réglementés figurant sur le tableau 1, d'autres substances vont devenir pertinentes pour l'avenir de la région alpine. Le présent chapitre examine les questions afférentes actuellement étudiées dans les programmes de recherche coopérative, détaillés dans les annexes.

Un défi majeur dans la région alpine, dont font état plusieurs études et rapports nationaux et transnationaux résumés dans l' 2, est celui des émissions et concentrations de matières particulaires ( $MP_{2,5}$  /  $MP_{10}$  / PUF) issues de la combustion du bois. La combustion du bois est en effet un comportement anthropique traditionnel, mais les problèmes qui en découlent en termes de POP et de COV sont exacerbés par la situation orographique particulière des Alpes.

Le climat influence particulièrement l'écosystème mais aussi l'atmosphère, ce qui, à son tour, affecte la distribution et le dépôt des masses d'air et des polluants et provoque des changements au niveau de la hauteur de la couche atmosphérique et de la réaction chimique. Les informations et les démonstrations concernant l'influence du changement climatique sur la qualité de l'air, et donc aussi sur la santé humaine, sont à l'heure actuelle encore limitées. Notre supposition générale est que les concentrations moyennes régionales d'ozone vont augmenter.

Les scientifiques observent et étudient toutes ces questions. Le présent chapitre traite des principaux projets de recherche passés et en cours et des installations d'observation qui contribuent à une meilleure connaissance de la qualité de l'air dans les Alpes.

### 6.1 PROJET DE RECHERCHE SUR L'ENVIRONNEMENT « PUREALPS »

Le projet MONARPOP, conclu en 2008 (voir annexe), se concentrait sur les POP et autres substances organiques présentes dans l'atmosphère des régions alpines. Depuis 2016, ces mesures se sont poursuivies en Autriche et en Bavière dans le cadre de deux projets du même nom, PureAlps (Freier K.P. *et al.*, 2019). Des polluants tels que les dibenzodioxines polychlorées et les furanes, les polychlorobiphényles (PCB), les HAP, les pesticides organochlorés (POC), les retardateurs de flamme halogénés et le mercure sont à l'étude, ainsi que certains nouveaux produits chimiques organiques à base de fluor et de chlore. Les résultats de plus de 15 ans de surveillance montrent que les zones alpines de haute altitude sont exposées à l'apport de polluants organiques persistants dus aux effets de condensation (figure 27). Bien que les concentrations atmosphériques de polluants y soient plusieurs fois inférieures à celles en zone urbaine, les dépôts de polluants sont souvent d'un ordre de grandeur similaire. Ceci signifie que même les régions alpines éloignées ne sont plus à l'abri des risques environnementaux dus aux produits chimiques. Certains polluants ayant d'importantes sources régionales, comme le lindane, issu des matériaux de construction en bois, ou les HAP, provenant de la combustion du bois, sont plus répandus dans la région alpine centrale.

Par effet de la législation REACH de l'UE (Règlement CE/1907/2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques) et de la Convention de Stockholm, les concentrations de certains polluants



**Figure 27 :** Résultat des mesures sur les masses d'air : impact sur les pics alpins depuis trois directions dominantes ; comme indiqué, certaines directions affichent des concentrations de PCB et de POC plus élevées.<sup>33</sup>

dans l'air ambiant ont diminué dans les Alpes. Ces polluants comprennent les pesticides organochlorés, largement interdits. En revanche, jusqu'à présent, la concentration de dioxines dans l'air ambiant n'a diminué que légèrement, ou, dans le cas des polychlorobiphényles (PCB), est restée stable. Les raisons de cet état ne sont pas encore claires et il est prévu de les étudier plus en détail dans le cadre des projets PureAlps. La présence dans l'air d'octachlorostyrène, un sous-produit involontaire de la production de solvants chlorés, provenant de la combustion d'hydrocarbures chlorés, a augmenté de façon significative. Le décabromodiphényl éthane (DBDPE), ignifuge utilisé en grands tonnages, a également dépassé les limites de détection des instruments de mesure pour la première fois en 2012 et est actuellement, parmi les retardateurs de flammes halogénés surveillés, celui ayant la plus forte concentration dans l'air ambiant.

## 6.2 STATIONS DE MESURE DE L'ENVIRONNEMENT EN HAUTE ALTITUDE

Dans la région alpine, il existe des stations de haute altitude où sont conduites des activités de surveil-

lance et de recherche sur la pollution atmosphérique, les conditions météorologiques et le climat, à savoir : Zugspitze au Schneefernerhaus (Umweltbundesamt/Bureau fédéral allemand de l'environnement, voir figure 28), Hohenpeißenberg (DE, Deutscher Wetterdienst/Service météorologique allemand) et Jungfrauoch (CH), Sonnblick (AT, voir figure 29) et Plateau Rosa (IT). Du fait qu'il s'agit de sites particuliers en Europe et dans les Alpes, ces stations revêtent un intérêt spécial pour la recherche scientifique et les tâches de surveillance, par exemple en matière de : transport à long terme des polluants, surveillance des substances organiques persistantes aéroportées au titre de la Convention de Stockholm sur les POP<sup>34</sup>, changements physiques et chimiques dans l'atmosphère, intrusion de masses d'air (et de polluants) de la stratosphère à la troposphère, production et transport de polluants. La plupart des stations en question font partie du Programme de la Veille de l'Atmosphère Globale (VAG) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), du réseau du Programme de coopération pour la surveillance continue et l'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe (EMEP) et de l'infrastructure ACTRIS (Aerosols, Clouds and Trace gas Research Infrastructure Network). L'Italie participe également à ces programmes par l'intermédiaire d'une autre station de haute altitude, au Monte Cimone (Apennins du nord). Les stations de Plateau Rosa (et du Monte Cimone), de la Zugspitze / du Hohenpeißenberg et du Jungfrauoch font également partie du Système intégré d'observation du carbone (ICOS) pour la sur-



**Figure 28 :** La station de recherche Schneefernerhaus sur la Zugspitze (© Markus Neumann-UFS).

33. PureAlps – Monitoring of Persistent Pollutants in the Alps ; brochure publiée par l'Agence bavaroise de l'environnement, Augsburg et l'Agence autrichienne de l'environnement, Vienne ; 2019, page 5. (<https://www.bestellen.bayern.de/>).

34. Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs) (<http://chm.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx>).



Figure 29 : Observatoire du Sonnblick (© ZAMG/SBO Ludewig).

veillance à long terme des gaz à effet de serre, du réseau de surveillance de l'EMEP et de la VAG. Ces pays alpins travaillent en outre intensément, dans le cadre du programme VAG, pour recueillir des données sur les processus atmosphériques mondiaux en ce qui concerne les composantes qui influent sur le climat transnational et transfrontalier.

Les stations de mesure d'altitude du Sonnblick (AT), de la Zugspitze et du Hohenpeißenberg (DE), ainsi que les stations de recherche en haute altitude du Jungfraujoch (CH) et l'observatoire climatique « Ottavio Vittori » au Monte Cimone (IT), étudient les gaz traces aéroportés, qui sont utilisés entre autres pour surveiller l'application de la Convention de Stockholm sur les POP.

## 6.3 RÉSEAUX DE SURVEILLANCE EXISTANT DANS LE PÉRIMÈTRE ALPIN (AUTRES QUE CEUX RELEVANT DES DIRECTIVES 2008/50/CE ET 2004/107/CE) AXÉS SUR L'ÉVALUATION DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

### 6.3.1 RÉSEAU ALLEMAND SUR LES PARTICULES ULTRAFINES

Il existe une station de mesure pour les particules ultrafines à l'Umweltforschungsstation Schneefer-

nerhaus (UFS) à la Zugspitze. Elle fonctionne, dans le cadre du Réseau allemand sur les particules ultrafines (GUAN - German Ultrafine Network), avec la station de mesure du Hohenpeißenberg, dans les contreforts des Alpes. Les stations de haute altitude mesurent les PUF, puis comparent les données de la région alpine avec celles de l'air en zone urbaine, ce qui permet d'obtenir des informations sur la formation naturelle de particules en comparaison avec les particules d'origine anthropique.

Du fait de sa sensibilité de mesure, la station UFS Zugspitze est actuellement utilisée dans le cadre du projet de l'Observatoire virtuel alpin, en coopération avec l'Italie, l'Autriche, la France et la Suisse, pour la recherche en altitude, le suivi de la qualité de l'air et le développement de modèles de prévision, ainsi que pour la compréhension des processus de changement climatique.

### 6.3.2 PROJET DE RECHERCHE SUR L'OZONE NEXTDATA

En Italie, le projet NextData (2011-2013), qui relevait du Conseil national italien de la recherche (Consiglio Nazionale delle Ricerche - CNR), visait à favoriser l'implantation d'un réseau dans les zones montagneuses et reculées, basé sur des observatoires atmosphériques, pour surveiller la composition atmosphérique et certaines données auxiliaires (paramètres météorologiques et rayonnement solaire). Ce réseau avait pour principale mission d'étudier les processus qui influencent la variabilité des polluants atmosphériques et des composés qui altèrent le climat (les halocarbures appauvrissant la couche d'ozone stratosphérique, réglementés par le Protocole de Montréal, les gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> inclus dans le Protocole de Kyoto, l'ozone et les composés organiques volatils non méthaniques, les aérosols minéraux et le carbone suie) et de surveiller en permanence les gaz traces et les propriétés des aérosols (distribution par taille - fine ou grossière -, coefficient d'absorption).

Le réseau comprenait cinq observatoires atmosphériques de haute montagne : Monte Cimone (2 165 m), projet Plateau Rosa (Alpes occidentales, 3 480 m), Col Margherita (Alpes orientales ; 2 550 m), Monte Portella-Campo Imperatore (Apennins centraux ; 2 401 m) et Monte Curcio (Apennins du sud, 1 796 m). Des mesures continues d'O<sub>3</sub> ont été effectuées au Col Margherita afin d'évaluer un éventuel transport à haute altitude de masses d'air influencées par les émissions anthropiques. Selon d'autres sites de montagne, une variabilité diurne de l'O<sub>3</sub>

était évidente pendant la saison estivale, avec les valeurs les plus élevées pendant la soirée ou la nuit et les valeurs les plus basses pendant la journée. Pendant la partie centrale de la journée, il est possible que des dépôts secs se produisent le long des pentes des montagnes, entraînant une diminution de la concentration d'O<sub>3</sub>, tandis qu'il est probable que l'O<sub>3</sub> s'accumule pendant la nuit, soit à cause

d'émissions anthropiques locales et de conditions météorologiques favorables, soit parce qu'il est transporté à longue distance depuis la stratosphère et passe ensuite dans la troposphère. En outre, un cycle hebdomadaire significatif d'O<sub>3</sub> peut être observé en été, avec des valeurs augmentant au cours de la semaine. En revanche, on peut observer en hiver un cycle jour-nuit inversé.

## 6.4 OBSERVATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LA RÉGION ALPINE DANS LE CADRE DE L'OBSERVATOIRE VIRTUEL ALPIN (VAO) – UNE CONTRIBUTION À LA CONVENTION ALPINE

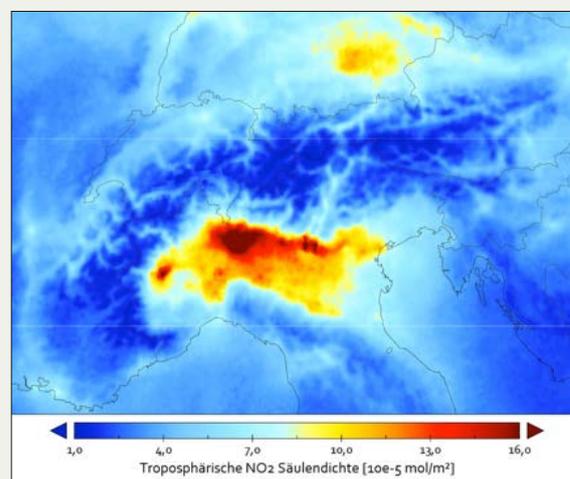
**Michael Bittner, Ehsan Khorsandi, Frank Baier, Thilo Erbertseder**  
**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Earth Observation Center, Oberpfaffenhofen.**

L'Observatoire virtuel alpin<sup>35</sup> est une association d'observatoires alpins et d'observatoires associés appartenant à d'autres régions montagneuses d'Europe, dont l'objectif est d'aborder conjointement les questions scientifiques et sociales pertinentes pour les Alpes, en particulier dans le contexte du changement climatique. La Convention alpine y a le statut d'observateur.

Dans le cadre du VAO, la qualité de l'air dans les régions alpines et préalpines fait également l'objet d'une surveillance. À cette fin, on utilise les mesures effectuées à partir de stations terrestres, à partir d'instruments par satellite (en particulier le programme Sentinel de l'Agence spatiale européenne<sup>36</sup>, figure 30) ainsi que les données du service européen COPERNICUS Atmosphère<sup>37</sup>.

Pour la prévision journalière de la qualité de l'air près du sol (actuellement sur deux jours),

le Centre aérospatial allemand (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR) utilise un système de modèle numérique constitué d'un modèle météorologique (WRF<sup>38</sup>) et d'un modèle de chimie-transport (POLYPHEMUS/DLR<sup>39</sup>), qui prend en compte les conditions particulières de la région alpine. La distribution des polluants atmosphériques est prédite au sein des districts administratifs (comtés) sur base horaire et avec une résolution horizontale de 6 km. Des méthodes dites d'« imbrication » permettent de passer régionalement à une résolution spatiale de 2 km. Dans les zones urbaines, il est possible d'obtenir, en couplage avec un autre modèle hydrodynamique (EULAG<sup>40</sup>), une résolution pouvant atteindre quelques mètres.



**Figure 30 :** Concentration moyenne de la colonne de NO<sub>2</sub> troposphérique pour la période de janvier à juin 2019 sur la région alpine (mesures par satellite Sentinel 5P de l'ASE, Centre aérospatial allemand).

35. <https://www.vao.bayern.de>.

36. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>.

37. <https://atmosphere.copernicus.eu/>.

38. <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>.

39. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10793/1079303/Air-quality-monitoring-and-simulation-on-urban-scale-over-Munich/10.1117/12.2503969.short?webSyncID=a0ce46e9-e6ec-7a49-dab6-a0cbad059329&sessionGUID=ad883c9d-902b-c999-3ced-268bead49a28&SSO=1>.

40. <https://www2.mmm.ucar.edu/eulag/>.

La qualité de l'air est l'un de ce qu'on appelle les « facteurs de stress environnementaux ». Cela signifie que les polluants atmosphériques peuvent affecter le bien-être humain. L'impact potentiel de certains polluants atmosphériques – de même que le stress météorologique – est donc également calculé journalièrement sur la base de la situation de la qualité de l'air et de l'état météorologique et est signalé sous forme d'un « indice du risque cumulé » (*Aggregated risk index – ARI*) (Sicard P. *et al.*, 2012) ou de l'indice universel du climat thermique UTCI<sup>41</sup>.

Tous les résultats sont mis journalièrement à la disposition du public par l'intermédiaire du Centre alpin de données et d'analyses environnementales<sup>42</sup> (AlpEnDAC) du VAO, au titre de service offert sans restriction d'accès.

Le système ci-dessus est également utilisé pour des études scientifiques (par exemple, sur l'influence du changement climatique sur la qualité de l'air ou sur l'impact de la pandémie de COVID-19 sur les concentrations de polluants atmosphériques) et permet en outre d'étudier des scénarios (par exemple, concernant l'impact que

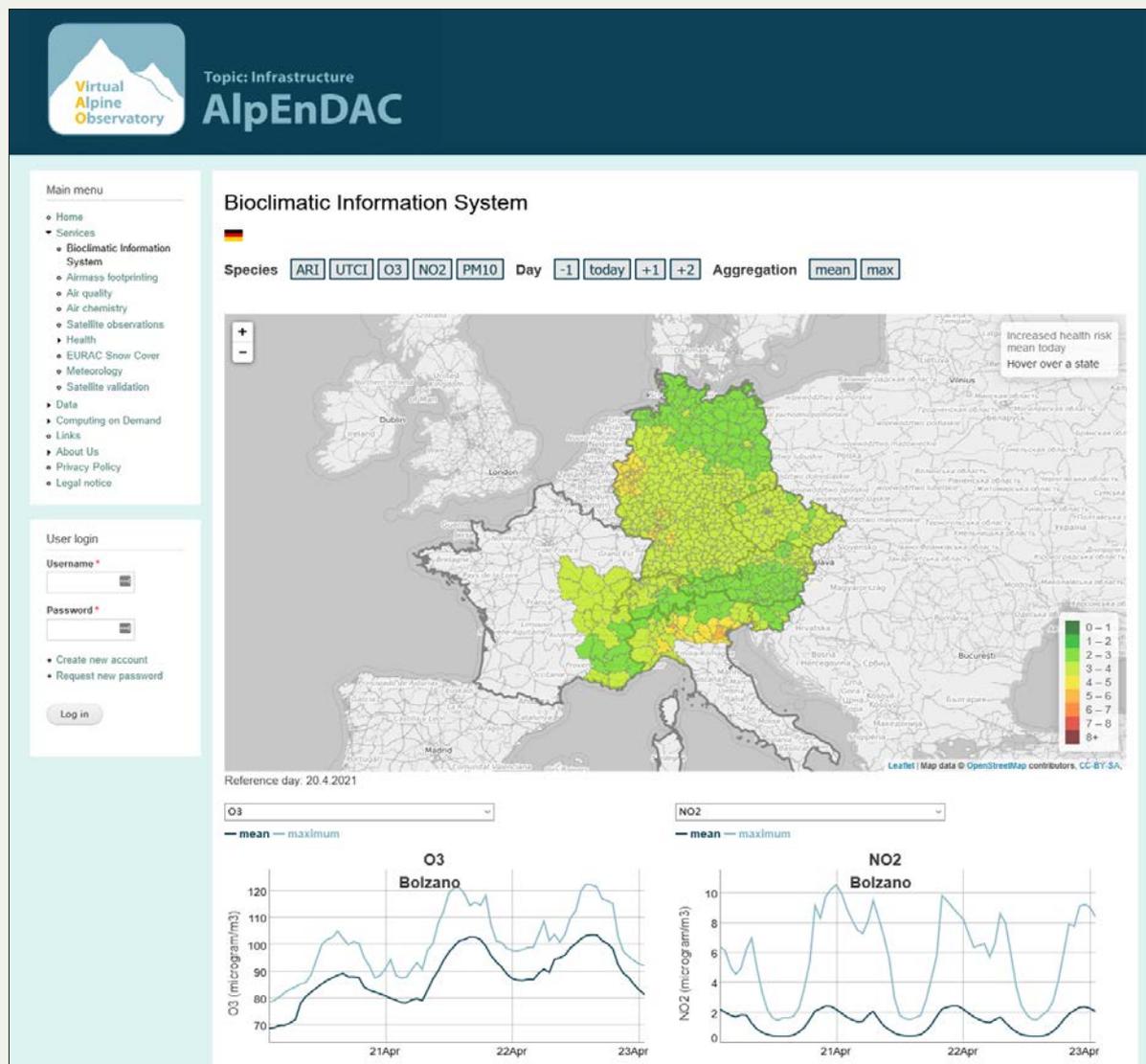
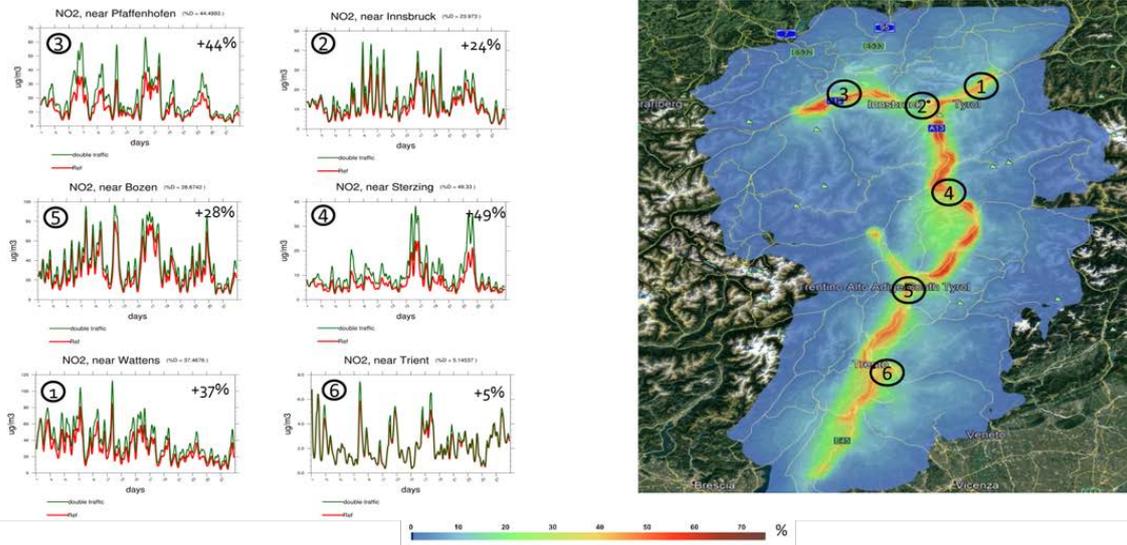


Figure 31 : Système d'information bioclimatique par district (pour plus d'information : <https://www.alpendac.eu/landkreis-tool>).

41. [http://www.utci.org/isb/documents/windsor\\_vers04.pdf](http://www.utci.org/isb/documents/windsor_vers04.pdf).

42. <https://www.alpendac.eu/>.

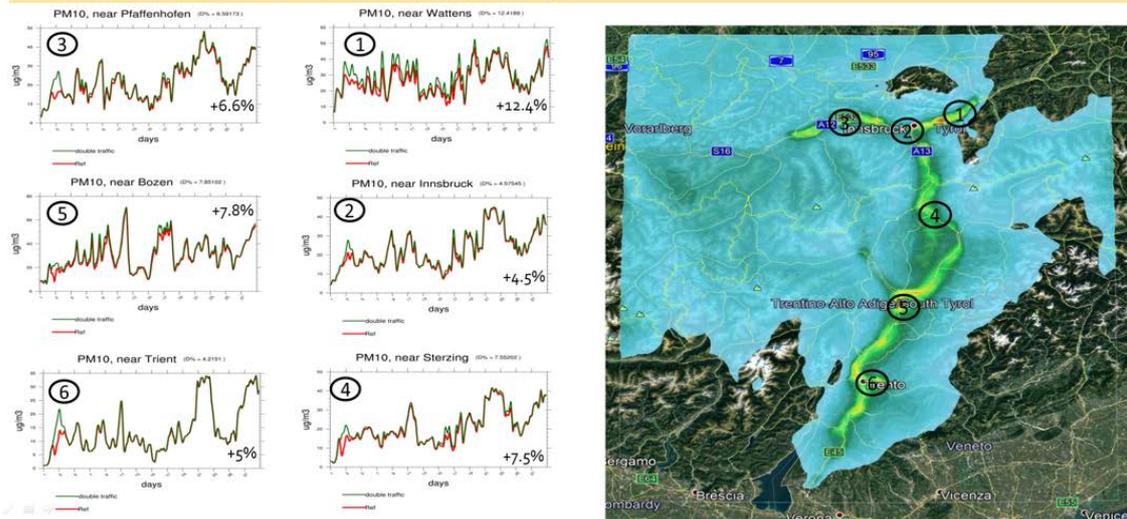
### Augmentation de la pollution en NO<sub>2</sub> sur certains sites due à un doublement du trafic (Estimée pour une durée de 10 jours en février 2018)



### Augmentation de la pollution en MP<sub>10</sub> sur certains sites due à un doublement du trafic (Estimée pour une durée de 10 jours en février 2018)

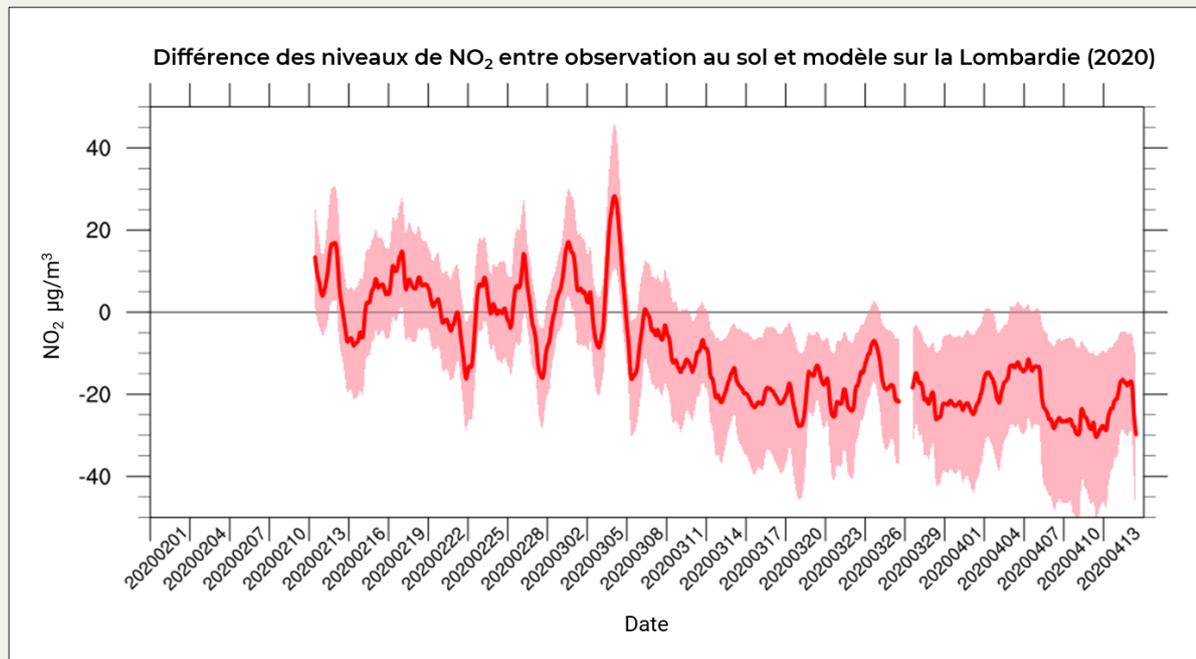


Note : les MP<sub>10</sub> peuvent être transportées sur de plus grandes distances ; une augmentation de la densité du trafic concerne donc des zones plus étendues que pour le NO<sub>2</sub>



**Figure 32 :** Simulation de l'influence du doublement du trafic routier pendant une période de 10 jours en février 2018 sur la concentration de NO<sub>2</sub> et sur la concentration de poussières fines (MP<sub>10</sub>).

Les données sont fournies pour le trafic normal (rouge) et pour le trafic double (vert). A droite : La carte indique l'écart moyen entre la pollution provoquée en situation de trafic normal et en situation de doublement du trafic (sur l'autoroute seulement) pendant les 10 premiers jours de février 2018.



**Figure 33 :** Différence entre les concentrations de  $\text{NO}_2$  mesurées dans 25 stations au sol en Lombardie et le modèle WR-F-POLYPHEMUS/DLR pour la période du 1er février 2020 au 13 avril 2020.

peuvent avoir sur la qualité de l'air une augmentation du trafic automobile, l'expansion de voies de transport ou la densification urbaine).

Quelques exemples sont présentés plus loin.

#### 6.4.1 LE SYSTÈME D'INFORMATION BIOCLIMATIQUE (BIOCLIS)

Un service (à statut de projet) offert par AlpEn-DAC est le Système d'information bioclimatique. Celui-ci fournit des valeurs journalières moyennes, ainsi qu'une série temporelle de polluants atmosphériques, paramètres météorologiques et leur influence en termes de bien-être humain, sur une période de quatre jours regroupé par districts. La figure 31 affiche une capture d'écran de la page Web BioCliS.

#### 6.4.2 DEUX EXEMPLES DE SCÉNARIOS

Comme exemple de question-type, la figure 32 montre une simulation de la distribution de  $\text{NO}_2$  et de la distribution des  $\text{MP}_{10}$  qui pourraient se présenter en cas de doublement du trafic routier sur les voies de transit des Alpes centrales. Le chiffre montre la situation hypothétique

pour une période de 10 jours en février 2018, en indiquant l'augmentation en pourcentage de la concentration de  $\text{NO}_2$  par rapport à la situation normale. Pour les emplacements sélectionnés, les graphiques à la gauche de l'image affichent la concentration supérieure de  $\text{NO}_2$  attendue. Il convient de noter, cependant, que près de villes plus importantes comme Innsbruck, par exemple, l'impact du doublement du trafic autoroutier pourrait être inférieur en comparaison, du fait de l'influence de fortes émissions locales provenant de nombreuses sources. Le graphique de la figure 32 montre la situation pour les  $\text{MP}_{10}$ .

Un autre exemple d'enquête-type est affiché sur la figure 33. Le premier confinement dû à la pandémie de COVID-19 a gravement limité le trafic routier et l'industrie. Les mesures de  $\text{NO}_2$  effectuées à partir de stations au sol ou même à partir de satellites indiquent une réduction de la pollution de  $\text{NO}_2$ , mais, compte tenu des variations naturelles de la concentration de  $\text{NO}_2$  dues aux conditions météorologiques, cet effet est masqué dans les mesures obtenues. En revanche, la réduction de la pollution de  $\text{NO}_2$  due au confinement devient particulièrement claire par comparaison des mesures avec le modèle mentionné ci-dessus, car celui-ci tient compte de nombreuses influences naturelles



sur la variabilité du NO<sub>2</sub>. La figure 33 montre ainsi la différence entre le modèle et plus de 25 mesures provenant de stations au sol situées en Lombardie. La diminution survenue dans la

concentration de NO<sub>2</sub> pendant le confinement, jusqu'à environ 30 µg/m<sup>3</sup> (ce qui correspond à une diminution d'environ 45 % par rapport à l'état normal), est clairement visible.

## 6.5 QUEL AVENIR POUR LA SURVEILLANCE DES POLLUANTS AMBIANTS ?

La mesure et la surveillance des polluants traces tels que les POP, les gaz fluorés, les gaz halogénés et les particules ultrafines aux stations de mesure de haute altitude revêtent un caractère de nécessité et d'urgence. La région alpine présente la particularité d'être très sensible aux polluants, d'afficher une bonne capacité de dispersion de polluants tout en étant aussi un piège pour ces derniers – une situation qui exige une attention supplémentaire. Dans ce contexte, les Alpes peuvent aussi être considérées comme une « sentinelle » capable de détecter les polluants émergents et de donner l'alerte sur les impacts futurs de nouvelles activités anthropiques.

Dans ce contexte, les mesures des PUF peuvent être intéressantes aussi pour des sites de vallée densément peuplés, industriels, caractérisés par un trafic important. Toutefois, l'acquisition des connaissances scientifiques sur la méthodologie de mesure et l'évaluation des effets sur la santé

est encore en cours. D'autres recherches sont donc nécessaires sur les PUF et leurs effets sur la santé humaine et l'environnement.

Par ailleurs, les stations de mesure ne doivent pas seulement recueillir des données précises sur les polluants. Elles doivent également être implantées de manière représentative, pour décrire de manière fiable les caractéristiques météorologiques spécifiques des zones locales.

Comme l'illustre le VAO dans la section 6.4, la détection des polluants atmosphériques à l'aide des données satellites, ainsi que son couplage avec des mesures et des modélisations *in situ*, est amenée à gagner en importance. Un tel observatoire donnera une meilleure image de la pollution de l'air dans les Alpes. Un réseau de capteurs à faible coût pourrait également compléter les mesures existantes et impliquer le public afin de mieux le sensibiliser aux problèmes de qualité de l'air. Toutefois, ce réseau ne devrait pas remplacer les mesures certifiées : il manque en effet de fiabilité et n'est pas adapté, à l'heure actuelle, aux investigations en matière d'effets des polluants sur la santé.

## 7. EXEMPLES ET SOLUTIONS INTELLIGENTES POUR RÉDUIRE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Ce chapitre se base sur des exemples de mesures et solutions fournis par les experts du Groupe de travail. Ces mesures peuvent être applicables à différents niveaux, de national à local, pour améliorer la qualité de l'air en se concentrant sur la région alpine. De nombreuses actions visant à améliorer la qualité de l'air ont des effets collatéraux que l'analyse actuelle tentera d'appréhender, en particulier lorsqu'une action ayant un effet positif sur un autre problème environnemental, par exemple le changement climatique, entraîne des effets néfastes sur la qualité de l'air (un exemple type étant celui de la combustion du bois). Inversement, des mesures ne visant pas spécifiquement à réduire la pollution atmosphérique peuvent influencer positivement sur la qualité de l'air. Lorsque ces informations sont disponibles, la présente étude met l'accent sur les situations efficaces gagnant-gagnant. Par exemple, la décarbonisation de l'économie alpine pourrait être bénéfique à la qualité de l'air lorsque des systèmes de transport plus propres seront mis en œuvre, mais aussi avoir des effets néfastes si la combustion de biomasse se développe sans technologie appropriée.

### 7.1 COMBUSTION DE BIOMASSE ET SYSTÈMES DE CHAUFFAGE URBAIN

Comme indiqué aux chapitres 2 et 3, certains pays alpins ont adapté leur cadre juridique, en se penchant, entre autres, sur les valeurs limites et sur les mesures qui ciblent spécifiquement les systèmes de chauffage, les dispositifs à combustible bois et les applications industrielles. La première étape des solutions intelligentes visant à réduire les émissions des activités de chauffage, en particulier à base de bois, consiste à établir des lignes directrices et des seuils pour le chauffage des bâtiments. S'ajoutant aux plafonds et lignes directrices, des incitations financières peuvent être mises en place pour aider les citoyens à respecter les limites. Un autre pilier est la mise en place de réseaux de recherche ou

d'échange et la diffusion des connaissances. Enfin, plusieurs exemples de réseaux de chauffage urbain sont présentés. Dans certaines circonstances, le chauffage urbain fournit une solution utile pour assurer des prestations plus efficaces et plus propres.

#### 7.1.1 INCITATIONS FINANCIÈRES

##### 7.1.1.1 Réduction des émissions de particules des dispositifs de chauffage au bois dans les ménages, France

En France, des fonds d'aide financière sont disponibles pour les particuliers vivant dans des communes particulièrement polluées par les MP. Leur objectif est d'aider les ménages à remplacer les dispositifs de chauffage très polluants par des versions améliorées et labellisées au titre de leurs émissions et de leur efficacité énergétique. Tous les ménages admissibles peuvent y avoir accès quel que soit leur revenu, ce qui encourage la population à remplacer leurs dispositifs de chauffage anciens. Ces dispositifs d'aide sont soutenus par des campagnes de communication visant à permettre à la population d'améliorer ses connaissances sur les bonnes pratiques dans ce domaine.

Une mesure simple mais efficace était nécessaire pour les zones marquées par la pollution due aux matières particulaires. C'est pourquoi une telle incitation économique a été testée pendant plus de quatre ans dans une région alpine. L'évolution de la concentration de  $MP_{10}$  provenant de la combustion du bois a été mesurée tout au long de ce projet pilote. Les gains d'efficacité suivants ont été observés :

- les MP ont affiché une réduction constante au fil du temps ;
- le remplacement de moins de 30 % des dispositifs de chauffage peu performants a permis d'observer une réduction de 4 % à 12 % des  $MP_{10}$  au terme de quatre années de projet pilote.

Cette mesure a donc été un succès et a été étendue à l'échelle nationale.



## 7.1.2 AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES

### 7.1.2.1 Mesures concernant l'utilisation du bois pour le chauffage, Slovénie

En complément des mesures sur le chauffage décrites dans son plan de maintien de la qualité de l'air, la Slovénie a mis en place une stratégie d'utilisation judicieuse du bois à des fins énergétiques, visant à mieux consommer les ressources dans le cadre du chauffage au bois. Cette stratégie se base sur une analyse précise de l'utilisation du bois pour chauffer les bâtiments en Slovénie, où 205 000 appareils de combustion (dont plus de la moitié ont plus de 20 ans) fonctionnent avec des combustibles solides.

Les objectifs de la stratégie sont les suivants :

- utiliser le bois comme ressource domestique et renouvelable, de manière avisée et efficace, en tant que matière première et source d'énergie ;
- traiter et utiliser efficacement le bois rond des forêts slovènes en Slovénie, à titre principal dans l'industrie du bois et secondairement à des fins énergétiques ;
- veiller à assurer une grande efficacité lors de l'utilisation du bois à des fins énergétiques ;
- là où la distribution spatiale des bâtiments le permet, favoriser la construction de chaudières partagées, modernes et efficaces, utilisant la biomasse ligneuse ;
- favoriser le remplacement des appareils de combustion individuels et réduire les émissions de matières particulaires provenant d'unités de combustion obsolètes ;
- instituer un pôle de compétences pour le chauffage au bois, ainsi qu'un centre mobile de démonstration pour les petits appareils de combustion ;
- améliorer la coopération et la coordination entre les décideurs, les experts et autres parties prenantes impliqués dans l'utilisation des sources d'énergie renouvelables.

### 7.1.2.2 Transfert de connaissances à différents niveaux administratifs : Cercl'Air – société suisse sur la qualité de l'air, Suisse

Cercl'Air est une société regroupant des autorités et universitaires suisses qui traitent de la protection de l'air et de la protection contre les rayonnements

non ionisants. Cercl'Air favorise et promeut, au sein du complexe système fédéral, la coordination intercantonale pour la mise en œuvre de la loi sur la protection de la qualité de l'air et facilite le transfert des connaissances entre le monde scientifique et les autorités. L'un de ses domaines d'activité couvre également le chauffage domestique (combustion du bois et qualité du combustible).

### 7.1.2.3 Accord sur les petits dispositifs de combustion du bois, Italie

L'Italie a mis en place un dispositif d'incitation financière pour remplacer les appareils anciens par des modèles à faibles émissions, mais la nécessité de promouvoir un changement culturel en la matière se fait sentir. Dans ce cadre, un accord<sup>43</sup> a été signé entre le Ministère de l'environnement, de la terre et de la mer et l'Association italienne des énergies agro-forestières (*Associazione Italiana Energie Agroforestali*), une association professionnelle représentant plus de 500 entreprises de la filière bois-énergie, qui comprend des producteurs et distributeurs de bois de chauffage, copeaux de bois et granulés certifiés, des fabricants de générateurs de chaleur et de systèmes de biomasse et des responsables de l'installation et de l'entretien des systèmes à biomasse. L'association promeut l'exploitation à des fins énergétiques de la biomasse issue de l'agriculture et de l'activité forestière.

Cet accord promeut les investissements en recherche et développement par les producteurs associés, afin de soutenir et d'accélérer le processus d'innovation technologique des usines à biomasse, pour accroître l'efficacité des générateurs et réduire les émissions, notamment de MP et BaP. Il met en place des processus de formation appropriés pour assurer aux responsables de l'installation et de l'entretien des usines utilisant de la biomasse ligneuse l'obtention ou la remise à niveau de leurs qualifications professionnelles. L'accord prévoit également des campagnes d'information à l'intention des producteurs et des utilisateurs ; il encourage à ajouter un « guide rapide pour l'utilisation correcte des appareils ménagers utilisant du bois et des granulés » aux manuels d'utilisation et d'entretien des dispositifs de chauffage appartenant aux classes de qualité élevées. Enfin, il définit des actions visant à trouver des ressources pour promouvoir le remplacement des systèmes anciens par des systèmes plus modernes à faibles émissions.

43. [https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/inquinamento\\_atmosferico/Protocollo\\_Intesa\\_MATTM\\_AIEL.pdf](https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/inquinamento_atmosferico/Protocollo_Intesa_MATTM_AIEL.pdf).

Il permet également l'accès à son programme à toutes les régions et provinces autonomes concernées qui s'engagent à la fois à intensifier et renforcer les procédures de contrôle des centrales thermique civiles à biomasse et à assurer une diffusion plus constante d'informations au public.

### 7.1.3 CHAUFFAGE URBAIN

#### 7.1.3.1 Mesures de chauffage des bâtiments conformément au Plan de maintien de la qualité de l'air, Slovénie

Le plan de maintien de la qualité de l'air<sup>44</sup> doit couvrir toutes les zones situées en-dehors des agglomérations urbaines, lesquelles disposent de plans séparés d'amélioration de la qualité de l'air. Les mesures varient selon les caractéristiques spatiales et prévoient notamment de :

1. mettre en place de nouveaux micro-systèmes de chauffage urbain à base de biomasse ligneuse dans des zones isolées densément peuplées et y raccorder tous les bâtiments de la zone donnée ;
2. mettre en place, lorsque les conditions le permettent, de petits dispositifs partagés de combustion de biomasse ligneuse et y raccorder tous les bâtiments de la zone ;
3. remplacer les petites installations obsolètes de combustion de biomasse ligneuse par des dispositifs modernes et, dans les zones d'habitation dispersée, par des pompes à chaleur ;
4. fournir des informations, communiquer avec les populations et les éduquer sur les bonnes pratiques ; démontrer et promouvoir les effets positifs de ces actions sur la qualité de l'air dans les zones où de petites unités de combustion obsolètes sont encore en service.

#### 7.1.3.2 Système urbain de chauffage au bois à Disentis-Mustér, Suisse

L'installation d'un réseau de chauffage urbain dans la commune de Disentis-Mustér, dans le canton des Grisons, a permis de réduire considérablement les émissions de poussières fines par rapport à celles des dispositifs de chauffage décentralisés, grâce à

un bon fonctionnement du système et à des dispositifs de filtrage. Le combustible choisi est le bois, par ailleurs faible en émissions de CO<sub>2</sub> et disponible localement.

Disentis-Mustér est un village de montagne situé dans le canton des Grisons. En novembre 2009, de nombreux dispositifs de chauffage au fioul et au gaz, désormais désuets, devaient être remplacés au centre du village. Début 2010, au lieu de revenir aux combustibles fossiles, la population locale, soutenue par les autorités communales et cantonales, a pris l'initiative de créer une centrale de chauffage urbain, alimentée par des ressources en bois disponibles localement et dont la chaleur est ensuite distribuée dans tout le village. Un effet secondaire appréciable de cette mesure est que les émissions de particules sont inférieures. À ce jour, 117 bénéficiaires sont connectés au réseau de chauffage urbain, y compris le monastère de Disentis, la mairie et le supermarché local. La première chaudière de chauffage a une puissance de 1 977 kW, la seconde une puissance de 1 955 kW. Le réseau de tuyauteries s'étend sur une longueur totale de 4,7 km. L'usine permet d'économiser environ 1,2 million de litres de fioul par an et assure une production totale de 3,5 MW.<sup>45</sup> Compte tenu de l'absence de chiffres qui permettraient une comparaison, il n'est pas possible de se prononcer sur la quantité d'émissions de particules évitée, mais il est probable qu'il s'agisse d'économies considérables, car l'usine est équipée de précipitateurs électrostatiques de pointe et les émissions ont chuté bien en-dessous de la valeur limite de 20 mg/Nm<sup>3</sup><sup>46</sup> établie pour les poussières fines.

Les réseaux de chauffage offrent l'avantage de comprendre, au lieu de plusieurs dispositifs de chauffage décentralisés, une seule unité centrale de contrôle, équipée des systèmes de filtration nécessaires et présentant des valeurs d'émission très faibles et un degré d'efficacité élevé.

#### 7.1.3.3 Extension du système de chauffage urbain, Bavière, Allemagne

L'objectif de cette mesure est de réduire les contributions à la pollution atmosphérique en remplaçant le chauffage des bâtiments individuel en connectant les foyers à une centrale combinée thermique et électrique.

44. Après consultation publique début 2020, le gouvernement adoptera le Plan d'ici fin 2020.

45. [https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/aev/dokumentation/EnergieeffizienzEnergieaperoDokumente/EA81\\_Sac.pdf](https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/aev/dokumentation/EnergieeffizienzEnergieaperoDokumente/EA81_Sac.pdf)

46. Le terme « N » correspond à « normal », c'est à dire sous des conditions normales de température et de pression (généralement 25 °C et 1 atm, respectivement).



### Exemple :

#### Bioenergie Berchtesgadener Land (Bavière)

En 2011, la société Bioenergie Berchtesgadener Land GmbH a mis en service une centrale à biomasse dans la commune de Schönau am Königssee. Cette centrale utilise la biomasse pour produire de l'électricité et de la chaleur : pour la production d'énergie, seuls les copeaux de bois provenant des forêts régionales dans un rayon de 80 km sont utilisés. La plus grande partie du bois provient directement du bassin de Berchtesgaden. Le réseau de chauffage urbain s'étend sur une longueur de plus de 33 km, couvrant une partie des communes de Schönau am Königssee, Berchtesgaden et Bischofswiesen. Outre la performance technique de surmonter 150 m de dénivelé, le dispositif d'approvisionnement intercommunautaire de chauffage urbain de Bioenergie Berchtesgadener Land est un projet de démonstration pour l'utilisation des énergies renouvelables en zone rurale. Grâce à l'exploitation d'une centrale combinée thermique et électrique centralisée, les émissions de polluants comme les NO<sub>x</sub> et les MP ont été considérablement réduites par rapport à celles des dispositifs de chauffage individuel fonctionnant dans chaque ménage.

- au renouvellement des chaudières dans les systèmes locaux existants de chauffage à la biomasse ;
- à la cogénération de biomasse (systèmes combinés chaleur/électricité à la biomasse).

Une condition préalable à l'obtention des fonds est la participation au programme « Gestion de la qualité dans les installations de chauffage », consacré à l'efficacité énergétique et l'optimisation des technologies et des installations. Une autre condition préalable consiste à concevoir et exploiter l'installation de façon à ce que les valeurs limites d'émission figurant dans le tableau 10 soient respectées.

## 7.2 RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE COV ET D'AUTRES PRÉCURSEURS DE L'OZONE

Cette section considère deux pays qui ont réglementé les réductions des émissions de COV et de COVNM : le cadre juridique de l'Allemagne pour les installations émettrices de COV et la législation suisse correspondante, ainsi qu'un exemple de réussite de la taxe incitative suisse en matière de COVNM.

### 7.1.3.4 Programme de soutien à l'environnement pour le chauffage urbain à la biomasse, Autriche

Afin de promouvoir le chauffage urbain à la biomasse, l'Autriche a mis en place un « Programme de soutien environnemental » spécifique, qui s'applique :

- aux centrales à biomasse destinées au chauffage urbain ;
- à la construction et à l'expansion de réseaux de distribution de chaleur à base de biomasse, d'énergie géothermique ou de rejets thermiques de l'industrie ;
- à l'optimisation des systèmes locaux de chauffage – primaires et secondaires ;

### 7.2.1.1 Réglementation en matière de COVNM, Suisse

Afin de réduire les émissions de COVNM, la Suisse dispose de trois types de politiques et mesures : i) la législation internationale sur les gaz d'échappement des véhicules automobiles, pleinement transposée dans la législation suisse, ii) l'ordonnance sur la protection de l'air pour les sources stationnaires, iii) la taxe incitative pour réduire les émissions de COVNM.

La taxe d'incitation sur les COVNM est définie dans

Puissance thermique	≤ 500 kW	0,5 – 1 MW	1 – 2 MW	2 – 5 MW	5 – 10 MW	> 10 MW
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ; 10 % O <sub>2</sub> )	200	275	275	220	220	110
Dust (mg/Nm <sup>3</sup> ; 10 % O <sub>2</sub> )	40	83	36	22	11	11

**Tableau 10 :** Valeurs limites d'émissions pour les installations de chauffage urbain à la biomasse (Programme autrichien de soutien environnemental).

47. <https://bebgl.de>.

l'ordonnance sur la taxe d'incitation sur les composés organiques volatils, qui est entrée en vigueur en 1997. En tant qu'instrument de protection de l'environnement fondé sur le marché, il crée une incitation financière pour réduire davantage les émissions de COVNM. La taxe (3 CHF/kg de COV) rapporte actuellement environ 110 millions de CHF par an et est largement redistribuée aux résidents suisses par l'intermédiaire de paiements forfaitaires.

L'Office fédéral de l'environnement examine régulièrement l'effet de la taxe, en analysant les bilans de masse déclarés et payés par 600 des entreprises les plus touchées. Par ailleurs, une enquête d'entreprise a été réalisée en 2017 en coopération avec les associations industrielles concernées. Les résultats montrent que la taxe continue à contribuer à la réduction des émissions. De 2007 à 2016, les émissions réglementées par l'ordonnance ont globalement diminué de 15 %, tandis que l'apport de COV a augmenté de 20 % parmi les entreprises qui déposent des bilans de masse.

La présentation du Rapport sur les inventaires d'information (Informative Inventory Report 2020 – IIR) de la Suisse montre que l'ordonnance sur la protection de l'air, la taxe incitative relative aux COVNM et l'élaboration des normes Euro en matière d'émissions ont permis de réduire considérablement les émissions de COV, de près de 30 % par rapport aux niveaux de 2005.<sup>48</sup>

#### 7.2.1.2 Législation plus stricte pour les installations émettrices de COV, Allemagne

Pour réduire les concentrations d'ozone, il existe plusieurs Directives visant à réduire les émissions de composés organiques volatils des installations industrielles - par exemple, le chapitre V de la Directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles et les Directives en matière d'essence, phases I et II (1994/63/CE, 2009/126/CE). L'établissement d'exigences plus strictes dans la mise en œuvre des Directives relatives aux COV et l'application des meilleures techniques disponibles permettent de réduire davantage encore les émissions de COV.

##### Exemples :

Transposition du chapitre V de la Directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles dans l'ordonnance allemande portant réduction des émis-

sions de COV résultant de l'utilisation de solvants organiques dans des installations spécifiques – 31e Règlement BImSchV (Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes)<sup>49</sup>:

- De nombreux seuils ont été abaissés dans le cadre des activités émettrices de COV.
- Pour les installations de traitement de surface ou d'impression : les gaz résiduels capturés sans épuration sont considérés comme des émissions diffuses. Cela nécessite généralement l'application d'un dispositif de réduction de ces émissions ou d'une réduction des gaz résiduels.
- Les installations nécessitant un permis environnemental doivent toujours prévoir l'application des meilleures techniques disponibles.
- Les valeurs fédérales d'émission TA Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) pour les composés organiques de classe I (point 5.2.5) doivent être appliquées pour les émissions de cheminées : 20 mg/Nm<sup>3</sup> (par rapport au chapitre V de la Directive relative aux émissions industrielles : seulement pour les COV halogénés auxquels sont attribuées, ou sur lesquels doivent être apposées, les mentions de danger H341 « Susceptible d'induire des anomalies génétiques » ou H351 « Susceptible de provoquer le cancer »). Nettoyants chimiques à sec : seul le perchloroéthylène (PERC) est autorisé comme agent de nettoyage halogéné. Les machines doivent être équipées d'un dispositif de verrouillage électronique et d'un dispositif de mesure du PERC. La porte de la machine ne peut être ouverte que si la concentration en masse d'émission mesurée dans l'air du tambour après séchage est inférieure à 2 g/m<sup>3</sup>.

Transposition des directives en matière d'essence, phases I/II dans le 20e et le 21e règlements (BImSchV)<sup>50</sup>:

- La portée des 20e et 21e règlements est beaucoup plus large que les directives en matière d'essence, phases I/II et inclut le naphta et les mélanges de carburant avec 10 %-90 % de bioéthanol.
- Dispositifs de récupération de vapeur dans les terminaux : la valeur limite d'émission est de 50 mg C/Nm<sup>3</sup> (sans méthane) au lieu de 35 g/Nm<sup>3</sup> (avec méthane).

48. Switzerland's Fourth Biennial Report under the UNFCCC 2020: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/CHE\\_BR4\\_2020.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/CHE_BR4_2020.pdf).

49. Exemples : [https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv\\_31/](https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_31/).

50. Exemples : [https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv\\_20\\_1998/](https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_20_1998/), [https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv\\_21/](https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_21/).

- Dans les stations-service, système de verrouillage automatique qui ne permet de décharger le carburant d'un camion-citerne que si le conduit d'aspiration des vapeurs est relié au réservoir de stockage.
- La surveillance automatique du système de récupération de vapeur des stations-service pendant le ravitaillement des véhicules est obligatoire.

### 7.3 SECTEUR DES TRANSPORTS – FOCUS SUR LA RÉDUCTION DU NO<sub>2</sub> ET DES MP

Les exemples issus du secteur des transports, fournis ici sous forme de contributions de différents pays et régions, représentent le champ d'action le plus vaste en matière de réduction de la pollution atmosphérique, avec la plus grande variété de mesures. La plupart de ces types de mesures de réduction des polluants atmosphériques comprennent un ensemble de caractéristiques applicables aux infrastructures, aux véhicules, aux règlements, aux opérations, aux innovations technologiques et managériales et au financement. En outre, dans

la plupart des cas, les dispositions réglementaires sont établies à l'échelle nationale, et non pas spécifiquement au niveau régional ou alpin. Des plans d'action pour l'air pur au niveau régional ou des plans de mobilité urbaine durable viennent refléter le caractère intégral de cette combinaison de mesures fondées sur des règles nationales ou européennes.

Néanmoins, en cas de nécessité, les autorités régionales du périmètre de la Convention alpine peuvent introduire des mesures spécifiques fortes pour contrebalancer et corriger des dépassements des valeurs limites.

#### 7.3.1 MESURES RÉGLEMENTAIRES ET POLITIQUE DE TRANSFERT MODAL DE LA ROUTE AU RAIL : TRANSPORT DE MARCHANDISES ET DE PASSAGERS

##### 7.3.1.1 Transfert modal dans le transport de marchandises, à l'échelle des Alpes

Le transport de marchandises transalpin est un défi majeur pour ce qui est de la qualité de l'air (et de la pollution sonore) pour l'arc alpin. Les quatre

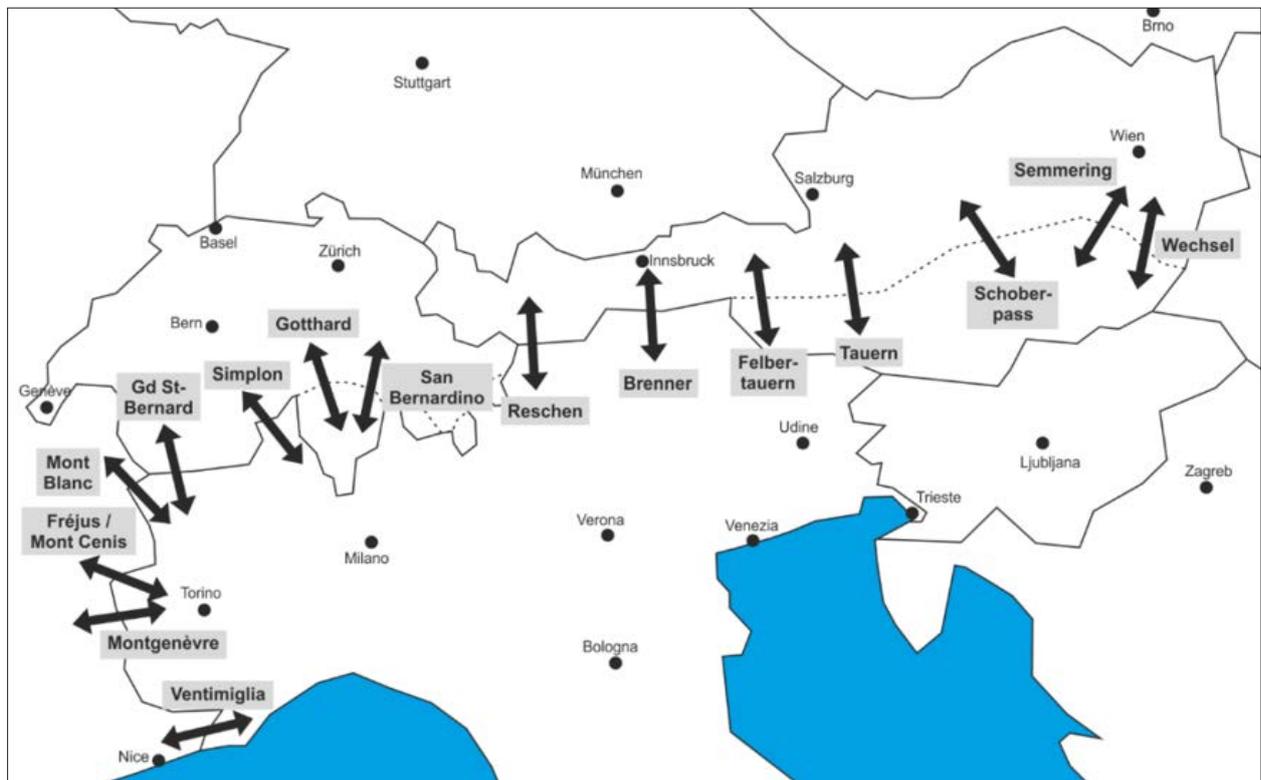


Figure 34 : Itinéraires de transport dans les Alpes (Alpine Traffic Observatory, 2020).

grands axes routiers traversant les Alpes (Fréjus, Mont-Blanc, Saint-Gothard, Brenner) ont des impacts significatifs en termes d'émissions de polluants atmosphériques (figure 34).

Dans tous les pays et régions, des efforts sont entrepris pour réduire la pollution atmosphérique en remplaçant, au niveau national et en partie dans les Alpes, le transport routier par le rail, tant dans le secteur du fret que du transport de passagers. Plus précisément, dans la région alpine, caractérisée par des vallées étroites et des ressources naturelles limitées, introduire ce transfert modal pour réduire les impacts dommageables sur la qualité de l'air pourrait avoir des effets positifs importants. Dans la plupart des pays et régions, des mesures spécifiques sont prises pour promouvoir l'intermodalité dans le but d'accroître la part des marchandises transportées par chemin de fer. Dans de nombreux cas, même s'il s'agit de mesures prises et mises en œuvre en particulier en dehors de la zone alpine, elles ont un fort impact en termes de réduction des émissions dans cette même zone.

Une comparaison des émissions entre le transport de marchandises ferroviaire et routier est fournie par le Manuel des coefficients d'émission, résumé sur le tableau 11, et repris également par l'Agence fédérale allemande pour l'environnement (Umweltbundesamt Deutschland, UBA)<sup>51</sup>. La dernière ligne indique le facteur moyen d'utilisation des terres (train à grande vitesse vs autoroute) :

Polluant atmosphérique en g/t.km / Utilisation des terres (sans dimension)	Poids lourds (>3.5t) <sup>(a)</sup>	Trains de marchandises <sup>(b)</sup>
NO <sub>x</sub>	0,269	0,037
MP <sup>(c)</sup>	0,004	0,000
COV <sup>(d)</sup>	0,037	0,003
CO <sub>2</sub> <sup>zequiv</sup>	112	18
<b>Facteur d'utilisation des terres<sup>(e)</sup></b>	3	1

**Tableau 11** : Comparaison des émissions entre le transport de marchandises ferroviaire et routier. Année de référence : 2018 ; g/t.km : gramme pour déplacer une tonne sur un km, processus de transformation compris.

(a) Tous types de poids lourds confondus : > 3,5 t jusqu'à 40 t, camions, camions-remorques, semi-remorques. (b) Base : mix électrique moyen en Allemagne. (c) Sans abrasion des pneus, des freins, de la surface de la route, du contact aérien. (d) Hors méthane. (e) <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/umwelt/flaechenverbrauch/>.

En outre, l'étude Grace de 2006 et l'étude plus récente de la SUERA (2017) sur les coûts externes dans les zones de montagne ont été en mesure de calculer un « facteur montagne » alpin qui prend en compte la spécificité des régions montagneuses dans le cadre des coûts externes de la dégradation de l'environnement. Ces facteurs de coûts liés à la montagne représentent le rapport entre les coûts externes dans les zones montagneuses et ceux dans les zones non montagneuses, et sont synthétisés dans la figure 35.

Cost category	Present EUSALP study		GRACE study (2006)	
	Road transport	Rail transport	Road transport	Rail transport
Air pollution	4.2 (1.3 – 14.2)	2.6 (0.9 – 6.6)	5.25 (2.4 – 19.8)	3.5 (2.1 – 5.2)
Noise	4.1 (1.3 – 14.7)	3.0 (1.0 – 11.25)	5.0 (2.3 – 19.8)	4.15 (2.1 – 10.4)
Nature & landscape	1.3 (1.0 – 1.6)	1.4 (0.8 – 2.0)	n.a.*	n.a.*
Accidents	3.9	n.a.	n.a.	n.a.

**Figure 35** : Comparaison des facteurs de coûts externes supplémentaires pour le transport routier et le transport ferroviaire dans les zones alpines (SUERA 2017, fac simile).

51. <https://www.hbefa.net/> and <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#emissionen-im-guterverkehr-tabelle>.



Le facteur de coût externe supplémentaire dû à la pollution atmosphérique provoquée par le transport routier dans les zones alpines est en moyenne de 4,2 - contre 2,6 pour le transport ferroviaire. La politique de transfert modal de la route au rail peut, à cet égard, avoir un impact particulièrement positif dans les zones alpines.

### 7.3.1.2 Politique de transfert modal dans le transport transalpin de marchandises, Suisse

En Suisse, la politique de transfert modal dans le secteur du transport de marchandises est un enjeu clé depuis 25 ans. Un article constitutionnel sur la protection des Alpes a été édicté en 1994 suite à une initiative populaire lancée au titre de la loi sur la protection des Alpes (article 84 de la Constitution fédérale), à quoi ont fait suite des lois fédérales concernant l'introduction d'une redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations. La loi sur le transfert modal spécifie le nombre maximum autorisé de poids lourds dans les transports transalpins (650 000 par an), la construction de la

nouvelle liaison ferroviaire à travers les Alpes et diverses mesures complémentaires. L'accord sur les transports terrestres entre la Suisse et l'UE adopte ce paquet global afin qu'il soit mis en œuvre. La politique de transfert modal comprend à la fois la réduction des transports en termes de nombre de véhicules impliqués et, implicitement, la réduction des émissions liées aux transports. Les mesures « push & pull » sont les suivantes :

- construction d'infrastructures comme alternative au transport routier = nouveaux tunnels ferroviaires de base à travers les Alpes ;
- introduction de la redevance poids lourds liée aux prestations (liées au poids, à la distance et aux émissions) ;
- augmentation de la limite de poids total effectif en charge pour les poids lourds, de 28 à 40 t (efficacité du transport) ;
- mesures de réforme des réglementations en matière de chemins de fer ;
- mesures de financement visant à promouvoir

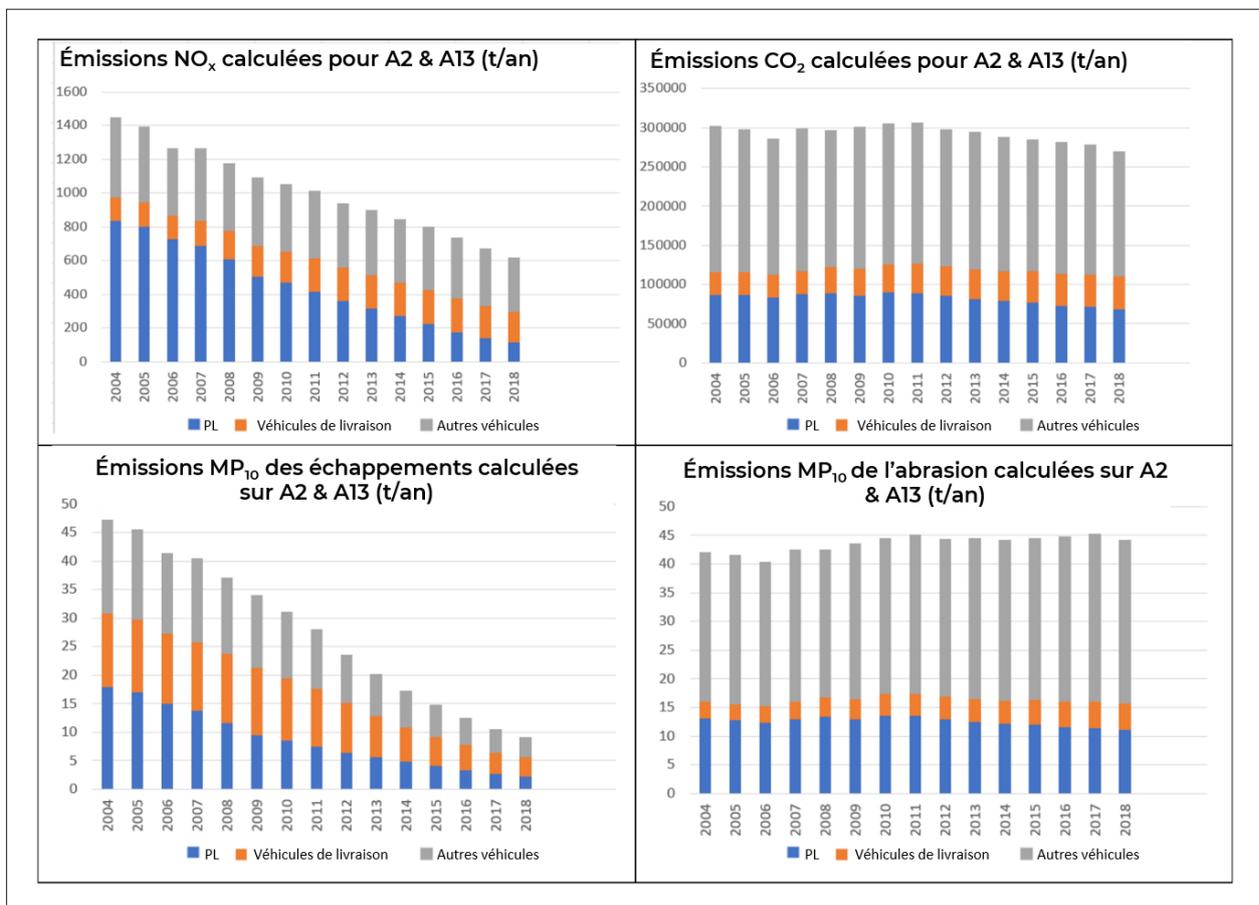


Figure 36 : Évolution des polluants atmosphériques et des émissions de CO<sub>2</sub> entre 2004 et 2018 sur les autoroutes suisses A2 et A13 dans la région alpine.

les subventions au fret ferroviaire pour les prix des transports combinés, créneaux de prix pour le fret, liaisons terminales.

Depuis 2004, les polluants NO<sub>2</sub> et MP ont considérablement diminué, grâce à l'amélioration de la technologie et à la réduction du nombre de véhicules, comme le montre la figure 36. Néanmoins, du fait de la topographie spécifique aux vallées alpines, les impacts négatifs des polluants atmosphériques restent aujourd'hui encore plus accentués que dans les régions de plaine, ce qui se traduit par certains dépassements des valeurs limites pour les NO<sub>x</sub> et les MP. L'expérience à long terme sur près de 20 ans montre que les mesures combinées des dispositions réglementaires, techniques et financières,

incitations comprises, dans le cadre d'une politique globale durable de transport de marchandises (route+rail), ont eu un impact positif sur la qualité de l'air et l'efficacité des transports<sup>52</sup>.

### 7.3.1.3 Transfert modal et politique d'interdiction des véhicules polluants dans le transport transalpin de marchandises et de passagers, Autriche

L'Autriche offre des exemples prégnants en matière de transports, en particulier concernant le Tyrol, très affecté par l'axe de transit majeur de l'autoroute de l'Inntal et celle du Brenner (A171 et A13 depuis Kiefersfelden/Kufstein/frontière avec

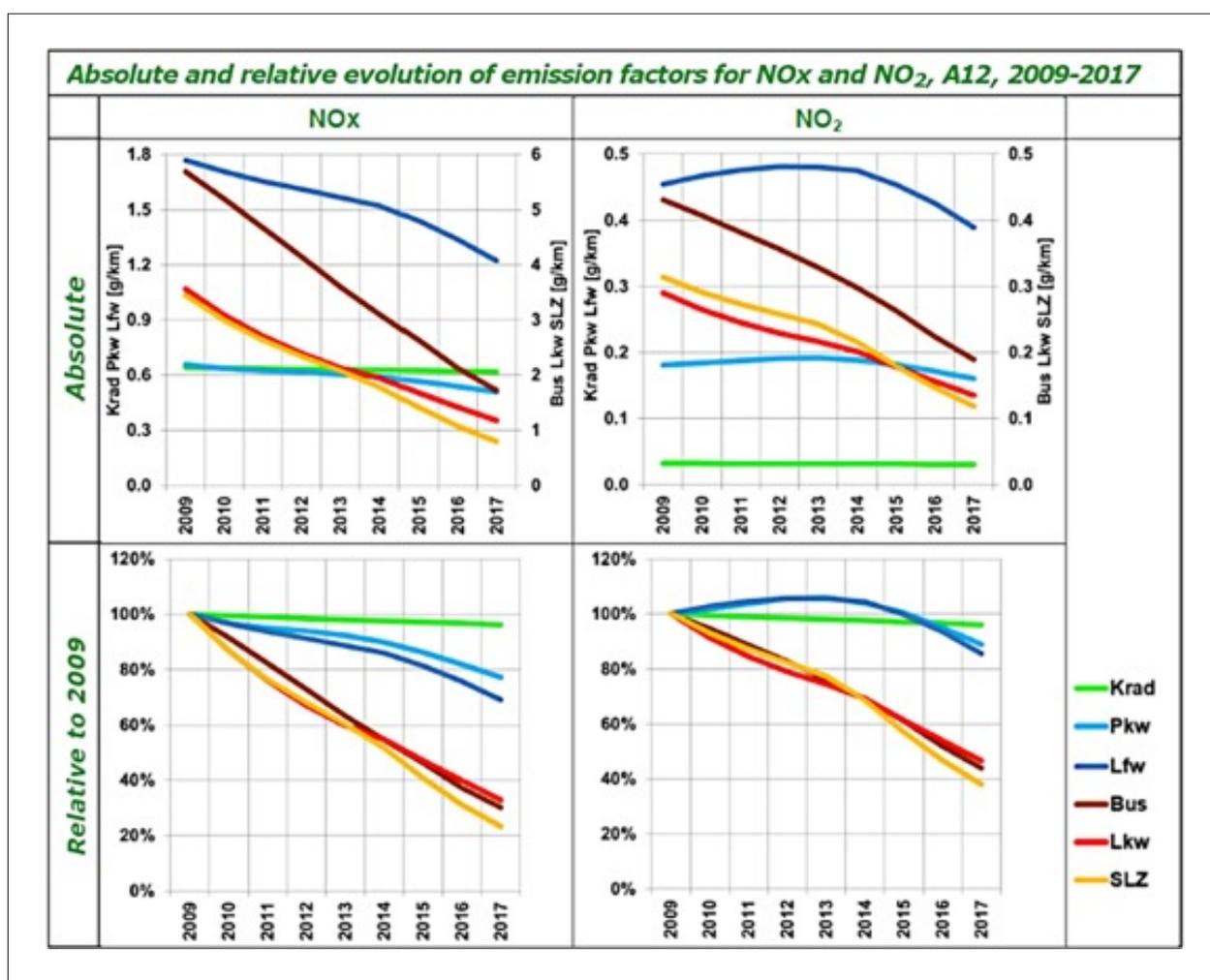


Figure 37 : Évolution des facteurs d'émission de NO<sub>x</sub> et NO<sub>2</sub> sur l'autoroute A12 en Autriche<sup>53</sup>.

Krad : motos ; Pkw : voitures particulières ; Lfw : fourgons de livraison ; Bus : bus et cars ; Lkw : camions ; SLZ : camions-remorques.

52. Voir le chapitre 3 (Suivi environnemental) du rapport sur le transfert modal : Rapport sur le transfert du trafic de novembre 2019 : [https://www.bav.admin.ch/dam/bav/fr/dokumente/themen/verlagerung/verlagerungsbericht-2019.pdf.download.pdf/VERLAGERUNGSBERICHT%20\\_fr.pdf](https://www.bav.admin.ch/dam/bav/fr/dokumente/themen/verlagerung/verlagerungsbericht-2019.pdf.download.pdf/VERLAGERUNGSBERICHT%20_fr.pdf).

53. [https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/umwelt/umweltrecht/Luftseiten/Luft/Evaluation\\_der\\_LKW-Massnahmen\\_auf\\_der\\_A12\\_Euroklassenfahrverbot\\_Nachfahrverbot\\_Sektorales\\_Fahrverbot.pdf](https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/umwelt/umweltrecht/Luftseiten/Luft/Evaluation_der_LKW-Massnahmen_auf_der_A12_Euroklassenfahrverbot_Nachfahrverbot_Sektorales_Fahrverbot.pdf).



l'Allemagne jusqu'au col du Brenner/frontière avec l'Italie). Malgré la croissance du trafic, les émissions de NO<sub>x</sub> dues aux poids lourds ont été considérablement réduites, grâce à un renouvellement plus rapide du parc automobile sur cet axe, comme le montrent les valeurs indiquées en rouge et en jaune sur la figure 37.

Les principales mesures adoptées sont les suivantes :

- une limite de vitesse permanente à 100 km/h pour les voitures particulières a été introduite en 2006, puis modifiée pour devenir une limite variable en fonction des concentrations de NO<sub>2</sub>, et enfin réintroduite en tant que limite fixe en 2014 ;
- une série d'interdictions sectorielles, pour des marchandises spécifiques, a été introduite pour les poids lourds en 2007, puis révoquée en 2011 et réintroduite en 2016, ce qui a favorisé le passage vers le rail ;
- depuis 2006, une interdiction de circuler de nuit pour les poids lourds a également été introduite, dont seule a été exonérée la dernière classe Euro d'émissions (actuellement, la catégorie Euro VI) ;
- une interdiction progressive portant sur les poids lourds anciens a été imposée pour les autoroutes A12 et A13 et actuellement les classes d'émissions Euro III et en-deçà ne sont plus autorisées à utiliser les voies de transit.

La construction du nouveau tunnel ferroviaire de base du Brenner constitue un élément de la politique de transfert modal visant à rééquilibrer les flux de fret transalpins sur le corridor scandinave-méditerranéen.

#### 7.3.1.4 Zones à faibles émissions et bonus de conversion des véhicules, France

L'introduction de zones à faibles émissions (ZFE) touche les communes et les particuliers. Une zone à faibles émissions est une zone limitant la circulation de certains types de véhicules polluants ; il en existe actuellement 220 en Europe<sup>54</sup>. La classe d'appartenance des véhicules est indiquée par une vignette visible, requise pour entrer dans ces zones. La classification française des véhicules se base sur le système européen (Euro I-VI). Le fait d'apposer une vignette distinctive sur le véhicule permet-

tra ultérieurement la mise en place de contrôles automatisés dans ces zones.

Il existe également une prime de conversion, qui est une subvention accordée aux citoyens pour remplacer leurs véhicules anciens par de nouveaux modèles moins polluants (106g de CO<sub>2</sub>/km en moyenne, conversion en véhicules Euro IV minimum). Il s'agit d'une incitation financière répondant aux raisons d'être de la ZFE, à savoir réduire l'exposition de la population aux polluants nocifs.

Depuis 2018, la prime de conversion des véhicules a contribué au remplacement de 550 000 véhicules. Cette mesure a été un grand succès (à condition que les véhicules en question ne soient pas exploités en dehors de l'Union européenne ou des États membres de l'AELE), en ce sens qu'elle a dépassé le budget prévu et pourrait atteindre l'objectif d'un million de véhicules convertis avant 2022. Des incitations de ce type servent également à sensibiliser les populations sur l'impact du trafic sur la qualité de l'air et donc à mieux faire accepter les ZFE imposées dans les zones urbaines (dans toute la France, pas seulement dans le périmètre de la Convention alpine).

Par exemple, la démarche ZFE de l'agglomération Grenoble-Alpes Métropole a été engagée le 2 mai 2019 dans 10 communes et élargie à 27 communes en février 2020<sup>55</sup>. Il est interdit aux véhicules les plus polluants d'entrer dans ces villes, sauf sur les tronçons d'autoroutes. L'objectif est d'éviter de dépasser les limites d'exposition d'ici 2026 pour les 4 300 personnes actuellement touchées.

Une ZFE est un moyen très efficace et peu coûteux d'améliorer la qualité de l'air, car elle impose des limitations directes à la pollution due au trafic, qui est la principale source de pollution dans les zones urbaines.

#### 7.3.1.5 Exemple de bonnes pratiques maritimes : la Zone de contrôle des émissions de navigation maritime de Monaco, Principauté de Monaco

L'établissement d'une zone de contrôle des émissions en Méditerranée constitue un nouvel élan vers la stratégie adoptée par l'Organisation maritime internationale au titre de la Convention MARPOL – Convention internationale pour la préven-

54. <https://fr.urbanaccessregulations.eu/userhome/map>.

55. <https://www.grenoblealpesmetropole.fr/761-la-zone-a-faibles-emissions.htm>.

tion de la pollution marine par les navires. Cette mesure a déjà été appliquée avec succès dans la mer Baltique et la mer du Nord. Le grand public comme les politiciens locaux sont conscients de l'impact du transport maritime sur la qualité de l'air et sont favorables à un tel projet. Aussi est-il essentiel d'assurer son succès pour améliorer la qualité de l'air dans cette région. La mesure établirait une zone mixte pour réduire les émissions de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> en mer Méditerranée. Concernant plus spécifiquement les émissions de SO<sub>2</sub>, l'objectif est de limiter à 0,1 % la teneur en soufre des carburants.

Depuis juillet 2018, la Principauté de Monaco a décidé de limiter drastiquement l'utilisation de fioul lourd à usage maritime dans ses eaux territoriales et ses ports, afin de minimiser les émissions aéroportées dues aux navires. Le gouvernement monégasque a choisi d'agir en anticipation de la création d'une zone de contrôle des émissions en Méditerranée et avant la réduction, à l'échelon mondial, du niveau de soufre dans le fioul lourd. Ainsi, depuis juillet 2018, tous les navires équipés de moteurs diesel doivent utiliser du carburant à usage maritime appartenant à la catégorie ISO-F-DMA et satisfaire à la norme ISO 8217 – carburant communément appelé Diesel Marine Léger (DML) ou Gazole marin (MGO), dont la teneur maximale en soufre est de 0,1 %. En alternative, ils doivent être équipés d'un système de nettoyage des gaz d'échappement fonctionnant dans un épurateur à circuit fermé. Les systèmes ouverts de nettoyage des gaz sont soumis à une interdiction visant à limiter leur impact sur la biodiversité marine.

La France et l'Italie sont favorables à la mise en place d'une zone de contrôle des émissions en Méditerranée. D'après les prévisions, cela devrait permettre de réduire les SO<sub>x</sub> de 95 %, les MP de 80 %, le carbone suie de 51 % et les NO<sub>x</sub> de 5 % par rapport aux valeurs de 2015-2016.

#### 7.3.1.6 Mesures réglementaires dynamiques – BrennerLEC, Italie

Le projet Life BrennerLEC vise à créer un « corridor à émissions réduites » le long de l'axe autoroutier du Brenner, afin d'obtenir un bénéfice environnemental clair en matière de protection de l'air et du climat, ainsi qu'une réduction de la pollution sonore<sup>56</sup>.

Le projet a débuté en septembre 2016 et deux phases d'essais expérimentaux ont été réalisées

pour vérifier les effets d'une réduction dynamique de la limite de vitesse sur certains tronçons d'autoroute. Les réductions des limites de vitesse s'affichaient sur des panneaux à messages variables positionnés le long de l'autoroute, mettant en place un système semi-automatique de gestion du trafic afin d'évaluer les effets éventuels sur le bruit, la pollution atmosphérique et les flux de circulation. L'application des limites de vitesse était obligatoire dans la première phase des essais, alors qu'elle n'était que recommandée, à des fins environnementales, dans la deuxième phase, obtenant des effets encore significatifs, mais moins importants.

Quoi qu'il en soit, les résultats confirment les impacts positifs de l'application dynamique des limites de vitesse en termes tant d'amélioration de la fluidité du trafic, les jours de grande circulation, que de qualité de l'air. La réduction des concentrations d'oxyde d'azote le long de l'autoroute est cohérente avec la réduction de vitesse enregistrée au cours des séances expérimentales. En particulier, les données expérimentales recueillies avec les limites recommandées ont montré des diminutions d'environ 7 % pour le NO et d'environ 2-3 % pour le NO<sub>2</sub>, avec une réduction moyenne de la vitesse d'environ 5 km/h pour les véhicules légers, contre des réductions de 10 % pour les deux polluants en cas de limites obligatoires entraînant une réduction moyenne de la vitesse d'environ 14 km/h pour les véhicules légers.

### 7.3.2 GESTION DE LA MOBILITÉ

La gestion de la mobilité consiste à promouvoir le transport durable et à gérer les exigences d'utilisation des voitures en influençant les attitudes et les comportements des voyageurs, pour les inciter à passer des transports motorisés individuels à des systèmes de mobilité plus durables. Depuis les années 1990, cette approche attire de plus en plus l'attention, dans le cadre des efforts visant à créer un équilibre entre les exigences de mobilité, leurs impacts négatifs et la qualité de l'environnement dans son ensemble. Dans de nombreux cas, la gestion de la mobilité est également liée à l'aménagement intégré du territoire, cadre dans lequel les questions de mobilité figurent comme les principaux éléments de base pour toute planification spatiale et territoriale au niveau local, régional et national.

L'attrait de la gestion de la mobilité réside dans ses nombreux avantages potentiels, notamment :

56. <https://brennerlec.life/en/home>.



- un trafic moins congestionné, se traduisant par une réduction de la pollution atmosphérique, du bruit et des pertes de temps liées aux embouteillages, ainsi que par une réduction du stress ;
- une plus grande variété de solutions de transport, améliorant l'accessibilité pour tous ;
- une utilisation plus efficace des infrastructures de transport existantes, conduisant à une réduction des dépenses publiques consacrées à des infrastructures inutiles et aux facteurs de coûts externes ;
- une gestion plus efficace de l'utilisation des terres ;
- des économies de coûts pour les collectivités locales, les institutions, les entreprises privées et les particuliers ;
- des styles de vie plus sains et moins stressants, grâce à des modes de transport plus actifs comme le vélo et la marche.

Différents exemples viennent appuyer cette optique, dans différents domaines de mobilité : déplacements entre domicile et travail, entre domicile et école, transports collectifs pour les grands événements, plans de mobilité urbaine durable, y compris la logistique urbaine durable, gestion du stationnement, mobilité active par l'usage du vélo et demande en matière de modes de transport réactifs. Un sous-chapitre traitant spécifiquement de l'interconnexion entre l'aménagement du territoire et la planification de la mobilité peut fournir un aperçu des impacts positifs des procédures de planification intégrée et de leur mise en œuvre.

### 7.3.2.1 Cadre institutionnel pour la mobilité durable à travers un bureau de coordination, Suisse

Un organe spécifique de coordination intersectorielle pour les projets de mobilité durable a été mis en place en Suisse. Chargé de promouvoir et de faciliter des projets innovants pour aider à réduire les émissions liées aux transports, le Bureau de coordination pour la mobilité durable (COMO) est le contact central et point de coordination et le premier interlocuteur au niveau fédéral en matière de mobilité durable. Il soutient des projets innovants par le biais d'une contribution financière et, en tant que plate-forme de connaissances, fournit des informations sur les projets en cours et les projets clôturés. Le COMO est porté par six services fédéraux.

Le COMO soutient une large palette de projets<sup>57</sup>:

- solutions informatiques ;
- partage de la mobilité ;
- mobilité liée aux loisirs ;
- circulation des cyclistes et piétons ;
- transports publics ;
- transport routier privé motorisé plus efficace ;
- trafic de fret et logistique ;
- enfants et jeunes ;
- gestion de la mobilité.

Dans ce contexte, de nombreux exemples existent dans le secteur de la mobilité, comme la création de la « Quality Alliance Ecodrivre » (QAED), initiée en 1999 par l'Office fédéral de l'énergie OFEN et SuisseÉnergie, en tant qu'association de partenaires pour mettre en œuvre de bonnes pratiques de conduite écologique et en tant que multiplicateur de ce type de conduite, chargé de l'instruction des moniteurs d'auto-école et plus précisément des gestionnaires des parcs de véhicules lourds (bus et poids lourds).

Néanmoins, compte tenu des différents facteurs d'émission et des différents types de véhicules impliqués, il n'est pas encore possible d'avoir une idée nette des économies d'émissions effectivement réalisées.

### 7.3.2.2 SuisseMobile - pour des voyages sans voiture à travers le pays alliant tourisme, loisirs, hébergement hôtelier et points d'intérêt, Suisse

SuisseMobile/SchweizMobil est le réseau national lancé en 1998 pour les transports individuels non motorisés, plus particulièrement orienté vers les loisirs et les touristes. Grâce à un planificateur d'itinéraires en ligne et une application smartphone<sup>58</sup> (depuis 2012) liés à des ressources diverses (loisirs d'été et d'hiver, événements culturels, musées, espaces sportifs, etc., et hébergement), il est possible de se déplacer sans voiture, en utilisant les transports en commun (rail, route, téléphérique, bateaux, etc.) et les modes actifs de mobilité à propulsion humaine (vélo, randonnée).

Le planificateur d'itinéraires a été créé et soutenu,

57. <https://www.suisseenergie.ch/tools/projets-como/>.

58. <https://www.schweizmobil.ch/fr/ete.html>.

en tant que fondation, par de nombreuses organisations comme Suisse Tourisme, La Suisse à vélo, Suisse Rando, le Club alpin suisse, l'Inventaire fédéral des voies de communication historiques de la Suisse et d'autres. Le soutien financier est octroyé par la Confédération suisse (depuis différents bureaux fédéraux), par tous les cantons et par la Principauté du Liechtenstein.

Les objectifs sont un tourisme et une mobilité de loisirs sans voiture, basés sur le système très développé de transports publics et sur la mobilité active, et la promotion des régions montagneuses et périphériques de la Suisse en les valorisant par le biais d'attractions touristiques, d'événements culturels et d'activités sportives.

Bien que la contribution de l'initiative à la réduction des émissions soit difficile à évaluer, le nombre de réservations dépasse le million par an.

### 7.3.2.3 Concept de gestion de la mobilité en Carinthie, Autriche

Des entreprises d'environ 3 000 employés sont les principaux employeurs de la région environnant St. Michael ob Bleiburg, en Carinthie orientale. Lorsqu'il est devenu nécessaire d'accroître les activités économiques, il a été décidé d'utiliser la gestion de la mobilité pour inciter les employés à passer de la voiture privée aux transports en commun et au vélo.

Les mesures en matière de mobilité ont été coordonnées par le Verkehrsverbund Kärnten (coopérative d'entreprises de transport public en Carinthie) pour le compte de la province (Land) de Carinthie. En décembre 2017, le service de S-Bahn (trains de banlieue) avait déjà été amélioré, offrant aux employés des liaisons ferroviaires plus nombreuses. Depuis août 2018, un bus électrique circule entre la gare de St. Michael et les sites d'exploitation, qui conduit le personnel jusqu'aux locaux des entreprises. L'e-bus remplace les véhicules diesel des entreprises et, le service faisant partie du réseau de transport public, il est également disponible pour tous types de passagers. Les employés obtiennent des tarifs réduits.

Tous les salariés vivant à distance cyclable de leur lieu de travail ont bénéficié d'améliorations au niveau des connexions et le nombre de places de stationnement pour vélos a considérablement augmenté. De plus, des garages à vélos verrouillables ont été construits à la gare de St. Michael.

### 7.3.2.4 Un système de transports publics plus attractif grâce au transport gratuit des scolaires, aux subventions accordées aux transports publics, à la gratuité des transports en commun pendant le week-end, Bavière, Allemagne

La Bavière a montré des exemples spécifiques visant à réduire la dépendance des personnes à l'égard des véhicules motorisés personnels et à accroître l'attractivité du système de transport public, tant pour les résidents que pour les touristes. L'objectif est une réduction du trafic individuel motorisé, via l'augmentation de l'attractivité du système de transports publics par différents moyens :

- **Offre de transport gratuit pour les scolaires (pour réduire le « taxi parental »).**

Les jeunes auront la possibilité de mieux utiliser les lignes existantes et, afin de réduire encore l'utilisation des véhicules individuels par les parents qui continuent à voiturier leurs enfants, le système de transport public sera renforcé. La complexité et les coûts sont souvent les raisons avancées par les enfants et les adolescents pour expliquer leur faible utilisation des services de transport public existants (autobus) dans leur temps libre. C'est pourquoi cette offre de billets a été développée, avec la société de transport RVO<sup>59</sup>, qui exploite presque toutes les lignes de bus en Haute-Bavière.

Le district de Miesbach a décidé d'autoriser les scolaires ayant un abonnement scolaire valable pour le réseau RVO ou une carte de scolarité en cours de validité à utiliser gratuitement les transports en commun, à partir du 1er novembre 2019, sans restriction d'âge. Le RVO transporte les scolaires et apprentis des districts intéressés sur toutes les lignes de Haute-Bavière. Les titulaires d'un abonnement scolaire RVO et les élèves sans carte d'étudiant RVO mais avec une carte de scolarité en cours de validité doivent acheter un « billet mensuel à 0 € » auprès du conducteur. Pour chacun de ces billets, le RVO reçoit du district un montant net de 11 €. Pour couvrir le district de Miesbach, un montant annuel plafonnant à 23 000 € a été introduit. Les montants relatifs au billet mensuel à 0 € sont attribués exactement aux lignes de bus où le billet a été pris. Le RVO fournit des statistiques trimestrielles sur le nombre d'utilisateurs. Ces billets sont valables toute la journée pendant les vacances, les week-ends et les jours fériés. Les jours d'école, ces billets sont valables à partir de 14h00.

59. RVO : Regionalverkehr Oberbayern, société de bus de Haute-Bavière.



- **Ambitieux dispositif de subventionnement des transports en commun**

Un exemple de démarche visant à réduire la circulation individuelle motorisée et la pollution ambiante et à favoriser l'utilisation des transports en commun est celui de la ville de Sonthofen, qui s'est fixé l'objectif à plus long terme d'accroître l'attractivité des bus de ville (ligne 1 et ligne 2). Ces lignes ont ainsi régulièrement transporté plus de 20 000 passagers au cours de ces dernières années. La ville de Sonthofen promeut son service de bus de ville en offrant des options tarifaires favorables avec une subvention financière d'environ 3,50 € par habitant et par an.

- **Transport gratuit pendant le week-end et les jours fériés**

Afin de réduire l'utilisation de véhicules individuels par les touristes au sein de la municipalité et des communautés locales environnantes, les services publics (Stadtwerke) de Bad Reichenhall offrent des services de transport public gratuit le week-end et les jours fériés pour l'ensemble de la zone de service « Bad Reichenhall, Bayerisch Gmain et Piding ». De nombreuses petites villes de Haute-Bavière (Bad Heilbrunn, Benediktbeuren, Bad Tölz, Wolfratshausen, Lenggries, Jachenau, Kochel am See, Garmisch-Partenkirchen et bien d'autres) ont introduit des transports publics gratuits au niveau local et régional pour les touristes munis d'une carte d'hôte (électronique), évitant ainsi de nombreux trajets individuels en voiture et réduisant l'émission de polluants atmosphériques et de CO<sub>2</sub>. Dans cette région riche en paysages de montagnes, en lacs et en châteaux, les touristes peuvent ainsi se déplacer plus facilement grâce aux transports gratuits en bus et train (« Allgäumobil im Schlosspark »).

Généralement, les touristes qui restent pour la nuit reçoivent une carte d'hôte qui leur permet d'utiliser gratuitement les transports en commun. La zone couverte par la gratuité des transports publics dépend des règlements municipaux. Par exemple, en hiver, à Lenggries, les vacanciers ou les visiteurs à la journée arrivant en train peuvent utiliser le ski-bus gratuit pour les transferts locaux vers les domaines skiables. Les destinations touristiques Garmisch-Partenkirchen, Grainau et Zugspitz Arena tyrolienne offrent à leurs invités la carte Zugspitz Arena Bayern-Tirol, qui permet l'utilisation gratuite de différents bus et autres formes de transport. La carte Zugspitz Arena Bayern-Tirol est soutenue fi-

nancièrement par l'Union européenne au titre d'un projet Interreg.

Avec la carte d'hôte de la région touristique Berchtesgaden-Königssee, les personnes qui passent la nuit sur place voyagent gratuitement sur presque toutes les lignes de la compagnie de cars Regionalverkehr Oberbayern (RVO) et des chemins de fer régionaux Berchtesgadener Land Bahn (BLB) dans la région touristique de Berchtesgaden-Königssee. Les déplacements vers Salzbourg (ligne de bus 840) et Bad Reichenhall (ligne de bus 841) sont eux aussi nettement moins chers avec la carte d'hôte. Cette offre s'applique à presque toutes les lignes du district sud du pays de Berchtesgaden - à quelques exceptions près : pour la ligne « Kehlstein » (bus 849), le bus sur demande « Berchtesgaden » et le bus « Alpine experience » (bus 847), des tarifs spéciaux s'appliquent, tandis que, pour la ligne Rossfeld (bus 848), le ticket est facturé séparément. Pour les voyages à Salzbourg et à Bad Reichenhall, il suffit de payer un petit supplément.

La réduction du trafic et de la pollution environnementale augmente l'attractivité de ces zones pour les touristes et en tant que station climatique. Le territoire offre l'accès par le train et la mobilité par les transports en commun sur place et dans un réseau vaste et bien connecté. Par conséquent, les visiteurs sont de plus en plus nombreux à voyager en train et à utiliser les services de mobilité (gratuits), libérant ces destinations de vacances de la circulation motorisée individuelle et réduisant aussi les problèmes de stationnement.

### 7.3.2.5 Concept de mobilité incluant un projet de train régional - Secteur des transports, Principauté du Liechtenstein

Le Concept de mobilité 2030, mis à jour depuis la stratégie 2015 de planification intégrée du territoire et de la mobilité, met l'accent sur un aménagement du territoire plus rigoureux, en fixant des pôles de développement et de densification pour faire face à des exigences croissantes de mobilité. Il s'attache également à une meilleure utilisation des transports publics (route+rail), en particulier dans le cadre du nouveau projet du train régional (S-Bahn) Liechtenstein-Autriche-Suisse reliant Feldkirch (AT), Schaan (FL), Vaduz (FL) et Buchs (CH), qui recèle un fort potentiel pour transférer les navetteurs de la route au rail<sup>60</sup>.

60. <https://www.mobilitaet2030.li>.

### 7.3.2.6 Promotion du cyclisme à Salzbourg, Autriche

Le cyclisme est l'un des modes de transport les plus économes en énergie et en espace. Une part importante des trajets journaliers en voiture pourraient être effectués en vélo, car plus de 50 % de tous les parcours font moins de cinq kilomètres. Avec une infrastructure adéquate, le vélo est le moyen le plus efficace pour couvrir de petites distances et les cyclistes peuvent généralement suivre la route la plus directe à une vitesse moyenne plus élevée que le transport individuel motorisé.

Salzbourg, la capitale de la province (Land) avec 156 159 habitants, a récemment mis l'accent sur l'amélioration des conditions du cyclisme. Le réseau de pistes cyclables a été progressivement étendu au cours des 30 dernières années ; il comprend actuellement 187 km et plus de 6 000 places de stationnement pour vélos. Plus des deux tiers de toutes les rues à sens unique peuvent aussi être empruntées à contre-sens par les cyclistes. Le vélo est autorisé dans presque toutes les zones piétonnes et voies réservées aux autobus. L'objectif principal de la stratégie cycliste 2025+ est de faire en sorte que le cyclisme représente 24 % du nombre total de déplacements d'ici 2025, soit une réduction de 20 000 trajets en voiture, par jour, à Salzbourg.

Les principales mesures de la stratégie en faveur du cyclisme sont les suivantes :

- développement d'un réseau principal de pistes cyclables sûres et confortables, avec optimisation du service hivernal ;
- introduction du système de location de vélos « S-Bike », avec 50 stations et 500 vélos pour sa première étape ;
- aménagement d'une première « piste cyclable premium » dans la région de Salzbourg jusqu'à Freilassing (Bavière), avec un nouveau pont sur la rivière Saalach, visant à devenir un modèle pour illustrer l'importance que peut aussi avoir le cyclisme pour les connexions entre les communes de l'arrière-pays et la ville ;
- campagnes et relations publiques en faveur d'un développement du cyclisme ;
- utilisation de tous les programmes de financement au niveau fédéral et européen pour augmenter le budget des mesures visant à promouvoir le cyclisme.

L'infrastructure cyclable étant déjà bien aménagée, environ 100 000 trajets par jour se font en vélo dans

la ville de Salzbourg, ce qui représente 20 % de tous les déplacements. Mais, avec une part de 45 %, le nombre de trajets en voiture reste assez élevé, alors que les transports en commun, qui représentent 15 % de l'ensemble des trajets, ont un bon potentiel de croissance. Les 20 % de trajets restants se font à pied.

### 7.3.2.7 Promotion générale de l'utilisation de vélos à la place des véhicules motorisés en Bavière, Allemagne

La réduction du trafic individuel motorisé et de la pollution environnementale augmente l'attractivité de ces zones pour les touristes et en tant que station climatique. Elle réduit également les problèmes de stationnement. Pour encourager l'utilisation des vélos plutôt que des voitures, les municipalités adoptent des approches différentes consistant par exemple à :

- préparer et mettre en œuvre un concept de cyclisme susceptible d'assurer une connexion sûre et bien signalée dans les communes et entre communes ;
- mettre en place de stations de location de vélos ;
- étendre l'infrastructure cyclable.

Exemples :

- Garmisch-Partenkirchen (Bavière) : piste cyclable rapide « Loisachtal » de 33 km entre Murnau et Garmisch-Partenkirchen, réalisée dans le cadre d'un projet de financement intitulé « Protéger le climat par le biais du cyclisme » (Ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature, du bâtiment et de la sûreté nucléaire) ;
- Jachenau (Bavière) : piste cyclable reliant Jachenau à Lenggries ;
- Jachenau (Bavière) : stations de location de vélos offrant parfois des réductions aux titulaires de cartes d'hôte ;
- Sonthofen (Bavière) : entre 2017 et 2019, l'infrastructure cyclable de Sonthofen a été agrandie. D'importantes mesures structurelles ont été mises en œuvre : rénovation de la signalétique au sol, création de bandes de protection aux intersections avec des aires de stationnement, réalisation de tronçons cyclables manquants, construction d'un mini-rond-point, réalisation de places de stationnement dans le centre-ville. De plus, de 2018 à 2020, la Ville de Sonthofen a promu le trafic commercial à faibles émissions en offrant des vélos-cargo à 30 % de leur prix d'achat. L'engagement de la ville de Sonthofen



en tant que commune « pro-vélo » en Bavière a été primé par le ministère bavarois du Logement, du Bâtiment et des Transports le 22 novembre 2019.

### 7.3.2.8 Promotion de la mobilité intelligente par Car Postal Suisse pour augmenter la part modale des transports publics, Suisse

Le plus grand fournisseur suisse de transport public par route promeut des solutions de mobilité intelligente en améliorant la chaîne de mobilité existante pour combler les lacunes existantes et répondre à des besoins spécifiques qui, jusqu'à présent, ne pouvaient pas être satisfaits en raison du facteur coût<sup>61</sup>. Les zones les plus susceptibles de voir augmenter l'utilisation des transports publics sont les zones rurales et les zones touristiques et montagneuses, l'utilisation des transports publics étant généralement déjà très élevée dans les zones urbaines et suburbaines. La démarche consiste à :

- fournir une réponse dynamique en termes de disponibilité des transports publics dans les régions touristiques en fonction des saisons et des conditions météorologiques, permettant de multiplier très rapidement les services de bus pour satisfaire la demande ;
- accroître la qualité de la mobilité dans les petites villes en l'associant à l'approche « village intelligent » (par exemple à Spiez, dans l'Oberland bernois), où se combinent la mobilité, les activités locales, les achats, les services administratifs et les espaces de cotravail ;
- développer une mobilité multimodale pour une transition sans rupture entre les transports publics conventionnels, les transports privés et les taxis (porte à porte).

Cette approche se base sur la coopération entre un grand nombre d'acteurs, ainsi que sur l'intégration dans le programme « Gestion de la mobilité pour les entreprises », mis en place par SuisseÉnergie pour les communes en vue de changer les modèles de mobilité et de comportement à long terme.

### 7.3.2.9 Renforcer la mobilité douce, Principauté de Monaco

La mobilité est l'un des principaux enjeux du gouvernement monégasque, car elle concerne à la fois

le développement durable et la santé publique. Elle joue également un rôle important sur le plan économique. Les principales actions sont axées sur :

- le développement de transports publics urbains « propres » : actuellement, tous les bus de la Compagnie des Autobus de Monaco fonctionnent au diésel, un carburant fossile plus propre. Des expériences sont en cours pour mettre en place un parc d'autobus électriques d'ici 2025.
- le développement de transports multimodaux propres : autopartage électrique sans station d'attache, location de vélos électriques dans toute la Principauté.
- des taux incitatifs pour encourager l'utilisation de parkings situés à l'entrée de la Principauté (environ 15 500 places), combinés à l'utilisation des transports en commun.
- le développement d'un très vaste réseau d'escaliers mécaniques et ascenseurs publics sur tout le territoire pour faciliter les déplacements à pied.
- un soutien financier, lancé en 1994, pour l'achat de véhicules électriques ou hybrides essence/électricité, qui représentent aujourd'hui environ 5 % du parc de véhicules routiers à Monaco.
- le développement d'une « Smart Nation », prévoyant la mise en place de divers capteurs (dont des capteurs de qualité de l'air) offrant une panoplie d'informations directes sur les transports, les activités locales et les indicateurs environnementaux.

### 7.3.3 MESURES TECHNIQUES : CARBURANTS/SYSTÈMES DE PROPULSION ALTERNATIFS

Parmi les mesures techniques, les carburants et les systèmes de propulsion alternatifs innovants occupent une place de plus en plus importante dans les systèmes de mobilité, soutenus par la Directive européenne sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs (2014/94/UE, AFID). En synthèse, les États membres ont élaboré des cadres politiques nationaux pour développer, à l'échéance de novembre 2016, le marché des carburants alternatifs et de leurs infrastructures.

La Directive « établit un cadre commun de mesures visant à déployer dans l'Union européenne des infrastructures destinées aux carburants alternatifs

61. Smart Mobility von PostAuto (<https://www.postauto.ch/de/file/134959/download?token=mElKUth0>).

afin de réduire au minimum la dépendance des transports à l'égard du pétrole et d'atténuer leur impact environnemental » : elle favorise les carburants à faibles émissions tels que l'électricité, l'hydrogène, le gaz naturel comprimé (GNC/Bio-GNC) ou le gaz naturel liquéfié (GNL/Bio-GNL) (Convention alpine, 2018b). Des exemples de promotion de véhicules utilisant des carburants alternatifs, y compris la e-mobilité, au niveau local ou régional, sont fournis par de nombreuses parties prenantes.

### 7.3.3.1 Stratégie énergétique 2050/économies d'énergie, Suisse

Afin de préparer la Suisse aux défis actuels de l'approvisionnement énergétique et aux exigences économiques, environnementales et technologiques de l'avenir proche, le Conseil fédéral a élaboré la Stratégie énergétique 2050, qui devrait permettre à la Suisse de profiter d'une nouvelle position de départ et de maintenir des standards élevés pour ses normes d'approvisionnement. Dans le même temps, la stratégie contribue à réduire l'impact environnemental énergétique du pays.

Cette stratégie a été acceptée en mai 2017 par vote populaire et une première étape de mise en œuvre a débuté en 2018.

La stratégie énergétique 2050 vise à éliminer progressivement l'énergie nucléaire dans le pays et à accroître l'utilisation des énergies renouvelables, tout en réduisant sa dépendance à l'égard des importations. Elle se compose principalement de trois piliers :

- Accroissement de l'efficacité énergétique (bâtiments, transports, industrie, machines/dispositifs) ;
- Accroissement de la part des énergies renouvelables (aussi bien l'énergie hydraulique traditionnelle que les « nouvelles » énergies renouvelables solaire et éolienne) par des mesures de promotion et par l'amélioration du cadre juridique ;
- Élimination progressive de l'énergie nucléaire.

En ce qui concerne le secteur de la mobilité, responsable d'un tiers des émissions de CO<sub>2</sub> et des polluants, l'objectif est de réduire la consommation d'énergie, d'ici 2050, de 44 % pour la mobilité des personnes et de 25 % pour le transport de marchandises.

Différents instruments seront utilisés à cette fin : accroissement de l'efficacité énergétique ; remplacement des systèmes existants par des carburants et des systèmes de propulsion alternatifs ; intégration de la production décentralisée d'électricité renouvelable ; techniques de construction légère et étude des aspects expérimentaux de nouveaux modèles urbains ; réduction de la demande de transport – grâce au développement de nouvelles compétences sociétales et économiques<sup>62</sup>.

Sur la base de l'objectif déclaré de 44 % d'économies de consommation d'énergie, Auto-Suisse, l'association fédérale des importateurs suisses d'automobiles, a également fixé l'objectif ferme de « 10/20 », signifiant qu'en 2020 une sur dix des voitures de tourisme neuves immatriculées en Suisse et au Liechtenstein devra être un véhicule électrique à batterie ou un véhicule hybride électrique rechargeable de manière externe (PHEV). Il s'agit là d'un objectif très ambitieux, vu qu'en 2019 la part de ces véhicules sur l'ensemble des nouvelles immatriculations n'était que de 5,6 %<sup>63</sup>.

### 7.3.3.2 Analyse approfondie de la promotion des modes de transport sans carburants fossiles sur les voies publiques, Suisse

En mars 2019, le Conseil national (Chambre basse du Parlement) suisse a accepté la proposition 19.3000 visant à « Encourager le passage des véhicules de transport public aux énergies propres ». Le Conseil fédéral (le gouvernement) avait préconisé de l'accepter, en particulier afin de mener une analyse complète du rapport coûts-bénéfice des autobus utilisant un système de propulsion alternatif (focus sur les e-bus) et de souligner les mesures de soutien déjà existantes<sup>64</sup>.

Le rapport de proposition se fixe les objectifs suivants : fournir un compte-rendu complet du potentiel actuel et futur et des bénéfices pouvant dériver des systèmes de propulsion alternatifs qui viendraient remplacer les autobus diesel existants ; démontrer de manière transparente les coûts et surcoûts actuels et futurs. Il devra en outre faire état des mesures de soutien existantes et des mesures possibles au niveau national. Afin d'obtenir un résultat largement soutenu et accepté, un groupe de soutien a été mis en place, dans lequel tous les acteurs concernés sont représentés. L'objectif était de mener à terme l'étude de base d'ici juin 2020 et de présenter le rapport de proposition à l'automne 2020.

62. <http://www.scoer-soe.ch/en/home/>

63. <https://www.auto.swiss/politik-themen/alternative-antriebe/>

64. <https://www.parlament.ch/fr/suche#k=Postulat%2019.3000>



L'accent est mis tout particulièrement sur les régions rurales et alpines, où les applications potentielles sont plus réduites et qui doivent faire face à des défis majeurs (conditions météorologiques, différences d'altitude, longues distances, puissance financière limitée, etc.). Le groupe de soutien comprend donc aussi des représentants des sociétés de transport rural (RBS et CarPostal) et de transport alpin (Engadin Bus). Le potentiel d'application technique ainsi que les surcoûts font l'objet d'analyses par grappes portant sur différents itinéraires-types, comprenant aussi des routes rurales et montagneuses difficiles. L'examen des projets pilotes a déjà révélé que le manque de bornes de recharge pour la propulsion électrique (et les infrastructures connexes, c'est-à-dire un approvisionnement suffisant en électricité) est, dans les régions rurales et alpines, un problème sérieux qui devra également être abordé.

### 7.3.3.3 Promotion de l'e-mobilité, Bavière, Allemagne

#### Conversion du parc municipal de véhicules en voitures électriques ou hybrides

L'objectif de cette politique est de remplacer par des voitures électriques ou hybrides les véhicules municipaux actuels, équipés de moteurs à combustion. À titre d'exemple, depuis 2016, la ville de Sonthofen (Bavière) renouvelle continuellement de cette manière sa flotte de véhicules. Des véhicules à propulsion électrique remplacent les véhicules équipés de moteurs à combustion mis au rebut. Cette démarche intéresse tant les voitures de passagers que les véhicules utilitaires. Trois véhicules anciens ont déjà été remplacés par des modèles électriques. L'électricité alimentant les véhicules électriques provient de sources renouvelables certifiées à 100 % (hydroélectricité de la région alpine).

Les véhicules sont rechargés dans une station de recharge pour véhicules municipaux (bornes murales). La grande majorité des déplacements professionnels ont lieu dans la zone urbaine. L'autonomie des véhicules électriques suffit à cet effet. Les e-véhicules sont pratiquement exempts d'émissions sur la route et réduisent la pollution sonore dans le centre-ville, et ils sont aussi nettement moins chers d'utilisation que les véhicules conventionnels comparables.

La conversion est financée par le Ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature et de la sécurité nucléaire (BMU) dans le cadre de l'Initiative nationale pour le climat, sur la base d'une résolution du Parlement fédéral allemand.

#### Offre municipale d'autopartage électrique et installation de nouvelles bornes de recharge

Grâce à un système attrayant d'autopartage électrique municipal, neutre en CO<sub>2</sub>, les citoyens, mais aussi les entreprises et les commerces locaux, seront incités à ne plus utiliser de voitures secondaires. Il en résultera un avantage considérable en termes d'économies (environ 2 000 € par voiture et par an), de réduction du stock de voitures secondaires dans la commune et de réduction du nombre de véhicules équipés de moteurs à combustion.

La ville de Fischbachau (Bavière) favorise l'e-mobilité en installant de nouvelles stations de recharge pour les véhicules électriques.

Une autre approche consiste à améliorer, grâce à des « infrastructures de recharge intelligentes », l'utilisation des voitures électriques (à la place des voitures équipées de moteurs à combustion). Garmisch-Partenkirchen (Bavière) a participé, en tant que commune-modèle, au projet « infrastructure de recharge intelligente » financé par l'Etat de Bavière entre 2011 et 2016. L'objectif était de développer un dispositif sans barrière (possibilité de disposer de différentes options de recharge ; mise en réseau de différentes infrastructures de recharge ou de solutions autonomes, etc.), équipées d'interfaces permettant l'intégration dans un système municipal de réseau intelligent, avec des processus et des flux de données inter-système.

Dans la ville de Sonthofen, il est possible, depuis 2011, de recharger les voitures électriques aux bornes de recharge publiques, situées dans le centre-ville. Sonthofen s'emploie à étendre et moderniser constamment son infrastructure de recharge. Certaines places de parking dans le centre-ville sont réservées aux e-véhicules et neuf bornes de recharge modernes sont disponibles pour le public à Sonthofen, ce qui dépasse la recommandation de la Directive sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs. Dans ce cadre, la ville de Sonthofen travaille en étroite collaboration avec la société « Allgäuer Kraftwerke ». La construction a été soutenue par le Ministère fédéral des transports et des infrastructures numériques (BMVI) sur la base d'une résolution du Parlement fédéral allemand.

Pour les districts ruraux des arrondissements du Pays-de-Berchtesgaden et de Traunstein, un concept d'électromobilité soutenu par le Ministère fédéral des transports et des infrastructures numériques a été développé pour renforcer l'électromobilité dans la région. Il se concentre sur la conception d'une infrastructure de recharge haute puissance, calibrée sur les besoins et desservant les locali-

tés centrales et les destinations touristiques, et destinée aux employeurs, aux hôtels et aux zones résidentielles comprenant des immeubles d'habi-

tation. En conséquence, le nombre et les emplacements des bornes de recharge ont été définis pour les 50 communes.

### 7.3.4 ÉVOLUTION DU TRANSPORT ROUTIER DE MARCHANDISES

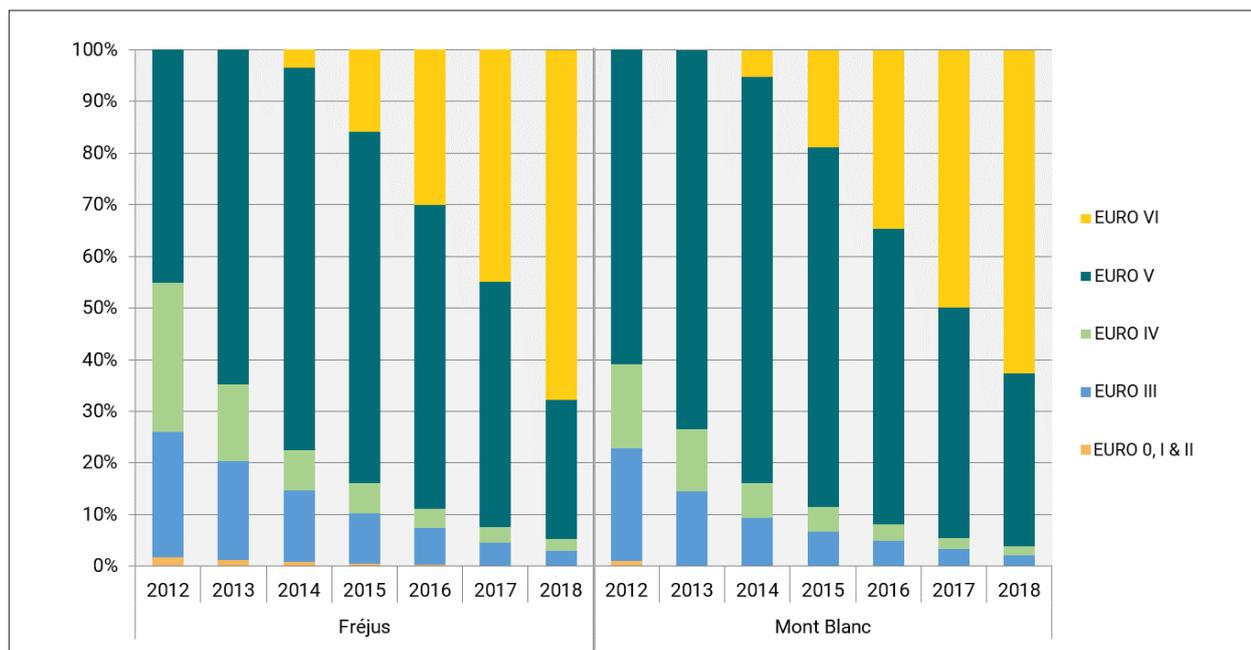
Le président du groupe de travail Transports de la Convention alpine a analysé les tendances concernant le transport routier de marchandises dans les Alpes.

En termes de pollution de l'air, les normes Euro ont mené à une amélioration incontestable au niveau de la route. Les statistiques des deux tunnels franco-italiens sont affichées sur la figure 38.

Vu le rythme du renouvellement du parc de poids lourds, on peut raisonnablement supposer que, d'ici cinq ans, tous les poids lourds en circulation sur les routes transalpines respecteront la norme Euro VI et qu'ils seront bientôt suivis par les poids lourds qui pratiquent le cabotage. Cela représenterait une amélioration d'environ 25 % des émissions de NO<sub>x</sub> et de MP. La part d'Euro VI est encore plus élevée en Suisse et Autriche, ce qui réduit donc leurs possibilités d'amélioration.

À moyen terme, les perspectives sont évidemment plus ouvertes et il faut interpréter des « signaux faibles ». L'électrification des poids lourds n'est plus un objectif irréalisable. Des analyses récentes du ministère français de la transition écologique et solidaire indiquent que, pour le transporteur, le coût (en tonne.km) d'un camion électrique de 40 tonnes est actuellement proche de celui d'un camion diesel, alors que les camions électriques revenaient beaucoup plus chers en 2017. L'hypothèse de produire des batteries de 300 Wh/kg en 2025/2030 et des batteries de 400/500 Wh/kg en 2040 semble raisonnable. Dans un tel scénario, un bloc-batterie de 4 tonnes assurerait à un semi-remorque une autonomie de 800 km et ouvrirait ainsi le marché transalpin.

Dès lors, la principale pollution résiduelle locale du trafic routier serait celle produite par l'abrasion des pneus sur la route et par les résidus de frein. En France, on estime qu'elle représente au moins 40 % de la pollution particulaire émise par le trafic routier. Même si le parc de camions devait être entièrement électrifié, cette nuisance resterait. Néanmoins, on peut s'attendre



**Figure 38** : Observation et analyse des flux transalpins de transport de marchandises dans deux tunnels transalpins. Les classes de Euro 0 à Euro VI sont les limites d'émission de l'UE pour les poids lourds : le niveau de NO<sub>x</sub>, par exemple, a baissé de 14,4 g/kWh à 0,4 g/kWh entre Euro 0 et Euro VI (Alpine Traffic Observatory).



à ce qu'elle diminue, et ce pour au moins deux raisons : la première est que le freinage d'un véhicule électrique est lui-même en partie électrique, sans contact ; la deuxième est l'existence de recherches technologiques prometteuses (revêtement biodégradable des pneus, aspirateur pour particules devant les freins, etc.).

Il est certain que les contraintes législatives en termes de pollution atmosphérique et de pollu-

tion mondiale se resserreront. Après l'Euro VI, une norme Euro VII est en cours de préparation, dont l'application est prévue d'ici 2025. On peut donc s'attendre, avec une plus grande diffusion de la traction électrique pour les poids lourds, présumée économiquement profitable, à une réduction à moyen terme des deux tiers de la pollution particulaire par rapport à la norme Euro VI, ce qui constituerait un quart de la pollution actuellement produite par le fret routier.

## 7.4 PLANIFICATION INTÉGRÉE : PLANIFICATION DE LA MOBILITÉ ET AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

Le lien entre la planification de la mobilité et l'aménagement du territoire ou l'utilisation des sols est fondamental pour les futures exigences en matière de transport, tant privé que public, de passagers que de fret. Quelle que soit la région géographique, les processus de planification intégrés à tous les niveaux administratifs (locaux, régionaux, nationaux, supranationaux) contribuent à un système de mobilité efficace permettant d'économiser au maximum les ressources naturelles et de limiter les impacts négatifs sur l'environnement et la santé.

La Directive UE sur la qualité de l'air exige l'établissement de plans d'action sur la qualité de l'air dans les zones affichant des dépassements des limites fixées. En Suisse, au titre de l'Ordonnance fédérale sur la protection de l'air et de la loi sur la protection de l'environnement, chaque canton est tenu de fournir un plan d'action pour la qualité de l'air. Dans le périmètre de la Convention alpine, tous les cantons ont adopté un tel plan. Généralement, un plan d'action sur la qualité de l'air décrit les sources d'émission responsables des dépassements et contient des mesures pour les réduire ou les éliminer. En outre, il quantifie l'effet des différentes mesures et fixe des délais à respecter pour ordonner et appliquer leur mise en œuvre.

### 7.4.1.1 Projet de territoire Suisse, Suisse

Le projet de territoire Suisse (publié en 2012) énonce les principaux objectifs suivants en matière de transport et de mobilité :

- La Suisse exploite un système de transport durable, sûr et fiable pour le trafic de passagers et de marchandises.

- Les coûts d'exploitation, d'entretien et de renouvellement sont abordables.
- La population et l'économie de la Suisse bénéficient d'une bonne accessibilité au niveau international et régional, ce qui renforce la compétitivité régionale et la cohésion du pays.
- Le système de transport favorise le développement des établissements humains dans les zones internes et réduit l'impact négatif de la mobilité sur la qualité de vie, la consommation d'énergie et le paysage.
- La population suisse bénéficie de courtes distances à parcourir entre le travail, la vie et les loisirs.
- La présence de centres ruraux bien implantés, avec un tissu d'entreprises, contribue à réduire les déplacements de navetteurs.
- Dans les procédures de planification, les pôles de développement devraient concentrer dans des sites appropriés les nouveaux lieux de travail, entreprises, écoles et activités de sport et de loisirs, afin de réduire la mobilité et de la concentrer sur les infrastructures de transport existantes (et étendues), ainsi que pour éviter l'étalement urbain et de nouvelles demandes de mobilité intéressant les transports privés et publics.

Aux différents niveaux de planification (locale, régionale et nationale), les nouveaux projets d'aménagement portant sur des espaces à affecter au logement, aux entreprises, aux lieux de travail, aux centres commerciaux, aux activités de sport et de loisirs avec des installations de transport intensif (> 2000 déplacements de voitures/jour) nécessitent avant l'approbation du projet un plan de mobilité *ex ante* spécifique qui prenne en compte l'exigence d'assurer la plus grande part de la mobilité par des modes de transport durables, par exemple transports publics ou mobilité douce (vélo + marche). La plupart de ces projets à forte intensité de transport s'appuient sur des « modèles de pondération des trajets », dans lesquels le chef de projet établit la

répartition modale de la demande de transport générée par le projet entre les modes publics et privés, principalement par l'extension des transports publics (au niveau d'infrastructure et d'exploitation), la mobilité douce et les déplacements additionnels de voitures privées. La somme des émissions supplémentaires modélisées générées par les transports et de la pollution ambiante existante doit rentrer dans les plafonds définis par l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air (OPair)<sup>65</sup>.

Dans une convention entre le chef de projet/investisseur et les autorités locales ou régionales concernées, la part modale calculée est surveillée et soumise à un système de bonus/malus selon que les chiffres sont atteints ou non. Depuis 2001, année de son introduction, le modèle bernois de pondération des trajets est utilisé comme instrument de planification par de nombreuses municipalités. En tant qu'étape de suivi, les règles de base de ce modèle ont été intégrées dans les plans cantonaux d'aménagement du territoire et de planification de la mobilité (planification cantonale).

Le gouvernement fédéral, les cantons, les villes et les municipalités coordonnent la planification de l'infrastructure de transport avec leurs idées de développement spatial.

Le *Concept spatial suisse*<sup>66</sup> est particulièrement recommandé pour le développement spatial dans les Alpes :

- Pour promouvoir le développement durable des vallées latérales, caractérisées par un paysage typique.
- La population résidente doit rester dans les zones encore fonctionnelles des vallées latérales.
- Cela exige que soit garantie, dans les zones touristiques et les centres ruraux alpins, une disponibilité de base suffisante en biens, services et emplois.
- Les stratégies régionales de développement spatial doivent être fondées sur ces priorités.
- L'objectif est d'atteindre une combinaison optimale du tourisme naturel et culturel, de l'agriculture et du commerce.
- Les paysages culturels traditionnels, avec leurs formes typiques de peuplement et leur histoire en matière de trafic, doivent être soigneusement préservés et développés.

#### 7.4.1.2 Plan intégré de protection de l'atmosphère, France

En France, certaines régions sont considérées comme sensibles à la pollution atmosphérique et des plans d'action supplémentaires y sont mis en œuvre pour améliorer la qualité de l'air. Dans les Alpes, le meilleur exemple en ce sens est la vallée de l'Arve. Du fait de la topographie de la région, la pollution de l'air constitue un problème pour ses habitants. Aussi un plan de protection de l'atmosphère<sup>67</sup> est-il en place depuis 2012. Tous les 5 ans, des évaluations sont réalisées et un nouveau plan est mis en œuvre. Le plan approuvé en 2019 comprend des actions locales telles que :

##### Énergie :

- « Fonds Air Gaz » : financement aux particuliers pour qu'ils remplacent leurs dispositifs de chauffage au bois par des appareils au gaz naturel, qui émettent beaucoup moins de matières particulaires.
- Interdiction d'utiliser des foyers ouverts (importants émetteurs de MP) : par décret.
- Développement de la production de biogaz : développer l'exploitation de différents types de déchets pour produire de l'énergie verte.

##### Agriculture :

- Formation des agriculteurs aux bonnes pratiques pour réduire les émissions de polluants : information et éducation des agriculteurs quant à leur impact sur la qualité de l'air et aux méthodes nouvelles ayant un impact minimal.

##### Urbanisme :

- Prise en compte de la qualité de l'air dans le cadre de l'aménagement urbain afin d'encourager la création de pôles urbains compacts et le développement de réseaux de chauffage.

##### Transports :

- Promotion de l'écoconduite et du covoiturage : promouvoir un réseau de parkings de covoiturage, si possible à des échelles plus adaptées aux zones moins peuplées ; développer une plateforme de connexion pour les covoitureurs.
- Amélioration de la capacité et l'efficacité des transports publics et promotion de la mobilité active.

65. <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19850321/index.html>.

66. <https://www.are.admin.ch/are/fr/home/developpement-et-amenagement-du-territoire/strategie-et-planification/projet-de-territoire-suisse.html>.

67. [https://www.haute-savoie.gouv.fr/content/download/15754/92617/file/ppa\\_20120305.pdf](https://www.haute-savoie.gouv.fr/content/download/15754/92617/file/ppa_20120305.pdf).



- Augmentation du transfert de marchandises de la route au rail en réduisant la charge de trafic sur les routes de la région.

#### 7.4.1.3 Programme commun régional pour l'air pur concernant différents secteurs, par exemple celui des transports, Italie

Les régions et les villes du nord et du centre de l'Italie, densément peuplées et fortement polluées, coopèrent dans le cadre d'un programme commun pour la qualité de l'air dénommé Life PrepAir<sup>68</sup>. Ce programme, cofinancé par l'Union européenne et opérationnel de 2017 à 2024, est dirigé par la Région Emilie-Romagne, avec 17 partenaires. Les actions envisagées portant sur les secteurs suivants : l'agriculture, la combustion de biomasse, les transports, l'énergie, l'évaluation des émissions, la communication et le renforcement des capacités.

Les principales actions intéressant le secteur des transports sont les suivantes :

- **Promotion de la mobilité active/cyclisme**

Les partenaires impliqués dans le projet favorisent la mobilité active et à vélo à travers différentes actions calibrées sur les différentes spécificités en matière de territoire et de planification. Celles-ci comprennent notamment : des cours de formation dispensés aux agents publics, aux citoyens et aux étudiants afin de changer et d'améliorer la planification et l'utilisation de la cyclo-mobilité ; enquête sur la disponibilité d'infrastructures pour cycles dans les gares ; amélioration des infrastructures pour cycles ; géo-suivi des pistes cyclables et navigateurs de vélos ; analyse de la répartition modale.

- **Action de démonstration pour la conversion du diesel à la propulsion électrique**

Après sélection de la plus longue ligne de bus sur le territoire intéressé par le projet, une étude de faisabilité sera conduite sur le réaménagement d'un bus diesel et la production d'un prototype de système de propulsion électrique modulaire adapté aux autobus urbains, à tester sur un parcours réel et opérationnel emprunté par les transports publics.

- **Rationalisation de la logistique du fret à courte distance dans les zones urbaines et périurbaines**

Il s'agira de rationaliser la logistique du fret à courte distance à la fois en zone urbaine, principalement dans les centres-villes, et en zone extra-urbaine et périurbaine, en définissant le modèle logistique le plus répandu et en menant une étude pilote pour le chargement/déchargement des marchandises.

- **Développement d'instruments TIC dans les transports publics**

L'action proposée vise à concevoir et à développer un nouvel outil multimodal de planification d'itinéraires « ouvert » et intégré destiné aux services de transport public régionaux et utilisable via web et appli.

- **Promotion générale de la mobilité électrique**

Contacts avec les acteurs publics et privés dans une optique de collaboration/information afin de renforcer la diffusion de la mobilité électrique, y compris au niveau des politiques. Des cours seront organisés pour les administrateurs locaux, les professionnels et les gestionnaires de mobilité, ainsi que des consultations et des études.

- **Education à l'écoconduite**

Le style de conduite désigné comme « écoconduite » peut contribuer à réduire la consommation de carburant et les émissions des véhicules, largement tributaires du comportement des conducteurs. Cette action, destinée aux chauffeurs d'autobus et de taxi et aux auto-écoles, comprend un programme de cours d'écoconduite, le développement et l'adoption de solutions technologiques, l'intégration de l'écoconduite dans les programmes des auto-écoles et les tests de conduite.

## 7.5 RÉDUCTION DES ÉMISSIONS D'AMMONIAC PROVENANT DE L'AGRICULTURE DANS LES ZONES DE MONTAGNE

### 7.5.1.1 Réduction des émissions d'ammoniac provenant de l'agriculture, Suisse

Dans le cadre de sa politique agricole 2014-2017, la Suisse s'était fixé l'objectif de réduire les émissions d'ammoniac générées par l'agriculture à un maximum de 41 000 t d'azote par an avant fin 2017. Dans

68. <https://www.lifepreparepair.eu/?lang=en>.

un message concernant un arrêté fédéral sur les moyens financiers destinés à l'agriculture pour les années 2018 à 2021, il a été indiqué qu'il convenait de poursuivre les objectifs intermédiaires énoncés dans la politique agricole 2014–2017 à réaliser d'ici 2021. L'objectif environnemental non programmé vise un plafond d'émissions de 25 000 t d'azote par an.

L'agriculture représente 93 % de toutes les émissions d'ammoniac en Suisse. De loin, la plus grande part (93 %) provient de l'élevage, principalement de l'élevage bovin (78 %). En Europe, la Suisse occupe la deuxième place après les Pays-Bas en matière d'émissions d'ammoniac par hectare de terres agricoles. Ces émissions élevées sont la conséquence de la pratique, répandue en Suisse, des étables à ciel ouvert et, plus encore, de la forte concentration de cheptel. Entre 1990 et 2015, les émissions d'ammoniac agricole en Suisse ont baissé de 18 %, principalement en raison de la réduction de la quantité de bétail entre 1990 et 2000 de presque 115 000 têtes de bétail, pour un cheptel résultant d'environ 1 337 000 unités. Depuis lors, les émissions ont stagné à un niveau élevé. Entre 2007 et 2017, le nombre de têtes de bétail n'a baissé que de 1,8 %, alors que, pour se rapprocher de l'objectif d'émissions de 41 000 t par an d'ici 2017, il aurait dû baisser de plus de 130 000 unités (environ 10 % du stock de 2007) pendant cette même période.

Afin de réduire l'impact des émissions d'ammoniac sur l'environnement et sur la qualité de l'air, le gouvernement fédéral a soutenu des projets cantonaux sur les ressources avec des contributions versées de 2008 à 2018 dans le cadre du programme Ressources. Depuis 2014, des mesures spécifiques ont été soutenues dans l'ensemble du pays par le biais de contributions à l'efficacité des ressources. Les mesures promues concernent en particulier le stockage et l'épandage du fumier, l'adaptation structurelle des étables, par exemple pour permettre à l'urine de s'écouler rapidement, et une alimentation équilibrée ou à teneur réduite en protéines.

Toutefois, au cours de la période pendant laquelle la Confédération a soutenu des mesures de réduction de l'ammoniac, les émissions n'ont diminué que de 2 % environ, du fait de l'importance du cheptel et l'exigence socialement imposée de respecter le bien-être animal (voir aussi la section 4.4). En outre, les mesures en matière d'alimentation et d'utilisation de pendillards ne sont que relativement utiles

ou réalisables, notamment dans les zones montagneuses. Une ration alimentaire équilibrée, avec de faibles excédents de protéines brutes, exige un approvisionnement en aliments riches en énergie, comme le maïs provenant de la vallée. Mais cela n'a qu'une utilité limitée, compte tenu des itinéraires de transport. Quant à l'épandage du lisier par des pendillards, qui permet une application à proximité du sol et donc une réduction des émissions, il n'est plus possible quand la pente dépasse un certain angle. Bien que les zones de montagne produisent moins d'émissions par rapport aux basses terres, la question se pose de savoir quel type d'élevage pollue le moins leurs écosystèmes sensibles.

Mettre exclusivement l'accent sur les mesures techniques et les mesures de construction ne rend pas justice à la situation des régions montagneuses. C'est une approche holistique qui est nécessaire, qui prenne en compte non seulement les mesures techniques, mais aussi les questions relatives aux ressources fourragères disponibles et à la capacité de charge des écosystèmes. La qualité de l'air est protégée dès lors que l'on adapte le nombre d'animaux à la sensibilité de l'environnement naturel. La pratique répandue du pâturage, en particulier dans les zones montagneuses, est une autre mesure importante pour réduire l'ammoniac : l'urine s'infiltre rapidement dans le sol et il y a moins de perte d'ammoniac que dans les étables. Si, en plus de cela, des pendillards peuvent être utilisés pour épandre le lisier, le fumier est entreposé à couvert et la propreté des zones de marche et de repos dans l'étable assurée, les émissions d'ammoniac et leurs effets sur les écosystèmes sensibles peuvent être considérablement réduits.

Le facteur le plus important pour les émissions d'ammoniac dans l'agriculture est le nombre d'animaux d'élevage. Si ce nombre stagne, voire augmente, il sera difficile de réduire les émissions d'azote et d'ammoniac. En outre, la réduction des émissions d'ammoniac dans l'agriculture se heurte en partie aux aspects concernant le bien-être animal, du fait que les étables à ciel ouvert contribuent au bien-être des animaux, mais entraînent également des pertes d'ammoniac plus élevées. Concilier les exigences sociétales concernant le nombre d'animaux, leur bien-être et la protection de l'environnement reste un défi auquel les décideurs politiques doivent faire face.

## 8. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS STRATÉGIQUES

### 8.1 RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE PARTICULES (BAP COMPRIS) DUES A LA COMBUSTION DU BOIS

Le Chapitre 5.2 a mis en évidence que les concentrations de MP, en particulier de MP<sub>2,5</sub>, y compris le BaP, restent préoccupantes pour de nombreuses régions alpines, bien que la tendance décrite dans le chapitre 5.3 indique une diminution des concentrations de MP<sub>10</sub> et de MP<sub>2,5</sub> au cours de la dernière décennie. La combustion du bois est une source majeure de concentrations de matières particulaires, contribuant massivement aux valeurs critiques de la qualité de l'air ambiant dans l'atmosphère alpine, comme le démontrent des programmes de recherche spécifiques et comme discuté dans le chapitre 3.2.1.

Pour atténuer ce problème, il est proposé d'élaborer des campagnes de mesures, visant à mesurer les émissions des petites sources domestiques et à surveiller les MP<sub>2,5</sub> et le BaP, afin d'informer les habitants des Alpes quant aux options techniques et opérationnelles susceptibles de réduire les émissions ; et de mettre en place des actions de soutien pour réduire davantage encore les émissions de particules et de BaP. Dans certaines zones affichant des niveaux élevés de pollution particulaire, des législations plus strictes devraient être introduites, sur base volontaire, pour la région alpine, telles que des valeurs limites d'émission plus strictes pour les nouveaux appareils, des contrôles plus sévères des appareils existants et des combustibles utilisés, des campagnes d'information, des formations sur la manière adéquate de manipuler les appareils, etc.

#### 8.1.1 MESURES ET INFORMATIONS

Les campagnes d'information sur les impacts sur la santé des matières particulaires et du BaP et sur les formes appropriées de chauffage au bois devraient se baser sur la possibilité de mesurer les émissions de MP et leurs sources et de mettre ces informations à la disposition du public. La mesure

des émissions devrait être assortie de campagnes de surveillance pour les MP<sub>2,5</sub>, le BaP et le carbone suie sur au moins une saison de chauffage. Les informations à l'intention des citoyens doivent s'appuyer sur des mesures adaptées aux caractéristiques physiques et géographiques de l'espace alpin : différents reliefs et spécificités météorologiques, différents types d'implantation humaine, saison de chauffage plus longue et différentes sources de pollution atmosphérique (chaudières individuelles, trafic, industrie, etc.). Pour ce qui est de la situation topographique et climatique et de la distribution hétérogène de la population et des sources d'émission dans les zones alpines, la sélection des points de surveillance devrait tenir compte des différents types de zones et inclure des points de surveillance du carbone suie.

#### RECOMMANDATION 1

Soutenir les organisations concernées afin de :

- mesurer in situ les particules fines et en particulier le benzo[a]pyrène provenant des poêles et chaudières à bois ;
- informer la population de l'incidence de la combustion du bois de chauffage sur la santé.

#### 8.1.2 SOUTENIR LA MISE À NIVEAU DES SYSTÈMES DE CHAUFFAGE A PETITE ÉCHELLE

Sur la base d'un diagnostic spécifique, la possibilité devrait être offerte à tous les opérateurs et les particuliers de moderniser techniquement leurs anciens dispositifs de chauffage au bois ou au fioul ou de les remplacer par des dispositifs de chauffage techniquement récents et modernes, à faibles émissions. Dans les assez grandes implantations, villes ou villages, la faisabilité de chaufferies communales devrait être étudiée, car les systèmes de chauffage centralisés modernes garantissent généralement un approvisionnement en énergie propre, sont généralement plus économes en énergie et génèrent des taux moins élevés d'émissions.

## RECOMMANDATION 2

Réduire les émissions du chauffage domestique en améliorant les performances énergétiques globales des bâtiments et en remplaçant les dispositifs de chauffage par des appareils à faibles émissions, à travers le support et l'appui à tous les opérateurs en matière :

- d'amélioration des performances énergétiques des bâtiments ;
- de remplacement des dispositifs de chauffage et chaudières anciens et fortement polluants ;
- de remplacement des combustibles traditionnels par des combustibles plus propres.

## 8.2 PROMOUVOIR UNE MOBILITÉ PROPRE

Comme le montrent les chapitres précédents de ce rapport, notamment le chapitre 3.2, la concentration du trafic dans les vallées et les villes alpines reste une source majeure de pollution atmosphérique pour les personnes vivant à proximité des routes principales. Les exemples présentés au chapitre 7.3 montrent que les Parties contractantes à la Convention alpine s'emploient déjà à réduire la pollution atmosphérique en s'appuyant sur la mobilité active, des zones à circulation restreinte, la promotion des transports en commun, l'introduction de limites de vitesse et l'utilisation de nouvelles technologies. Ce partage d'expériences incite tous les pays à tirer des leçons des expériences de leurs partenaires, à personnaliser les solutions proposées, à diffuser des campagnes d'information et de sensibilisation et enfin à les mettre en œuvre. Des solutions sont disponibles à plusieurs niveaux, du niveau UE et national aux communautés locales. Dernier élément, mais non des moindres, la plupart de ces actions ont également des effets positifs en matière d'atténuation du changement climatique.

### 8.2.1 ADOPTER DES POLITIQUES DE MOBILITÉ AMBITIEUSES

Les villes, les districts et les régions sont encouragés à utiliser les outils disponibles (cartographie et modélisation de la qualité de l'air, évaluation de l'effet, sur la qualité de l'air, du passage aux modes

actifs etc.) pour démontrer le lien existant entre les choix de mobilité, la pollution atmosphérique et la santé humaine. Des discussions et des débats avec les citoyens concernés à propos de l'usage de ces outils pourraient s'avérer utiles pour proposer et mettre en œuvre des solutions ambitieuses et surveiller leurs avantages pour tous. Des initiatives de mobilité faisant usage d'un ensemble cohérent de mesures, couplant des incitations réglementaires et financières ou fiscales et des restrictions dans les politiques de transport tant des passagers que des marchandises, adoptées après concertation et évaluation environnementale, pourraient contribuer à ce que les souhaits et les besoins deviennent des politiques publiques.

## RECOMMANDATION 3

Après concertation et évaluation environnementale, adopter des initiatives régionales et locales de mobilité pour le transport de passagers et de marchandises en favorisant les transports en commun et les modes actifs, tout en couplant incitations et restrictions lorsqu'un impact important sur la qualité de l'air est attendu.

### 8.2.2 INVESTIR DANS LE TRANSPORT PROPRE

Des systèmes de transport public intelligents, des outils numériques permettant de les utiliser sans accroc, des applications pour smartphones, l'intégration des transports en commun dans des systèmes de mobilité multimodale, ainsi que de nouvelles technologies tendant vers des véhicules zéro émission sont déjà disponibles et vont encore s'améliorer. Leur développement dépend de signaux du marché que l'on peut accélérer en utilisant, par exemple, un ensemble cohérent de systèmes de financements publics, de législation ou de dispositifs fiscaux basés sur les coûts réels, conçus pour promouvoir une mobilité propre. Dans le cadre des politiques nationales ou régionales, y compris la promotion de solutions de transport combinés en-dehors du champ d'application de la Convention alpine, mais ayant un impact à l'intérieur de la région alpine, ces outils sont recommandés pour favoriser l'adoption rapide de solutions intelligentes, ainsi que pour fournir les conditions permettant aux solutions innovantes de pénétrer sur le marché.



#### RECOMMANDATION 4

Promouvoir une stratégie de mobilité propre et de véhicules zéro émission, par exemple en utilisant un système équilibré de taxation et d'incitations pour internaliser les coûts externes de la pollution dans les coûts réels du transport, et renforcer les signaux du marché en faveur d'une mobilité propre et de véhicules zéro émission.

#### RECOMMANDATION 5

Promouvoir l'utilisation de la gestion intelligente du trafic, par exemple des limites de vitesse, de la tarification routière, de la favorisation des véhicules propres sur les autoroutes et tunnels alpins, pour réduire les émissions, ainsi que :

- encourager la mise en œuvre de technologies de transport alternatif et de transport combiné ;
- intégrer les transports publics dans les systèmes de mobilité multimodale ;
- créer des incitations pour le transfert modal du transport de passagers et de marchandises.

### 8.3 RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE L'AGRICULTURE

Comme le montrent les chapitres précédents, l'agriculture n'est généralement pas la principale source de pollution de l'air dans les Alpes. Néanmoins, le chapitre 3.2 montre que, dans certaines zones d'agriculture intensive, sa contribution n'est pas négligeable. Le chapitre 4.4 illustre le fait que les charges critiques d'azote déposées dans l'atmosphère peuvent être dépassées dans certaines régions des Alpes.

#### RECOMMANDATION 6

Recommandation 6: Soutenir le développement de bonnes pratiques agricoles limitant les émissions de composés azotés, comme l'ammoniac, et la combustion à ciel ouvert des déchets verts et des résidus de coupe dans la région alpine.

### 8.4 POLITIQUES SUR LA QUALITÉ DE L'AIR

Les Parties contractantes de la Convention encouragent toutes les initiatives contribuant à l'amélioration de la qualité de l'air dans les Alpes. La cohérence de ces initiatives doit être abordée à plusieurs niveaux. Au sein des différents pays, il est important que toutes les communautés bénéficient d'une bonne qualité de l'air, étant donné que les inégalités sociales sont souvent liées aux inégalités environnementales<sup>69</sup>.

#### 8.4.1 METTRE EN PLACE DES INITIATIVES DE QUALITÉ DE L'AIR DANS LES ALPES

L'objectif est d'encourager la prise d'initiatives par les décideurs locaux et régionaux. Ceci pourrait aussi contribuer à une meilleure compréhension des différences et à l'élimination des inégalités en matière de mobilité, de pollution de l'air et de logement. La mise en place de plans de qualité de

#### RECOMMANDATION 7

Les Parties contractantes de la Convention alpine sont encouragées à mettre en place des initiatives pour la qualité de l'air intégrant des mesures visant à s'attaquer à leurs principales sources de pollution atmosphérique comme le chauffage domestique, la mobilité, l'énergie, l'industrie et l'agriculture.

69. Par exemple, il est plus facile de marcher ou de faire du vélo pour les personnes qui peuvent se permettre de vivre près des infrastructures urbaines que pour les personnes vivant dans les banlieues, où les coûts de logement sont inférieurs.

l'air est une obligation résultant de la législation de l'UE pour les zones où les limites de concentration fixées par la Directive 2008/50/CE sont dépassées. La Convention alpine souhaite encourager les initiatives additionnelles s'inspirant des lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air.

#### 8.4.2 ÉTENDRE L'UTILISATION DES CRITÈRES DES CONVENTIONS D'ESPOO ET CPATLD

La Convention sur l'évaluation de l'impact environnemental dans un contexte transfrontière, adoptée à Espoo, en Finlande, en 1991 (CEE-ONU 1991), requiert de ses parties la prise de mesures appropriées pour prévenir, réduire et contrôler les effets transfrontières négatifs de leurs activités. Cet aspect est déjà inclus dans le droit européen grâce à la Directive 85/337/CEE du Conseil du 27 juin 1985 concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement (v. art. 7) et dans la Directive 2001/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 juin 2001 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement (v. art. 7). La pollution des Alpes peut cependant aussi provenir de l'extérieur de la zone de la Convention alpine, comme en témoigne la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance.

#### RECOMMANDATION 8

Les Parties contractantes de la Convention alpine devraient se concerter avec les pays et régions voisins pour stimuler la réduction des transports transfrontière de polluants dans la zone géographique couverte par la Convention alpine.

#### 8.4.3 SOUTENIR L'INITIATIVE DU « PACTE VERT POUR L'EUROPE » DANS LE DOMAINE DE LA POLLUTION DE L'AIR

Les objectifs de qualité de l'air ambiant portant sur les concentrations de polluants dans le périmètre de la Convention alpine et visant à protéger la santé humaine se basent sur la Directive 2008/50/CE de l'UE sur la qualité de l'air, mais certains États

membres ont établi des réglementations plus strictes. Considérant l'objectif c) de la Convention alpine<sup>70</sup>, un alignement des seuils de qualité de l'air sur les lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air modifierait clairement les politiques dans le sens d'une meilleure protection de la santé humaine. Cela ne résoudrait pas le problème en soi puisque les émissions ne sont pas couvertes, mais pourrait aider les États membres et les communautés à identifier les priorités et à déclencher des solutions là où cela est nécessaire.

#### RECOMMANDATION 9

Les Parties contractantes de la Convention alpine devraient :

- soutenir le chapitre sur la qualité de l'air du Pacte vert pour l'Europe ;
- s'efforcer de satisfaire aux lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air.

### 8.5 MIEUX CONNAÎTRE LES CAUSES ANTHROPIQUES DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Ce rapport prend ses sources dans des rapports officiels d'agences mandatées : AEE, OMS, EPA (États-Unis), dans d'anciens rapports de la Convention alpine et aussi dans des publications scientifiques, dont beaucoup sont le résultat de programmes de recherche européens menés en collaboration (énumérés à l'annexe). La plupart d'entre eux ont été lancés au cours des deux dernières décennies. Il n'aurait pas été possible d'écrire de nombreux chapitres de ce rapport sans ces informations. Toutefois, des incertitudes subsistent quant aux relations causales précises entre les activités humaines, les sources biogéniques et la qualité de l'air. Les incidences du changement climatique sur la qualité de l'air restent également à traiter et à modéliser en fonction de différents scénarios. L'exposition des personnes aux particules ultrafines constitue toujours, tout comme la génération, le transport et les effets de ces particules, un sujet de recherche actif.

En outre, des politologues et sociologues impliqués dans des processus de consultation seraient

70. c. qualité de l'air - en vue d'obtenir une réduction drastique des émissions de polluants et de leurs nuisances dans l'espace alpin ainsi que des apports externes de polluants de manière à parvenir à un taux non nuisible aux hommes, à la faune et à la flore.



à même de mieux comprendre les attentes des citoyens vivant dans les Alpes, leur connaissance de la situation réelle et de leur rôle dans la pollution de l'air, ce qu'ils attendent de la part des décideurs et leur volonté d'adapter leur comportement en vue d'améliorer la qualité de l'air. De ce fait, ce rapport appelle à un renforcement des programmes de recherche pluridisciplinaires sur la qualité de l'air dans les Alpes, à une communication rapide des résultats aux parties prenantes, et à la participation du public à des débats et une compréhension mutuelle avec les communautés de recherche qui étudient les Alpes.

#### RECOMMANDATION 10

Développer des études approfondies et spécifiques sur la qualité de l'air dans les Alpes visant à étudier l'influence des sources de pollution atmosphérique, en particulier lorsque la surveillance fait apparaître ou laisse envisager des problèmes de qualité de l'air ambiant, ainsi que sur les questions sociales et politiques qui y sont liées.

## 9. BIBLIOGRAPHIE

AEE - Agence européenne pour l'environnement (2018). Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe. EEA Report No. 22/2018. Found at: <https://www.eea.europa.eu/publications/unequal-exposure-and-unequal-impacts/#additional-files>.

AEE - Agence européenne pour l'environnement (2019). Air quality in Europe - 2019 Report, 99 pp. EEA Report No 10/2019. Found at: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019/air-quality-in-europe-2019/viewfile#pdfjs.action=download>.

Agence allemande de l'environnement, Grote, R. (2019). Environmental impacts on biogenic emissions of volatile organic compounds (VOCs) – final report. Found at: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/environmental-impacts-on-biogenic-emissions-of>.

Alpine Traffic Observatory (2020). Observation and analysis of transalpine freight traffic flows. Key figures 2019. Found at: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2020-alpine-traffic-observatory-key-figures-2019.pdf>.

American Academy of Pediatrics and Committee on Environmental Health (2004). Ambient Air Pollution: Health Hazards to Children. In: Pediatrics, 114, 1699. Found at: <https://pediatrics.aappublications.org/content/114/6/1699>.

Andreani-Aksoyoglu, S. et al. (2008). Contribution of Biogenic Emissions to Carbonaceous Aerosols in Summer and Winter in Switzerland: A Modelling Study. In: Borrego C. and A.I. Miranda (eds.): Air Pollution Modeling and Its Application XIX, NATO Science for Peace and Security Series Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 101-108. Found at: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8453-9\\_11#citeas](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8453-9_11#citeas).

Avakian, M.D. et al. (2002). The Origin, Fate, and Health Effects of Combustion By-Products: A Research Framework. In: Environmental Health Perspectives, 110 (11), 1155.

BAFU – Bundesamt für Umwelt, Switzerland (2016). Umweltbelastungen des alpenquerenden Güterverkehrs (Environmental impact of freight traffic in the Alps). UZ-1628-D. Found at: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/ernaehrung-wohnen-mobilitaet/mobilitaet/monitoring-flankierende-massnahmen-umwelt-mfm-u.html>.

Barroso, P.J. et al. (2019). Emerging contaminants in the atmosphere: Analysis, occurrence and future challenges. In: Crit Rev Env Sci Tec, 49, 104-171.

Beelen, R. et al. (2014). Effects of long-term exposure to air pollution on natural cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. In: Lancet, 383, 785-795.

Belis, C.A. et al. (2014). European guide on air pollution source apportionment with receptor models. European Union, JRC reference reports, 9789279325144. Found at: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/reference-reports/european-guide-air-pollution-source-apportionment-receptor-models>.



Besombes, J.L. et al. (2014). Evaluation des impacts sur la qualité de l'air des actions de modernisation du parc d'appareils de chauffage au bois à Lanslebourg – Rapport Final. Ademe. Found at: <http://hal.univ-smb.fr/hal-02014899/document>.

Blasco, M. et al. (2006). Use of Lichens as Pollution Biomonitors in Remote Areas: Comparison of PAHs Extracted from Lichens and Atmospheric Particles Sampled in and Around the Somport Tunnel (Pyrenees). In: *Environ. Sci. Technol.* 40, 6384-6391.

Blasco, M. et al. (2008). Lichens biomonitoring as feasible methodology to assess air pollution in natural ecosystems: Combined study of quantitative PAHs analyses and lichen biodiversity in the Pyrenees Mountains. In: *Anal. Bioanal. Chem.* 391, 759-771.

Bowman, W.D. et al. (2018). Limited ecosystem recovery from simulated chronic nitrogen deposition. In: *Ecol. App.* 28, 1762-1772.

CE - Commission européenne (2018). COM/2018/773 final. Communication from the Commission. A Clean Planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. Found at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0773>.

CE - Commission européenne (2019). COM/2019/640 final. Communication from the Commission. The European Green Deal. Found at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>.

CEE-ONU (1991). Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context. Found at: [https://unece.org/DAM/env/eia/documents/legaltexts/Espoo\\_Convention\\_authentic\\_ENG.pdf](https://unece.org/DAM/env/eia/documents/legaltexts/Espoo_Convention_authentic_ENG.pdf).

Chaxel, E. and J.P. Chollet (2009). Ozone production from Grenoble city during the August 2003 heat wave. In: *Atmos. Environ.* 43, 4784-4792.

Chemel, C. et al. (2016). Valley heat deficit as bulk measure of wintertime particulate air pollution in Arve valley. In: *Atmos. Environ.* 128, 208-215.

Climate Action Network Europe (2020). Overview of national phase-out announcements, October 2020. Found at: <https://beyond-coal.eu/2020/10/15/overview-of-national-phase-out-announcements-july-2020/>.

Convention alpine (2007). Report on the State of the Alps. Alpine Signals – Special edition 1. Transport and Mobility in the Alps. Found at: [https://www.alpconv.org/fileadmin/user\\_upload/Publications/RSA/RSA1\\_EN.pdf](https://www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA1_EN.pdf).

Convention alpine (2011). Towards decarbonising the Alps - National policies and strategies, regional initiatives and local actions (ISBN: 978-3-9503014-5-8). Found at: [https://www.alpconv.org/fileadmin/user\\_upload/Publications/AS/AS6\\_EN.pdf](https://www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/AS/AS6_EN.pdf).

Convention alpine (2018). Alpine Convention collection of texts, Alpine Signals 1, 3rd edition. Found at: <https://www.alpconv.org/en/home/news-publications/publications-multimedia/detail/as1-the-alpine-convention-collection-of-texts/>.

Convention alpine (2018a). The Alps in 25 maps. Found at: <https://www.alpconv.org/en/home/news-publications/publications-multimedia/detail/the-alps-in-25-maps/>.

Convention alpine, Groupe de travail Transports (2018b). Deployment of Alternative Fuels Infrastructure - Implementing the EU Directive 2014/94/EU on the Alpine territory. Found at: [https://www.alpconv.org/fileadmin/user\\_upload/fotos/Banner/Topics/transport/AlpineConvention\\_TransportWG\\_AlternativeFuels\\_012019.pdf](https://www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/fotos/Banner/Topics/transport/AlpineConvention_TransportWG_AlternativeFuels_012019.pdf).

Derognat, C. et al. (2003). Effect of biogenic volatile organic compound emissions on tropospheric chemistry during the Atmospheric Pollution Over the Paris Area (ESQUIF) campaign in the Ile de France region. In: *J. Geophys. R.* 108, 8560.

Diemoz, H. et al. (2014). One Year of Measurements with a POM-02 Sky Radiometer at an Alpine EuroSkyRad Station. In: J. Meteorol. Soc. Jpn. 92A, 1-16.

Diemoz, H. et al. (2019a). Transport of Po valley aerosol pollution to the north-western Alps. Part 1: Phenomenology. In: Atmos. Chem. Phys. 19, 3065-3095.

Diemoz, H. et al. (2019b). Transport of Po valley aerosol pollution to the north-western Alps. Part 2: Long term impact on air quality. In: Atmos. Chem. Phys. 19, 10129-10160.

Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants, amending Directive 2003/35/EC and repealing Directive 2001/81/EC. OJ L 344/1, 17.12.2016. Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2016/2284/oj>.

Directive (EU) 2016/802 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 relating to a reduction in the sulphur content of certain liquid fuels. OJ L132/58, 21.05.2016. Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2016/802/oj>.

Directive 2001/42/EC of the European Parliament and of the Council of 27 June 2001 on the assessment of the effects of certain plans and programmes on the environment. OJ L 197, 21.07.2001. Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2001/42/oj>.

Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. OJ L 309, 27.11.2001. Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2001/81/oj>.

Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. OJ L 23, 26.1.2005. Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/107/oj>.

Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. OJ L 152/1, 11.06.2008. Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>.

Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. OJ L 285/10, 31.10.2009. Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/125/oj>.

Directive 2009/30/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 98/70/EC as regards the specification of petrol, diesel and gas-oil and introducing a mechanism to monitor and reduce greenhouse gas emissions and amending Council Directive 1999/32/EC as regards the specification of fuel used by inland waterway vessels and repealing Directive 93/12/EEC. OJ L 140/88, 05.06.2009. Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/30/oj>.

Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). OJ L 334/17, 17.12.2010. Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>.

Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure Text with EEA relevance. OJ L 307, 28.10.2014. Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/94/oj>.

Directive 2015/1480 of the European Commission of 28 August 2015 amending several annexes to Directives 2004/107/EC and 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council laying down the rules concerning reference methods, data validation and location of sampling points for the assessment of ambient air quality (Text with EEA relevance). Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2015/1480/oj>.

Directive 2015/2193 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants. OJ L 313/1, 28.11.2015. Found at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2015/2193/oj>.



- Ducret-Stich, R. et al. (2013a). Role of highway traffic on spatial and temporal distributions of air pollutants in a Swiss Alpine valley. In: *Sci. Total Environ.* 456, 50-60.
- Ducret-Stich, R. et al. (2013b). PM<sub>10</sub> source apportionment in a Swiss Alpine valley impacted by highway traffic. In: *Environ. Sci. Pollut. R.* 20, 6496-6508.
- Egger, I. and K.P. Hoinka (1992). Fronts and orography. In: *Meteorology and Atmospheric Physics*, 48, 3-36.
- Elsasser, M. et al. (2012). Organic molecular markers and signature from wood combustion particles in winter ambient aerosols: aerosol mass spectrometer (AMS) and high time-resolved GC-MS measurements in Augsburg, Germany. In: *Atmos. Chem. Phys.* 12, 6113-6128.
- Fang, T. et al. (2019). Oxidative Potential of Particulate Matter and Generation of Reactive Oxygen Species in Epithelial Lining Fluid. In: *Environ. Sci. Technol.* 53, 12784-12792.
- Favez, O. et al. (2017a). Traitement harmonisé de jeux de données multi-sites pour l'étude de sources de PM par Positive Matrix Factorization (PMF). Ineris DRC-16-152341-07444A / CARA\_PMF Harmonisée.
- Favez, O. et al. (2017b). État des lieux sur les connaissances apportées par les études expérimentales des sources de particules fines en France - Projet Sources. Rapport Ademe, 132 pages.
- Finizio, A. et al. (2006). Variation of POP concentrations in fresh-fallen snow and air on Alpine glacier (Monte Rosa). In: *Ecotox Environ. Safe.* 63, 25-32.
- Freier, K.P. et al. (2019). Monitoring of Persistent Pollutants in the Alps. Bavarian Environment Agency & Environment Agency Austria, Brochure of Bavarian Environmental Agency.
- Gianini, M.F.D. et al. (2012). Comparative source apportionment of PM<sub>10</sub> in Switzerland for 2008/2009 and 1998/1999 by Positive Matrix Factorisation. In: *Atmos. Environ.* 54, 149-158.
- Gilardoni, S. et al. (2011). Better constraints on sources of carbonaceous aerosols using a combined 14C – macro tracer analysis in a European rural background site. In: *Atmos. Chem. Phys.* 11, 5685–5700.
- Global energy monitor (2019). Air pollution from coal-fired power plants. Found at: [https://www.gem.wiki/Air\\_pollution\\_from\\_coal-fired\\_power\\_plants](https://www.gem.wiki/Air_pollution_from_coal-fired_power_plants).
- Hao, L. et al. (2018). Combined effects of boundary layer dynamics and atmospheric chemistry on aerosol composition during new particle formation periods. In: *Atmos. Chem. Phys.* 18, 17705-17716.
- Hasan, M. et al. (2009). Identification and characterization of trace metals in black solid materials deposited from biomass burning at the cooking stoves in Bangladesh. In: *Biomass Bioenerg* 33, 1376-1380.
- Hazenkamp-von Arx, M.E. et al. (2011). Impacts of highway traffic exhaust in alpine valleys on the respiratory health in adults: a cross-sectional study. In: *Environ Health*, 10, 13. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-13>. Found at: <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/1476-069X-10-13>.
- Health Effects Institute (2019). State of Global Air 2019. Special Report. Boston, MA: Health Effects Institute. Found at: [https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga\\_2019\\_report.pdf](https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_report.pdf).
- Heimann, D. et al. (2007). ALPNAP comprehensive report. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Trento, Italy, 335 pp. Found at: [http://www.alpine-space.org/2000-2006/uploads/media/ALPNAP\\_CR\\_Part\\_1.pdf](http://www.alpine-space.org/2000-2006/uploads/media/ALPNAP_CR_Part_1.pdf).
- Herich, H. et al. (2014). Overview of the impact of wood burning emissions on carbonaceous aerosols and PM in large parts of the Alpine region. In: *Atmos. Environ.* 89, 64-75.
- Jaward, F.M. et al. (2005). PCB and selected organochlorine compounds in Italian mountain air: the influence of altitude and forest ecosystem type. In: *Environ. Sci. Technol.* 39, 3455-3463.

- Larsen, B.R. et al. (2012). Sources for PM air pollution in the Po Plain, Italy: II. Probabilistic uncertainty characterization and sensitivity analysis of secondary and primary sources. In: Atmos. Environ. 50, 203-213.
- Lelieveld, J. et al. (2020). Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective. Cardiovascular research. Found at: <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa025>.
- Lercher, P. et al. (1995). Perceived traffic air pollution, associated behavior and health in an alpine area. In: Sci. Tot. Environ. 169, 71.
- Lighty, J.S. et al. (2000). Combustion Aerosols: Factors Governing Their Size and Composition and Implications to Human Health. In: J Air Waste Manage, 50, 1565.
- Lin, M. et al. (2020). Vegetation feedbacks during drought exacerbate ozone air pollution extremes in Europe. In: Nature Climate Change 10, n°4.
- Löflund, M. et al. (2002). Monitoring ammonia in urban, inner alpine and pre-alpine ambient air. In: J. Environ. Monitor. 4, 205-209.
- Maas, R. and P. Grennfelt (eds.) (2016). CLRTAP\_Scientific\_Assessment\_Report\_-\_Final, Oslo. Found at: [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/ExecutiveBody/35th\\_session/CLRTAP\\_Scientific\\_Assessment\\_Report\\_-\\_Final\\_20-5-2016.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/ExecutiveBody/35th_session/CLRTAP_Scientific_Assessment_Report_-_Final_20-5-2016.pdf).
- Mazzuca, G.M. et al. (2016). Ozone production and its sensitivity to NO<sub>x</sub> and VOCs: results from the DISCOVER-AQ field experiment, Houston 2013. In: Atmos. Chem. Phys. 16, 14463-14474.
- McLachlan, M.S. et al. (1998). Forests as Filters of Airborne Organic Pollutants: A Model. In: Environ. Sci. Technol. 32, 413-420.
- Meijer, S.N. et al. (2003). Global Distribution and Budget of PCBs and HCB in Background Surface Soils: Implications for Sources and Environmental Processes. In: Environ. Sci. Technol. 37, 667-672.
- Nascimbene, J. et al. (2014). Patterns of traffic polycyclic aromatic hydrocarbon pollution in mountain areas can be revealed by lichen monitoring: A case study in the Dolomites (Eastern Italian Alps). In: Sci. Total Environ. 475, 90-96.
- Nilsson, J. and P. Grennfelt (1988). Critical Loads for Sulphur and Nitrogen. Skokloster, Schweden, 1988. Found at: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4292/dokumente/nillssongrennfelt\\_1988.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4292/dokumente/nillssongrennfelt_1988.pdf).
- Offenthaler, I. et al. (2009). MONARPOP technical report, revised edition July 2009. Found at: [http://monarpop.at/downloads/MONARPOP\\_Technical\\_Report.pdf](http://monarpop.at/downloads/MONARPOP_Technical_Report.pdf).
- OMS (2019). WHO European High-level Conference on Non-communicable Diseases 9 – 10 April 2019 Ashgabat, Turkmenistan. Found at: <https://www.who.int/news-room/events/detail/2019/04/09/default-calendar/who-european-high-level-conference-on-noncommunicable-diseases>.
- OMS Europe (2013a). Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Found at: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/health-risks-of-air-pollution-in-europe-hrapie-project.-recommendations-for-concentrationresponse-functions-for-costbenefit-analysis-of-particulate-matter,-ozone-and-nitrogen-dioxide>.
- OMS Europe (2013b). Review of evidence on health aspects of air pollution, technical report. Found at: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report>.



OMS Europe (2013c). Development of the health economic assessment tools (HEAT) for walking and cycling. Found at: [https://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0003/155631/E96097.pdf](https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0003/155631/E96097.pdf).

Paerl, H.W. (2003). Coastal eutrophication and harmful algal blooms: Importance of atmospheric deposition and groundwater as "new" nitrogen and other nutrient sources. In: *Limnol. Oceanogr.* 42, 1154-1165.

Pascal, M. et al. (2017). Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité dans la vallée de l'Arve. *Santé publique France*. Found at: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/air/documents/rapport-synthese/impact-de-l-exposition-chronique-aux-particules-fines-sur-la-mortalite-dans-la-vallee-de-l-arve>.

Pietroangelo, A. et al. (2014). Improved identification of transition metals in airborne aerosols by SEM-EDX combined backscattered and secondary electron microanalysis. In: *Environ Sci Pollut R.* 21, 4023.

Piot, C. (2011). Polluants atmosphériques organiques particulaires en Rhône-Alpes : caractérisation chimique et sources d'émissions. Thesis, Université de Grenoble. Found at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00661284>.

Price, M.F. et al. (2011). The Alps. From Rio 1992 to 2012 and beyond: 20 years of Sustainable Mountain Development. What have we learnt and where should we go? Swiss presidency of the Alpine Convention 2011-2012. Found at: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/mountain\\_partnership/docs/ALPS%20FINAL%2020120228%20RIO%20Alps.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/mountain_partnership/docs/ALPS%20FINAL%2020120228%20RIO%20Alps.pdf).

Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency. OJ L 396, 30.12.2006. Found at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/1907/2014-04-10>.

Regulation (EU) 2015/1185 of 24 April 2015 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for solid fuel local space heaters. OJ L 193, 21.7.2015. Found at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2015:193:TOC>.

Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery, amending Regulations (EU) No 1024/2012 and (EU) No 167/2013, and amending and repealing Directive 97/68/EC. OJ L 252/53, 16.9.2016. Found at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj>.

Rihm, B. et al. (2016). Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). Federal Office for the Environment, Bern. In: *Environmental studies*, 1642, 78 p.

Robinson, A.L. et al. (2007). Rethinking organic aerosols: semivolatile emissions and photochemical aging. In: *Science*, 315, 1259–1262.

Rouvière, A. et al. (2006). Monoterpene source emissions from Chamonix in the Alpine valleys. In: *Atmos. Environ.* 40, 3613-3620.

Salvador, P. et al. (2010). Evaluation of aerosol sources at European high-altitude background sites with trajectory statistical methods. In: *Atmos. Environ.* 44, 2316-2329.

Schnelle-Kreis, J. et al. (2010). Anteil von Partikelemissionen aus Holzverbrennungsanlagen PM<sub>10</sub>-Feinstaub-immissionen im städtischen Umfeld am Beispiel von Augsburg, Teil 1: Emissions- und Immissionsmessungen. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 5, 203-209.

Schnitzhofer, R. et al. (2009). A multimethodological approach to study the spatial distribution of air pollution in an Alpine valley during wintertime. In: *Atmos. Chem. Phys.* 9, 3385-3396.

Seibert, P. et al. (1996). A pollution event in the High Alps - Results from the joint EUMAC-ALPTRAC case study. In: Borrell, P. M., Borrell, P., Kelly, K. and W. Seiler (eds.): Proceedings of EUROTRAC Symposium 1996 - Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere. In: Computational Mechanics Publications, Southampton, 251-255.

Sicard, P. et al. (2012). The Aggregate Risk Index: An intuitive tool providing the health risks of air pollution to health care community and public. In: Atmos Environ, 46, 11-16.

Squizzato, S. et al. (2013). Factors determining the formation of secondary inorganic aerosol: a case study in the Po Valley (Italy). In: Atmos. Chem. Phys. 13, 1927-1939.

Srivastava, D. et al. (2019). Speciation of organic fractions does matter for aerosol source apportionment. Part 3: Combining off-line and on-line measurements. In: Sci. Total Environ. 690, 944-955.

Stefenelli, G. et al. (2019). Secondary organic aerosol formation from smoldering and flaming combustion of biomass: a box model parametrization based on volatility basis set. In: Atmos. Chem. and Phys. 19, 11461-11484.

Stevens, C. J. et al. (2010). Nitrogen deposition threatens species richness of grasslands across Europe. In: Environ Pollut, 158, 2940-2945.

Sturman, A. and H. Wanner (2001). A Comparative Review of the Weather and Climate of the Southern Alps of New Zealand and the European Alps. In: Mountain Research and Development, 21 (4), 359-369.

SUERA (2017). Action Group 4 "To promote inter-modality and interoperability in passenger and freight transport", Study on External costs in mountain areas. Found at: <https://www.alpine-region.eu/results/study-external-costs-mountain-areas>.

Szidat, S. et al. (2007). Dominant impact of residential wood burning on particulate matter in Alpine valleys during winter. In: Geophys. Res. Lett. 34, L05820.

Thimonier, A. et al. (2019). Total deposition of nitrogen in Swiss forests: Comparison of assessment methods and evaluation of changes over two decades. In: Atmos. Environ. 198, 335-350.

Tibaldi S., Buzzi A., Speranza A. (1990). Orographic Cyclogenesis. In: Newton C.W., Holopainen E.O. (eds) Extratropical Cyclones. American Meteorological Society, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-944970-33-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-944970-33-8_7).

Treaty on the Functioning of the European Union. Part three - Union policies and internal actions Title XX – Environment Article 193. C326/1, 26.10.2012. Found at: [http://data.europa.eu/eli/treaty/tfeu\\_2012/art\\_193/oj](http://data.europa.eu/eli/treaty/tfeu_2012/art_193/oj).

Tuet, W. et al. (2019). Chemical Oxidative Potential and Cellular Oxidative Stress from Open Biomass Burning Aerosol. In: Environ. Sci. Technol. Lett. 6, 126-132.

U.S. EPA - United States Environmental Protection Agency (2013). Integrated Science Assessment (ISA) of Ozone and Related Photochemical Oxidants (Final Report, Feb 2013). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-10/076F. Found at: [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=511347&Lab=NCEA](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=511347&Lab=NCEA).

U.S. EPA - United States Environmental Protection Agency (2016). Integrated Science Assessment (ISA) for Oxides of Nitrogen – Health Criteria (Final Report, 2016). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-15/068. Found at: [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=526855&Lab=NCEA](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=526855&Lab=NCEA).

U.S. EPA - United States Environmental Protection Agency (2019). Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, 2019). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-19/188. Found at: [https://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p\\_download\\_id=539630](https://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=539630).



- Valverde, V. et al. (2016). A model-based analysis of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> dynamics from coal-fired power plants under representative synoptic circulation types over the Iberian Peninsula. In: *Sci. Tot. Environ.* 541, 701-713.
- Van Drooge, B.L. and P.P. Ballesta (2009). Seasonal and Daily Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Concentrations in PM<sub>10</sub> in a Semirural European Area. In: *Environ. Sci. Technol.* 43, 7310-7316.
- Wania, F. et al. (2001). Estimating the Influence of Forests on the Overall Fate of Semivolatile Organic Compounds Using a Multimedia Fate Model. In: *Environ. Sci. Technol.* 35, 582-590.
- Weber, S. et al. (2019). Comparison of PM<sub>10</sub> Sources Profiles at 15 French Sites Using a Harmonized Constrained Positive Matrix Factorization Approach. In: *Atmosphere*, 10, 310-331.
- Weimer, S. et al. (2009). Mobile measurements of aerosol number and volume size distributions in an Alpine valley: Influence of traffic versus wood burning. In: *Atmos. Environ.* 43, 624-630.
- Weiss, P. et al. (2015). MONARPOP – Ergebnisse der Dioxin-und PCB-messungen in Luft und Deposition. Report REP-0546. Found at: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0546.pdf>.
- Wierzbicka, A., et al. (2005). Particle emissions from district heating units operating on three commonly used biofuels. In: *Atmos. Environ.* 39, 139.
- Wotawa, G. et al. (2000). Transport of ozone towards the Alps – results from trajectory analyses and photochemical model studies. In: *Atmos. Environ.* 34, 1367-1377.
- Young, P.J. et al. (2018). Tropospheric Ozone Assessment Report: Assessment of global-scale model performance for global and regional ozone distributions, variability, and trends. In: *Elementa. Science of the Anthropocene*, 6: 10. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.265>.
- Zhang, W. et al. (2014). Emission of Metals from Pelletized and Uncompressed Biomass Fuels Combustion in Rural Household Stoves in China. In: *Scientific Reports*, 4, 5611.
- Zotter, P. et al. (2014). Radiocarbon analysis of elemental and organic carbon in Switzerland during winter smog episodes from 2008 to 2012 – Part 1: Source apportionment and spatial variability. In: *Atmos. Chem. Phys.* 14, 13551-13570.

## ANNEXE 1

# APERÇU DES POLLUANTS LES PLUS COURANTS

### Aérosols organiques primaires (AOP) et secondaires (AOS)

Un aérosol est une matière particulaire, une suspension de particules solides fines ou de gouttelettes liquides dans l'air. Les AOP sont directement émis par différentes sources, aussi bien naturelles (végétation et micro-organismes) qu'anthropiques (comme la combustion de combustibles fossiles et de biomasse). Les AOS sont formés à partir de la transformation atmosphérique d'espèces organiques.

### Ammoniac (NH<sub>3</sub>)

L'ammoniac est un gaz alcalin incolore et est l'un des composés azotés les plus abondants dans l'atmosphère. C'est un irritant, dont l'odeur piquante est caractéristique. Lors de l'inhalation, l'ammoniac est déposé dans les voies respiratoires supérieures : les expositions professionnelles à celui-ci sont généralement associées à une sinusite. De petites quantités de NH<sub>3</sub> sont naturellement présentes dans presque tous les tissus et organes des organismes vertébrés.<sup>71</sup>

### Arsenic (As)

L'arsenic et ses composés se trouvent partout dans la nature. L'arsenic est rejeté dans l'atmosphère à partir de sources naturelles et anthropiques. La principale source naturelle est l'activité volcanique, tandis que les émissions dans l'air dues aux activités humaines proviennent de la fusion des métaux, de la combustion des combustibles, en particulier du lignite de faible qualité, et de l'utilisation de pesticides. Il est principalement transporté dans l'environnement par l'eau.<sup>72</sup> L'arsenic de l'air est surtout présent en tant qu'arsenic inorganique, sous forme de particules. Il est fortement toxique et, sous sa forme inorganique, c'est un cancérigène confirmé.<sup>73</sup>

### Benzène C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>

Le benzène est un liquide incolore, qui s'évapore rapidement lorsqu'il est exposé à l'air. Il se forme à partir de processus naturels, tels que l'activité volcanique et les feux de forêt, mais, pour la plus grande part, l'exposition au benzène résulte des activités humaines. Le benzène est émis pendant l'extraction du pétrole brut, dont il est un composant naturel, ainsi que lors de l'activité des fours à coke. Outre ces sources industrielles, les émissions proviennent de différentes sources de combustion, telles que les moteurs, la combustion du bois et la combustion de combustibles fossiles provenant de sources fixes. La majeure part provient des émissions d'échappement et des pertes par évaporation issues des véhicules automobiles, ainsi que des pertes par évaporation pendant la manutention de l'essence, sa distribution (par ex. le ravitaillement aux pompes) et son stockage. Le CIRC classe le benzène comme cancérigène pour l'homme.<sup>74</sup>

### Benzo[a]pyrène (BaP)

Il s'agit d'un HAP formé lors de la combustion incomplète de matière organique. On le trouve principalement dans les gaz d'échappement issus de l'essence et du diesel, dans la fumée de cigarette, le goudron de houille, les aliments grillés au charbon de bois et certains autres aliments. C'est un agent cancérigène et il présente une menace pour l'environnement, car il pénètre facilement dans le sol et contamine les eaux souterraines.<sup>75</sup>

### Cadmium (Cd)

Le cadmium est un métal lourd que l'on trouve en quantités infimes dans l'air, l'eau, le sol et les aliments. Principalement utilisé, autrefois, dans le placage par galvanoplastie des métaux et dans les pigments ou les stabilisateurs pour les plastiques, il est aujourd'hui devenu, sous de nombreux aspects,

71. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/222>.

72. [https://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0014/123071/AQG2ndEd\\_6\\_1\\_Arsenic.PDF](https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0014/123071/AQG2ndEd_6_1_Arsenic.PDF).

73. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>.

74. <https://www.cancer.org/cancer/cancer-causes/benzene.html>.

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/benzene>.

75. [https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzo\\_a\\_pyrene](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzo_a_pyrene).



un composant vital de la technologie moderne : par exemple, plus de la moitié (55 %) de la production de cadmium est utilisée pour la fabrication de batteries nickel-cadmium et cette application devrait se développer encore (par exemple, dans le secteur des véhicules électriques). Dans l'Union européenne et dans le monde, environ 85 à 90 % des émissions totales de cadmium aéroporté proviennent de sources anthropiques, principalement de la fusion et du raffinage de métaux non ferreux, de la combustion de combustibles fossiles et de l'incinération des déchets municipaux. Le cadmium a une demi-vie biologique exceptionnellement longue, d'où une accumulation pratiquement irréversible du métal dans le corps tout au long de la vie. Il est classé comme cancérigène pour l'homme.<sup>76</sup>

### Carbone suie (black carbon BC) et carbone élémentaire (elemental carbon EC)

Ce sont les constituants primaires des aérosols atmosphériques. Ils résultent d'une combustion incomplète de combustibles fossiles ou des émissions de la combustion de biomasse.<sup>77</sup>

### Composés organiques volatils (COV) et composés organiques volatils non méthaniques (COVNM)

Les COV et les COVNM sont un groupe de composés organiques (tels que le benzène, l'éthanol, le formaldéhyde, le cyclohexane, le trichloroéthane ou l'acétone) qui diffèrent largement les uns des autres en termes de composition chimique, mais présentent un comportement similaire dans l'atmosphère : ils sont émis par un large éventail (plusieurs milliers) de produits et processus, à la fois naturels et anthropiques. La plupart des parfums ou des odeurs proviennent des COV. Les COV comprennent une variété de produits chimiques, dont certains peuvent avoir des effets néfastes à court et à long terme sur la santé. Les concentrations de nombreux COV restent toujours plus élevées (jusqu'à dix fois) à l'intérieur qu'à l'extérieur. Certaines espèces de COVNM, comme le benzène, sont dangereuses pour la santé humaine et contribuent à la formation de l'ozone troposphérique.<sup>78</sup>

### Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)

C'est un gaz incolore à forte odeur. Il est produit à partir de la combustion de combustibles fossiles et de la fusion de minerais contenant du soufre. La principale source anthropique de SO<sub>2</sub> est la combustion de combustibles fossiles contenant du soufre. Le SO<sub>2</sub> peut affecter le système respiratoire et les fonctions pulmonaires et provoquer des irritations au niveau des yeux. Les hospitalisations pour troubles cardiaques et les décès augmentent les jours où les niveaux de SO<sub>2</sub> sont plus élevés. Lorsque le SO<sub>2</sub> se combine avec l'eau, il forme de l'acide sulfurique : c'est le principal composant des pluies acides.<sup>79</sup>

### Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Il s'agit d'une classe de produits chimiques présents dans le charbon, le pétrole brut et l'essence. Ils sont aussi produits lors de la combustion du charbon, du pétrole, du gaz, du bois, des déchets et du tabac. La cuisson à haute température provoque aussi la formation de HAP dans les aliments. En 2010, le Programme des Monographies du CIRC a examiné les données expérimentales de 60 HAP individuels. Parmi ces 60 HAP, le BaP est classé comme cancérigène pour l'homme (Groupe 1). D'autres HAP sont classés comme probablement cancérigènes pour l'homme (Groupe 2A) ou peut-être cancérigènes pour l'homme (Groupe 2B), tandis que d'autres sont inclassables quant à leur cancérigénicité pour l'homme (Groupe 3), en raison de preuves expérimentales limitées ou inadéquates. Les HAP partagent un mécanisme similaire d'action cancérigène chez l'homme et les animaux de laboratoire. Un certain nombre d'entre eux ont été reconnus responsables de cancers, de problèmes de reproduction, de dommages à la peau, aux fluides corporels, ainsi qu'au système immunitaire chez des animaux de laboratoire qui y ont été exposés. Les HAP sont une source d'inquiétude parce qu'ils sont persistants et peuvent rester dans l'environnement pendant de longues périodes.<sup>80</sup>

76. <https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/substances/cadmium>.  
[https://www.who.int/ipcs/assessment/public\\_health/cadmium/en/](https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/cadmium/en/).

77. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014JD022144>.  
<https://www.hindawi.com/journals/amete/2014/179301/>.

78. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea-32-non-methane-volatile-1>.  
<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality>.

79. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

80. <https://archive.epa.gov/epawaste/hazard/wastemin/web/pdf/pahs.pdf>.  
<https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Scientific-Publications/Tumour-Site-Concordance-And-Mechanisms-Of-Carcinogenesis-2019>.

### Matières particulaires (MP)

Le terme matière particulaire indique un mélange de particules solides et de gouttelettes liquides en suspension dans l'air. Ces matières particulaires (ou, plus simplement, particules) se présentent sous différentes tailles et formes et peuvent être composées de centaines de produits chimiques différents. Certaines particules sont émises directement à partir d'une source (par exemple, les chantiers de construction, les champs ou les feux), mais la plupart d'entre elles se forment dans l'atmosphère suite à des réactions complexes de produits chimiques tels que le  $\text{SO}_2$  et les  $\text{NO}_x$ . Les MP comprennent : les  $\text{MP}_{10}$  (diamètre de 10 micromètres ( $\mu\text{m}$ ) et moins),  $\text{MP}_{2,5}$  (2,5  $\mu\text{m}$  et moins) et les PUF (ou  $\text{MP}_{0,1}$ , d'un diamètre inférieur à 0,1  $\mu\text{m}$ ). Plus les particules sont petites, plus il est facile d'accéder aux alvéoles des poumons et d'atteindre les cellules et les organes.<sup>81</sup>

### Mercure (Hg)

Le mercure et ses composés se trouvent partout dans la nature. Le mercure est libéré dans l'environnement à la fois naturellement, par effet de l'activité volcanique et de la dégradation des roches, et suite à l'activité humaine, qui est la principale source de rejets, notamment issus des centrales au charbon, de la combustion domestique du charbon pour le chauffage et la cuisson, des processus industriels.<sup>82</sup> L'exposition au mercure peut, même à faibles doses, causer de graves problèmes de santé et menace le développement de l'enfant in utero et au début de sa vie. L'exposition humaine se manifeste principalement par l'inhalation de vapeurs élémentaires de mercure libérées par les amalgames dentaires et par la consommation de poissons et crustacés contaminés par des composés de méthylmercure.<sup>83</sup> Le CIRC classe ce dernier comme potentiellement cancérigène pour l'homme.

### Monoxyde de carbone (CO)

Le nickel est un métal lourd très répandu, normalement présent à des teneurs très basses dans la nature. La combustion des huiles résiduelles et combustibles, l'extraction et le raffinage du nickel et l'incinération des déchets municipaux sont les

principales sources anthropiques d'émissions de nickel dans l'atmosphère et représentent environ 90 % des émissions mondiales totales. Les vapeurs de nickel sont des irritants respiratoires.<sup>85</sup> Les composés de nickel sont classés par le CIRC comme cancérigènes pour l'homme.

### Oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ )

$\text{NO}_x$  est un terme générique désignant l'oxyde nitrique (NO) et le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ). Ces gaz sont toxiques et réagissent dans l'air avec d'autres produits chimiques dans la formation de matières particulaires, d'ozone et de pluies acides. Les gaz  $\text{NO}_x$  sont généralement produits lors de la combustion de carburants, tels que les hydrocarbures, notamment à des températures élevées, comme dans les moteurs de voiture, le chauffage et la production d'électricité. Dans les zones où le trafic automobile est élevé (comme par exemple les grandes villes), les oxydes d'azote émis peuvent être une source importante de pollution atmosphérique. Les  $\text{NO}_x$  sont très toxiques et causent une inflammation significative des voies respiratoires.<sup>86</sup>

### Ozone ( $\text{O}_3$ )

L'ozone est un gaz composé de trois atomes d'oxygène. Il se produit à la fois dans la haute atmosphère terrestre et au niveau du sol. Le premier type d'ozone, appelé ozone stratosphérique, se produit naturellement et forme une couche protectrice qui filtre les rayons UV du soleil. En revanche l'ozone proche du sol (ou troposphérique) est un polluant atmosphérique nocif pour la santé. Il n'est pas émis directement dans l'air, mais créé par la réaction entre les  $\text{NO}_x$  et les COV en présence de la lumière du soleil. Par conséquent, l'ozone est plus susceptible d'atteindre des niveaux néfastes les jours chauds et ensoleillés en environnement urbain, mais il peut encore atteindre des niveaux élevés pendant les mois plus froids. Il peut également être transporté sur de longues distances par le vent, de sorte que même les zones rurales peuvent connaître des niveaux élevés d'ozone. Respirer de l'ozone peut provoquer différents problèmes respiratoires. L'ozone affecte également la végétation et les écosystèmes sensibles.<sup>87</sup>

81. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>.  
<https://www.nature.com/articles/s12276-020-0403-3>.

82. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>.

83. [https://www.who.int/ipcs/assessment/public\\_health/mercury/en/](https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/mercury/en/).

84. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/281>.

85. [https://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0014/123080/AQG2ndEd\\_6\\_10Nickel.pdf](https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0014/123080/AQG2ndEd_6_10Nickel.pdf).

86. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).  
<https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>.

87. <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics>.

[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).



### Perchloroéthylène (PERC)

Le PERC est un liquide incolore qui peut émettre des fumées toxiques lorsqu'il est exposé à la lumière du soleil ou à des flammes. L'exposition au PERC irrite les voies respiratoires supérieures et les yeux et provoque des effets neurologiques, ainsi que des lésions rénales et hépatiques. Il est classé cancérigène probable pour l'homme. Le PERC est un contaminant commun du sol. En raison de sa mobilité dans les eaux souterraines, de sa toxicité à de faibles niveaux, de sa densité (qui l'amène à couler en-dessous de la nappe aquifère), les activités de dépollution sont plus difficiles que pour les déversements d'hydrocarbures.<sup>88</sup>

### Plomb (Pb)

Le plomb est un métal lourd, d'une densité plus élevée que la plupart des matériaux courants. Il est considéré comme hautement toxique et peut pénétrer dans le corps humain par absorption d'eau ou d'aliments contaminés ou par inhalation de vapeurs ou de poussières contenant du plomb. À l'échelle mondiale, la combustion d'additifs de type alkyles de plomb dans les carburants automobiles représente la plus grande partie de toutes les émissions de plomb dans l'atmosphère, suivie de la combustion du charbon. Chez l'homme l'apport quotidien en plomb arrive principalement à travers les aliments, lesquels sont contaminés notamment pendant leur stockage et leur fabrication ou suite à la contamination directe des feuilles des plantes par le plomb atmosphérique. Les conduites d'eau en plomb ou les peintures contenant du plomb utilisées dans les maisons anciennes peuvent également être d'importantes sources d'exposition au plomb pour l'homme.

La toxicité du plomb peut s'expliquer en grande partie par son interférence avec différents systèmes enzymatiques, raison pour laquelle de nombreux

organes ou systèmes d'organes sont des cibles potentielles : ses effets portent principalement sur la formation d'hèmes, sur le système nerveux, sur la pression artérielle et le système cardiovasculaire, ainsi que sur les reins. D'après le CIRC, la cancérogénicité des composés de plomb pour l'homme n'est pas encore suffisamment prouvée.<sup>89</sup>

### Polluant organique persistant (POP)

Les POP sont essentiellement des produits chimiques synthétiques d'origine anthropique. Ils peuvent être générés sous forme de produits industriels ou de sous-produits non intentionnels résultant de processus industriels ou de combustions, mais ils peuvent aussi être résulter des déchets ou de la combustion de déchets, du trafic et de l'agriculture (certains POP, comme par exemple le DDT, sont des pesticides). Ils revêtent une importance planétaire, en raison de leur potentiel de transport à long terme (ils sont distribués à l'échelle mondiale et peuvent entrer dans des processus atmosphériques) ; leur persistance dans l'environnement (jusqu'à des décennies ou même des siècles) ; leur capacité à se bioaccumuler et en particulier se biomagnifier dans les écosystèmes et dans les organismes (les concentrations les plus élevées sont ainsi trouvées dans les organismes situés au sommet de la chaîne alimentaire : on peut trouver des niveaux de fond de POP dans le corps humain) ; leurs effets négatifs significatifs sur la santé humaine et l'environnement. L'exposition humaine – pour certains de ces composés et même dans des scénarios considérant de faibles niveaux de POP – peut conduire, entre autres, à un risque accru de cancer, à des troubles de la reproduction, à une altération du système immunitaire, à une déficience neurocomportementale et à une augmentation des malformations congénitales.<sup>90</sup>

88. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/31373>.

89. [https://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0020/123077/AQG2ndEd\\_6\\_7Lead.pdf](https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0020/123077/AQG2ndEd_6_7Lead.pdf).

90. [https://www.who.int/foodsafety/areas\\_work/chemical-risks/pops/en/](https://www.who.int/foodsafety/areas_work/chemical-risks/pops/en/).

## ANNEXE 2

# PROJETS D'INTÉRÊT DANS LA RÉGION ALPINE

### ALPNAP – CONTRÔLE ET MINIMISATION DU BRUIT ET DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE DUS AU TRAFIC LE LONG DES PRINCIPAUX AXES ALPINS DE TRANSPORT TERRESTRE

Le projet ALPNAP (Contrôle et minimisation du bruit et de la pollution atmosphérique dus au trafic le long des principaux axes alpins de transport terrestre) a été conclu en 2007. D'une durée de trois ans (2005-2007), le projet a été cofinancé par le Fonds européen de développement régional (FEDER) dans le cadre du programme européen Interreg IIIIB Espace alpin. Le projet ALPNAP avait pour objectif de recueillir et décrire des méthodes scientifiques avancées pour la prédiction et l'observation de la pollution atmosphérique et sonore le long des principaux corridors de transport transalpins et d'en évaluer les effets connexes sur la santé et le bien-être. La valeur ajoutée d'ALPNAP a été renforcée par une coopération coordonnée avec le projet contemporain MONITRAF (« Monitoring des effets du trafic routier dans la région des Alpes et élaboration de mesures communes »), un réseau d'administrations régionales alpines chargées des transports et de l'environnement. Les objectifs de MONITRAF étaient d'élaborer des mesures globales susceptibles de réduire les effets négatifs du trafic routier, tout en améliorant la qualité de vie dans la région alpine.

<http://alpnap.i-med.ac.at/>

<http://alpnap.i-med.ac.at/results-en.html>

### LIFE BRENNERLEC – UN CORRIDOR DU BRENNER À PLUS FAIBLES ÉMISSIONS (ITALIE)

« BrennerLEC est l'abréviation de Brenner Lower Emissions Corridor – un corridor du Brenner à plus faibles émissions. BrennerLEC vise à rendre la circulation sur l'axe du Brenner plus respectueuse

de la santé des personnes qui y vivent et plus compatible avec les caractéristiques du territoire, afin de protéger l'environnement alpin particulier traversé. »

La réglementation de la vitesse et la gestion des flux de trafic devraient permettre d'obtenir un avantage maximum en termes d'environnement et de trafic. Le projet vise à démontrer l'efficacité de telles mesures afin de les utiliser sur plus grande échelle.

<http://brennerlec.life/en/home>

### ESPACE MONT-BLANC (FRANCE, ITALIE, SUISSE)

L'Espace Mont-Blanc est une initiative de coopération transfrontalière réunissant Savoie (FR), Haute-Savoie (FR), Vallée d'Aoste (IT) et Valais (CH), s'engageant dans la protection du patrimoine naturel et environnemental exceptionnel et des activités économiques et touristiques communes. L'Espace Mont-Blanc a lancé en 1998 une campagne transfrontalière de mesure de l'air. Cette action a été pérennisée par la mise en place d'une surveillance en continu de la qualité de l'air. L'efficacité des actions aurait un avantage collatéral pour l'ensemble de la région alpine, suite à la réduction des sources locales et du transport de la pollution depuis la vallée du Pô.

<http://www.espace-mont-blanc.com/>

### MONARPOP – RÉSEAU DE SURVEILLANCE DANS LA RÉGION ALPINE POUR LES POLLUANTS ORGANIQUES PERSISTANTS ET AUTRES (ALLEMAGNE, AUTRICHE, ITALIE, SLOVÉNIE, SUISSE)

Le programme Monarpop (Monitoring Network in the Alpine Region for Persistent and other Organic



Polluants – Réseau de surveillance dans la région alpine pour les polluants organiques persistants et autres) a été conclu en 2008 ; il s'agissait d'un projet commun unissant l'UE, l'Allemagne, l'Autriche, l'Italie, la Slovénie et la Suisse. Dans le cadre d'un projet pilote, Monarpop a évalué pour la première fois la concentration des POP dans les Alpes (phase 1) et, sur la base des résultats, a établi des conclusions (par exemple une déclaration commune) et fixé des étapes de mise en œuvre pour réduire cette concentration (phase 2). Le fait que les Alpes représentent un puits important et une barrière pour les POP transportés à longue distance est la découverte la plus importante du projet Monarpop.

Le projet a étudié la pollution atmosphérique alpine provoquée par les POP et d'autres composants organiques. 12 partenaires du réseau ont coopéré via ce programme Espace alpin de l'Union européenne. Les plantes, le sol et l'air ont été analysés dans différents profils d'altitude. Les dépôts et les flux d'air révèlent la trajectoire de transport aérien et permettent d'attribuer la zone d'origine. Monarpop a contribué à une surveillance efficace au titre de la Convention de Stockholm, en mesurant continuellement l'air et les précipitations sur certains sommets de montagne pour surveiller des séries temporelles. Il s'impose d'étendre le projet pour établir des conclusions concernant l'origine géographique des POP et l'influence du changement saisonnier sur leur origine dans l'atmosphère alpine.

<http://www.monarpop.at/>

<https://keep.eu/project/122/monitoring-network-in-the-alpine-region-for-persistent-et-autres-organic-polluants>

#### LIFE PREPAIR – RÉGIONS DU PÔ ENGAGÉES DANS DES POLITIQUES DE L'AIR (ITALIE)

« Le projet PrepAir (Po regions engaged to policies of air – régions du Pô engagées dans des politiques de l'air) vise à mettre en œuvre à plus grande échelle les mesures énoncées dans les plans régionaux et dans l'accord portant sur la vallée du Pô, afin de renforcer la durabilité et la pérennité des résultats : la zone géographique couverte par le projet intégré (PI) est celle de la vallée du Pô, avec les régions et les villes qui influent principalement sur la qualité de l'air dans le bassin. Les actions prévues par le PI sont également étendues à la Slovénie, afin d'évaluer et de réduire le transport de polluants également à travers la mer Adriatique. »

Le projet vise à lancer sur plus grande échelle des mesures figurant dans les plans régionaux de la vallée du Pô dans une visée de durabilité et de

permanence. La vallée du Pô, située dans le nord de l'Italie, est une source importante de MP, NO<sub>x</sub> (NO<sub>2</sub>), NH<sub>3</sub> et O<sub>3</sub>. Cette zone couvre le territoire des différentes régions du nord de l'Italie et comprend plusieurs agglomérations urbaines telles que Milan, Turin et Bologne. Le transport et la distribution des polluants sont déterminés par les influences morphologiques intéressant la vallée du Pô. Afin de réduire davantage la pollution atmosphérique de fond, toutes les régions de la vallée du Pô se sont réunies et ont prévu des mesures pour réduire, dans les années à venir, les émissions dues à la combustion de biomasse, au transport de marchandises et de passagers, au chauffage, à l'industrie, à l'énergie et à l'agriculture. Dans cette optique, ils ont signé un accord visant à élaborer et à coordonner des mesures à court et à long terme pour améliorer la qualité de l'air dans la vallée du Pô.

<http://www.lifeprepare.eu/>

#### PUREALPS (ALLEMAGNE, AUTRICHE, ITALIE)

L'objectif du programme bavarois/autrichien PureAlps est de protéger les Alpes contre les influences critiques des POP et de surveiller les concentrations atmosphériques ainsi que le dépôt des POP par précipitation, neige et poussière. 106 substances et classes de substances se rattachant aux POP ont été analysées dans l'air ambiant à la station de recherche environnementale Schneesfernerhaus (UFS) sur le sommet de la Zugspitze.

#### GUAN – RÉSEAU ALLEMAND SUR LES PARTICULES ULTRAFINES GERMAN ULTRAFINE AEROSOL NETWORK (ALLEMAGNE, AUTRICHE, ITALIE, SUISSE)

Les particules ultrafines pourraient comporter certains risques pour l'homme. Le GUAN (German Ultrafine Aerosol Network – Réseau allemand sur les particules ultrafines) est un réseau de mesure coopératif allemand qui crée de nouvelles bases scientifiques pour l'évaluation des particules ultrafines. Les principales variables de mesure sont : le nombre de particules, la distribution des tailles et les concentrations en masse de suie. Entre-temps, le réseau coopératif est passé à 17 stations de mesure. Les données compilées peuvent être utilisées pour revoir la Directive européenne sur la qualité de l'air. Les stations de mesure du GUAN dans la région alpine sont l'UFS du Zugspitze et la station du Hohenpeißenberg, dans les contreforts nord des Alpes.

### **INVESTIGATION DU BUDGET RÉGIONAL DE CO<sub>2</sub> SUR DES SÉRIES DE MESURES ATMOSPHÉRIQUES (AUTRICHE, ALLEMAGNE, ITALIE ET SUISSE)**

La caractérisation du budget de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> de l'espace alpin, basée sur des mesures atmosphériques d'observatoires locaux, est une opération qu'il est possible d'effectuer de manière fiable. En outre, la méthodologie du projet peut être utilisée pour mesurer de manière fiable les zones (sources et puits) spécifiques au climat, ainsi que les variations saisonnières.

### **VOTALP I ET VOTALP II – TRANSPORT VERTICAL D'OZONE DANS LES ALPES (ALLEMAGNE, AUTRICHE, SLOVÉNIE, SUISSE)**

Le projet Votalp (Vertical Ozone Transport in the Alps – Transport vertical de l'ozone dans les Alpes) s'est conclu à la fin de 1999 ; il s'agissait d'un projet conjoint entre l'Université des sciences agricoles de Vienne (Autriche), l'Université de Cologne et l'Institut Fraunhofer de recherche environnementale atmosphérique de Garmisch-Partenkirchen (Allemagne), l'Institut Paul Scherrer, l'Université de Berne et la Metair AG (Suisse), le Conseil national de recherches (Italie) et l'Université de Ljubljana (Slovénie). Son objectif principal était l'étude de l'échange vertical renforcé au-dessus des Alpes ainsi que d'autres processus pouvant intéresser l'augmentation des concentrations d'ozone. Il s'est développé à travers deux projets consécutifs : Votalp I et Votalp II, financés par la Commission européenne, dans le cadre de l'action Environnement et Climat relevant du quatrième programme-cadre, et par le Gouvernement suisse.

Les principaux objectifs du projet Votalp étaient d'étudier l'échange vertical de polluants au-dessus des contreforts alpins par des mesures d'aéronefs, en effectuant également des explorations de l'ozone. Les panaches de pollution de Milan et Munich, dans la région alpine, ont également été étudiés par le biais de mesures prises d'avion et comparés à des campagnes précédentes. Une augmentation significative de la concentration a pu être observée au-dessus des contreforts alpins. Grâce à ces études, il a été possible de caractériser pour la première fois l'échange vertical de polluants sur les contreforts. Milan est une source majeure de polluants et, pendant les mois d'été, les polluants de cette région frappent souvent les Alpes.

<https://imp.boku.ac.at/votalp/>

### **VAO – OBSERVATOIRE VIRTUEL ALPIN (ALLEMAGNE, AUTRICHE, FRANCE, ITALIE ET SUISSE)**

Le projet de l'observatoire virtuel alpin (Virtual Alpine Observatory – VAO) vise à mettre en réseau les activités des observatoires européens alpins de recherche de haute altitude pour améliorer la surveillance du climat et de l'environnement. Ceci soutient les activités des stations de haute altitude en combinant leurs mesures respectives et en menant des projets de recherche communs. Combiné à l'accès à d'autres données, par exemple des données satellites, et à de puissants dispositifs de calcul, ceci crée des possibilités de recherche pratiquement sans précédents.

### **VAG – VEILLE DE L'ATMOSPHÈRE GLOBALE (ALLEMAGNE, AUTRICHE, FRANCE, ITALIE, SUISSE)**

Le programme Veille de l'atmosphère globale (VAG) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) est un partenariat dont font partie les membres de l'OMM ; il réunit des réseaux et des organisations et institutions coopérantes qui fournissent des données scientifiques et des informations fiables sur la composition chimique de l'atmosphère et son altération naturelle et anthropique, contribuant ainsi à améliorer la compréhension des interactions entre l'atmosphère, la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (PATLD) et la biosphère. La VAG se concentre sur les aérosols, les gaz à effet de serre, des gaz réactifs sélectionnés, l'ozone, le rayonnement UV et la chimie des précipitations (ou dépôts atmosphériques). Elle crée un réseau pour la recherche, une plate-forme de données, un réseau de modélisation et de surveillance.

### **BB CLEAN – OUTILS STRATÉGIQUES PERMETTANT UNE UTILISATION DURABLE DE LA BIOMASSE POUR UN CHAUFFAGE INDIVIDUEL SANS IMPACT CARBONE (FRANCE, ITALIE, SLOVÉNIE, AUTRICHE)**

Dans la région alpine, il est nécessaire de promouvoir une meilleure utilisation des ressources locales telles que le bois, tout en réduisant leur impact sur l'environnement et le climat. La biomasse est une ressource économique disponible localement, donc très importante pour la population, et la combustion du bois évite les émissions de CO<sub>2</sub> fossile dans l'atmosphère. Néanmoins, l'utilisation d'une mauvaise technique de combustion de la biomasse (BB signifiant biomass burning) provoque dans l'air ambiant des émissions de matières par-



ticulaires (MP) inacceptable, ce dont la population n'a même pas conscience. L'objectif principal du projet est donc d'élaborer des stratégies transnationales d'utilisation durable de la biomasse pour le chauffage domestique, en vue de minimiser ces impacts et d'améliorer l'utilisation intelligente de cette ressource dans la région alpine. L'élaboration de documents politiques communs favorisera l'application de règles harmonisées dans ce domaine.

### **ACTRIS / ACTRIS II – INFRASTRUCTURE DE RECHERCHE SUR LES AÉROSOLS, LES NUAGES ET LES GAZ TRACES (ALLEMAGNE, AUTRICHE, FRANCE, ALLEMAGNE, ITALIE, SUISSE)**

Actris (Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure – Infrastructure de recherche sur les aérosols, les nuages et les gaz traces) est une initiative paneuropéenne de consolidation des actions entre partenaires européens qui produisent des observations de haute qualité sur les aérosols, les nuages et les gaz traces. Différents processus atmosphériques sont de plus en plus au centre de nombreux enjeux sociétaux et environnementaux, tels que la qualité de l'air, la santé, la durabilité et le changement climatique. ACTRIS vise à aider à relever ces défis en fournissant une plate-forme pour permettre aux chercheurs d'associer leurs efforts plus efficacement, tout en mettant à la disposition de toute personne qui pourrait vouloir les utiliser des données d'observation sur les aérosols, les nuages et les gaz traces, de façon ouverte.

### **CLIMGAS-CH (HALCLIM) / AGAGE – MESURE DES GAZ À EFFET DE SERRE HALOGÈNES AU COL DE LA JUNGFRAU (SUISSE)**

Entre 2000 et 2018, plus de 50 gaz à effet de serre et responsables de l'appauvrissement de la couche d'ozone ont été mesurés en permanence au col de la Jungfrau, dans le cadre du projet national suisse HALCLIM, sous la direction de l'Empa (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche) et de l'OFEV (Office fédéral de l'environnement). Depuis 2018, dans le cadre du projet CLIMGAS-CH, géré en commun par l'Empa et l'OFEV, tous les gaz à effet de serre non-CO<sub>2</sub> (halocarbures, méthane et oxyde nitreux) sont analysés et leurs émissions régionales estimées. Cette activité permet également au réseau AGAGE de bénéficier de la technique de mesure commune CPG-SM (chromatographe en phase gazeuse – spectromètre de masse). Il est ainsi possible : (1) d'évaluer les émissions suisses et les émissions régionales européennes de gaz à effet

de serre non-CO<sub>2</sub> ; (2) de contribuer au contrôle de l'inventaire national des émissions ; (3) de localiser les sources et les régions sources dominantes de gaz à effet de serre non-CO<sub>2</sub> à l'aide de modèles de transport atmosphérique ; (4) d'utiliser des mesures continues à long terme portant sur différents halocarbures pour identifier les émissions mondiales et régionales. Par exemple, le HFC-134a est utilisé en grande quantité comme agent de refroidissement (entre autres, dans les climatiseurs mobiles), le HFC-125 est utilisé dans les mélanges de refroidissement stationnaires. Une identification précoce montre que les concentrations des deux gaz sont en augmentation.

### **POLLUTION DE L'AIR AU CARBONE SUIE – ÉTUDE DE CAS DE LOŠKI POTOK (SLOVÉNIE)**

La recherche se concentre sur une étude de la pollution atmosphérique due au carbone suie et aux particules fines en suspension, réalisée dans la zone rurale de la commune de Loški Potok pendant l'hiver 2017/2018. Les mesures effectuées ont révélé les principales sources de pollution atmosphérique au carbone suie dans cette zone : le chauffage domestique à la biomasse (près de 80 % de toutes les émissions de carbone suie) et les conditions météorologiques défavorables à la dilution des polluants lors des inversions de température. À l'hiver 2017/18, les concentrations moyennes dans la cuvette de Retje étaient encore plus élevées que celles de Ljubljana, ce qui attire aussi l'attention sur le problème de l'air pollué dans les zones rurales (de collines ou montagnes).

### **APERÇU DE L'IMPACT DES ÉMISSIONS DE COMBUSTION DU BOIS SUR LES AÉROSOLS CARBONES ET LES MP DANS DE GRANDES PARTIES DE LA RÉGION ALPINE : JOURNAL ATMOSPHERIC ENVIRONMENT 89 (2014) 64-75**

Au cours des dernières années, les actions mises en œuvre pour la réduction des émissions de matières particulaires se sont concentrées dans de nombreux pays européens sur le domaine du trafic routier. La combustion domestique du bois en tant que source d'émissions a été beaucoup moins étudiée, alors que de nombreuses études ont démontré son importance comme source de matières particulaires atmosphériques (MP) dans la région alpine. Nous passons ici en revue les connaissances actuelles sur la contribution des émissions de combustion du bois aux concentrations ambiantes de carbone élémentaire (CE), de carbone organique (CO) et de MP dans les Alpes.

Les résultats publiés, obtenus par le biais de différentes approches (méthode de macro-traceur, modélisation multivariée de récepteurs, modélisation de l'équilibre de masse chimique et modélisation par aethalomètre), sont utilisés dans une approche mono-traceur ambiant pour estimer les relations représentatives entre les traceurs de combustion du bois (lévoglucosane et mannosane) et le CE, le CO et les MP issus de la combustion du bois. Les relations trouvées sont appliquées aux mesures ambiantes disponibles du lévoglucosane et du mannosane sur les sites alpins afin d'estimer dans quelle mesure les émissions dues à la combustion du bois contribuent aux niveaux moyens d'aérosols carbonés et de MP de ces sites. Les résultats impliquent que, dans plusieurs vallées alpines, pendant les jours d'hiver, les MP provenant de la combustion du bois représentent souvent, à eux seuls, 50 % et plus de la valeur limite journalière de l'UE pour les MP<sub>10</sub>. Les concentrations d'aérosols carbonés dans ces vallées sont souvent jusqu'à six fois plus élevées que dans les sites urbains ou ruraux se trouvant au pied des Alpes.

#### **IMPACT SUR LES ÉMISSIONS DE PARTICULES DU REMPLACEMENT DES APPAREILS DE CHAUFFAGE AU BOIS ANCIENS PAR DES POÊLES À BOIS EFFICACES (FRANCE)**

Cet impact est évalué en prenant des mesures sur place avant et après le remplacement de l'appareil (mesures effectuées dans la vallée de l'Arve, Haute-Savoie, FR). Les essais sont effectués directement dans l'habitation, en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement en termes de performance, d'espèces de bois et d'humidité, de charge de bois, de tirage, etc. 35 sites ont été étudiés, dont 19 rééquipés avec des dispositifs à rondins de bois et 16 avec des dispositifs à granulés. Les résultats obtenus fournissent des informations sur l'impact de ces remplacements sur les émissions de polluants et sur l'efficacité énergétique : avec un nouvel appareil à rondins, un gain d'efficacité énergétique de 16 points et une réduction de 57 % des matières particulaires ont été obtenus et, respectivement, avec un appareil à granulés, des valeurs de 34 points et 44 %.

#### **SURVEILLANCE À LONG TERME DES PARTICULES ISSUES DE LA COMBUSTION DE BIOMASSE À GRENoble (FRANCE)**

Cette étude s'appuie sur des mesures effectuées dans le cadre du « Programme CARA », un programme de caractérisation de la composition

chimique des MP d'envergure nationale, mené en étroite collaboration avec Atmo Auvergne Rhône-Alpes et l'Institut des géosciences de l'environnement (IGE). Les données de mesure recueillies entre 2008 et 2017 sont analysées. L'objectif de cette surveillance est de déterminer l'influence de la combustion de biomasse, une source considérée comme l'une des activités anthropiques les plus polluantes, en particulier dans les vallées alpines, sur les niveaux de particules. Un autre objectif est d'étudier le lien entre l'évolution des particules issues de la biomasse (en utilisant le lévoglucosane comme traceur de combustion de biomasse) et les concentrations de HAP. Les résultats montrent une diminution significative non seulement des concentrations de MP<sub>10</sub>, mais aussi des concentrations de CE et d'HAP. En revanche, les concentrations de particules provenant de la combustion de biomasse n'affichent pas de tendance significative. Leur contribution relative aux MP<sub>10</sub> a donc augmenté: en hiver, cette contribution est passée de 20 % en 2009-2010 à 30 à 35 % en 2016-2017. Ces résultats suggèrent une réduction des émissions de MP provenant de sources autres que la combustion de biomasse, la combustion du bois restant l'une des principales sources de MP à Grenoble.

#### **VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DES ESPÈCES CHIMIQUES MAJEURES ET DE COMPOSÉS TRACES DES MP<sub>10</sub> EN FRANCE MÉTROPOLITAINE**

Cette étude est basée sur des mesures prises dans le cadre du programme national « CARA » (un programme de caractérisation de la composition chimique des MP) et par l'Institut des géosciences de l'environnement (IGE). Elle analyse la variabilité saisonnière et spatiale des concentrations moyennes de composés de particules spécifiques mesurées dans 19 sites de différents types (milieu rural, milieu urbain, zone de trafic, vallées alpines). Menée parallèlement à une vaste étude sur les sources de MP réalisée par factorisation matricielle positive, cette étude fournit une vue d'ensemble des principales sources de MP et de leur impact selon le type de site. En ce qui concerne les vallées alpines (voir les pages 11 & 13 du rapport du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air – LCSQA), les résultats montrent des niveaux plus élevés de matière organique et de lévoglucosane en hiver (sites de Passy, Marnaz et Chamonix), ce qui témoigne de l'influence de la combustion de biomasse.



### SOURCES (FRANCE)

Programme de recherche financé par l'Ademe, mené par l'IGE et coordonné par l'Ineris, mis en place pour recueillir et étudier de manière harmonisée une quinzaine de jeux de données concernant des composés chimiques, à partir de  $MP_{10}$  collectés en France, sur une période de 5 ans (2012-2016), pour des études de factorisation matricielle positive. Il comprend les sites de Chamonix et de Revin (Weber S. *et al.*, 2019).

<http://pmsources.u-ga.fr/>

### NETDESA – ÉMISSION, TRANSPORT ET DÉPÔT D'AÉROSOLS DANS DES CONDITIONS DE STAGNATION EXTRÊME DANS LES ZONES MONTAGNEUSES INFLUENCÉES PAR LES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES.

Pour comprendre et prédire la pollution atmosphérique, il est intéressant de se pencher sur le cycle de vie des aérosols, qu'ils soient émis de façon anthropique (du trafic automobile aux rejets accidentels) ou de façon naturelle. Ce projet vise à mieux simuler les émissions, le transport et le dépôt d'aérosols dans des milieux caractérisés par des reliefs abrupts et dans des conditions de stagnation atmosphérique, lorsque les concentrations dépassent les seuils réglementaires de qualité de l'air.

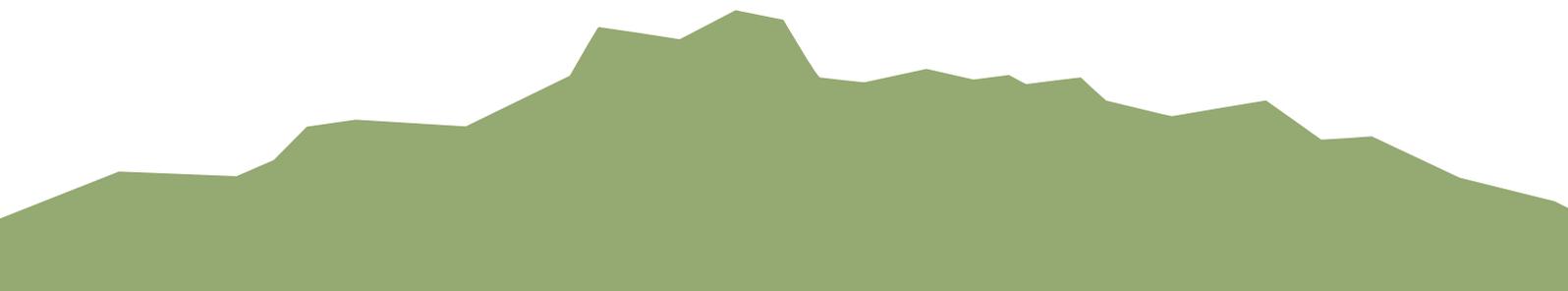


La **Convention alpine** est une pionnière dans son genre, en tant que premier traité international consacré à la protection et au développement durable d'une zone de montagne dans son intégralité : les Alpes. La Convention a été signée par les huit pays alpins (l'Allemagne, l'Autriche, la France, l'Italie, le Liechtenstein, Monaco, la Slovénie et la Suisse) et par l'Union européenne, et est entrée en vigueur en 1995.

Les fondements de la Convention alpine sont la Convention-cadre et les protocoles d'application et déclarations, qui établissent des principes directeurs et un cadre pour la coopération transnationale dans des domaines clés des environnements, des sociétés et des économies alpines. Sur la base de ces fondements, la Convention s'efforce de créer des partenariats et d'établir des approches intersectorielles pour relever les défis les plus urgents dans les Alpes.

Les travaux sont réalisés sous des formes variées par les différents organes de la Convention alpine : la Conférence alpine biennale, les travaux des Parties contractantes, le Comité permanent, le Comité de vérification, de nombreux Organismes de travail thématiques et le Secrétariat permanent. Plusieurs organisations observatrices contribuent également à la mise en œuvre de la Convention.

La Convention alpine ouvre la voie pour une vie durable dans les Alpes, en s'efforçant de sauvegarder leurs patrimoines naturels et culturels uniques – maintenant et pour l'avenir.



Que savons-nous de la qualité de l'air dans les Alpes, un élément vital de cette région située sur le toit de l'Europe ? Et que peut-on faire pour l'améliorer ?

Ces questions, et d'autres, sont explorées dans ce rapport, qui réalise une enquête approfondie sur la qualité de l'air alpin, ainsi que sur les phénomènes et les tendances qui l'influencent.

Le rapport fournit également une liste de solutions intelligentes mises en œuvre à travers la région alpine, ainsi qu'une série de recommandations politiques visant à préserver ce bien public essentiel.

