



Commission économique pour l'Europe

Organe exécutif de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance

Quarante-deuxième session

Genève, 12-16 décembre 2022

Point 5 de l'ordre du jour provisoire

Examen du caractère suffisant et efficace du Protocole relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique, tel que modifié en 2012**Informations scientifiques pour l'examen du Protocole de Göteborg***Résumé*

Le présent document a été établi par les Présidentes du Groupe de travail des effets et de l'Organe directeur du Programme concerté de surveillance continue et d'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe, sur la base des informations fournies par les centres scientifiques et les équipes spéciales relevant de la Convention, pour faciliter l'examen du Protocole relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique (Protocole de Göteborg), tel que modifié en 2012.

Il accompagne le rapport sur l'examen du Protocole relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique, tel que modifié en 2012 ([ECE/EB.AIR/2022/3](#)), et il y est couramment fait référence en tant qu'« annexe I ». Approuvé par l'Organe directeur et le Groupe de travail à leur huitième session commune (Genève, 12-16 septembre 2022), il est transmis à l'Organe exécutif pour information.



I. Introduction

1. Le présent document a été établi par les Présidentes du Groupe de travail des effets et de l'Organe directeur du Programme concerté de surveillance continue et d'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe (EMEP) sur la base des informations scientifiques fournies par les Bureaux élargis du Groupe de travail¹ et de l'Organe directeur², dans la perspective de l'examen du Protocole relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique (Protocole de Göteborg), tel que modifié en 2012, demandé par l'Organe exécutif dans sa décision 2019/4³. Il contient la synthèse d'une étude détaillée consacrée aux outils, aux recommandations et aux résultats découlant des travaux menés dans le cadre de la Convention en vue d'appuyer la prise de décisions par les pouvoirs publics et la mise en œuvre des protocoles à la Convention, ainsi que d'évaluer leur efficacité.

2. Reposant sur des connaissances scientifiques qui ont permis d'élaborer une approche multipolluants et multieffets, le Protocole de Göteborg fixe des objectifs nationaux de réduction des émissions afin de réduire l'acidification, l'eutrophisation et les effets de la pollution atmosphérique sur l'environnement et la santé (notamment l'ozone troposphérique (O₃) et les particules fines (PM_{2,5}). Les principales activités des équipes spéciales, des programmes de coopération internationale et des centres de l'EMEP consistent à réaliser les inventaires des émissions, à mesurer et modéliser la pollution atmosphérique et les dépôts pour les composés eutrophisants et acidifiants, l'ozone et les particules fines, ainsi qu'à surveiller et modéliser les effets (acidification, eutrophisation, effets de l'ozone sur la végétation, les cultures et la santé humaine, et incidences des particules sur la santé). Un cadre unique a été mis en place dans la région de la Commission économique pour l'Europe (CEE) en vue de collecter des données dans ces différents domaines, ce qui permet d'évaluer les conséquences et les tendances de la pollution atmosphérique et de ses effets, d'estimer l'efficacité des politiques actuelles et de cibler les domaines (secteurs, zones géographiques) dans lesquels des efforts supplémentaires sont nécessaires.

3. Le présent document donne un aperçu des connaissances actuelles dans ce domaine afin d'illustrer le contenu du rapport sur l'examen du Protocole de Göteborg, tel que modifié en 2012 ([ECE/EB.AIR/2022/3](https://unece.org/decisions)).

II. Émissions

4. La présente section complète les données relatives aux tendances des émissions (y compris de carbone noir (CN)) présentées de manière détaillée dans le rapport sur l'examen du Protocole de Göteborg, tel que modifié en 2012, et contient de plus amples informations sur les processus d'inventaire et de notification, ainsi que sur les principes d'assurance qualité garantissant la fiabilité et la pertinence des données afin qu'elles puissent servir de base à des travaux scientifiques et à la prise de décisions par les pouvoirs publics : comparabilité, exhaustivité, cohérence, exactitude et transparence.

5. La mise en place d'un cadre scientifique rigoureux à l'appui des activités d'inventaire et de notification des émissions est une réalisation majeure du programme de l'EMEP. Ce cadre établit des liens entre les travaux scientifiques et les politiques publiques, car les inventaires des émissions fournissent des données essentielles pour les activités de modélisation et pour l'évaluation du respect des obligations en matière de plafonds d'émissions découlant des protocoles à la Convention.

6 Le Guide EMEP/Agence européenne pour l'environnement (AEE) des inventaires des émissions de polluants atmosphériques (ci-après, le Guide) est le pilier de cette activité et

¹ Composé des membres du Bureau du Groupe de travail, des Présidents des équipes spéciales des programmes internationaux concertés (PIC) et de l'Équipe spéciale mixte des aspects sanitaires de la pollution atmosphérique, ainsi que de représentants des centres des programmes PIC.

² Composé des membres du Bureau de l'Organe directeur, des Présidents des équipes spéciales de l'EMEP et de représentants des centres EMEP.

³ Consultable à l'adresse : <https://unece.org/decisions>.

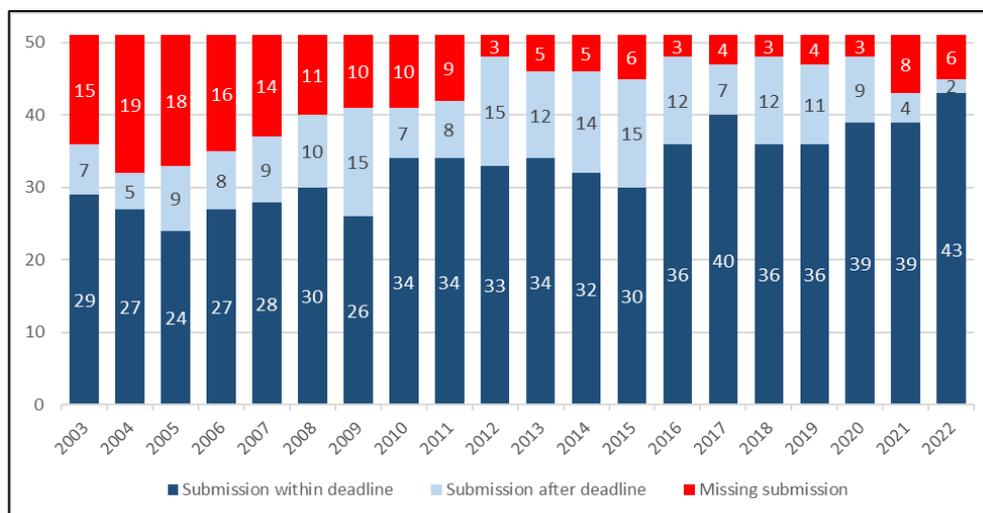
fournit des informations très complètes sur les moyens d'estimer les émissions de polluants atmosphériques. Le champ d'application technique du Guide est axé sur l'utilisation de méthodes relatives aux polluants visés par les engagements en matière de notification découlant de la Convention et aux sources pertinentes pour les pays situés dans la zone géographique couverte par la Convention. Cependant, le Guide est considéré dans le monde entier comme un manuel de référence essentiel concernant les inventaires des émissions de polluants atmosphériques⁴.

7. Les inventaires nationaux des émissions sont communiqués chaque année par les Parties, qui établissent également des rapports d'inventaire décrivant le contenu des inventaires nationaux et les hypothèses sur lesquels ils se fondent. Pour la plupart d'entre eux, les méthodes appliquées sont généralement conformes à la version de 2019 du Guide et la notification est, dans la plupart des cas, conforme aux Directives pour la communication des données d'émission et les projections des émissions au titre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (ECE/EB.AIR/125). L'évaluation des inventaires des émissions est effectuée selon une méthode en trois étapes, l'étape 3 étant la plus sophistiquée (examen « approfondi » par des pairs), et confiée à des experts nationaux en matière d'émissions (sélectionnés dans une liste de réserve).

8. Le nombre de Parties ayant soumis des rapports d'inventaire (47 en 2022) a considérablement augmenté au cours des dernières années. Cela étant, les rapports d'inventaire de 9 Parties étaient incomplets et 9 Parties n'en ont pas fourni. Le taux de déclaration des Parties a augmenté au cours de ces dernières années pour atteindre 94 % (voir la figure 1 ci-dessous).

Figure 1

Évolution de la communication des rapports d'inventaire (au 18 mars 2022) au cours des vingt dernières années

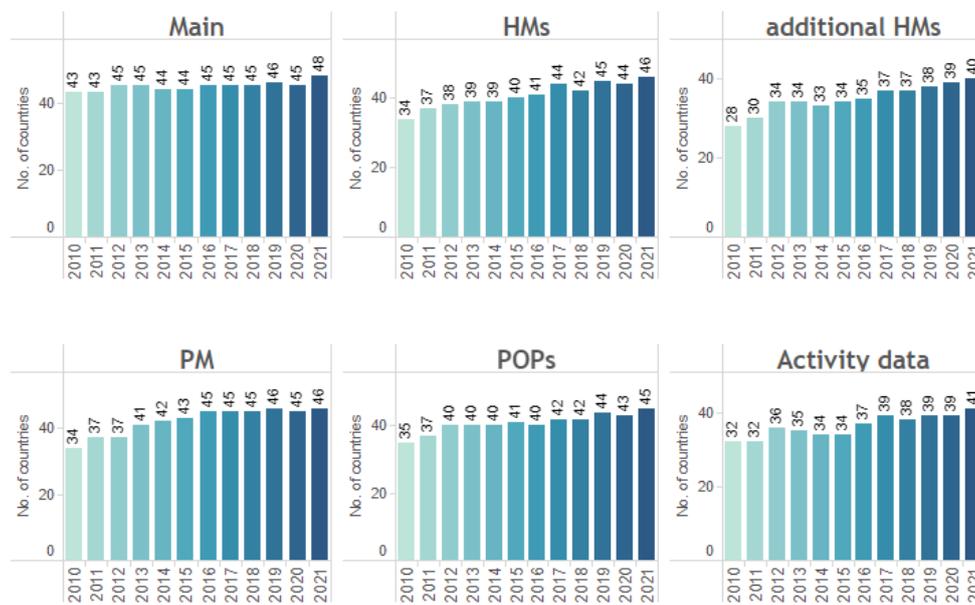


Source : Centre des inventaires et des projections des émissions.

9. L'exhaustivité reste un problème (voir la figure 2 ci-dessous), pour différentes raisons : soit il manque des données, soit les ensembles de données pour les polluants prioritaires sont incomplets, soit les séries chronologiques complètes ne sont pas fournies, soit les données sur les activités ne sont pas accompagnées de pièces justificatives adéquates.

⁴ Il a également été traduit en russe afin de le rendre accessible à un plus grand nombre de spécialistes chargés des inventaires dans la région de la CEE.

Figure 2
Nombre de Parties communiquant des données d'émission pour divers groupes de polluants (2010-2021)



Source : Centre des inventaires et des projections des émissions.

Abréviations : HMs – métaux lourds ; PM – particules ; POPs – polluants organiques persistants.

10. La cohérence des séries chronologiques est un problème que l'on retrouve encore fréquemment dans les examens approfondis annuels. En général, ce sont les premières années de la série chronologique qui sont concernées et les nouveaux calculs ne sont souvent pas appliqués de manière cohérente sur toutes les années. La cohérence des séries chronologiques des données notifiées peut être vérifiée à l'aide de visualiseurs de données mis à jour chaque année⁵.

11. L'exactitude est généralement meilleure pour les principaux polluants et les PM_{2,5} que pour les métaux lourds et les polluants organiques persistants (POP). Un problème fréquent lié à l'exactitude est l'application de méthodes de niveau 1 à une catégorie clef. Le principal élément permettant d'assurer une bonne transparence des inventaires est un bon rapport d'inventaire. Toutefois, neuf Parties n'ont pas communiqué de rapport d'inventaire pour l'année 2021, ce qui est un nombre moins élevé que les années précédentes.

12. Tous les inventaires d'émissions comportent des incertitudes. Comme ces inventaires constituent une base importante pour la réduction de la pollution atmosphérique, il est important d'estimer les incertitudes en question. Chaque inventaire devrait donc comporter des informations à ce sujet. En outre, les Directives pour la communication des données d'émission et les projections des émissions au titre de la Convention prévoient que : « les Parties chiffrer les incertitudes liées à leurs estimations des émissions au moyen des meilleures méthodes dont elles disposent, compte tenu des indications fournies dans le Guide EMEP/AEE »⁶. Toutefois, en 2021, moins de la moitié des Parties à la Convention ont donné une estimation des incertitudes dans leur inventaire. Habituellement, les Parties indiquent les incertitudes concernant les émissions totales et les tendances des émissions. On a observé ces dernières années un plus grand nombre d'estimations des incertitudes, même si les progrès sont lents.

13. On voit dans le tableau ci-après que les incertitudes signalées par les Parties pour la plupart des polluants varient considérablement. Il est probable qu'une partie de cette large fourchette soit due à des différences réelles au niveau des incertitudes des inventaires et qu'une autre partie soit due à une sous-estimation ou à une surestimation des incertitudes

⁵ Voir www.ceip.at/data-viewer.

⁶ ECE/EB.AIR/125, par. 31.

réelles. En outre, dans certains cas, les nouveaux calculs de ces dernières années donnent des chiffres plus élevés que ne le suggèrent les valeurs indiquées en matière d'incertitude⁷.

Analyse des incertitudes notifiées concernant les données d'émission (notifications de 2021)

<i>Polluant</i>	<i>Plage d'incertitude notifiée par les Parties pour les émissions nationales totales (%)</i>	<i>Nombre de Parties notifiant une estimation des incertitudes pour les émissions nationales totales</i>	<i>Plage d'incertitude notifiée par les Parties pour les tendances des émissions (%)</i>	<i>Nombre de Parties notifiant une estimation des incertitudes pour les tendances des émissions</i>
NO _x	8,5-59	19	1-31	19
COVNM	15-112	19	1,8-32,2	19
SO _x	5-47	19	0,2-103	19
NH ₃	9,5-143	19	3,1-364,8	19
PM _{2,5}	9,96-96,6	17	3-140	18
CN	27,1-302	7	3,1-67	7

Source : Centre des inventaires et des projections des émissions

Abréviations : NH₃ – ammoniac ; COVNM – composés organiques volatils non méthaniques ; NO_x – oxydes d'azote ; SO_x – oxydes de soufre.

14. Dans le cadre de cet examen, une attention particulière a été accordée aux transports maritimes et fluviaux, qui sont aujourd'hui une source majeure de polluants atmosphériques. Trois catégories de la Nomenclature pour la notification des données (Nomenclature For Reporting, NFR) concernent les émissions provenant de ce secteur : NFR 1.A.3.d.i(i) (navigation maritime internationale) ; NFR 1.A.3.d.i(ii) (navigation intérieure internationale) ; et NFR 1.A.3.d.ii (navigation nationale (transport de marchandises)). Les émissions d'oxydes d'azote dues au transport maritime international devraient rester à peu près constantes ou diminuer légèrement en valeur absolue au cours du XXI^e siècle, selon les hypothèses relatives à la croissance du commerce international et à l'utilisation des technologies de contrôle des émissions. La part des oxydes d'azote émis par le transport maritime mondial dans les émissions mondiales d'oxydes d'azote d'origine anthropique (actuellement d'environ 30 %) devrait varier entre 10 et 60 % d'ici à la fin du siècle, selon l'efficacité de la lutte contre les émissions d'oxydes d'azote d'origine terrestre. Dans le secteur des transports, la qualité des estimations pourrait également être améliorée pour l'aviation (comme pour le transport maritime) ; toutefois, il s'agit, par définition, d'une source « transfrontière », donc « internationale ». Il serait certainement préférable d'étudier la question en adoptant une approche centralisée, car laisser la collecte des données se faire séparément au sein de chaque Partie risque d'entraîner des lacunes, une instabilité de la qualité des données et, en général, des incohérences dans les ensembles de données.

15. Enfin, en ce qui concerne l'examen des engagements futurs en matière de réduction des émissions, il serait certainement utile de prendre désormais en compte les secteurs pour lesquels les méthodes et les données étaient jugées trop incertaines pour rendre obligatoire leur prise en considération. Ainsi, les sources d'oxydes d'azote et de COVNM provenant des activités agricoles pourraient être mieux décrites dans les inventaires communiqués à l'avenir. Les émissions provenant des activités liées au bétail et au fumier peuvent être estimées de manière appropriée dans les rapports nationaux sur les émissions. Les méthodes et les coefficients d'émission ont été mis à jour dans les dernières versions du Guide. Les émissions provenant des terres agricoles et des cultures ne sont ni obligatoires dans le processus de notification ni prises en compte lors du contrôle du respect des engagements au niveau national. Le degré d'incertitude est encore élevé, mais compte tenu, d'une part, de l'amélioration possible de la description de ces émissions anthropiques et, d'autre part, de leur importance potentielle, il semble pertinent de les inclure dans les processus de notification à l'avenir.

⁷ Sabine Schindlbacher, Bradly Matthews et Bernhard Ullrich, « Uncertainties and recalculations of emission inventories submitted under CLRTAP », rapport technique du Centre des inventaires et des projections des émissions (CIPE) n° 01/2021 (s.l., 2021).

III. Surveillance et modélisation de l'atmosphère

16. La stratégie de surveillance de l'EMEP pour la période 2020-2029 (ECE/EB.AIR/2019/4) prévoit la mise en place d'un réseau spécialisé dans la mesure de la pollution atmosphérique de fond (concentrations et dépôts) dans les zones rurales afin d'évaluer les flux transfrontières. Ce réseau, dont le fonctionnement est assuré par des experts nationaux dans les États Parties, est coordonné et géré par le Centre de coordination pour les questions chimiques. Le cadre de modélisation de l'EMEP inclut la mise au point de modèles de chimie-transport tenant compte des connaissances les plus récentes sur les mécanismes de la pollution atmosphérique et la production de résultats de modélisation (cartes d'évaluation, analyse des relations source-récepteur, simulation de scénarios sur modèle), en vue de faire avancer les connaissances scientifiques et soutenir l'action des pouvoirs publics. Le réseau de surveillance de l'EMEP et ses travaux de modélisation ont déjà une longue histoire, ce qui permet d'analyser les tendances de manière cohérente pour des données remontant à plus de vingt ans. Les résultats de ces activités sont présentés ci-après⁸.

Ozone

17. L'ozone est un polluant secondaire et les tendances observées reflètent la variabilité météorologique dans une bien plus large mesure que les tendances relatives aux composés précurseurs. Les tendances observées en matière de pollution par l'ozone dépendent fortement du type de mesure considéré, avec d'importantes variations entre les tendances des concentrations moyennes annuelles et les tendances pour d'autres types de mesure relative à la santé (SOMO35⁹) et à l'exposition des écosystèmes, ou les pics les plus élevés¹⁰. Les tendances sont également fort différentes si l'on examine les données de différents types de stations de surveillance et de diverses zones géographiques. Les tendances subissent des effets de titrage, une diminution des émissions d'oxydes d'azote pouvant accroître la concentration d'ozone, en particulier en hiver. Au cours de la période 2000-2018, la concentration moyenne annuelle a augmenté d'un pourcentage allant jusqu'à 11 %, tandis qu'une légère diminution (3 %) a été observée dans les zones rurales¹¹. Cette différence entre les types de station est due à l'effet de titrage : la somme des émissions de O₃+NO₂ diminue de 2 % pour les sites urbains et de 13 % pour les sites ruraux.

18. Les tendances concernant l'ozone en été, avec des mesures de concentrations d'ozone plus élevées (concentration maximale quotidienne sur huit heures et somme annuelle des moyennes supérieures à 35 ppb (SOMO35)), sont plus fortes et plus claires que celles des données annuelles, bien que la variabilité d'un site à l'autre soit importante¹². Sur la base de critères rigoureux en matière de collecte de données, les tendances médianes de la concentration d'ozone maximale quotidienne en juin-août étaient de 0,6 ppb par an sur les sites de l'EMEP (modèle EMEP : -0,4 ppb par an). Les tendances observées ont montré bien plus de variabilité que les tendances modélisées et ont été plus affectées par les étés à forte concentration d'ozone de 2003 et 2006 dans certaines régions.

19. Les pics d'ozone diminuent systématiquement (de 11 et 6 % sur les sites ruraux et urbains, respectivement), mais cette fourchette de baisse peut être considérée comme limitée au regard des variations de -47 et de -54 % des émissions de COVNM et d'oxydes d'azote, respectivement, observées sur la même période. Cet écart dans les tendances relatives tient

⁸ On trouvera des informations plus détaillées dans le Rapport de situation de l'EMEP pour 2022 (à paraître) et celui de 2021 (EMEP_Status_Report_1_2021.pdf).

⁹ Somme annuelle des moyennes supérieures à 35 parties par milliard (ppb), pour l'ozone.

¹⁰ Voir : https://unece.org/DAM/env/documents/2016/AIR/Publications/Air_pollution_trends_in_the_EMEP_region.pdf.

¹¹ Ces estimations des tendances sont mises à jour pour la période 2000-2018 à l'aide de la méthode publiée dans le rapport portant sur la période 2000-2017 (qui sera à nouveau mis à jour à l'été 2021 pour la période 2000-2019), consultable à l'adresse suivante : www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-atni-report-16-2019-air-quality-trends-in-europe-2000-2017-assessment-for-surface-so2-no2-ozone-pm10-and-pm2-5-1.

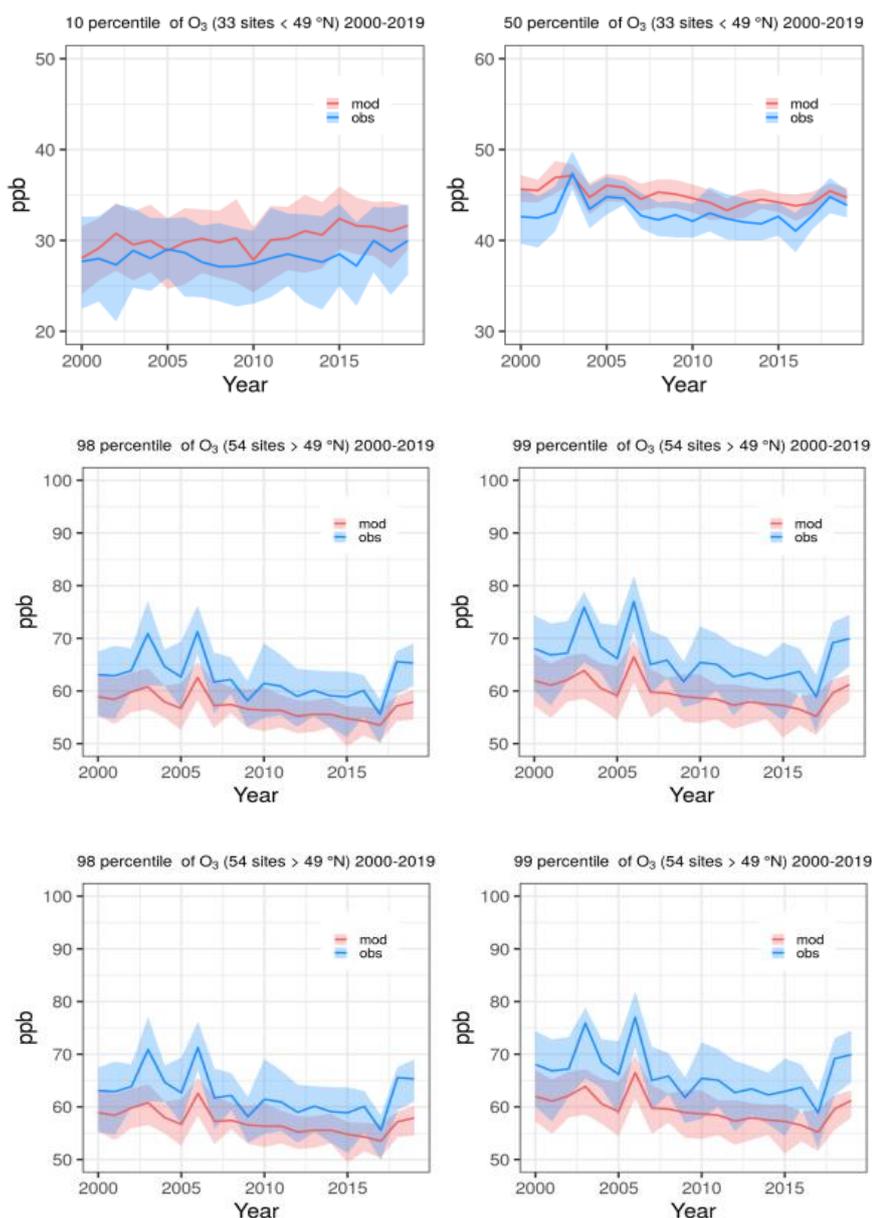
¹² Kai-Lan Chang *et al.*, « Regional trend analysis of surface ozone observations from monitoring networks in eastern North America, Europe and East Asia », *Elementa: Science of the Anthropocene*, vol. 5, art. 50 (2017).

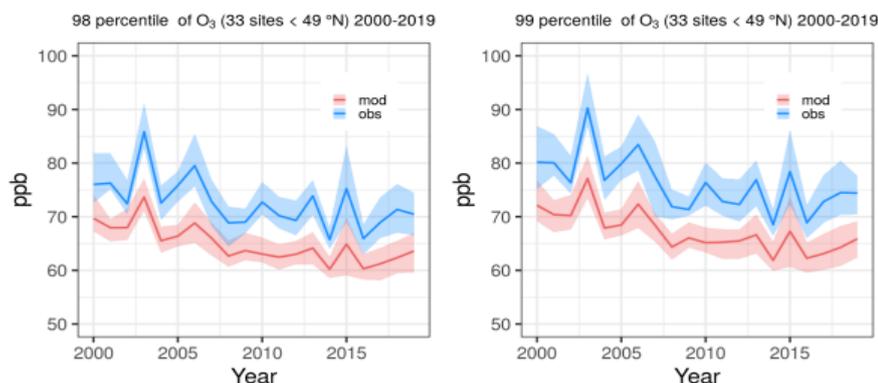
en grande partie au fait que les stratégies de réduction de l’ozone ne sont efficaces que pour réduire la part des concentrations qui dépasse une certaine charge naturelle, laquelle reste difficile à estimer. En outre, ces tendances pour la période 2000-2018 sont encore fortement influencées par les années 2003 et 2006, exceptionnelles pour l’ozone, même en ce qui concerne les pics. On n’enregistre généralement pas de baisse notable des pics d’ozone après 2007, sauf en Europe méridionale.

20. Ces conclusions sont illustrées dans la figure 3 ci-dessous, qui montre les percentiles les plus bas et les plus élevés des tendances de l’ozone au cours des vingt dernières années pour les zones Nord et Sud (au-dessus et au-dessous de 49 °N). Des tendances à la hausse ou des tendances stables apparaissent pour les niveaux de concentration les plus faibles, alors que de légères tendances à la baisse sont observées et modélisées (grâce aux réductions des émissions de précurseurs de l’ozone) pour les percentiles les plus élevés, en particulier dans la zone Sud. Les tendances enregistrées et modélisées sont assez cohérentes.

Figure 3

Tendances des percentiles annuels de la concentration d’ozone maximale quotidienne de 2000 à 2019 pour les données observées et les données modélisées par le Programme concerté de surveillance continue et d’évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe pour les sites situés au nord de 49 °N (première et troisième rangées de graphiques) et au sud de 49 °N (deuxième et quatrième rangées)





Source : Centre de coordination pour les questions chimiques.

Remarques : La ligne continue indique la médiane, et la zone ombrée indique le premier et le troisième quartile. Seuls les sites situés à moins de 1 200 m d'altitude et disposant de données sur au moins quinze ans sont inclus.

Composés soufrés et azotés

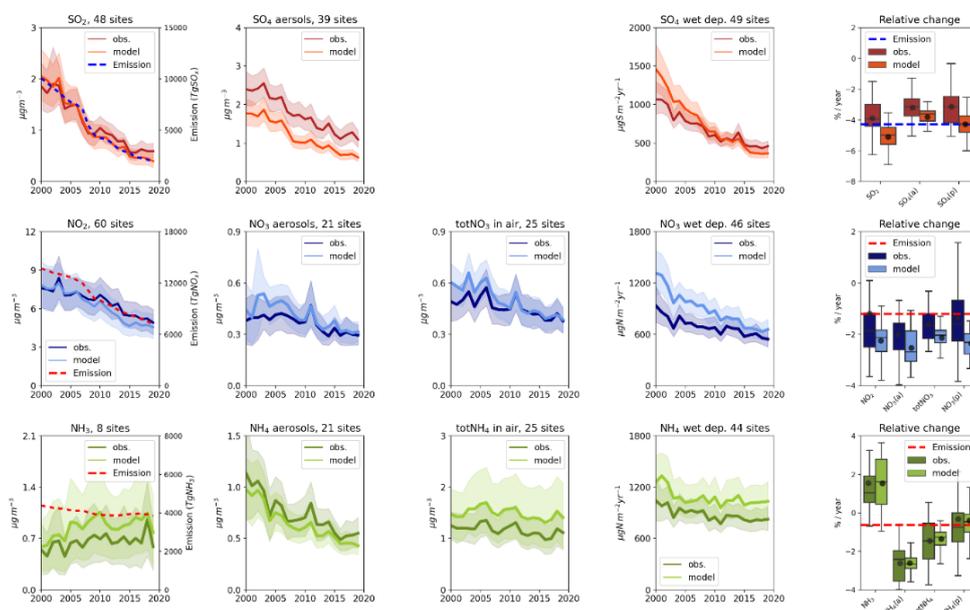
21. Les concentrations moyennes annuelles de dioxyde de soufre (SO_2) et de sulfates particulaires, ainsi que les dépôts humides de soufre oxydé, sont en baisse depuis les années 1980. Sur les sites de référence de l'EMEP, les variations entre 2000 et 2018 sont en moyenne respectivement de -4 %, de -2,9 % et de -3,3 % par an pour le SO_2 , les sulfates particulaires et les dépôts humides de soufre oxydé (résultats du modèle de l'EMEP : -5,3 %, -4,0 % et -4,5 % par an). Cette évolution correspond tout à fait à la baisse de 91 % des émissions notifiées au cours de la période 2000-2018 en Europe et l'influence du transport transcontinental est négligeable.

22. À partir de 1990 environ, les émissions totales d'oxydes d'azote ont sensiblement diminué en Europe, suivies d'une baisse des concentrations de dioxyde d'azote (NO_2) et de nitrates totaux (acide nitrique plus nitrates particulaires) présentes dans l'air et d'une réduction des dépôts d'azote oxydé (N) sur les sites de référence de l'EMEP. De 2000 à 2018, les réductions moyennes sur les sites de référence à long terme de l'EMEP ont été respectivement de -1,5 %, de -1,9 % et de -1,7 % par an pour les concentrations de NO_2 , celles de nitrates particulaires et les dépôts humides d'azote oxydé (résultats du modèle de l'EMEP : -2,3 %, -2,3 % et -2,4 % par an). La tendance pour les données enregistrées concernant le NO_2 (baisse de 37 et 28 % sur les sites ruraux et urbains, respectivement) est toutefois bien inférieure à la baisse notifiée des émissions en Europe (55 %).

23. Depuis 2000, seules des réductions modestes des émissions d'ammoniac ont été obtenues par rapport aux autres polluants. Par conséquent, l'ammonium présent dans les précipitations a légèrement diminué (médiane de -0,08 % par an de 2000 à 2018 sur les sites d'observation à long terme de l'EMEP). Cependant, la formation d'ammonium particulaire dans l'air dépend de la présence non seulement d'ammoniac, mais aussi d'acide nitrique (résultant d'oxydes d'azote) et de sulfates (résultant d'oxydes de soufre). Compte tenu des fortes réductions des émissions d'oxydes de soufre et d'oxydes d'azote au cours des dernières décennies, on observe un important excédent d'ammoniac et la présence de l'acide nitrique et des sulfates limite la formation d'ammoniac, ce qui entraîne une baisse de l'ammonium dans l'air de -2,8 % par an en moyenne sur les sites d'observation à long terme de l'EMEP. La quantité d'azote réduit total présent dans l'air (ammoniac + particules d'ammonium) a moins diminué (-1 % par an de 2000 à 2018), une fraction plus grande de l'azote réduit total étant l'ammoniac (mais avec une durée de vie plus courte que l'aérosol d'ammonium). La majorité des sites ne montrent aucune tendance significative pour l'ammoniac présent dans l'air. La figure 4 ci-dessous présente une synthèse de ces conclusions.

Figure 4

Tendances observées et modélisées pour les composés soufrés et azotés, comparées aux tendances des émissions (première et cinquième colonnes) pour les concentrations dans l'atmosphère et les dépôts humides sur la période 2000-2020

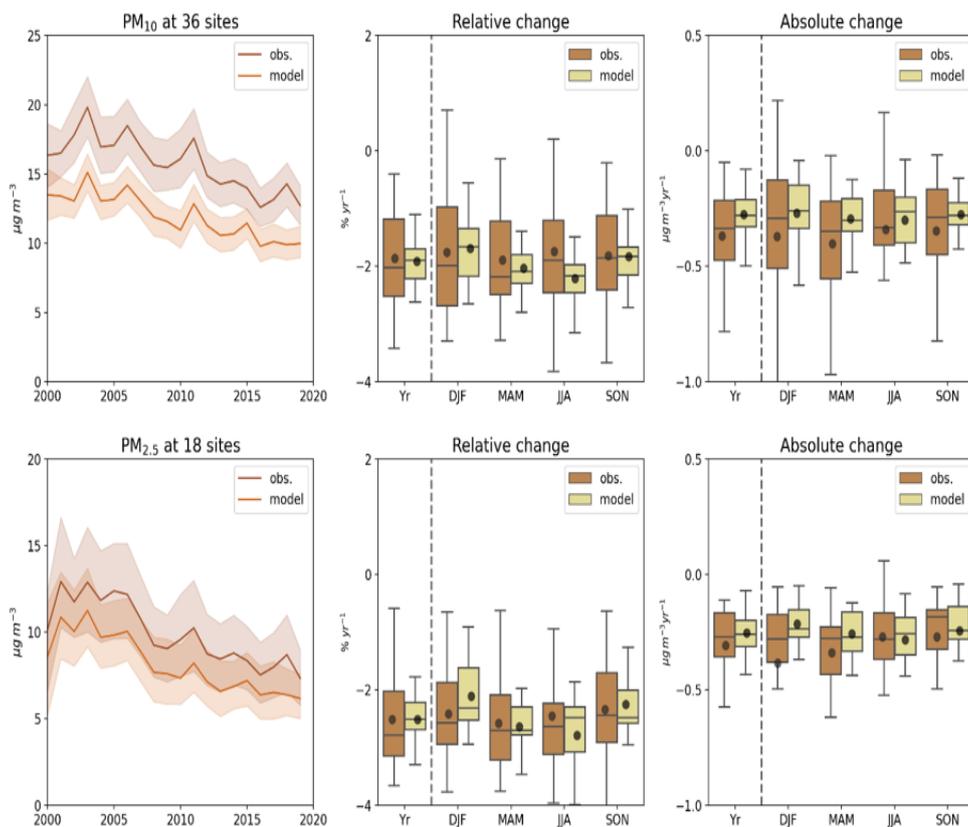


Matières particulaires (PM₁₀ et PM_{2,5})

24. Depuis 2000, on observe des réductions importantes des PM₁₀ et PM_{2,5} (en moyenne -1,7 et -2,3 % par an, respectivement, sur les sites d'observation à long terme de l'EMEP, et un peu plus dans les calculs du modèle de l'EMEP (-2,0 et -2,6 % par an). Les aérosols inorganiques secondaires (sulfates particulaires, nitrates et ammonium) diminuent de manière notable depuis 2000, les sulfates présentant la plus forte diminution (SO₄ : -2,9 (-4,0) % par an, NO₃ : -1,9 (-2,3) % par an, NH₄ : -2,8 (-2,9) % par an, les valeurs du modèle EMEP étant indiquées entre parenthèses). Pour les composants naturels (sel marin et poussière), il existe moins de sites d'observation à long terme, et seuls quelques-uns affichent des tendances significatives. Les tendances pour les PM₁₀ et PM_{2,5} dépassent le taux de variation des émissions de particules primaires en raison de l'effet supplémentaire des mesures d'atténuation visant les précurseurs des particules secondaires. Pour les PM_{2,5}, la baisse moyenne observée est de -31 %, contre -19 % pour les émissions (voir la figure 5 ci-dessous).

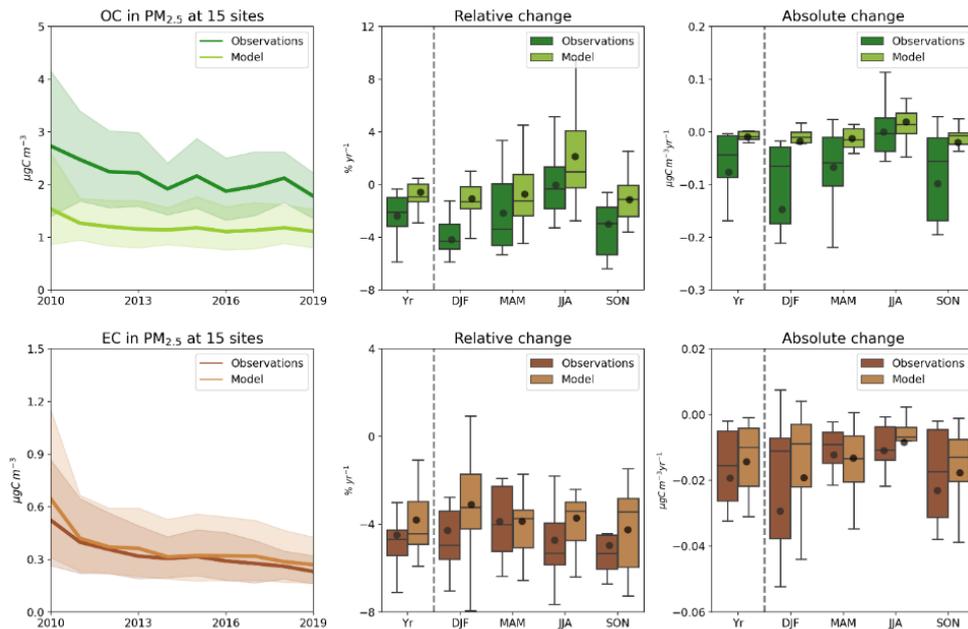
25. En ce qui concerne les aérosols carbonés, il existe très peu de sites disposant de mesures cohérentes à long terme. Les tendances pour la période plus courte 2010-2019 sont présentées dans la figure 6 ci-dessous. On constate une diminution de 4 % par an du carbone élémentaire depuis 2010, ce qui indique une réduction des sources anthropiques, alors que les tendances du carbone organique sont (davantage) influencées par des sources naturelles et donc plus difficiles à évaluer. La variabilité saisonnière est assez élevée pour le carbone organique, avec une diminution assez marquée en hiver (que la modélisation ne fait pas apparaître) et des tendances plus stables pour les autres saisons.

Figure 5
Tendances observées et modélisées pour les PM₁₀ et PM_{2,5} sur la période 2000-2020



Remarque : Les tendances annuelles et saisonnières des changements relatifs et absolus apparaissent également.

Figure 6
Tendances observées et modélisées pour le carbone organique et le carbone élémentaire sur la période 2010-2019



Remarque : Les tendances annuelles et saisonnières des changements relatifs et absolus apparaissent également.

Zones marines

26. Selon les calculs du modèle du Centre de synthèse météorologique-Ouest (CSM-O), les dépôts d'azote oxydé dans la mer Baltique ont diminué de 37 % entre 1995 et 2018. La diminution des dépôts d'azote réduit est beaucoup plus faible (4 %), alors que la quantité totale des dépôts d'azote a diminué de 25 %, principalement grâce aux réductions significatives des émissions d'oxydes d'azote provenant de sources terrestres et du transport maritime. Pour les régions relevant de la Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est (OSPAR) qui couvrent la mer du Nord et certaines parties de l'Atlantique Nord, la diminution des dépôts d'azote oxydé au cours de la même période a atteint 44 %. Cependant, les dépôts d'azote réduit n'ont pas diminué – on a même observé de légères augmentations dans certaines régions relevant de la Convention OSPAR. Une étude sur les effets futurs (à l'horizon 2030) du Protocole de Göteborg (et de la directive de l'Union européenne concernant la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques¹³) a été réalisée pour la Commission pour la protection de l'environnement marin de la mer Baltique (HELCOM). Selon les résultats du modèle du CSM-O, en 2030, les dépôts d'azote oxydé et d'azote réduit seront inférieurs d'environ 55 et 14 %, respectivement, par rapport aux valeurs de 2005. Les résultats de ces calculs sont résumés dans les rapports du CSM-O destinés à la Commission OSPAR et à la Commission d'Helsinki, ainsi que dans l'article de Gauss *et al.* (2021)¹⁴. Avec les apports provenant des émissions dans l'eau, l'apport maximal admissible d'azote dans la mer Baltique est toujours dépassé depuis 2017¹⁵.

27. Selon les résultats du modèle du CSM-O, les dépôts d'azote oxydé dans la mer du Nord, la mer Méditerranée et la mer Noire diminuent de 63, 28 et 20 %, respectivement, sur la période 2005-2030. Les dépôts d'azote réduit diminuent de 18 % (mer du Nord) et de 5 % (mer Noire) alors qu'ils augmentent légèrement en Méditerranée au cours de la période 2005-2030, malgré des réductions (mineures) des émissions d'ammoniac dans l'Union européenne.

Transport des polluants atmosphériques à l'échelle de l'hémisphère

28. Le transport intercontinental a plus d'effet sur les concentrations d'ozone troposphérique que sur celles des particules ou de leurs composants car la durée de vie de l'ozone dans l'atmosphère est plus longue. La concentration d'ozone en un lieu donné est déterminée par la combinaison de l'ozone et de ses précurseurs transportés depuis des sources éloignées à l'échelle hémisphérique ou régionale et, selon le régime photochimique, de l'ozone produit localement par réaction photochimique ou de l'ozone détruit localement par les oxydes d'azote, par effet de titrage. La diminution des émissions de précurseurs de l'ozone dans la région de la CEE a entraîné une diminution des pics de concentration d'ozone troposphérique à court terme associés à la production au niveau local par réaction photochimique, en particulier en été. La réduction des émissions d'oxydes d'azote a également entraîné une réduction de l'effet de titrage produit sur l'ozone par l'oxyde d'azote, ce qui a conduit à une augmentation des concentrations d'ozone troposphérique, notamment entre l'automne et le printemps, la nuit, et en Europe. Ces deux effets ont accru l'influence relative de l'ozone de fond, y compris l'ozone provenant du transport à l'échelle de l'hémisphère, sur les concentrations locales d'ozone relevées dans les zones urbaines de la région de la CEE, surtout en Europe.

29. Les pics de concentration d'ozone troposphérique en Europe et en Amérique du Nord ont considérablement diminué depuis 2000, mais les tendances pour les niveaux moyens annuels d'ozone sont mitigées, avec des augmentations sur certains sites et des diminutions sur d'autres. Les niveaux moyens d'ozone mesurés par les avions dans la troposphère libre au-dessus de l'Europe et de l'Amérique du Nord ont continué d'augmenter. Ailleurs dans le

¹³ Voir : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2016.344.01.0001.01.ENG&toc=OJ.L:2016:344:TOC.

¹⁴ Michael Gauss *et al.*, « Airborne nitrogen deposition to the Baltic Sea: Past trends, source allocation and future projections », *Atmospheric Environment*, vol. 253 (15 mai 2021).

¹⁵ Commission pour la protection de l'environnement marin de la mer Baltique (HELCOM), « Inputs of nutrients (nitrogen and phosphorus) to the sub-basins (2017) - Key message », HELCOM Indicators, HELCOM core indicator report (s.l., 2019).

monde, les pics et les moyennes annuelles de l’ozone troposphérique ont continué d’augmenter, tout comme les niveaux d’ozone à plus haute altitude mesurés par les avions.

30. Les tendances mitigées ou à la baisse des niveaux moyens annuels d’ozone masquent des tendances opposées selon les saisons. En Europe, en hiver (décembre-janvier-février) et au printemps (mars-avril-mai), de faibles tendances à la hausse ont été enregistrées sur certains sites, alors que de faibles diminutions ont été observées sur d’autres. En été (juin-juillet-août), cependant, de fortes diminutions ont été observées sur la plupart des sites européens au cours de la période 2000-2014. En automne (septembre-octobre-novembre), sur la plupart des sites, une absence de tendance ou une faible diminution a été observée. En Amérique du Nord, les niveaux d’ozone troposphérique en hiver (décembre-janvier-février) ont augmenté au cours de la période 2000-2014 alors que les niveaux en été (juin-juillet-août) ont diminué. Les tendances au printemps et à l’automne étaient mitigées, aucune tendance notable n’étant observée sur de nombreux sites¹⁶.

31. Cette tendance observée de l’ozone troposphérique et de ses effets ne s’explique pas complètement par les tendances des émissions de précurseurs en Europe et en Amérique du Nord. Les tendances à la baisse des émissions de précurseurs de l’ozone en Europe et en Amérique du Nord depuis 1990 environ semblent être au moins partiellement contrebalancées par l’augmentation des émissions d’oxydes d’azote et de composés organiques volatils hors de la région de la CEE et par l’augmentation des émissions de méthane au niveau mondial.

32. La contribution des sources d’émissions anthropiques situées hors de la région de la CEE aux différents types de particules et à leurs effets connexes dans la région est négligeable par rapport à l’incidence des sources anthropiques locales. Les incendies de forêt et la poussière soufflée par le vent émanant de l’extérieur de la région de la CEE influent toutefois sur les niveaux et les dépôts de particules dans la région de la CEE et sont sensibles aux changements climatiques.

33. Si les émissions d’oxydes d’azote et de composés organiques volatils étaient réduites partout du même pourcentage, les réductions des émissions hors de l’Europe auraient une incidence plus prononcée sur les niveaux d’ozone européens que les réductions des émissions en Europe. Des réductions des émissions d’oxydes d’azote et de composés organiques volatils d’un pourcentage égal à l’extérieur de l’Amérique du Nord contribueraient de manière significative à la diminution de l’ozone en Amérique du Nord, mais pas plus que les réductions des émissions d’un pourcentage égal en Amérique du Nord même.

34. En raison de sa longue durée de vie dans l’atmosphère, le méthane est bien mélangé. Les diminutions de l’ozone de surface résultant du contrôle des émissions de méthane sont largement indépendantes de l’emplacement de la source ; c’est-à-dire que des réductions égales des émissions de méthane dans différentes régions entraîneront des réductions semblables de l’ozone troposphérique de fond d’un endroit à l’autre. Cependant, la réaction locale à la réduction mondiale de méthane est plus forte dans les endroits où les émissions locales d’oxydes d’azote sont élevées et où la formation d’ozone est limitée par les composés organiques volatils.

IV. Effets sur la santé humaine, les matériaux et l’environnement

Santé humaine

35. L’Équipe spéciale mixte des aspects sanitaires de la pollution atmosphérique, relevant de la Convention et de l’Organisation mondiale de la Santé (OMS), réunit des experts de l’environnement et de la santé publique représentant les Parties à la Convention. Un rapport intitulé « Residential heating with wood and coal: Health impacts and policy options in Europe and North America » (Chauffage domestique au bois et au charbon : incidences sur la santé et solutions envisagées en Europe et en Amérique du Nord) a été présenté en 2015¹⁷.

¹⁶ Chang, « Regional trend analysis ».

¹⁷ Organisation mondiale de la Santé (OMS)/Processus européen environnement et santé (Copenhague, 2015).

Il contient une synthèse des données probantes relatives aux liens existant entre les émissions provenant du chauffage au bois ou au charbon et de graves problèmes sanitaires (par exemple, la mortalité et la morbidité liées à des problèmes respiratoires ou cardiovasculaires). La combustion du bois et du charbon produit également des composés cancérigènes et on estime que 61 000 décès prématurés sont imputables chaque année en Europe à la pollution de l'air ambiant due au chauffage domestique au bois et au charbon, auxquels s'ajoutent 10 000 décès par an en Amérique du Nord imputables à cette pollution. Ce rapport indique en conclusion qu'il serait difficile de lutter contre la pollution de l'air ambiant sans prendre de mesures concernant le chauffage au bois, qui constitue une source majeure de polluants atmosphériques nocifs, notamment de particules.

36. Les lignes directrices mondiales de l'OMS sur la qualité de l'air, qui constituent une référence en la matière, ont été publiées en 2021¹⁸. Elles contiennent des recommandations quantitatives, fondées sur les enjeux sanitaires et étayées par des données probantes, concernant la gestion de la qualité de l'air, qui sont exprimées en concentrations à long ou à court terme pour plusieurs polluants atmosphériques clés. Les nouvelles lignes directrices de l'OMS fournissent des niveaux indicatifs de qualité de l'air pour les PM_{2,5}, PM₁₀, O₃, NO₂, SO₂ et le monoxyde de carbone, et des objectifs intermédiaires, ainsi que le recensement de bonnes pratiques pour certains types de matières particulaires, comme le carbone noir ou élémentaire, les particules ultrafines et les tempêtes de sable et de poussière. L'objectif des lignes directrices est en définitive d'orienter les politiques et les actions visant à réduire les niveaux de polluants atmosphériques afin de diminuer l'énorme pression sanitaire résultant de l'exposition à la pollution atmosphérique dans le monde entier, y compris dans la région de la CEE.

37. Pour les PM_{2,5}, des estimations de la mortalité (décès prématurés) sont disponibles dans la base de données de l'OMS relative à la qualité de l'air ambiant dans le monde ; les estimations les plus récentes sont fondées sur les données de 2016 et concernent également les années de vie ajustées sur l'incapacité. Les estimations de la mortalité prématurée et des années de vie perdues sont disponibles dans les rapports de l'AEE¹⁹. On constate une tendance à la réduction des décès en raison d'une diminution des polluants atmosphériques, mais il existe encore des pics en certains lieux, par exemple pour le dioxyde d'azote dégagé à proximité des zones de trafic routier. Les données démographiques et les données sur l'espérance de vie proviennent d'Eurostat et celles concernant la mortalité émanent de l'OMS ; les orientations relatives à la relation exposition-réaction et à la population à risque suivent les recommandations du projet « Health Risks of Air Pollution in Europe » (Risques sanitaires liés à la pollution atmosphérique en Europe).

38. En ce qui concerne les autres paramètres de mesure de la santé, un nouveau projet a été mis en œuvre en vue d'élaborer une méthode d'estimation de la morbidité due à la pollution atmosphérique et de son coût économique (pour les lieux disposant des statistiques appropriées en matière de santé) et des fonctions concentration-réaction liées à la morbidité (résultats attendus en 2022). Le deuxième rapport « Perspectives en matière d'air pur » comprend des projections des tendances de la morbidité établies à partir des données du Centre pour les modèles d'évaluation intégrée²⁰. Des actions de suivi sont nécessaires pour vérifier la faisabilité de l'accès aux scénarios dans le cadre d'une coordination entre plusieurs équipes spéciales.

Matériaux

39. Selon les tendances observées (voir la figure 7 ci-dessous), la corrosion et la pollution ont beaucoup diminué depuis le début des années 1990 et un changement dans leur ampleur a été généralement observé aux alentours de 1997, période où la forte baisse a laissé place à une baisse modérée, voire à des niveaux constants. Les niveaux de SO₂ et la corrosion de l'acier au carbone et du cuivre ont diminué même après 1997, le phénomène étant plus prononcé dans les zones urbaines, tandis que la corrosion des autres matériaux ne montre

¹⁸ Voir : <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/978924003422-8-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

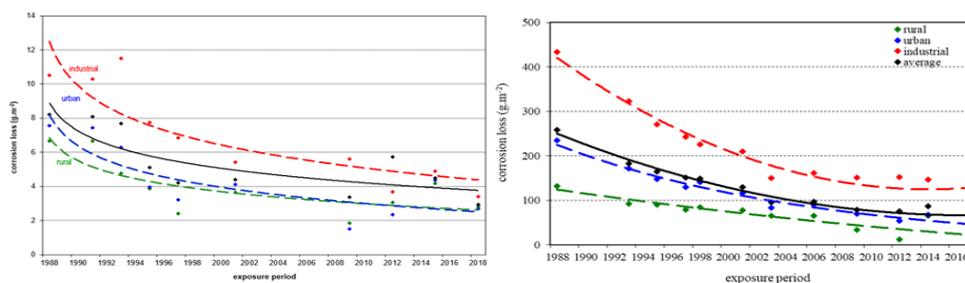
¹⁹ <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/>.

²⁰ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0003&from=EN>.

aucune diminution après 1997, si l'on considère les valeurs sur un an. Si l'on examine les valeurs sur quatre ans, on constate une baisse significative après 1997 pour le zinc, qui n'apparaît pas clairement d'après les valeurs sur un an. Des valeurs de corrosion supérieures aux niveaux acceptables sont encore observées à certains endroits en Europe.

Figure 7

(À gauche) Tendence annuelle de la diminution de la corrosion du zinc sur tous les sites d'essai pendant la période 1987-2018. (À droite) Tendence de la diminution de la corrosion de l'acier au carbone sur des sites ruraux, urbains et industriels pendant la période 1987-2018 (valeurs moyennes)



40. Pour ce qui est de l'encrassement, on n'a pas constaté de tendance à la baisse après 1997, ce qui signifie que de plus grandes zones en Europe se situent au-dessus des niveaux acceptables. Par conséquent, le programme sera axé à l'avenir sur l'exposition des nouveaux matériaux d'encrassement, par exemple les matériaux prélaqués sous forme de bobines et les matériaux à base de pierre. Les matières particulaires constituent le principal polluant responsable de l'encrassement des matériaux.

Environnement

Forêts

41. Il est vrai que les taux de dépôt d'azote inorganique dans les eaux d'égouttement de la frondaison sont actuellement élevés sur de nombreux sites du Programme international concerté d'évaluation et de surveillance des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts (PIC-Forêts), mais les mesures montrent une nette diminution sur la plupart de ces sites entre 2000 et 2015. Cette diminution a été particulièrement importante sur les sites fortement pollués. Sur le tiers des sites présentant le taux initial (2000-2004) de dépôt par égouttement de la frondaison le plus élevé, on a observé une réduction médiane de 24 % entre 2000 et 2015, tandis que sur le tiers des sites présentant le taux initial le plus faible, une réduction correspondante de 16 % a été enregistrée. Il est intéressant de noter que, sur de nombreux sites, le dépôt de nitrates par égouttement de la frondaison a diminué plus rapidement (26 %) que celui d'ammonium (18 %) entre 2000 et 2015. Il ressort des mesures à long terme du PIC-Forêts qu'un long laps de temps s'est écoulé entre la réduction des émissions et la modification de l'acidité de la solution du sol. En outre, les effets eutrophisants ou acidifiants des dépôts d'azote et de soufre inorganiques ont entraîné des déséquilibres dans la nutrition des arbres en Europe. Dans de nombreuses régions d'Europe, une tendance de croissance positive a été observée pour les arbres au cours des dernières décennies. Entre autres facteurs, la hausse des dépôts d'azote a contribué à stimuler leur croissance et à augmenter le stockage du carbone, mais sur les sites où la teneur en azote est suffisante, des dépôts supplémentaires de cet élément peuvent entraîner des déséquilibres en nutriments, notamment une carence en phosphore, un lessivage des nitrates, une acidification et une perte de cations basiques ainsi qu'une vulnérabilité accrue aux parasites ou aux agents pathogènes. Des dépôts élevés d'azote peuvent donc avoir des effets divergents et potentiellement freiner la croissance des forêts²¹.

²¹ W. de Vries *et al.*, « Impacts of acid deposition, ozone exposure and weather conditions on forest ecosystems in Europe: an overview », *Plant and Soil*, vol. 380, n^{os} 1 et 2 (2014), p. 1 à 45 ; Sophia Etzold *et al.*, « Nitrogen deposition is the most important environmental driver of growth of pure, even-aged and managed European forests », *Forest Ecology and Management*, vol. 458 (15 février 2020).

Bassins versants forestiers

42. Les bassins versants relevant du Programme international concerté de surveillance intégrée des effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes (PIC-Surveillance intégrée) ont de plus en plus réagi aux diminutions des émissions et des dépôts d'azote en Europe. Entre 1990 et 2017, les concentrations et les flux d'azote inorganique total dans les eaux de ruissellement ont en effet connu une tendance générale à la baisse (dans respectivement 76 et 69 % des sites). La diminution des concentrations de nitrates (NO_3) et d'ammonium (NH_4) a été marquée dans respectivement 59 et 36 % des sites, mais les flux n'ont décliné sensiblement que dans respectivement 25 et 31 % d'entre eux. Les tendances à la baisse des émissions de soufre et d'azote et, par conséquent, la réduction des dépôts dans les eaux de ruissellement ont généralement été plus progressives depuis le début des années 2000. Une corrélation négative marquée a été trouvée entre les variations annuelles des concentrations d'azote inorganique total et des flux de ruissellement, les flux moyens d'azote inorganique total dans les eaux d'égouttement de la frondaison, les concentrations d'azote total et les ratios azote/phosphore dans le feuillage et la litière, et les concentrations et flux d'azote total dans l'eau du sol. Les résultats ont également montré que les sites les plus touchés par l'azote présentaient à la fois les plus importants dépôts dans le sol forestier et les plus fortes concentrations dans le feuillage, la litière, les eaux de ruissellement et les eaux du sol, ainsi que les baisses les plus prononcées de l'azote inorganique total dans les eaux de ruissellement.

43. Pour évaluer les effets bénéfiques sur la végétation de sous-bois de la réduction actuellement mandatée par la législation des dépôts d'azote, on a fait appel aux données issues de 23 sites forestiers européens appartenant aux réseaux du PIC-Surveillance intégrée, du PIC-Forêts et de l'infrastructure européenne intégrée de recherche à long terme sur les écosystèmes, les zones critiques et les socioécosystèmes (eLTER-RI) et produisant des données à long terme de bonne qualité sur les dépôts, le climat, la chimie du sol et la végétation de sous-bois. Un modèle dynamique des sols couplé à un modèle statistique des niches d'espèces végétales a été utilisé pour une simulation à partir des conditions climatiques et des dépôts enregistrés sur les sites. Des indicateurs des effets des dépôts d'azote et du réchauffement climatique, tels que les variations dans la présence des espèces végétales oligophiles (vivant dans les milieux pauvres en nutriments), acidophiles (vivant dans les milieux acides) et tolérantes au froid, ont été utilisés pour comparer la situation actuelle aux projections pour 2030 et 2050. La diminution des dépôts d'azote conformément aux objectifs de réduction des émissions jusqu'en 2030 fixés par la législation actuelle ne devrait pas entraîner d'inversion de la tendance à l'eutrophisation. Les prévisions du modèle, qui présentent toutefois une forte marge d'incertitude lorsqu'on les confronte aux observations, indiquent que le nombre d'espèces végétales oligophiles des sous-bois devrait continuer de diminuer. Ces résultats s'expliquent en partie par des facteurs confondants liés aux effets climatiques ainsi qu'à des diminutions importantes des dépôts de soufre et à la régénération des sols dégradés par l'acidification qui en résulte. Ils ont cependant montré que la réduction des dépôts d'azote mandatée par la législation en vigueur serait très probablement insuffisante pour permettre aux sols eutrophisés de se régénérer. Ils ont également montré que les réductions des émissions d'oxydes d'azote devaient être considérablement plus importantes pour permettre la régénération dans des zones ayant subi des dépôts d'azote chroniquement élevés.

44. Il est ressorti des études menées dans le cadre du PIC-Surveillance intégrée qu'une approche systémique pouvait aider à faire face aux effets conjugués du réchauffement climatique et de la pollution atmosphérique sur le fonctionnement des écosystèmes et l'évolution de la biodiversité²². Une chaîne de modèles a été appliquée à un ensemble de données combinées provenant de 26 sites forestiers du PIC-Surveillance intégrée, du PIC-Forêts et du Programme européen de recherche à long terme sur les écosystèmes, situés dans toute l'Europe. Sur la base des prévisions jusqu'en 2100 des dépôts d'azote et de soufre et des changements climatiques, les principales propriétés des sols, par exemple le pH de la

²² Thomas Dirnböck *et al.*, « Currently legislated decreases in nitrogen deposition will yield only limited plant species recovery in European forests », *Environmental Research Letters*, vol. 13, n° 12 (17 décembre 2018) ; Maria Holmberg *et al.*, « Modelling study of soil C, N and pH response to air pollution and climate change using European LTER site observations », *Science of the Total Environment*, vol. 640 et 641 (1^{er} novembre 2018), p. 387 à 399.

solution du sol, leur saturation basique et leur rapport carbone organique/azote (rapport C/N), ont été simulées. Selon des simulations réalisées sur la base de projections à la baisse des dépôts d'azote, les conditions pédologiques devraient s'améliorer dans les conditions climatiques actuelles : le pH, la saturation basique des sols et le rapport C/N étaient plus élevés pour respectivement 21, 16 et 12 sites sur les 26 étudiés. Lorsque les prévisions relatives aux changements climatiques étaient intégrées, le pH du sol augmentait dans la plupart des cas, tandis que la saturation basique et le rapport C/N étaient plus élevés à peu près dans la moitié des cas. Presque aucun scénario de réchauffement climatique n'a mené à une diminution du pH. Les résultats de la modélisation ont également indiqué que les diminutions des dépôts d'azote mandatées par la législation en vigueur seraient très probablement insuffisantes pour permettre à la végétation de sous-bois de se régénérer en cas d'eutrophisation. Les réductions des émissions d'azote oxydé et d'azote réduit devraient être considérablement plus importantes pour permettre la régénération dans des zones ayant subi des dépôts d'azote chroniquement élevés. Ces études montrent l'intérêt que présentent les sites de surveillance intégrée à long terme pour l'application de modèles permettant de prévoir la réaction des sols, de la végétation et des espèces face aux multiples changements environnementaux.

Fleuves, rivières et lacs

45. D'après l'ensemble de données du Programme international concerté d'évaluation et de surveillance des effets de la pollution atmosphérique sur les cours d'eau et les lacs (PIC-Eaux), qui comprend des données récoltées depuis 1990 dans environ 500 lacs et cours d'eau d'Europe et d'Amérique du Nord, les principaux indices d'acidification – tels que la capacité de neutralisation d'acide, le taux de pH et les concentrations des formes toxiques d'aluminium – montrent qu'un processus de régénération est en cours. Les tendances observées traduisent les effets de la réduction des dépôts de substances acidifiantes, mais les changements climatiques ainsi que les modifications de l'utilisation des sols deviennent des facteurs de changement plus importants. En effet, les perturbations majeures telles que les incendies de forêt et les invasions d'insectes, qui sont souvent liées au climat, peuvent entraîner une réacidification des eaux de surface.

46. Les dépôts d'azote ont diminué dans une moindre mesure que les dépôts de soufre, et de grandes questions subsistent quant à leurs effets chimiques et biologiques. Le climat et les propriétés des bassins versants influent considérablement sur le lessivage de l'azote, ce qui montre qu'il existe un lien entre la pollution atmosphérique et les effets de l'azote réactif dans les eaux de surface. Bien que l'azote soit un nutriment essentiel, le phosphore est souvent le principal facteur de contrôle de la productivité des eaux douces. Cela étant, il est de plus en plus clairement établi que l'azote provenant des dépôts d'azote peut influencer sur la productivité des eaux douces dans les lacs pauvres en nutriments. Le lessivage de l'azote atmosphérique déposé sur les eaux de surface et, en aval, sur les écosystèmes marins, peut également contribuer à l'eutrophisation marine, car l'azote est le nutriment limitant dans les eaux marines. Il est important de déterminer les sources de l'azote présent dans les masses d'eau (dépôts, agriculture ou autre source) pour pouvoir évaluer les effets des mesures visant à réduire les émissions d'azote dans l'environnement. D'après les résultats préliminaires du rapport sur l'azote, des données utiles en cours d'élaboration viendront étayer les orientations empiriques sur la charge critique que le Groupe de travail des effets établit actuellement.

47. Des ensembles de données à long terme sur la surveillance de l'environnement des sites alpins et subalpins italiens et suisses ont révélé une nette réduction des dépôts de soufre et d'azote oxydé en 2020, phénomène qui s'écarte de la tendance à long terme. Cet écart résulte très probablement d'une moindre émission d'oxydes d'azote dans l'atmosphère en raison de la réduction du trafic automobile pendant la pandémie de COVID-19. Certaines améliorations de la composition chimique de l'eau ont également été observées, en particulier s'agissant des nitrates, ce qui donne à penser que les sites alpins sensibles à l'acidité se prêtent très bien à la surveillance des réactions des eaux douces face à des changements rapides de la chimie atmosphérique.

48. Les données de surveillance provenant du Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord montrent des changements biologiques qui appuient l'hypothèse d'une réaction à la régénération chimique dans certaines des zones – mais pas toutes – où les eaux

acidifiées sont en voie de régénération, tandis que les données provenant de lacs alpins italiens ne révèlent pas de tendances bien claires. Au Royaume-Uni, l'ampleur des changements biologiques ne fait pas ressortir de relation bien claire avec les seuils de capacité de neutralisation d'acide communément utilisés pour définir les « limites critiques ». Les facteurs qui déterminent le taux de régénération biologique ne sont pas bien compris, et il n'est pas toujours évident de savoir quels organismes sont les plus sensibles à l'acidification. Non seulement les environnements des sites du PIC-Eaux dégradés par l'acidification se régénèrent, mais ils sont également plus riches en azote réactif et se réchauffent en raison des changements climatiques. Après régénération, les communautés biologiques peuvent être très différentes de celles présentes avant l'acidification.

49. Dans de nombreux pays européens, les réseaux de surveillance des eaux de surface fournissent des données à l'appui de plusieurs instruments d'action tels que la Convention ainsi que la Directive fixant des plafonds d'émissions nationaux (Directive PEN) et la Directive-cadre sur l'eau (DCE) de l'Union européenne²³. Dans certains pays, le réseau de surveillance relevant de la Directive PEN est plus étendu que le réseau de surveillance national qui fournit des données au PIC-Eaux, alors que dans d'autres pays, les réseaux sont en grande partie identiques. En application de la DCE, la taille minimale suggérée pour les lacs est de 0,5 kilomètre carré, ce qui est supérieur à celle de nombreux lacs d'amont du PIC-Eaux. Or les petits lacs et cours d'eau d'amont qui ne sont pas affectés par les facteurs confondants que sont les pressions locales telles que l'agriculture ou la pollution ponctuelle sont une référence essentielle pour l'évaluation des pressions qui s'exercent à l'échelle régionale (pollution atmosphérique, changements climatiques), ce processus d'évaluation devant par exemple être mené au titre de la Convention et de la Directive PEN.

50. En raison des différences entre les systèmes nationaux de classification de l'acidification des eaux de surface, il peut être difficile, dans le cadre de la DCE, de comparer l'état écologique de ces eaux d'un pays à l'autre. La définition physico-chimique du seuil important entre un état de l'acidification des masses d'eau qui est bon (c'est-à-dire acceptable) et un état qui est moyen (c'est-à-dire inacceptable) diffère entre la Norvège, la Suède et la Finlande. Un ensemble de données provenant de pays nordiques concernant la chimie et la biologie a été utilisé pour proposer un système fondé sur la capacité de neutralisation d'acide susceptible de servir à harmoniser les systèmes de classification.

Effets de l'ozone sur les cultures et la végétation : niveaux critiques

51. Le profil de l'ozone a changé depuis 1990. Les concentrations « de pointe » ont diminué, tandis que les concentrations « de fond » ont augmenté. Les mesures fondées sur les concentrations observées au-dessus de seuils relativement élevés, comme l'exposition cumulée à l'ozone au-delà d'une concentration limite de 40 parties par milliard (AOT40), mettent fortement l'accent sur les concentrations de pointe. Des données scientifiques ont montré que la végétation réagit à l'absorption cumulée d'ozone, mise en évidence dans les mesures de la dose d'ozone phytotoxique fondées sur les flux, et que la réaction est la même qu'il s'agisse d'une « concentration de fond élevée » ou d'une « concentration de pointe épisodique ». Par conséquent, les effets de l'ozone sur la végétation peuvent également être constatés lorsque le niveau critique fondé sur l'indice AOT40 n'est pas dépassé.

52. L'analyse des données modélisées n'a révélé qu'un faible changement dans la perte de rendement du blé pour les périodes 1990-2010 et 2010-2030. Faite en collaboration avec le Centre thématique européen sur la pollution atmosphérique et l'atténuation des changements climatiques de l'AEE, la modélisation des effets de l'ozone sur le rendement du blé a révélé que, pour l'Europe, sur la base de l'AOT40 modélisé, les pertes de rendement du blé calculées ont considérablement diminué, passant de 18,2 à 10,2 % entre 1990 et 2010, alors que, selon les mesures fondées sur les flux (POD6SPEC), les pertes n'ont pas changé de manière significative, c'est-à-dire qu'elles s'établissaient respectivement à 14,9 et à 13,3 % en 1990 et en 2010. Le pourcentage de perte de rendement (d'après la mesure de flux POD3IAM) était similaire en Europe et en Amérique du Nord (environ 6,6 et 5,5 % en 2010 et 2030, respectivement). Pour autant, la perte de production était plus élevée en Europe, car

²³ Consultable à l'adresse <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32000L0060&from=EN>.

la production totale de blé y avait doublé. En pourcentage, les pertes de rendement sont différentes dans les évaluations de 1990-2010 par rapport à celles de 2010-2030 en raison des différents paramètres de mesure de flux utilisés.

53. Une modélisation précise des effets de l’ozone sur la végétation passe par un paramétrage de la relation dose-effet pour chaque espèce. On manque actuellement, pour mener ces travaux, de données expérimentales permettant de paramétrer à la fois la composante « absorption stomatique » et la composante « évolution des rendements ». Il existe de nombreuses espèces (cultures, arbres et végétation semi-naturelle) pour lesquelles de telles informations n’existent pas actuellement, et certaines sont même des espèces communes et économiquement importantes.

54. La pollution par l’ozone a des répercussions sur les écosystèmes et leurs fonctions. Les connaissances scientifiques sur les flux cumulés d’ozone (y compris à partir de faibles concentrations d’ozone) mettent en évidence des effets sur les cultures, les arbres et les écosystèmes, notamment sur la croissance et la floraison (nombre et calendrier).

55. Les évaluations actuelles des risques liés aux effets de l’ozone sur les écosystèmes sont axées sur la composante « végétation », mais d’après des informations et des évaluations qualitatives, on constate que les effets de la pollution par l’ozone touchent bien plus que la seule végétation. Cette pollution a des répercussions sur le biote du sol et, à la fois directement et indirectement, sur d’autres niveaux trophiques, notamment les insectes pollinisateurs. Pour évaluer les risques liés à l’ozone, il est également utile d’étudier les effets de ce gaz sur le fonctionnement des écosystèmes, tels que le stockage du carbone dans les sols, le cycle de l’eau et des nutriments dans les écosystèmes ou l’efficacité de l’utilisation des ressources.

56. La pollution par l’ozone peut réduire l’efficacité de l’utilisation de l’azote dans certaines cultures, comme le blé, le soja et le riz. La fertilisation à l’azote devenant moins efficace, l’ozone peut accroître les pertes d’azote dans les écosystèmes agricoles, par exemple en raison du lessivage des nitrates et des émissions d’oxyde d’azote. L’ozone troposphérique peut donc être à l’origine d’une augmentation de l’azote dans les cours d’eau, mais l’ampleur potentielle de ce phénomène n’a pas été quantifiée. On observe une situation analogue pour la végétation semi-naturelle, car l’effet stimulant de l’azote sur la croissance peut progressivement se perdre avec l’augmentation des concentrations d’ozone et parfois des émissions d’oxyde nitreux provenant du sol.

57. Selon des études à grande échelle menées sur les placettes du PIC-Forêts, malgré une réduction légère mais significative des niveaux d’ozone pendant la période végétative, les niveaux critiques fondés sur la concentration (indice AOT40) ont été dépassés sur la majorité des sites étudiés, en particulier en Europe orientale et méridionale. Sur ces sites, des dommages causés aux feuilles imputables à l’ozone ont été détectés sur plusieurs espèces, principalement les feuillus. Le niveau de sensibilité aux dommages causés par l’ozone varie également d’une espèce à l’autre et d’une région à l’autre (par exemple, en Grèce, le *Sorbus torminalis* semble être plus sensible que le *Fagus Sylvatica*). L’apparition et la gravité des symptômes visibles causés par l’ozone dépendent non seulement des niveaux d’ozone, mais aussi de plusieurs autres paramètres environnementaux et des caractéristiques de la végétation qui déterminent l’absorption stomatique. Les effets combinés des changements climatiques et des agents biotiques (parasites et maladies) devraient modifier considérablement les résultats exposés ci-dessus. Cela dépendra toutefois des conditions propres à chaque site.

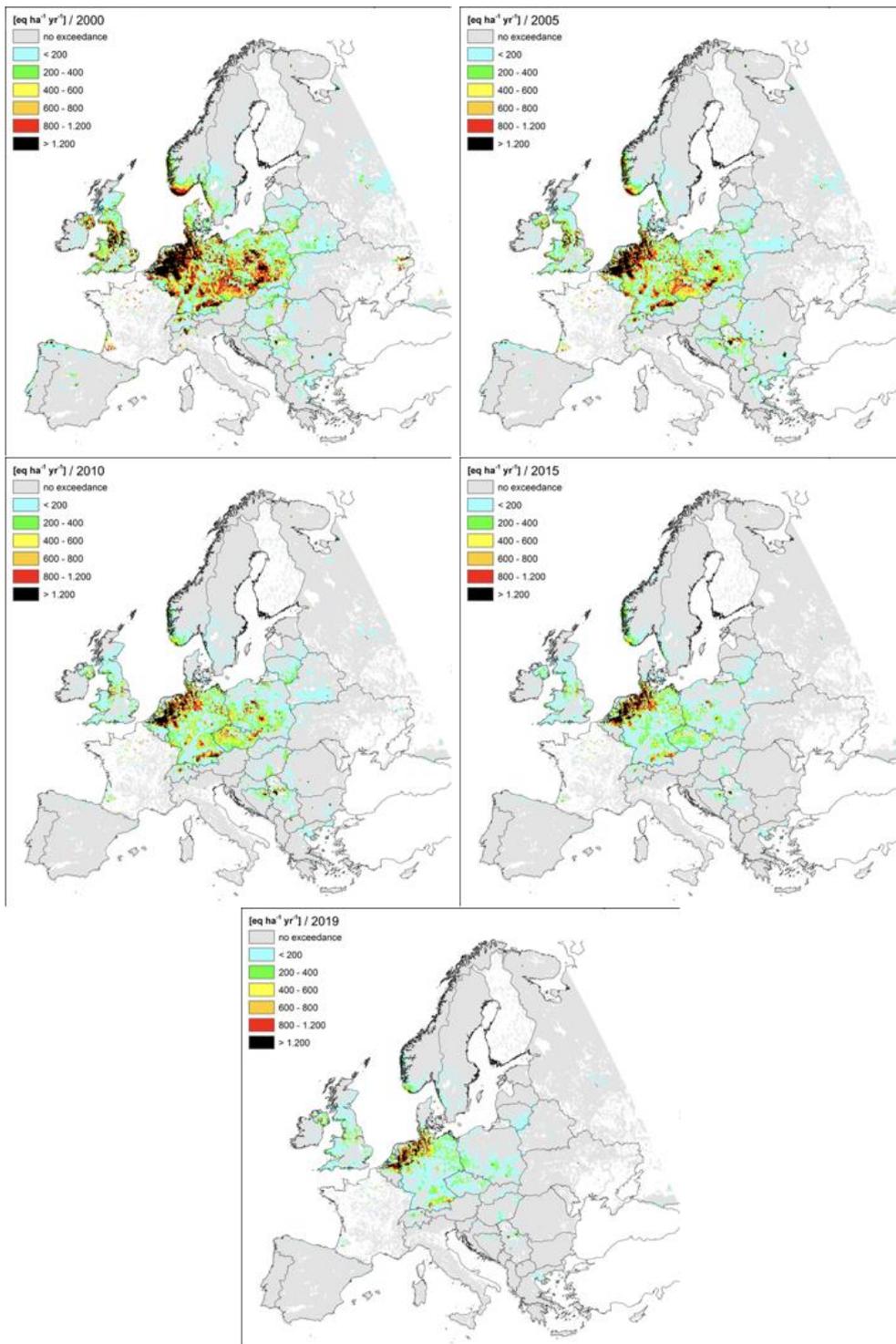
58. Il existe des interactions entre la pollution par l’ozone et les changements climatiques. Certaines d’entre elles modifient l’exposition de la végétation à l’ozone : par exemple, l’accélération du développement phénologique provoquée par une hausse des températures entraîne un débourrement plus précoce et, partant, une exposition des plantes à l’ozone plus tôt au printemps que ne le prévoient les modèles actuels. En agissant sur l’ouverture des stomates, les modifications des conditions météorologiques et de l’humidité du sol provoquées par les changements climatiques influent sur les quantités d’ozone absorbé par la végétation. Cependant, la nature et l’ampleur de cette évolution dépendront de la différence entre les conditions perçues et les conditions optimales pour chaque paramètre relatif au climat et à l’humidité du sol.

Charges critiques

59. Le concept de « charge critique » a été mis au point pour déterminer le seuil au-dessous duquel les dépôts nocifs n'entraînent pas d'effets néfastes sur les écosystèmes. Dès que les dépôts estimés dépassent la charge critique, on considère que les écosystèmes sont en danger.

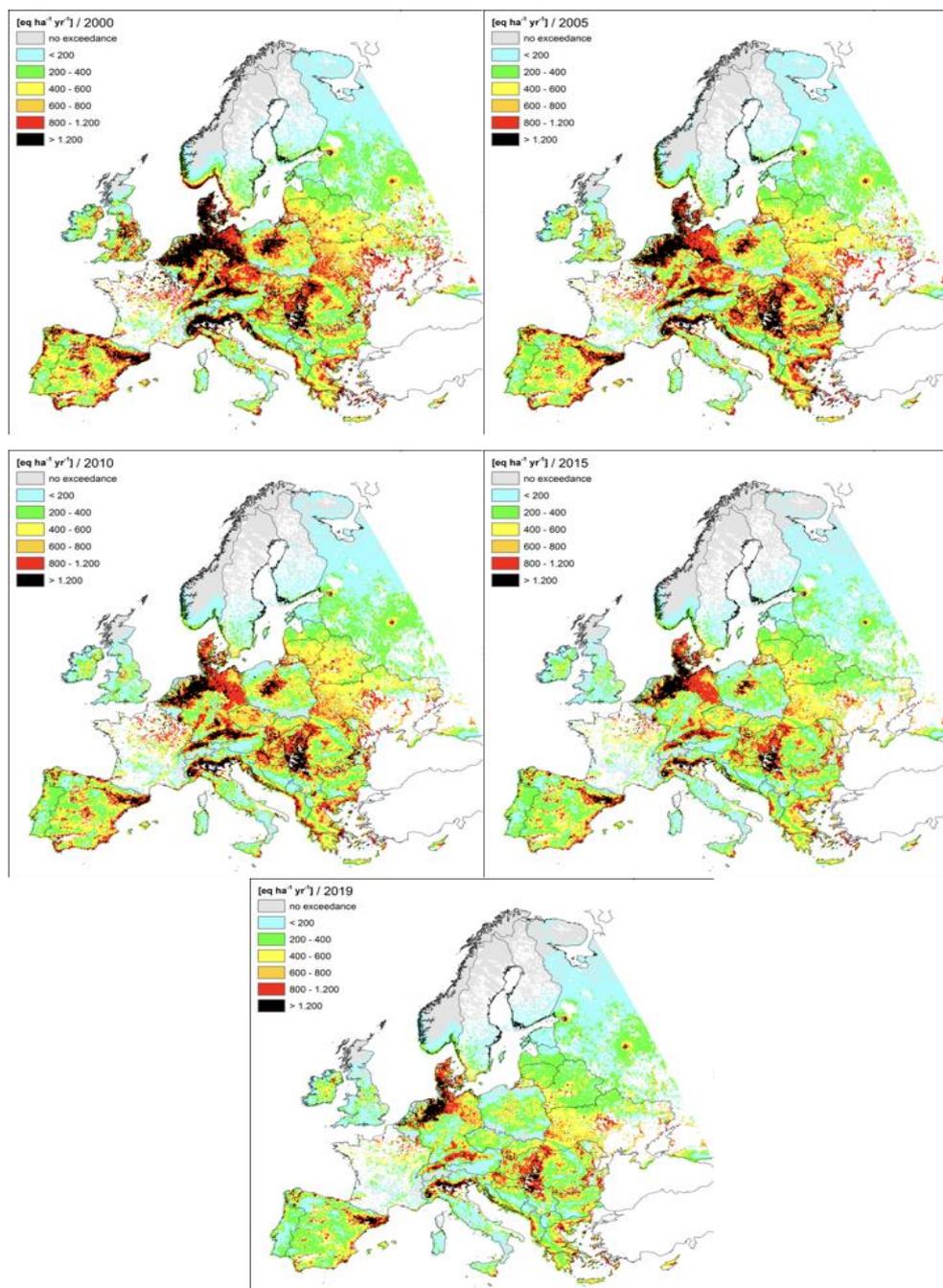
60. Comme on peut le voir sur les cartes (voir la figure 8 ci-dessous), les charges critiques d'acidité sont dépassées sur 14 % (2000) et 4,4 % (2019) de la superficie de l'écosystème. Les charges critiques d'eutrophisation, quant à elles, sont dépassées sur de grandes parties de la zone modélisée, et ce, pour toutes les années (voir la figure 9 ci-dessous). Les dépassements concernaient 75 % de la superficie en 2000 et 64,3 % en 2019.

Figure 8
Dépassement de la charge critique d'acidification pour les années 2000, 2005, 2010, 2015 et 2019



Source : Données sur les dépôts provenant du CSM-O de l'EMEP ; données sur les charges critiques provenant du Centre de coordination pour les effets (CCE).

Figure 9 :
Dépassement de la charge critique d'eutrophisation pour les années 2000, 2005, 2010, 2015 et 2019



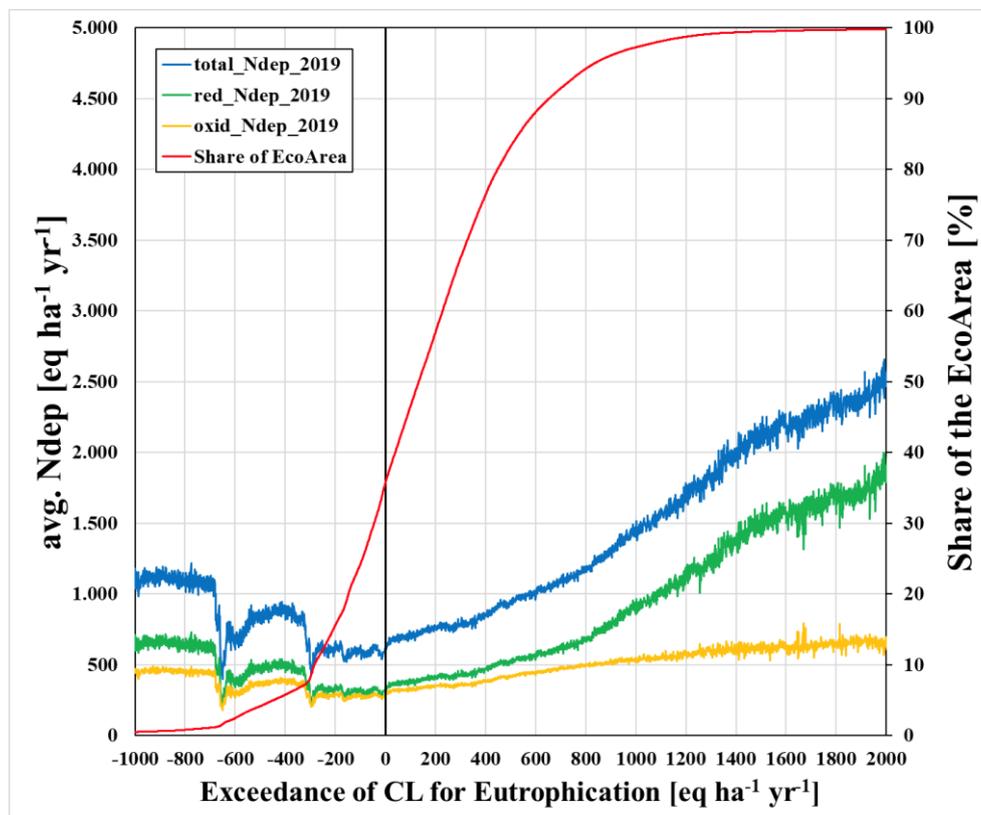
Source : Données sur les dépôts provenant du CSM-O de l'EMEP ; données sur les charges critiques provenant du CCE.

61. Les zones où l'on observe un dépassement de la charge critique d'eutrophisation ont également été évaluées au regard de la quantité totale des dépôts d'azote et de la proportion des différentes formes d'azote dans le dépôt total enregistré en 2019. La figure 10 ci-dessous montre que les dépôts d'azote réduits dans les régions réceptrices où un dépassement de la charge critique a été enregistré (ligne verte) sont toujours plus élevés que les dépôts d'azote oxydé (ligne jaune). Cette tendance est moins prononcée dans les régions où il n'y a pas de dépassement de la charge critique (valeurs négatives sur l'axe des x), tandis que la part de l'azote réduit dans le dépôt total d'azote augmente de manière significative à mesure que le dépassement de la charge critique croît. Dans les zones où les dépassements de la charge critique sont très élevés (>800 équivalents par hectare et par an ($\text{eq ha}^{-1} \text{a}^{-1}$), le dépôt d'azote réduit représente plus des deux tiers du dépôt total. Toutefois, comme le montre la fonction

de distribution cumulative (ligne rouge), ces zones ne représentent qu'environ 3 % de la superficie totale des régions réceptrices.

Figure 10

Dépassement de la charge critique d'eutrophisation (2019) et différentes formes de dépôts d'azote



Source : CCE.

62. Dans les zones exposées à un risque d'eutrophisation, les dépôts d'azote réduits sont en général la principale source des dépôts eutrophisants. Cependant, l'azote oxydé présent dans toutes les zones à risque contribue également à l'eutrophisation à hauteur d'environ 30 à 50 %. Par conséquent, afin de réduire efficacement le nombre de zones touchées par l'eutrophisation, il faut de toute urgence diminuer les quantités d'azote oxydé et d'azote réduit.

Réseaux de surveillance des effets

63. La surveillance à long terme effectuée dans le cadre du Groupe de travail des effets a établi la preuve scientifique que les mesures d'atténuation de la pollution atmosphérique ont l'effet escompté, à savoir la régénération des écosystèmes, la réduction de la corrosion des matériaux et la diminution de la charge de morbidité. De nombreux lacs, rivières et bassins versants se rétablissent de l'acidification, bien que certaines zones restent acidifiées en raison de la lenteur du processus de régénération. Dans les sites surveillés de très près, on a observé l'interaction entre la pollution atmosphérique et les changements climatiques, ainsi que leurs effets conjugués sur les forêts, le sol et l'eau, ce qui a permis de mieux comprendre la complexité de cette interaction.

64. La surveillance à long terme effectuée dans le cadre du Groupe de travail des effets joue un rôle précieux dans la mise au point et la validation des modèles utilisés dans les travaux relevant de la Convention, car les données afférentes servent à comprendre la relation de cause à effet entre la pollution atmosphérique et ses effets et permettent d'évaluer les résultats susceptibles de découler d'un air plus pur. En outre, les données sur les écosystèmes ont également été utilisées pour évaluer les effets combinés d'un air plus pur et des changements climatiques, ainsi que les effets de l'azote sur le stockage du carbone.

65. Toutefois, les réseaux de surveillance relevant du Groupe de travail des effets devraient être améliorés. Ils devraient être étendus à des zones actuellement moins bien couvertes avec l'aide de toutes les Parties à la Convention ; un éventail plus large de types d'écosystèmes devrait être étudié et des méthodes de surveillance spécialement adaptées à ces types d'écosystèmes devraient être élaborées. Les données qui en résulteraient permettraient de déceler les cas de régénération, d'évaluer l'efficacité et le caractère suffisant des mesures de contrôle et de repérer les nouveaux impacts.

V. Nouveaux défis

66. Les organes scientifiques relevant de la Convention devront se pencher sur plusieurs questions afin d'améliorer leurs compétences et perfectionner les outils mis au point pour donner effet aux décisions de politique générale.

67. Il faut avant tout que les données d'émissions communiquées par les Parties soient de meilleure qualité, plus complètes, plus précises et plus transparentes, car ces données sont ce qui permet d'interpréter toutes les tendances de la pollution atmosphérique et de ses effets. Il est essentiel que les inventaires des émissions soient de bonne qualité pour appuyer l'élaboration et l'évaluation des politiques et mesures de réduction des émissions (y compris la fixation d'objectifs en la matière).

68. À cet égard, il est capital de continuer à mettre régulièrement à jour le Guide grâce à un financement durable et au soutien des experts nationaux. L'obtention des ressources nécessaires sera un véritable enjeu dans les années à venir.

69. Les données communiquées par les Parties sur le transport maritime international ne sont pas suffisamment cohérentes pour être intégrées dans l'ensemble de données maillées utilisé dans les évaluations modélisées. Comme indiqué au paragraphe 15, les sources d'oxydes d'azote et de COVNM provenant des activités agricoles pourraient être mieux décrites dans les inventaires communiqués. Le même problème se pose pour les émissions provenant de sources naturelles, principalement les forêts mais aussi d'autres types de végétation non agricole. Les informations fournies par les Parties ne sont pas suffisamment complètes, cohérentes ou précises pour répondre aux besoins de l'ensemble des spécialistes de la modélisation.

70. Le groupe spécial de la protection marine créé dans le cadre de la Convention a mené, en coopération avec des experts d'HELCOM, une première étude fondée sur une approche pragmatique pour évaluer le risque d'eutrophisation causée par les dépôts atmosphériques d'azote. Il a conclu à un dépassement généralisé, bien que relativement faible, des apports atmosphériques critiques (principe identique à celui de la charge critique). L'étude a jusqu'à présent porté principalement sur la mer Baltique ouverte, mais les régions les plus sensibles à l'eutrophisation, à savoir les zones côtières, devraient être incluses dans les travaux futurs. En outre, pour les futures stratégies de réduction, il faudrait tenir compte du rapport coût-efficacité des solutions de réduction des émissions pour chaque catégorie, y compris les sources aquatiques.

71. Enfin, l'amélioration des connaissances et de la précision des données sur les émissions de particules et les composés particulaires est un enjeu central des activités de collecte et de communication de données d'émissions. L'estimation de la part condensable dans les émissions de particules organiques reste une question délicate qui devra être traitée dans le cadre de la Convention, car cette valeur peut avoir une incidence sur les décisions de politique générale (respect des objectifs de réduction des émissions, objectifs en matière de plafonds d'émission, établissement de priorités par secteur).

72. En ce qui concerne les outils élaborés par les organes scientifiques relevant de la Convention, la précision et la fiabilité des modèles, y compris l'amélioration de la résolution, restent des questions récurrentes sur lesquelles on progresse graduellement grâce à un approfondissement des connaissances des processus physico-chimiques, à une amélioration de la description des émissions (et de leur distribution spatiale) et au renforcement des capacités de calcul. Aujourd'hui, on peut faire appel à des systèmes de modélisation multiéchelle qui joueront un rôle important dans la définition des futures priorités de

développement. Dans le cadre de la Convention, il faut en outre travailler à la cohérence et l'interopérabilité entre les différents modèles de simulation de la pollution atmosphérique et de ses effets.

73. Enfin, il faut que les outils élaborés et les données recueillies dans le cadre de la Convention soient conformes aux objectifs de la science ouverte et permettent d'établir des liens entre les chercheurs, les acteurs institutionnels et les responsables de l'élaboration des politiques, et parfois le grand public. Cela permettra de mieux faire connaître la Convention et de renforcer la confiance à l'égard des travaux scientifiques menés dans le cadre de celle-ci, grâce aux avancées informatiques et au vif intérêt manifesté par les utilisateurs dans les Parties. Même si certaines initiatives ont déjà été mises en œuvre par les organes subsidiaires de l'EMEP et du Groupe de travail des effets pour faciliter l'accès à leurs modèles, simulations et observations, il faudra adopter formellement une stratégie visant à favoriser le libre accès aux produits de la Convention.

Question des particules condensables

74. Les aérosols organiques primaires condensables sont une catégorie de composés organiques qui se présentent sous forme gazeuse dans les conditions d'émission d'une cheminée, mais qui se condensent et s'évaporent lorsque l'air de la cheminée refroidit et se propage dans l'air ambiant au moment de l'évacuation. Les coefficients d'émission mesurés à l'intérieur ou à proximité de la cheminée ou du tuyau d'échappement à haute température et à forte concentration peuvent donner une fausse idée de la quantité de matières particulaires ou de gaz réellement dégagée dans l'atmosphère – voire ne pas la détecter du tout –, en fonction des filtres utilisés, de la dilution et des conditions dans lesquelles les émissions mesurées ont été échantillonnées. Il n'apparaît pas clairement, dans les données d'émissions actuellement communiquées par les Parties à l'EMEP au titre de la Convention, si les matières organiques condensables sont incluses et, le cas échéant, dans quelle mesure.

75. La manière dont les données sur les émissions de matières particulaires et de particules condensables sont actuellement communiquées peut conduire à de grandes variations, d'un pays à l'autre, des estimations sanitaires et des obligations de réduction par unité de bois brûlé, puisque, pour la même activité, on trouve des coefficients d'émission de matières particulaires très variables dans les rapports nationaux soumis par les différents pays. Les hypothèses sur lesquelles reposent ces estimations nationales des émissions ne sont souvent pas exposées de manière transparente, et les méthodes peuvent changer d'une année à l'autre, car le Guide ne fournit pas de lignes directrices claires, du moins en ce qui concerne le secteur résidentiel, qui est responsable d'une large part des émissions de matières particulaires. Cela tient au fait que les normes d'émission applicables aux appareils de chauffage résidentiel ont initialement été définies dans des règlements liés à la performance environnementale des systèmes de chauffage résidentiel (par exemple, dans la réglementation relative à l'écoconception de l'Union européenne) testée dans des conditions de laboratoire, qui ne rend pas totalement compte des émissions (y compris de particules condensables) dégagées par les appareils dans des conditions réelles d'utilisation.

76. Les incertitudes actuelles concernant les émissions de matières particulaires viennent en grande partie de la manière dont la part des condensables est prise en compte. Cela concerne d'une part l'estimation et les mesures des coefficients d'émission comprenant la composante condensable (pour lesquels aucune norme n'existe actuellement en Europe) et d'autre part l'évaluation des données sur les activités (combustibles utilisés, types et âges des appareils, description de l'utilisation et des pratiques). En outre, de nombreuses incertitudes subsistent quant à la répartition géographique des émissions provenant du chauffage au bois.

77. En 2020 et 2022, des ateliers de réflexion soutenus par respectivement le Conseil des ministres des pays nordiques et la Commission européenne ont permis de définir une approche progressive fondée sur les principes suivants :

a) À des fins de modélisation, et notamment dans la perspective d'une éventuelle révision des protocoles, il est essentiel d'utiliser des données sur les émissions de matières particulaires tenant compte de la part des condensables. Dans le cas contraire, l'évaluation de la contribution du chauffage résidentiel aux émissions dans les pays eux-mêmes (et de la part relative de ce secteur) et des impacts relatifs des émissions provenant des pays voisins

dans un lieu donné (matrices source-récepteur) pourrait être faussée. Il en résulterait également une répartition sous-optimale des nouveaux objectifs de réduction des émissions entre les pays ;

b) Pour les besoins de la modélisation, un autre inventaire des émissions est utilisé. Il se compose des données sur les émissions de matières particulaires communiquées officiellement lorsqu'elles prennent en compte les condensables, et d'estimations d'experts scientifiques lorsque ce n'est pas le cas. Les estimations des experts sont fondées sur une méta-analyse des publications, sur des statistiques et des enquêtes récentes ainsi que sur des échanges avec des experts nationaux. Elles devraient être progressivement remplacées par les données d'émission officiellement déclarées au fur et à mesure que celles-ci s'améliorent ;

c) Afin d'améliorer les connaissances sur la part condensable des émissions de matières particulaires dans les différents pays, des projets scientifiques et des campagnes de mesure sur le terrain seront menés, et les résultats de ces activités seront colligés et examinés par les membres des réseaux de l'EMEP afin de favoriser le partage d'informations. Le Centre des inventaires et des projections des émissions de l'EMEP mettra au point une base de données répertoriant les coefficients d'émission issus de la méta-analyse réalisée en 2021 ;

d) Les Parties qui ne communiquent pas actuellement d'informations sur la composante condensable ont besoin de lignes directrices et d'un appui pour les aider à repérer des sources des données sur les activités. Une recommandation visant à aider les Parties à recueillir des données sur les activités au moyen d'enquêtes et de statistiques pourrait être élaborée ;

e) Le Guide sera régulièrement enrichi de nouvelles informations sur la composante condensable (facteurs d'émission et données sur les activités) afin de contribuer à la diffusion des bonnes pratiques en matière de recueil des données d'émissions.

78. Les échanges entre les modélisateurs, les responsables des inventaires et les spécialistes chargés de la mesure des émissions ont montré que les travaux qui ont été lancés prendront du temps et devront passer par de nombreuses étapes, dans lesquelles on s'emploiera à améliorer progressivement les connaissances et les outils nécessaires au traitement de la question des particules condensables. Cet état de fait est accepté par toutes les Parties. L'utilisation d'autres inventaires d'émissions incorporant les particules condensables a déjà permis d'améliorer les résultats de la modélisation fournis par le CSM-O et l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués. Il est acceptable que les résultats de la modélisation soient associés à un certain degré d'incertitude, tant que ce fait est bien compris et que le processus d'évaluation reste transparent et comparable.

79. Les États-Unis ont déjà mis en œuvre une stratégie de communication des données harmonisée au niveau national. Cette stratégie n'établit pas de distinction entre les particules condensables et filtrables, mais définit les conditions de mesure. Un outil de communication des émissions dues à la combustion du bois à usage ménager, incluant des données sur les activités et des coefficients d'émission normalisés (pour 22 types d'appareils), a été mis au point pour appuyer cette stratégie et pourrait inspirer de nouveaux travaux à mener dans le cadre de la Convention.

Amélioration de la modélisation et de la surveillance

80. Grâce à l'amélioration de la résolution ces dernières années, les résultats fournis par le modèle EMEP (y compris concernant le calcul des émissions) ont, d'une façon générale, favorisé la comparabilité des données d'observation, en particulier pour les composantes primaires. Alors que, avec l'ancienne résolution (50 km x 50 km), les résultats du modèle étaient représentatifs du contexte régional, la nouvelle résolution permet également une modélisation à l'échelle des conditions urbaines de fond. Comme maintenant les résultats du modèle représentent mieux les zones à plus petite échelle caractérisées par des concentrations plus élevées (généralement les zones suburbaines), le modèle aura par définition une queue de distribution formée de concentrations plus élevées qui n'existait pas avec une résolution inférieure. Dans les calculs du modèle, le seul passage d'une résolution de 50 km x 50 km à 0,1° x 0,1° suffit à produire une exposition quelque peu plus élevée et un plus grand écart par rapport à l'objectif fixé par l'OMS.

81. Les différences globales dans les matrices source-récepteur dues aux différentes résolutions des modèles utilisées pour calculer la contribution du pays sur le territoire national sont faibles pour les dépôts (quelques pour cent), mais un peu plus importantes pour les matières particulaires et l'ozone (jusqu'à 11 %). Pour les contributions transfrontières à la pollution, les différences peuvent être plus importantes, notamment lorsque la pollution est transportée à travers des zones montagneuses ou est très faible. Un nouvel ensemble de données plus précises sur les frontières nationales a été introduit en même temps que l'augmentation de la résolution. Dans l'ensemble, les différences causées par l'utilisation d'un nouvel ensemble de données sur les frontières nationales étaient aussi importantes que celles dues au changement de résolution.

82. S'agissant des évaluations du transport hémisphérique, il convient de noter que les modèles mondiaux continuent de diverger fortement quant à l'évolution des quantités d'ozone troposphérique depuis la période préindustrielle jusqu'à aujourd'hui et sous-estiment généralement l'ampleur de la tendance observée. Il existe encore une incertitude considérable quant à la fiabilité des projections tirées des modèles actuels concernant la contribution à l'échelle hémisphérique de l'ozone de fond et la manière dont elle affectera la réalisation des objectifs futurs.

83. S'agissant de l'ozone, les modèles régionaux offrent généralement de meilleurs résultats au regard des observations que les modèles mondiaux, dont la résolution spatiale est généralement plus faible. Cependant, les meilleurs modèles mondiaux sont plus performants que les modèles régionaux de piètre qualité.

84. Les défis techniques à relever pour améliorer les simulations mondiales de l'ozone troposphérique dans la région de la CEE sont les suivants : simulation plus précise de la durée de vie du méthane à l'échelle mondiale, meilleure résolution pour le comportement chimique des oxydes d'azote dans les panaches d'échappement des navires et meilleure représentation des dépôts d'ozone sur la végétation.

85. Les études de comparaison de modèles (l'étude sur le transport des polluants atmosphériques à l'échelle de l'hémisphère, l'Initiative sur les modèles chimie-climat (CCMI) ou le Projet de comparaison des modèles chimie-climat des aérosols) jouent un rôle essentiel dans l'évaluation de la question de savoir si les plus récents inventaires d'émissions, modèles mondiaux et données de mesure peuvent adéquatement informer les Parties à la Convention de l'incidence des sources d'émissions extrarégionales sur les effets de l'ozone dans la région de la CEE.

86. Outre la mise au point de modèles, il est nécessaire de fournir en permanence des inventaires d'émissions de bonne qualité et d'élargir le réseau mondial d'observation de l'ozone pour l'évaluation des modèles.

87. En ce qui concerne le réseau de surveillance de l'EMEP, le principal problème est qu'il n'existe pratiquement aucune observation (à long terme) de l'EMEP en Europe orientale, dans le Caucase et en Asie centrale, ou dans les Balkans occidentaux. Si l'on y ajoute l'absence de données d'émissions cohérentes, de bonne qualité (et à long terme) pour les pays de la partie orientale de la zone EMEP, il est très difficile d'évaluer et de projeter la pollution atmosphérique et ses effets dans ces régions.

88. Des mesures supplémentaires des dépôts d'azote dans les zones maritimes (îles ou navires) seraient utiles pour mieux surveiller les tendances de l'eutrophisation dans les écosystèmes marins et évaluer ou nuancer les modèles.

Libre accès aux données et visibilité

89. Les infrastructures de données sont de plus en plus gérées par des fournisseurs de services généraux guidés par les principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable and Reusable) visant à rendre les données découvrables, accessibles, interopérables et réutilisables, et les résultats de la recherche scientifique financée par l'Union européenne devraient par défaut être partagés en libre accès. Le libre accès aux modèles, aux résultats qui en sont issus et aux observations devrait se généraliser pour les travaux menés au titre de la Convention, afin de favoriser l'utilisation de ces ressources dans les activités de recherche et les évaluations nationales et d'appuyer l'amélioration des modèles. En outre, les succès

enregistrés dans le cadre de la Convention pourraient être une source d'inspiration pour d'autres régions et conventions, notamment en ce qui concerne les travaux de la future équipe spéciale de la coopération internationale dans la lutte contre la pollution atmosphérique. Cependant, de tels objectifs soulèvent plusieurs questions liées aux données et aux droits de propriété intellectuelle, à la réutilisation des données et des outils, à la responsabilité et à l'octroi de licences, qui ne sont pas complètement résolues. La mise en place d'un cadre solide et efficace favorisant le libre accès aux outils de la Convention sera une composante majeure de la future stratégie scientifique de la Convention.

VI. Canada et États-Unis d'Amérique

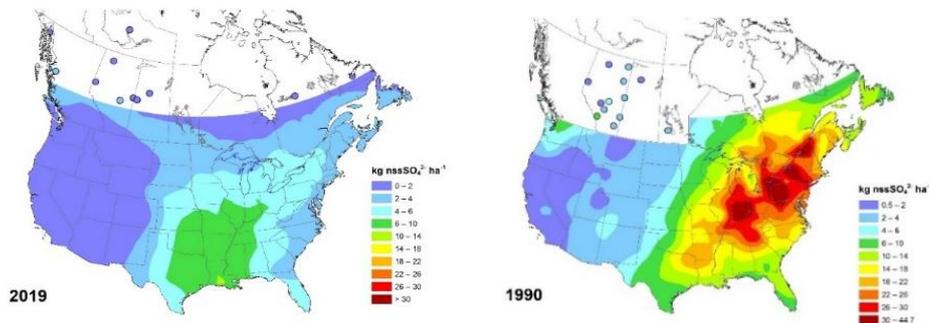
90. Le Canada et les États-Unis, après avoir évalué les effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine et l'environnement, ont mis en place des réglementations et pris des mesures volontaires qui ont permis de réduire considérablement les émissions. En conséquence, les concentrations de $PM_{2,5}$ et d'ozone ont diminué, de même que les dépôts de soufre et d'azote.

91. Les émissions provenant tant du Canada que des États-Unis d'Amérique ont une incidence sur la pollution atmosphérique dans la région frontalière. Afin de quantifier les effets liés à l'exposition aux émissions transfrontières d'ozone et de $PM_{2,5}$, des évaluations et analyses techniques sont réalisées dans le cadre de l'Accord entre le Canada et les États-Unis sur la qualité de l'air. Elles ont montré que les concentrations de l'ozone et des $PM_{2,5}$ pondérées en fonction du nombre d'habitants avaient diminué dans cette région.

92. Les émissions d'ammoniac sont préoccupantes au Canada et aux États-Unis d'Amérique, dans la mesure où l'ammoniac présent dans l'atmosphère est un précurseur clef dans la formation de $PM_{2,5}$ et contribue aux dépôts acides et à l'eutrophisation. Les deux pays coopèrent depuis longtemps dans le domaine de la surveillance et de l'évaluation des retombées acides, notamment dans le cadre de l'Accord entre le Canada et les États-Unis sur la qualité de l'air de 1991. Des progrès considérables ont été réalisés au cours des deux dernières décennies en ce qui concerne la réduction d'autres précurseurs de $PM_{2,5}$ tels que les oxydes d'azote et le dioxyde de soufre (la réduction de ce dernier entraînant une réduction continue des dépôts de soufre, voir la figure 11 ci-dessous), mais les émissions et les concentrations d'ammoniac ont continué à augmenter dans les deux pays, la principale source de cet élément étant le secteur agricole (voir la figure 12 ci-dessous). Des mesures et modélisations réalisées récemment aux États-Unis montrent que la sensibilité des $PM_{2,5}$ à l'ammoniac varie considérablement d'une région à l'autre. L'atelier sur l'ammoniac (Ottawa, 10 octobre 2018) qui a réuni des participants du Canada, des États-Unis d'Amérique et d'Europe a permis de formuler des messages clefs concernant les effets de l'ammoniac sur la santé et l'environnement, ainsi que sur les outils et les approches disponibles pour les atténuer. Pour quantifier ces effets et évaluer les outils disponibles pour les atténuer, il serait nécessaire de disposer d'évaluations plus détaillées. Les deux pays ont continué de réduire leurs émissions de dioxyde de soufre, ce qui s'est traduit par une poursuite de la tendance à la baisse des dépôts de soufre (voir la figure 12 ci-dessous).

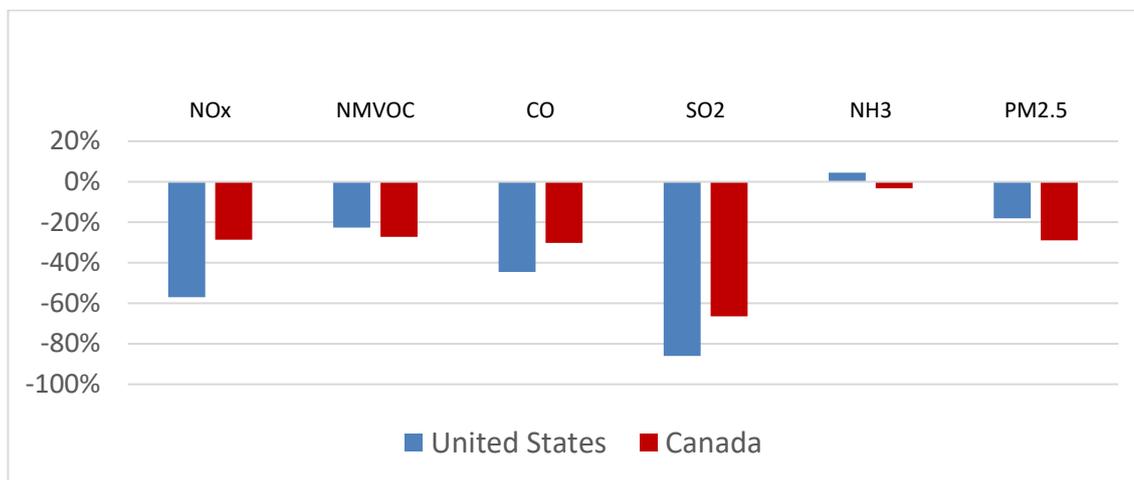
93. Pour de plus amples informations sur l'approche adoptée par le Canada et les États-Unis pour lutter contre la pollution atmosphérique transfrontière, on pourra se référer au rapport d'examen et d'évaluation de l'Accord entre le Canada et les États-Unis sur la qualité de l'air (attendu fin 2022/début 2023).

Figure 11
Réduction des émissions de dioxyde de soufre par le Canada et les États-Unis d'Amérique, comparaison entre 1990 et 2019



Source : Canada-United States Air Quality Agreement Progress Report, 2020-2022

Figure 12
Émissions nationales des États-Unis d'Amérique (en bleu) et du Canada (en rouge), telles que déclarées, évolution entre 2005 et 2019
 (Pourcentage)



Source : Centre des inventaires et des projections des émissions, visualiseur de données. Voir www.ceip.at/data-viewer²⁴.

Notes : L'évolution des émissions d'ammoniac déclarées par les États-Unis est incertaine, car des changements ont été apportés aux méthodes de calcul entre 2005 et 2019. Pour les PM_{2,5}, les informations fournies pour le Canada reflètent les engagements pris par le pays au titre du Protocole.

²⁴ <https://www.ceip.at/data-viewer> et Rapport d'inventaire des émissions de polluants atmosphériques du Canada, 1990-2022. https://publications.gc.ca/collections/collection_2022/eccc/En81-30-2020-fra.pdf.