

## Citepa. Rapport Secten édition 2020

Émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France

# Acidification, eutrophisation et pollution photochimique

Rédaction

Benjamin CUNIASSE

Etienne FEUTREN

Thamara VIEIRA DA ROCHA

Nadine ALLEMAND

► [Télécharger les données associées au chapitre sur citepa.org/fr/secten](https://citepa.org/fr/secten)

### Sommaire du chapitre

AEPP : de quels phénomènes s'agit-il ?.....	132
Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> ) .....	137
Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> ) .....	141
Ammoniac (NH <sub>3</sub> ).....	145
Composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) .....	153
Monoxyde de carbone (CO) .....	159
Emissions de SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> et NH <sub>3</sub> en acide équivalent (Aeq).....	163

## AEPP : de quels phénomènes s'agit-il ?

### Acidification et eutrophisation

La **pollution acide** est liée aux émissions de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> mais aussi celles de NH<sub>3</sub> des activités humaines qui retombent en partie à proximité des sources mais aussi à des centaines, voire des milliers de kilomètres (la durée de vie du SO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est de l'ordre de 2 à 5 jours) de leurs sources émettrices. L'**eutrophisation** est principalement liée aux dépôts d'azote provenant des émissions de NO<sub>x</sub> et de NH<sub>3</sub>.

Ces polluants se transforment et retombent sous forme de retombées sèches ou humides. SO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> se transforment respectivement en sulfates et en nitrates ainsi qu'en acide sulfurique et en acide nitrique selon les conditions. Le NH<sub>3</sub>, émis principalement par les activités agricoles, se transforme aussi en ammonium. Il contribue également à l'acidification des milieux. Son potentiel d'acidification est équivalent à celui des NO<sub>x</sub>.

Les retombées d'azote issues des émissions de NO<sub>x</sub> et NH<sub>3</sub> conduisent à enrichir les milieux et à en modifier les équilibres chimiques.

L'acidification de l'atmosphère est connue depuis très longtemps dans les zones urbaines et/ou industrielles sous le nom bien connu de "smog acide" (ou smog londonien). Ce type de smog tend à disparaître depuis quelques dizaines d'années de l'atmosphère des grandes zones urbaines européennes (mais il caractérise encore l'atmosphère de beaucoup de zones urbaines de pays en voie de développement).

Les phénomènes de pollution acide à grande échelle ont été mis en évidence par l'acidification des eaux des lacs scandinaves et canadiens dans les années 70. Le pH des eaux est devenu acide, entraînant des modifications importantes de la faune piscicole par exemple. Certaines pluies avaient un pH compris entre 3 et 4 alors que l'acidité naturelle de l'eau de pluie est de 5,6.

Ces polluants sont transportés à grande distance. La France impacte les pays voisins sur un domaine plus ou moins étendu mais elle est impactée aussi par les pays voisins.

Pour caractériser la sensibilité des milieux, la notion de **charges critiques** a été définie. Les charges critiques sont déterminées sur la base de critères géologiques, pédologiques, hydrologiques, écologiques. Pour ce qui concerne les dépôts acides, la charge critique est définie ainsi : « Dépôt de composés acidifiants le plus élevé qui ne puisse causer de dysfonctionnement chimique des sols susceptible d'entraîner des altérations à long terme sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes ».

Les **retombées acides** ont les effets suivants :

Acidification des lacs : grâce à l'étude de certains fossiles (certains animaux aquatiques sont

caractéristiques d'une plage de pH), il a été établi que le pH des lacs est resté constant jusque vers 1950. Il s'est abaissé brusquement après. L'acidification de l'eau perturbe la faune piscicole et peut même la détruire complètement en cas de pH faible.

Dépérissement des forêts : le dépérissement des forêts atteint aussi bien les conifères que les arbres à feuilles caduques. Les nombreuses recherches réalisées sur le dépérissement des forêts ont montré qu'il y avait en fait synergie entre plusieurs phénomènes. Effets des sécheresses (ces effets sont renforcés par la présence de SO<sub>2</sub> et de l'ozone) ; dépôts acides secs ou humides qui provoquent un lessivage des éléments nutritifs des sols ; action directe de SO<sub>2</sub> ou NO<sub>x</sub> sur la physiologie des plantes.

La charge critique pour les dépôts acides est donc la valeur des retombées qu'il ne faut pas dépasser pour maintenir la capacité de neutralisation des sols, permettant le maintien des paramètres vitaux pour la faune ou la flore. Ces paramètres peuvent être le pH des sols, des eaux de surface, les teneurs en calcium et en aluminium en solution, la combinaison de ces paramètres...

Les effets des dépôts acides varient géographiquement en fonction de la sensibilité des écosystèmes, la charge critique est déterminée pour chaque milieu.

Les **dépôts d'azote** dans un écosystème en modifient progressivement la composition floristique et diminuent la biodiversité en raison de l'eutrophisation. Les espèces nitrophiles, par exemple, se développent aux dépens des espèces qui préfèrent les sols moins riches. La biodiversité s'en trouve diminuée.

L'établissement de la Convention sur le transport de la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (LRTAP) en 1979, de ses Protocoles limitant les émissions de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COV, PM et NH<sub>3</sub> (Notamment Protocole de Göteborg multi-polluants, multi-effets de 1999 et 2012) et des directives européennes limitant aussi les émissions de ces mêmes polluants (directive européenne 2001/81/CE sur les plafonds d'émissions de polluants) ont permis des réductions significatifs des impacts sur les écosystèmes. Il est à noter que la mise au point du Protocole de Göteborg (1999, 2012) et des directives 2001/81 et 2284 /2016, est basée sur des objectifs de réduction des impacts des polluants sur la santé et les écosystèmes. Les plafonds d'émissions sont déterminés pour chaque pays, avec pour objectif, parmi d'autres, de réduire les niveaux de dépassement des charges critiques.

En termes d'impacts sur les écosystèmes, les progrès sont réels comme en témoigne les figures 1 et 2 suivantes (Maas 2016).

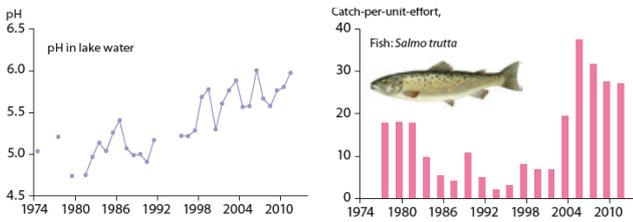
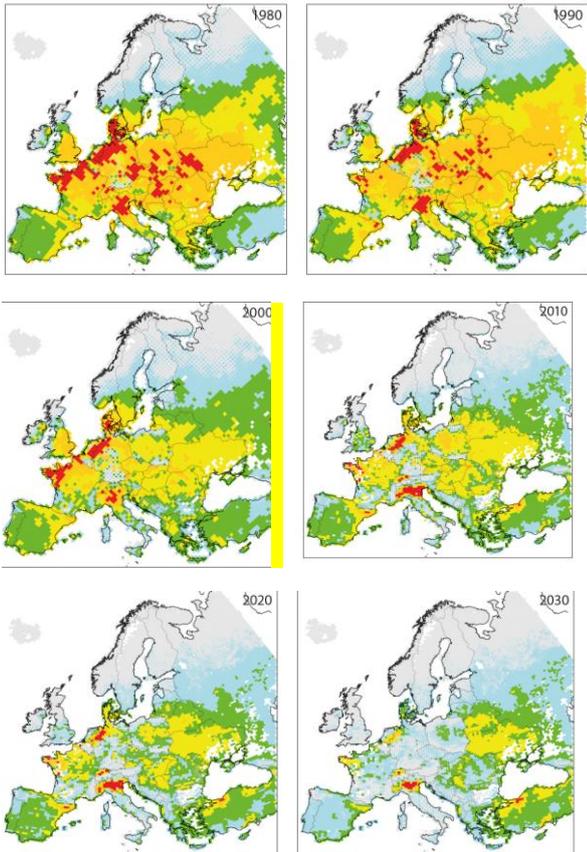


Figure 1 : Récupération de l'acidification au lac Saudlandsvatn, en Norvège. Les dépôts de soufre ayant diminué, le pH de l'eau du lac a augmenté et les populations d'une espèce sensible ont commencé à se reconstituer (CLRTAP 2016)



□ No exceedance □ <200 □ 200-400 □ 400-700 □ 700-1200 □ >1200 eq/ha/yr  
 Figure 1 : Dépassement moyen cumulé des charges critiques calculées pour l'eutrophisation de 1980 à 2020 en vertu du Protocole de Göteborg amendé de 2012 (scénario GP-CLE) et en 2030 sous un scénario de réduction maximale réalisable (MAAS 2016).

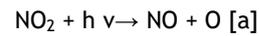
**Pollution photochimique**

La pollution photochimique (ou pollution photo-oxydante) est un ensemble de phénomènes complexes conduisant à la formation d'ozone (O<sub>3</sub>) et d'autres composés oxydants (tels que peroxyde d'hydrogène, aldéhydes, peroxy acétyl nitrate (PAN)) à partir de polluants primaires (appelés précurseurs) : oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), monoxyde de carbone (CO) et méthane (CH<sub>4</sub>), et d'énergie apportée par le rayonnement ultra-violet (UV) solaire. Cette pollution atmosphérique riche en ozone, appelée aussi « smog », se rencontre dans la basse couche de l'atmosphère, ou troposphère (0 à 8-10 km d'altitude). La durée de

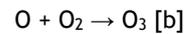
vie de l'ozone dans la troposphère est de quelques semaines mais cette durée de vie est plus courte au niveau de la couche limite (partie de l'atmosphère sensible à la présence de la surface terrestre (continentale ou océanique). Son épaisseur varie de quelques centaines de m (la nuit) à 2 à 3 km (le jour)).

L'ozone et les oxydants photochimiques sont des polluants secondaires. Les réactions chimiques mises en jeu sont complexes mais peuvent être représentées de façon simplifiée. Elles mettent en jeu en atmosphère polluée, le NO<sub>2</sub> et des COV, polluants primaires ou précurseurs.

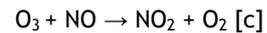
Le NO<sub>2</sub> est dissocié sous l'action du rayonnement UV, à des longueurs d'ondes λ < 430 nm :



L'oxygène atomique ainsi créé réagit avec l'oxygène moléculaire pour former l'ozone, molécule constituée de 3 atomes d'oxygène :

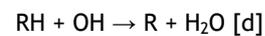


L'ozone réagit avec le monoxyde d'azote pour redonner NO<sub>2</sub> :

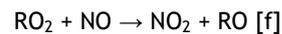
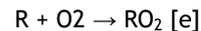


Le NO est qualifié de « puits d'ozone » puisqu'il contribue à limiter la concentration d'ozone en le consommant. Les concentrations d'ozone dépendent du rapport entre concentrations de NO<sub>2</sub> et concentrations de NO. Sans présence de COV, l'ozone est peu abondant.

En présence de COV, un ensemble complexe de réactions se met en route et conduit à l'accumulation d'ozone. Ces réactions enrichissent le réservoir atmosphérique en NO<sub>2</sub> en consommant du NO [selon la réaction f décrite ci-dessous] qui ne peut plus jouer son rôle de puits d'ozone [réaction c]. Il y a production de NO<sub>2</sub> sans destruction d'ozone. La décomposition des COV est déclenchée par le radical OH (radical hydroxyle) qui est très réactif et présent de façon naturelle dans l'atmosphère.



(RH est une représentation simplifiée d'un COV, R représentant une molécule organique associée à l'hydrogène)



Ces réactions génèrent de nombreuses espèces organiques gazeuses et notamment des composés organiques nitrés tel que le peroxyacétylnitrate (PAN).

Les conditions météorologiques favorisant l'apparition de fortes concentrations d'ozone sont notamment :

- une température élevée de l'air,
- une faible teneur en humidité de l'air,
- une longue durée d'ensoleillement,
- une forte irradiation,
- une faible vitesse synoptique du vent (vents à grande échelle par opposition aux vents locaux).

La pollution photochimique est un phénomène caractéristique des situations estivales anticycloniques.

Une des caractéristiques importantes de la chimie atmosphérique est son caractère non linéaire. Cela signifie que la production d'ozone n'est pas proportionnelle aux teneurs en précurseurs. Selon l'abondance relative des divers composés, ce sont les réactions de formation ou de destruction qui sont favorisées.

C'est ce qui explique que, de façon surprenante, les concentrations d'ozone mesurées loin des sources des précurseurs (une agglomération par exemple) sont plus élevées que celles mesurées près des sources émettrices elles-mêmes. Ainsi, les zones suburbaines et rurales sont plus touchées que les zones urbaines par les phénomènes de pointes de concentrations en ozone. En effet, sur une ville par exemple, les émissions de NO (liées au trafic notamment) sont élevées. L'ozone susceptible de se former est rapidement détruit par le NO présent en forte concentration. Si le nuage de polluants formé sur la ville se déplace à la campagne, où les émissions de NO sont moindres, les concentrations d'ozone augmentent puisque l'ozone n'est plus consommé.

De façon générale, les stratégies de réduction devraient se concentrer sur les précurseurs les moins présents (COV et NOx) présentant un caractère limitant dans la chimie (Seigneur 2018). Pour aller plus loin, cette dernière référence présente, de façon assez synthétique, cette chimie de l'atmosphère.

En France et en Europe, les concentrations de fonds en ozone n'ont pas diminué significativement malgré la baisse des émissions des précurseurs NOx et COVNM. Les niveaux de concentrations observés lors des épisodes de fortes concentrations en ozone ont par contre, diminué sous l'impact de ces réductions. Cette évolution est présentée en figure 3.

Sous l'impact de l'augmentation des températures qui favorise la formation d'ozone troposphérique et l'impact du transport des polluants à grande échelle, la réduction des concentrations d'ozone de fonds passe aujourd'hui par une action de réduction des émissions de NOx et de CH<sub>4</sub> à grande échelle (Amann, 2018), (Maas, 2016).

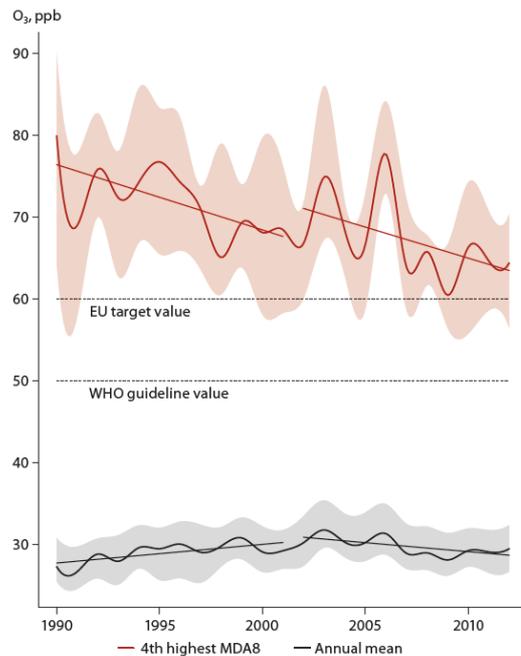


Figure 3 : évolution des pics de concentration d'ozone (4ème plus haut niveau quotidien des concentrations en ozone moyennes sur 8 heures) et les concentrations moyennes annuelles sur les 54 stations de surveillance EMEP avec une couverture de données satisfaisante. Les lignes indiquent la médiane et les zones ombrées les 25 et 75 percentiles. Les lignes de tendance sont indicatives pour les périodes 1990-2002 et 2002-2012 (Maas 2016).

### Ozone troposphérique et effet de serre

L'ozone troposphérique est impliqué dans l'effet de serre. Il est le troisième 3<sup>e</sup> gaz à effet de serre en termes de PRG après le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub> selon le 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC [IPCC- AR5-2014]. Son forçage radiatif est de 0,40 W.m<sup>2</sup> [IPCC- AR5-2014]. Ce gaz n'est pas encore pris en compte dans les engagements de réduction des gaz à effet de serre mis en place au niveau international dans le cadre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Or, pour les scientifiques, l'augmentation des concentrations de fond en ozone milite pour des actions de réduction au niveau global (Amann 2018). L'augmentation des températures liées au changement climatique favorisent les réactions conduisant à l'ozone troposphérique. En raison de l'impact de l'ozone sur la santé et les écosystèmes (voir ci-après) et donc sur le puits de carbone, l'augmentation de ces concentrations dans la troposphère, pourrait conduire à une amplification de l'effet de serre. Les scientifiques recommandent donc de ne plus se satisfaire des actions régionales de réduction des émissions des précurseurs NOx et COVNM mais bien de mettre en place des actions au niveau global et d'agir pour réduire les émissions de CH<sub>4</sub> (Mass, 2016).

### Impact de la nature des COV sur la formation d'ozone

Tous les COVNM n'ont pas la même réactivité dans l'atmosphère. La notion de "réactivité photochimique" a été construite pour donner une image du pouvoir de production d'ozone de chaque COVNM. Plus celle-ci est élevée, plus le COVNM participe aux mécanismes, mais la relation est loin d'être linéaire.

Une méthode récente pour caractériser la réactivité photochimique, est basée sur l'estimation de la contribution réelle de chaque COVNM à la formation d'ozone dans une zone géographique déterminée, en prenant en compte les caractéristiques du milieu réactionnel (composition de l'air ambiant, caractéristiques des émissions). Cette méthode, extrêmement complexe, repose sur l'utilisation des modèles de chimie atmosphérique très sophistiqués.

Le Potentiel de Création de l'Ozone Photochimique d'un COVNM, PCOP [ou POCP en anglais] a été développé par la direction de la qualité de l'air au sein du Ministère britannique de l'Environnement par R.G. Derwent (Derwent 1998) en utilisant un modèle photochimique. Le modèle a été utilisé pour trois trajectoires supposées représentatives de situations générales en Europe lors d'épisodes de pollution photochimique mais ne représentent pas un épisode particulier de pollution. Les contributions de chacun des COVNM initiaux dans la formation d'ozone sont obtenues en faisant tourner le modèle sur chaque trajectoire (une fois avec l'ensemble des composés et au tant de fois que de COV à étudier avec l'ensemble des COVNM sauf l'un d'entre eux dont l'émission est considérée comme nulle). Il ressort notamment que l'éthylène est un composé très actif dans les processus photochimiques. Dans l'environnement, il est l'un des COVNM dont les concentrations commencent à être bien connues et sont parmi les plus fortes. Il sert de COVNM de référence. Son indice PCOP est fixé à 100.

Le PCOP d'un composé i est défini par la formule suivante :

$$PCOP_i = \frac{\text{Evolution de la concentration d'ozone avec le COVNM}_i}{\text{Evolution de la concentration d'ozone avec l'éthylène}} \times 100$$

Echelle de classification :

- Pouvoir élevé : PCOP > 80
- Pouvoir moyen : PCOP 40 à 60
- Pouvoir faible : PCOP 10 à 35
- Pouvoir très faible : PCOP <10

La réactivité des COVNM est la suivante :

Aromatiques > Alcènes > Aldéhydes > Alcanes.

Toutefois, il est nécessaire de garder en mémoire que la valeur du PCOP d'un COVNM (ou tout autre indice) dépend du modèle utilisé, de la valeur de tous les paramètres rentrant dans le modèle, des conditions climatiques modélisées, du lieu de constat de la concentration d'ozone et du temps entre l'émission et le constat de la concentration d'ozone. L'exploitation

directe d'un indice PCOP n'est pas possible. Il faut se rappeler que cet indice varie dans le temps et dans l'espace (Ainsi des composés initialement peu réactifs peuvent avoir un rôle prépondérant quand les COVNM les plus réactifs ont réagi).

Aux Etats-Unis, le paramètre MIR (Maximum Increment Reactivity) est utilisé pour caractériser le potentiel de création d'O<sub>3</sub>.

De façon générale en Europe, la réduction des émissions de COV est requise, quel que soit leur potentiel de création d'ozone. La réactivité des espèces chimiques est essentielle dans la modélisation Impact des SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COV et NH<sub>3</sub> dans l'effet de serre et de mieux en mieux documentée.

### Impacts de l'ozone sur la santé humaine et les végétaux

L'ozone troposphérique a un impact sur la santé humaine. Il entraîne une irritation des voies respiratoires et des yeux, une baisse des performances physiques et une détérioration de la fonction pulmonaire. Dans l'Union européenne, le nombre de décès prématurés en 2015, dus à l'exposition aux PM<sub>2,5</sub>, au NO<sub>2</sub> et à l'ozone est estimé respectivement à 391 000, 76 000 et 16 400 selon l'Agence de l'environnement européenne (AEE, 2018). Pour la France, ces morts prématurées sont respectivement estimées à 35 800, 9 700 et 1 800 en 2015.

L'ozone perturbe l'activité photosynthétique des plantes et altère leur résistance. L'ozone attaque les plantes par leurs stomates. Les plantes absorbent moins d'ozone par temps sec que par temps humide. En effet, les stomates se referment par temps sec pour protéger la plante de la sécheresse et la protège de ce fait de l'ozone. Les plantes sont plus ou moins sensibles à l'ozone. Ce dernier provoque des dégâts visibles sur le feuillage (jaunissement par exemple) et entraîne des déficits en croissance. Des études montrent que la productivité des cultures diminue avec la présence d'ozone, figure 4.

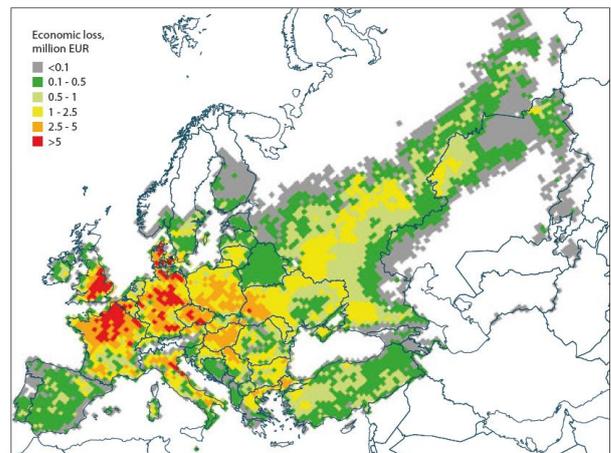


Figure 4 : pertes de rendement du blé (millions d'euros par réseau selon grille 50 à 50 km<sup>2</sup>), en utilisant une espèce de blé (Rain-fed-wheat) (valeur de production pour 2000, ([www.fao.org/nr/gaez/en/](http://www.fao.org/nr/gaez/en/)), le calcul l'ozone moyen flux pour les cultures ([http://emep.int/mscw/index\\_mscw.html](http://emep.int/mscw/index_mscw.html)), et les prix moyens du blé pour la période 2007 à 2011).

L'ozone et les polluants photochimiques accentuent également le pouvoir acidifiant des oxydes de soufre et d'azote, en accélérant l'oxydation de ces composés en sulfates et nitrates. La pollution oxydante et la pollution acide agissent de façon combinée sur la végétation et contribuent aux troubles des forêts.

L'ozone réduit également la capacité de stockage de carbone par les plantes.

### Impact des SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COV et NH<sub>3</sub> dans l'effet de serre

Les inventaires d'émissions de gaz à effet de serre comptabilisent les 7 gaz à effet de serre direct mais aussi le SO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub>, le CO et les COVNM comptabilisés comme des gaz à effet de serre indirect (CCNUCC 2019). Ces quatre gaz ont une action indirecte sur l'effet de serre en tant que polluants primaires intervenant dans la formation de polluants secondaires comme l'ozone ou les aérosols. Ils n'entrent pas dans le "panier" de Kyoto.

- Le CO et les COV, s'oxydent en CO<sub>2</sub> et contribuent à la formation d'ozone. Ils ont tous deux un forçage radiatif positif contribuant donc au réchauffement.
- Les NO<sub>x</sub> conduisent à la formation d'ozone (forçage positif), mais aussi à la formation de particules de nitrate et oxydent le CH<sub>4</sub> (forçage négatif). Au global ils ont un forçage négatif.
- Le SO<sub>2</sub> a un effet refroidissant, en produisant des sulfates (forçage négatif).
- Le NH<sub>3</sub> présente lui aussi un forçage négatif en produisant des nitrates et des ions ammonium.

La figure 5 suivante présente les coefficients de forçage des diverses espèces chimiques (IPCC- AR5-2014). Il est à noter que l'on ne trouve pas

directement l'ozone puisqu'il est émis indirectement, mais sa contribution apparaît indirectement par l'intermédiaire de ses précurseurs.

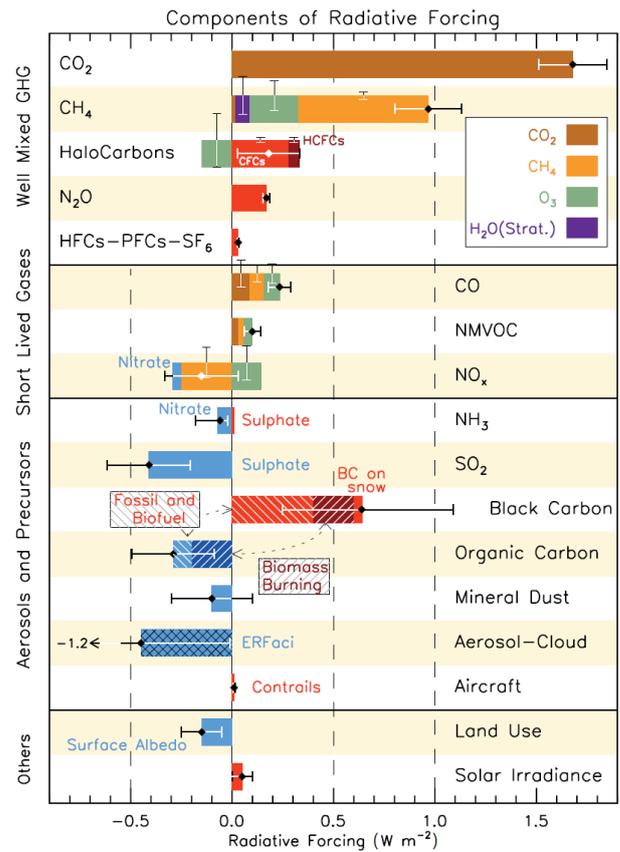


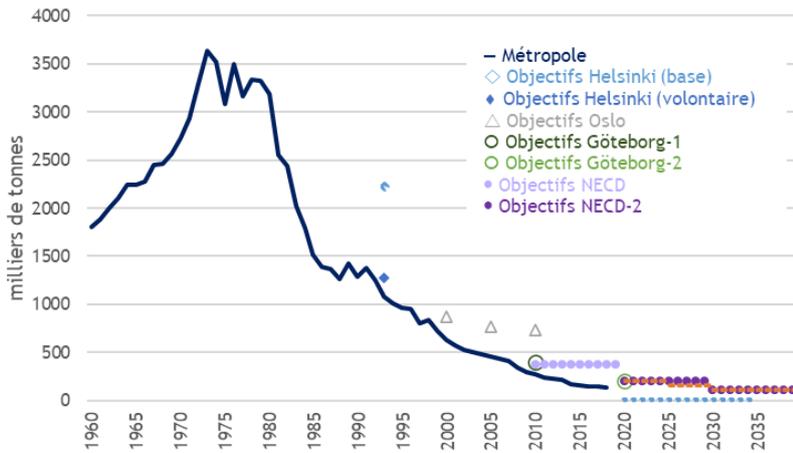
Figure 5 : Forçage radiatif des composés (IPCC- AR5-2014)

### Références

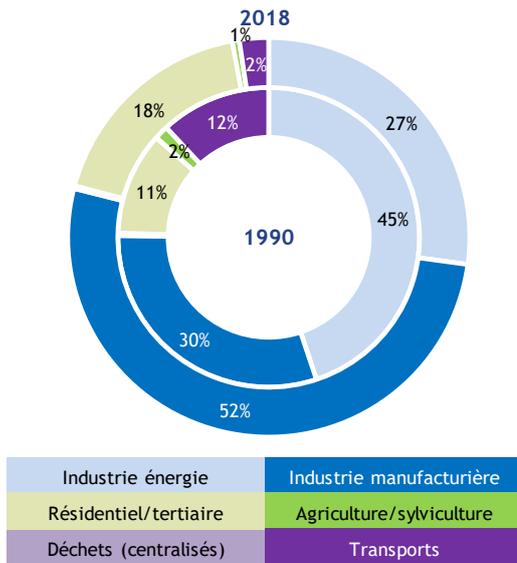
Voir en fin de chapitre.

## Emissions de SO<sub>2</sub> en bref

### Evolution des émissions de SO<sub>2</sub> en France



### Répartition des émissions de SO<sub>2</sub> en France



# SO<sub>2</sub>

## Dioxyde de soufre

### Type

Polluant atmosphérique

### Définition

Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) est un gaz incolore, toxique avec une odeur pénétrante et fortement irritante pour les yeux et les voies respiratoires.

Le SO<sub>2</sub> est essentiellement issu des processus de combustion des combustibles fossiles sulfurés et certains procédés industriels.

### Composition chimique

Deux atomes d'oxygène et un atome de soufre.

### Origine

Sources anthropiques : utilisation de combustibles fossiles riches en soufre (charbon, lignite, coke de pétrole, fioul lourd, fioul domestique, gazole, etc.) ; procédés industriels (production de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, production de pâte à papier, raffinage du pétrole, etc.).

Source naturelle : volcans, sulfatares.

### Phénomènes associés

Le SO<sub>2</sub> participe à l'acidification de l'air, peut former un brouillard et des aérosols d'acide sulfurique et de sulfates. Il est un précurseur de particules secondaires.

C'est un gaz à effet de serre indirect avec un effet refroidissant par sa composante sulfate.

### Effets



Acidification

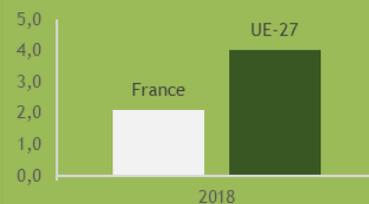


Effet de serre : effet refroidissant (forçage radiatif négatif)

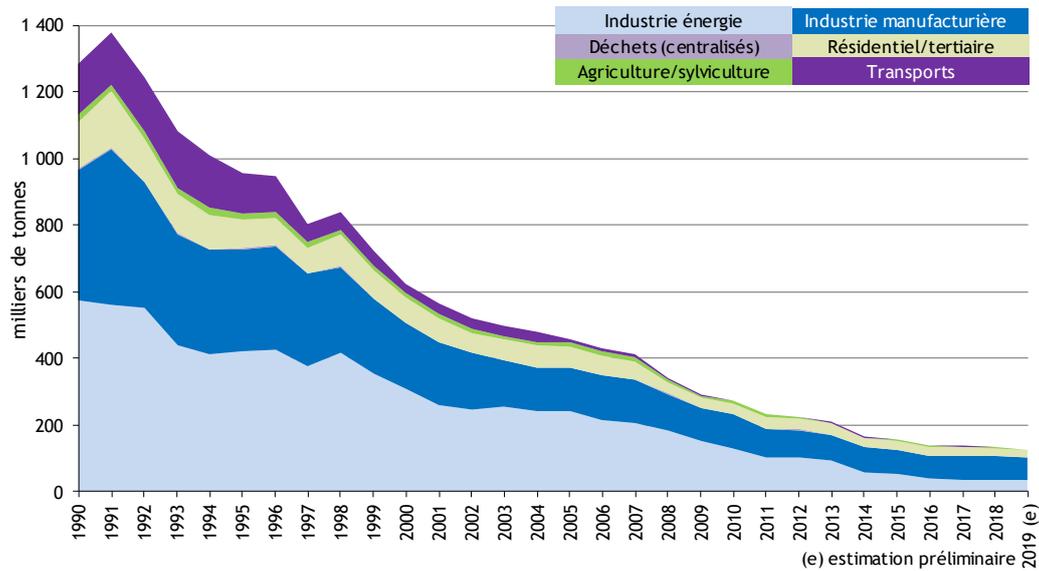


Santé

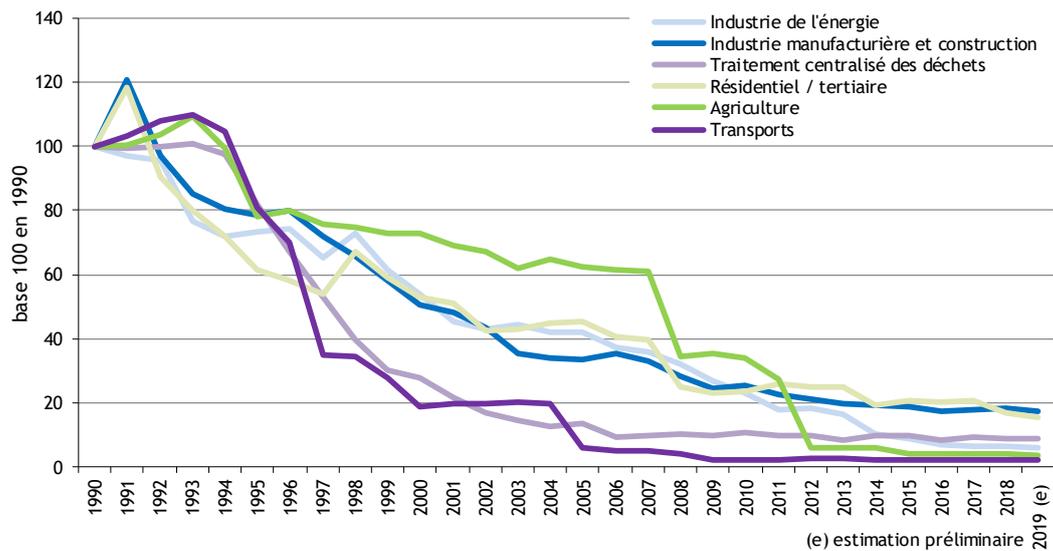
### Emissions par habitant kg/hab/an en 2018



Evolution des émissions dans l'air de SO<sub>2</sub> depuis 1990 en France (Métropole)



Evolution des émissions dans l'air de SO<sub>2</sub> en base 100 en 1990 en France (Métropole)



Emissions de SO <sub>2</sub> (kt/an)		1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019
Périmètre : Métropole																	(e)
Industrie de l'énergie		645	947	1 185	1 539	1 755	700	576	423	310	242	132	51	39	36	37	35
Industrie manufacturière et construction		711	846	942	1 049	957	482	389	306	196	131	99	73	68	69	70	67
Traitement centralisé des déchets		0,8	1,1	1,5	2,1	2,6	2,6	3,4	2,8	0,9	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Résidentiel / tertiaire		291,7	293,9	432,0	325,8	286,7	198,5	143,2	87,8	76,0	64,5	33,8	29,7	29,2	29,8	24,4	22,0
Agriculture		12,8	19,7	33,3	32,2	30,8	17,2	19,2	15,0	14,0	12,0	6,5	0,8	0,7	0,8	0,8	0,7
Agriculture hors total		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transports		140,6	133,2	127,5	138,0	152,6	115,6	152,7	123,6	28,9	8,8	3,1	3,5	3,1	3,1	3,2	3,0
Transport hors total		106,6	136,5	259,7	331,0	252,7	122,0	147,1	119,5	151,7	152,9	92,4	91,7	84,2	92,6	105,9	94,0
TOTAL national hors UTCATF		1 802	2 241	2 721	3 086	3 185	1 516	1 283	958	626	458	275	159	140	140	136	127
UTCATF		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UTCATF Hors total		0,2	0,8	0,5	0,3	0,2	0,5	0,8	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1
Emissions naturelles hors total		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL national avec UTCATF		1 802	2 241	2 721	3 086	3 185	1 516	1 283	958	626	458	275	159	140	140	136	127
Hors total		106,8	137,3	260,2	331,3	253,0	122,6	147,9	119,8	152,0	153,1	92,6	91,9	84,4	92,9	106,0	94,0

## Analyse

### Enjeux

#### Effets environnementaux

Les émissions de SO<sub>2</sub> participent à la pollution acide. Elles entraînent des dépôts de sulfates et d'acides sulfuriques qui perturbent les écosystèmes (voir section générale « AEPP : de quels phénomènes s'agit-il ? »).

#### Objectifs de réduction

Le SO<sub>2</sub> est visé depuis la fin des années 1980 par différents objectifs :

- **Protocole d'Helsinki de 1985** sur les SO<sub>2</sub> dans le cadre de la CLRTAP (Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance) avec un objectif volontaire plus contraignant ;
- **Protocole d'Oslo de 1994** sur les SO<sub>2</sub> dans le cadre de la CLRTAP (Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance) ;
- **Protocole de Göteborg de 1999**, multi-polluants, multi-effets, entré en vigueur en 2007, dans le cadre de la CLRTAP ;
- **Amendement de 2012 au Protocole de Göteborg de 1999**, non encore ratifié par la France au 30 juin 2019 mais rentrant en application en 2019
- **Directive NEC (2001/81/EC)** sur les plafonds d'émissions nationaux (National Emission Ceilings Directive)
- **Directive NEC-2 (2016/2284)** sur la réduction des émissions de certains polluants
- **PREPA** : Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques de 2017 (décret n° 2017-949) prévu par la LTECV (Loi 2015-992 relative à la transition énergétique pour la croissance verte).

Le Protocole de Göteborg amendé fixe un engagement de réduction des émissions de SO<sub>2</sub> de 55% en 2020 par rapport à 2005 pour la France. Cet engagement est repris dans la directive (UE) 2016/2284, dite Directive Plafonds d'émissions (NEC-National Emission Ceilings en anglais) et ajoute des engagements de réduction après 2020, notamment une réduction de 77% en 2030.

#### Enjeux méthodologiques et incertitudes

Pour une présentation très détaillée des méthodologies d'estimation des émissions, téléchargez la dernière édition de notre rapport méthodologique « Ominea ». Au global, on estime l'incertitude (en niveau) sur ce polluant à 14,3 %.

#### A noter

Les émissions de SO<sub>2</sub> hors du total national restent importantes et sont principalement dues au secteur maritime international. L'annexe VI révisée de la convention MARPOL a imposé au 1<sup>er</sup> janvier 2020 une teneur en soufre maximale pour les combustibles utilisés dans le secteur maritime à 0,5% (contre 3,5 % avant cette date) ce qui va contribuer à diminuer considérablement les émissions de ce secteur.

### Tendance générale

Depuis 1990, la baisse des émissions de SO<sub>2</sub> dans les différents secteurs s'explique par :

- la diminution des consommations d'énergie fossile du fait de la mise en œuvre du programme électronucléaire et du développement des énergies renouvelables ;
- la mise en place d'actions d'économie d'énergie ;
- les progrès réalisés par les industriels par l'usage de combustibles moins soufrés et l'amélioration du rendement énergétique des installations.

Sont venues s'ajouter à ces réductions, diverses dispositions réglementaires sur la teneur en soufre des combustibles et carburants, renforçant la baisse constatée.

Cette tendance de fond, orientée à la baisse, devrait perdurer au cours des prochaines années grâce à la poursuite de la mise en œuvre de réglementations visant à sévérer les valeurs limites d'émission des installations industrielles dans le cadre de la directive sur les émissions industrielles (directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles, dite IED) ainsi que les valeurs limites d'émission des autres installations de combustion, notamment entre 1MW et 50 MW dans le cadre des arrêtés français sur la combustion.

Il est important de souligner que malgré cette tendance générale à la baisse, certaines années voient leurs émissions de SO<sub>2</sub> augmenter. Ces années constituent des épiphénomènes liés à la conjoncture climatique, du fait d'années plus froides (par exemple, une forte vague de froid ayant nécessité de recourir davantage aux énergies fossiles en 1998) et/ou à la conjoncture technique (par exemple, une moindre disponibilité du nucléaire en 1991).

A l'inverse, une douceur exceptionnelle du climat, comme en 2011 et 2014, ou encore la crise économique, en 2008, accentuent la baisse des émissions observées. Ceci montre la sensibilité des émissions aux aléas climatiques, notamment pour les secteurs de la transformation d'énergie et du résidentiel/tertiaire, et aux aléas économiques, essentiellement pour les industries.

Dans l'agriculture/sylviculture, les émissions de SO<sub>2</sub> proviennent de la combustion dans les engins mobiles. La baisse observée depuis 2011 s'explique par l'obligation de consommer du gazole non routier moins soufré en remplacement du fioul domestique.

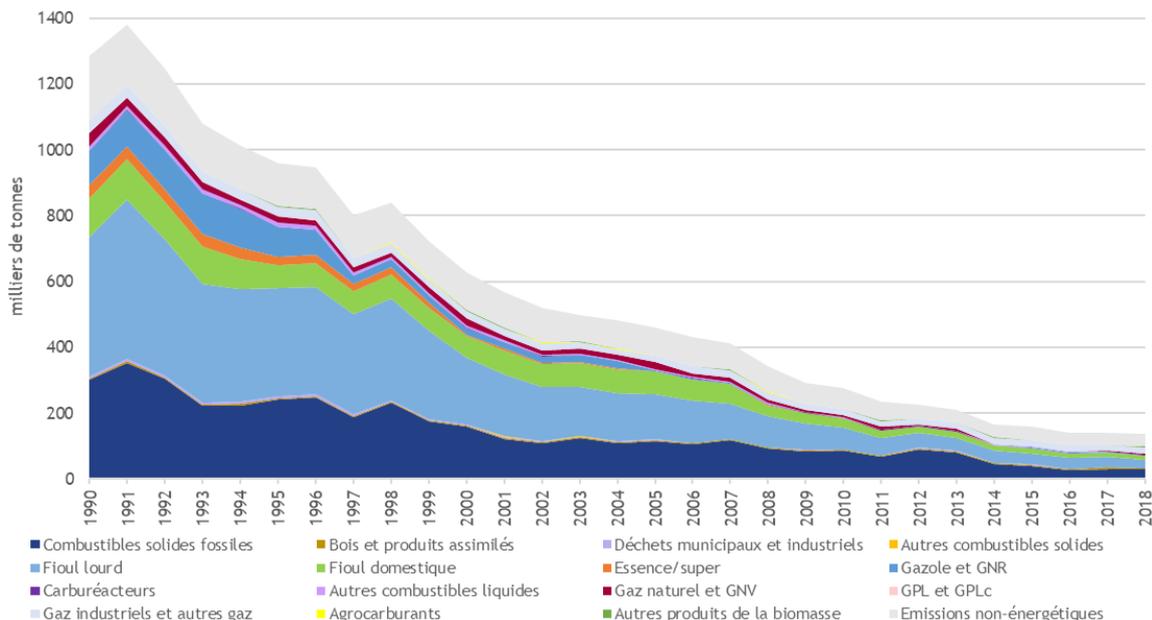
### Évolution récente

Pour la plupart des secteurs, l'évolution des émissions de SO<sub>2</sub> de ces dernières années est soit en légère baisse soit constante. Des baisses significatives sont tout de même observées dans les secteurs de la transformation de l'énergie, traduisant notamment l'abandon progressif du charbon dans la production d'électricité, et de l'industrie manufacturière du fait de l'évolution du mix énergétique avec une part plus importante pour les combustibles moins soufrés (gaz naturel notamment).

Ces objectifs de réduction **sont déjà atteints** ces dernières années puisque les émissions françaises sont passées en dessous du seuil de -55%/2005 en 2014 et -77%/2005 en 2016.

### Part des émissions liée aux combustibles

Les émissions de SO<sub>2</sub> sont davantage issues de procédés énergétiques (liées à des combustibles) et évoluent entre 70 et 90 % des émissions totales. Depuis 1990, le dioxyde de soufre est principalement émis par les CMS ainsi que par les fiouls lourds et domestiques dont les émissions ont diminué de 92 % entre 1990 et 2018.

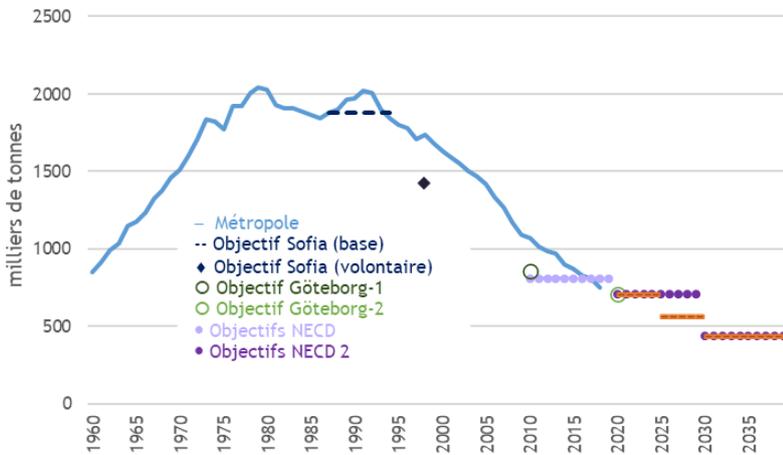


### Et ailleurs ?

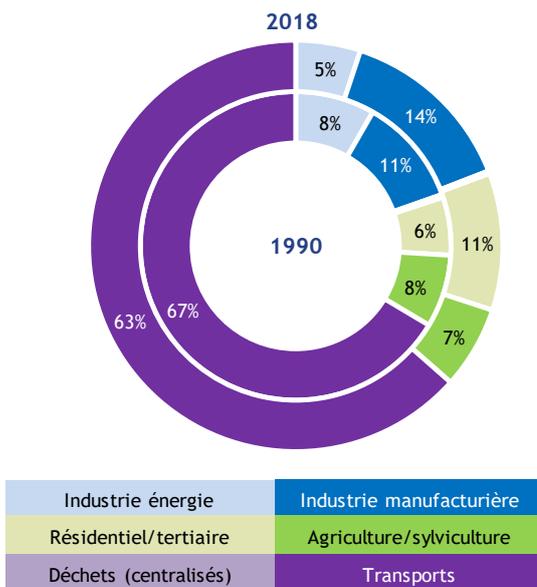
A titre de comparaison, les émissions de SO<sub>2</sub> en France sont estimées en 2018 à 2,1 g par habitant et par an contre 4,0 g dans l'Union Européenne (UE-27+Islande) en moyenne (table CRF UE éd. 2020).

## Emissions de NO<sub>x</sub> en bref

### Evolution des émissions de NO<sub>x</sub> en France



### Répartition des émissions de NO<sub>x</sub> en France



# NO<sub>x</sub>

## Oxydes d'azote

### Type

Polluant atmosphérique

### Définition

Les oxydes d'azote comprennent le NO<sub>2</sub> (dioxyde d'azote) et le NO (monoxyde d'azote).

### Composition chimique

Un atome d'azote et un ou deux atomes d'oxygène.

### Origine

Sources anthropiques : combustion de tout combustibles fossiles ou biomasse dans le transport routier, les installations de combustion dans la production d'électricité, le chauffage urbain, l'industrie, le résidentiel et le tertiaire ; quelques procédés industriels (production d'acide nitrique, fabrication d'engrais, traitement de surfaces, etc.).

Sources naturelles : volcans, éclairs, feux de forêts.

### Phénomènes associés

Les NO<sub>x</sub> contribuent à l'acidification, à l'excès de retombées azotées (eutrophisation), à la formation de particules secondaires et interviennent dans la formation des oxydants photochimiques (ozone troposphérique). Ils sont un gaz.

### Effets

☠ Effet de serre, forçage radiatif négatif (refroidissant)

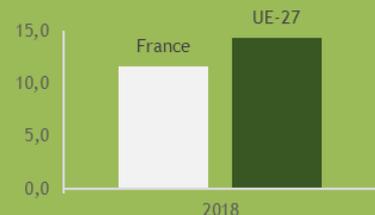
☠ Précurseur d'ozone

☠ Acidification

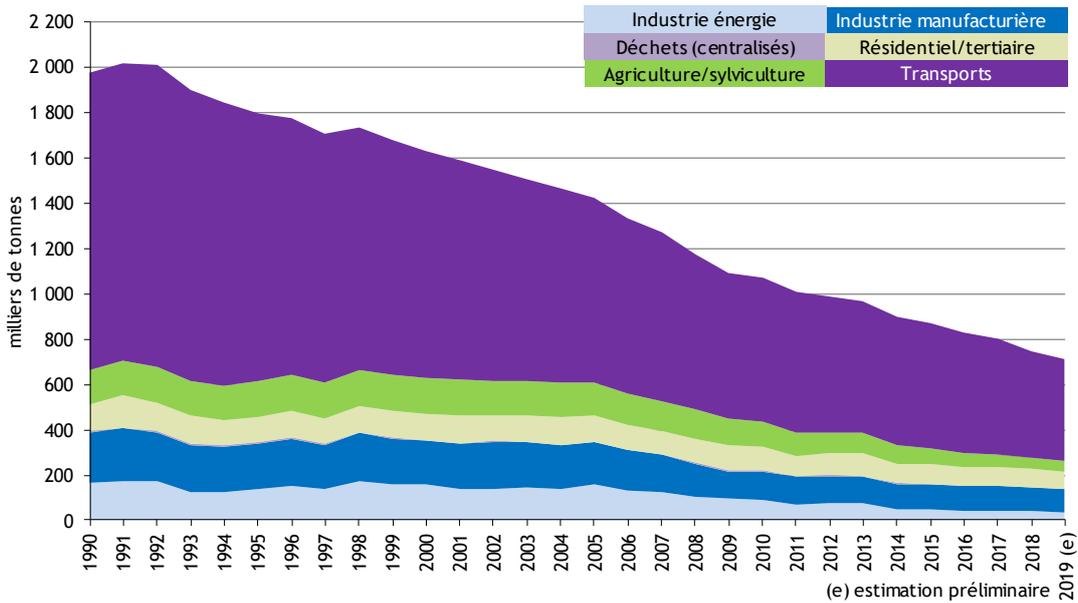
Eutrophisation

☠ Santé (pour le NO<sub>2</sub>)

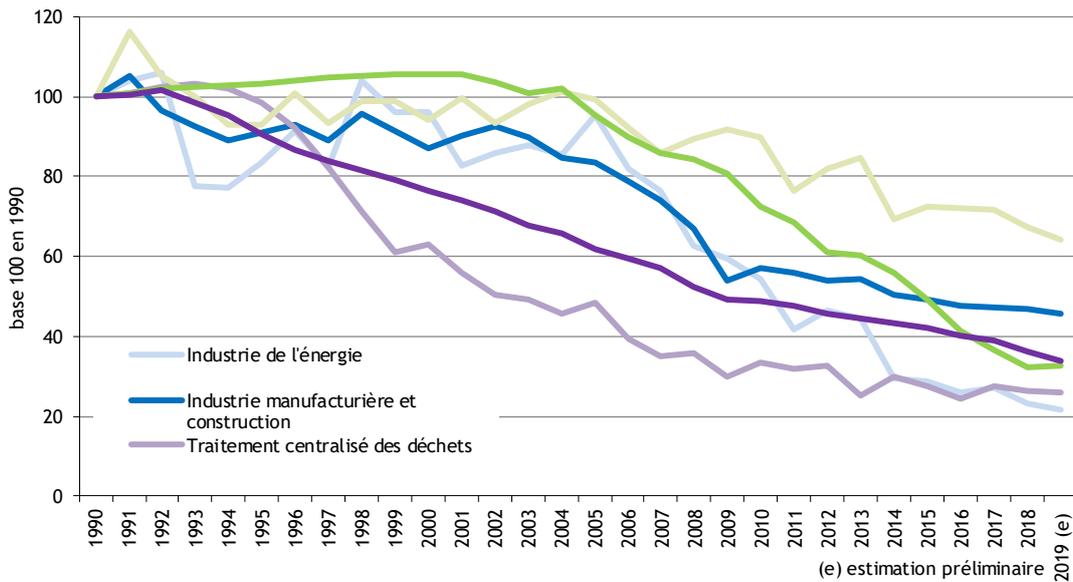
### Emissions par habitant (kg/hab/an) en 2018



Evolution des émissions dans l'air de NO<sub>x</sub> depuis 1990 en France (Métropole)



Evolution des émissions dans l'air de NO<sub>x</sub> en base 100 en 1990 en France (Métropole)



Emissions de NO <sub>x</sub> (kt/an)		1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019 (e)
Périmètre : Métropole																	
Industrie de l'énergie		168,6	230,5	251,4	278,6	358,6	214,0	163,3	136,6	157,2	156,0	88,7	47,1	42,6	44,2	37,9	35,3
Industrie manufacturière et construction		270,6	358,1	398,3	382,7	352,5	268,7	223,2	203,3	194,3	186,5	127,3	110,2	106,6	105,6	104,8	101,9
Traitement centralisé des déchets		1,3	1,7	2,4	3,4	4,4	4,6	6,0	5,9	3,8	2,9	2,0	1,7	1,5	1,7	1,6	1,6
Résidentiel / tertiaire		54,7	69,5	120,7	122,1	120,6	116,1	120,0	111,5	113,1	119,0	107,8	87,0	86,4	86,0	80,9	76,9
Agriculture		49,7	77,4	125,3	127,4	141,8	140,0	150,5	155,6	159,2	143,7	108,9	74,2	62,1	55,0	48,6	49,1
Agriculture hors total		0	0	0	0	76,7	80,0	82,4	76,8	79,3	73,6	70,2	71,4	71,4	71,3	70,3	70,3
Transports		304	436	614	855	1 048	1 117	1 310	1 186	1 002	812	638	550	528	511	475	445
Transport hors total		127,2	158,2	298,6	370,7	320,8	201,2	220,5	205,4	273,4	257,5	235,3	177,5	169,6	178,2	197,7	180,2
TOTAL national hors UTCATF		849	1 173	1 512	1 769	2 026	1 861	1 973	1 799	1 629	1 420	1 072	870	827	804	749	710
UTCATF		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UTCATF Hors total		9,4	13,2	13,4	11,3	10,9	14,0	21,0	19,0	19,6	16,2	15,9	16,4	17,0	18,0	17,3	17,3
Emissions naturelles hors total		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,7	0,7	0,6	0,4	0,5	0,4	0,4	0,8	0,8
TOTAL national avec UTCATF		849	1 173	1 512	1 769	2 026	1 861	1 973	1 799	1 629	1 420	1 072	870	827	804	749	710
Hors total		137,1	172,0	312,5	382,5	409,0	295,8	324,5	301,9	373,0	347,9	321,7	265,8	258,5	267,8	286,0	268,5

## Analyse

### Enjeux

#### Effets environnementaux et sanitaires

Les émissions de NO<sub>x</sub> entraînent l'acidification de l'atmosphère et des retombées acides (acidification des lacs, dépérissement des forêts) ainsi que des dépôts d'azote (nitrates), à l'origine du phénomène d'eutrophisation. Les NO<sub>x</sub> sont aussi des précurseurs d'ozone. Ils ont aussi un impact complexe sur l'effet de serre : les NO<sub>x</sub> conduisent à la formation d'ozone (forçage positif), mais aussi à la formation de particules de nitrate et oxydent le CH<sub>4</sub> (forçage négatif).

Les NO<sub>x</sub> sont nocifs pour la santé humaine, particulièrement le NO<sub>2</sub> qui pénètre profondément dans les poumons où il fragilise la muqueuse face aux agressions infectieuses. Irritant les bronches, il augmente la fréquence et la gravité des crises chez les asthmatiques et il altère le développement de la capacité pulmonaire des jeunes enfants. Par ailleurs, le NO passe dans les alvéoles pulmonaires et se dissout dans le sang où il limite la fixation de l'oxygène sur l'hémoglobine. Les organes sont alors moins bien oxygénés.

#### Objectifs de réduction

Le NO<sub>x</sub> est visé depuis la fin des années 1980 par différents objectifs :

- **Protocole de Sofia de 1988** sur les NO<sub>x</sub> dans le cadre de la CLRTAP (Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance) ;
- **Protocole de Göteborg de 1999**, multi-polluants, entré en vigueur en 2007, dans le cadre de la CLRTAP ;
- **Amendement de 2012 au Protocole de Göteborg de 1999**, non encore ratifié par la France au 30 juin 2019 mais rentrant en application en 2019
- **Directive NEC** (2001/81/EC) sur les plafonds d'émissions nationaux (National Emission Ceilings Directive)
- **Directive NEC-2** (2016/2284) sur la réduction des émissions de certains polluants
- **PREPA** : Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques de 2017 (décret n°2017-949) prévu par la LTECV (Loi 2015-992 relative à la transition énergétique pour la croissance verte).

#### Dépassement des normes de concentrations

Malgré une diminution générale des émissions de NO<sub>x</sub>, localement, les concentrations dans l'air restent préoccupantes. Ainsi, le 24 octobre 2019, la France a été condamnée par la Cour de Justice de l'UE (CJUE) pour non-respect de la directive 2008/50/CE relative à la qualité de l'air ambiant, et plus spécifiquement pour "dépassement de manière systématique et persistant" des valeurs limites de concentration (VLC) pour le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>).

#### A noter

Les NO<sub>x</sub> de l'agriculture, à l'exception de ceux émis par le brûlage de résidus de récolte, n'ont pas été pris en compte dans l'élaboration des objectifs de réduction réglementaires. Par souci de cohérence entre ces objectifs et les totaux nationaux, ces émissions sont exclues du total national, et rapportées en « hors total ».

### Tendance générale

Depuis 1966, le principal secteur émetteur de NO<sub>x</sub> est celui du transport routier. Les émissions qui y sont associées sont en baisse depuis 1993, malgré l'accroissement du parc et de la circulation. Cette réduction globale des émissions du secteur des transports est à mettre en parallèle avec la mise en place, depuis 1970, des normes européennes d'émission. Ces réglementations fixent les limites maximales de rejets polluants pour les véhicules roulants, et intègrent les rejets de NO<sub>x</sub> pour les véhicules neufs mis en service. Cette baisse est principalement liée au renouvellement du parc de véhicules, à l'équipement progressif des véhicules en pots catalytiques et au développement d'autres technologies de réduction. Ainsi, les progrès réalisés au sein du secteur parviennent à contrebalancer l'intensification du trafic. Les émissions des autres secteurs connaissent également une évolution à la baisse, expliquée par :

- une meilleure performance énergétique des installations industrielles ;
- la mise en place du programme électronucléaire et le développement d'énergies renouvelables ;
- le renouvellement du parc des engins mobiles non routiers de l'agriculture/sylviculture et de l'industrie (particulièrement dans le sous-secteur du BTP) ;
- la mise en place dans l'industrie et les installations de combustion de systèmes de traitement primaires et secondaires conformément à la directive GIC et à d'autres réglementations (petites et moyennes installations de combustion, arrêté du 2 février 1998 modifié, directive 2010/75/UE dite « IED »).

Concernant le secteur de l'agriculture/sylviculture, il est important de noter qu'une part importante des émissions de NO<sub>x</sub>, celles provenant de l'élevage et de l'épandage d'engrais azotés, est comptabilisée hors total national, conformément au périmètre des plafonds nationaux (Protocole de Göteborg et directive NEC).

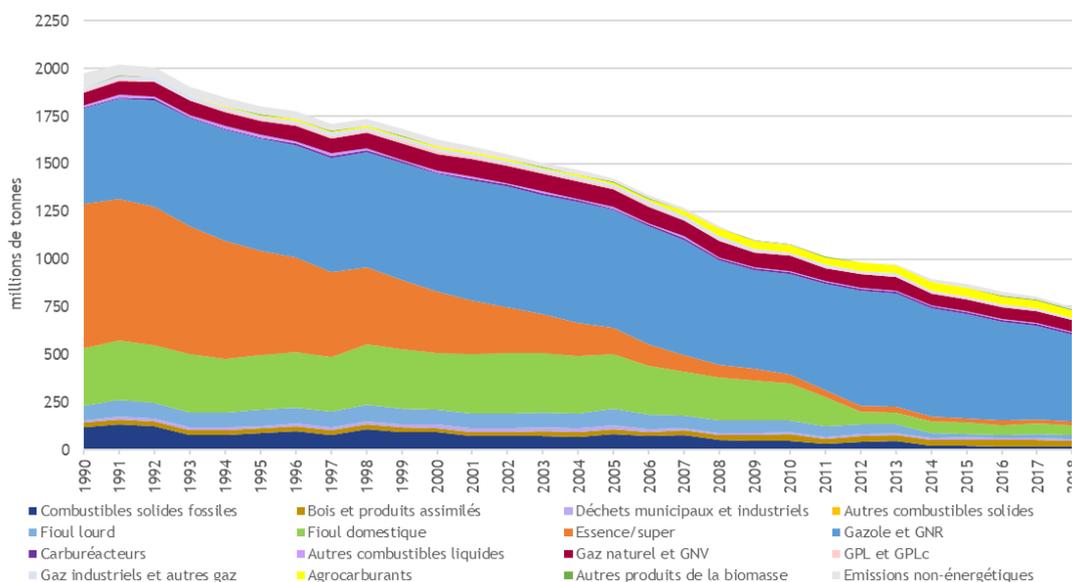
## Évolution récente

Si la tendance générale des émissions de NO<sub>x</sub> est à la baisse depuis plusieurs années, pour le secteur résidentiel/tertiaire, certaines années, comme 2012 et 2013, sont marquées par une augmentation des émissions. Cela s'explique par un indice de rigueur climatique plus élevé, par rapport à d'autres années marquées par un climat plus doux, comme 2011 et 2014. Ceci souligne la sensibilité des émissions aux aléas climatiques. La tendance à la baisse des émissions de NO<sub>x</sub> dans le secteur des transports devrait se poursuivre au cours des prochaines années grâce à la mise en œuvre de normes de plus en plus strictes concernant les rejets de polluants.

Le plafond 2010 de 810 kt fixé par la **directive NEC** (plafonds d'émissions nationaux, voir *chapitre Politique et Règlementation*) a été atteint en 2017. Le Protocole de Göteborg amendé fixe un engagement de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> de 50% en 2020 par rapport à 2005, c'est-à-dire un plafond calculé de 710 kt. La **directive NEC-2** (voir *chapitre Politique et Règlementation*) prévoit des engagements de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> de 50% en 2020 par rapport à 2005 (c'est-à-dire un plafond calculé de 710 kt) et de 69% en 2030 par rapport à 2005 (c'est-à-dire un plafond calculé de 440 kt). Le niveau pré-estimé pour 2019, de 710 kt, montre que l'objectif 2020 peut être atteint.

## Part des émissions liée aux combustibles

Depuis 2011 en France, les émissions de NO<sub>x</sub> sont majoritairement issues de la combustion du gazole (sans y inclure la part du biogazole). La contribution de ce combustible au total national a augmenté ainsi jusqu'à atteindre 65 % en 2014, pour en partir en baisse. Cela s'explique en partie par l'activité du transport routier, avec un parc de véhicules massivement diésélisé.



## Et ailleurs ?

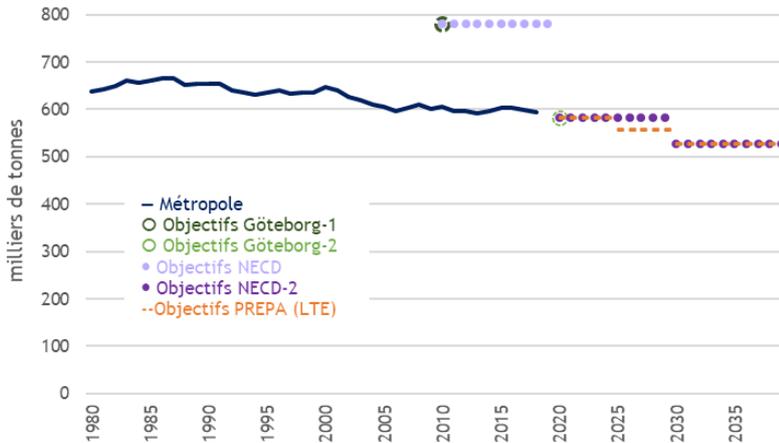
D'après le rapport d'inventaire d'émissions de polluants de l'UE-28 (IIR éd. 2019, réalisé dans le cadre de la CEE-NU), les émissions totales de NO<sub>x</sub> dans l'UE-28 sont passées de 18 007 kt en 1990 à 7532 kt NO<sub>x</sub> en 2017. Les Etats-membres qui ont le plus contribué aux émissions en 2017 sont l'Allemagne (16%), le Royaume-Uni (12%), la France (11% 2017) et la Pologne (11%). Dans l'UE-28, les émissions de NO<sub>x</sub> ont baissé de 58% entre 1990 et 2017 (contre 59% en France).

Aux **Etats-Unis**, (IIR des Etats-Unis, éd. 2019) les émissions de NO<sub>x</sub> ont fortement diminué entre 2002 et 2017, passant de 21 623 kt à 9 668 kt (-55%).

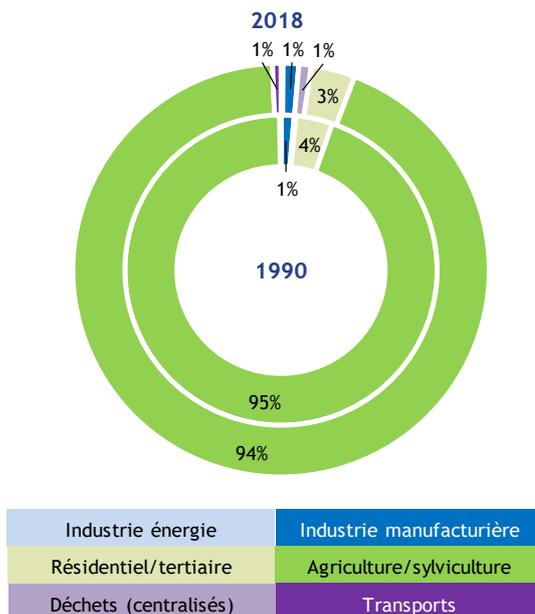
En Chine, d'après les estimations de Zhao et al. (2013), les émissions de NO<sub>x</sub> ont fortement augmenté jusqu'en 2010, passant de 11 Mt en 1995 à 26,1 Mt en 2010. Cependant, depuis 2010, les mesures de contrôle des émissions de NO<sub>x</sub> et la mise en œuvre, dès 2013, du plan quinquennal « Clean Air Action » a permis une réduction de la majorité des émissions de polluants. Les émissions de NO<sub>x</sub> ont ainsi baissé de -17 % entre 2010 et 2017. Cette diminution a été notamment permise par la dénitrification des fumées dans les centrales énergétiques par réduction catalytique sélective et l'arrêt de petites chaudières industrielles. (Zheng, B. et al., 2018).

## Emissions de NH<sub>3</sub> en bref

### Evolution des émissions de NH<sub>3</sub> en France



### Répartition des émissions de NH<sub>3</sub> en France



# NH<sub>3</sub>

## Ammoniac

### Type

Polluant atmosphérique

### Définition

L'ammoniac (NH<sub>3</sub>) est un composé présent à l'état naturel dans l'environnement. Il peut également être produit industriellement par le procédé d'Haber-Bosch, à partir de N<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>. C'est un gaz incolore, reconnaissable à sa forte odeur, très irritant pour le système respiratoire, la peau et les yeux.

### Composition chimique

Un atome d'azote (N) et trois atomes d'hydrogène (H) composent l'ammoniac, existant à l'état liquide ou gazeux.

### Origine

Sources anthropiques : agriculture (effluents d'élevage, engrais azotés minéraux) ; voitures équipées d'un catalyseur, usage d'ammoniac et urée dans les procédés de dénitrification, quelques procédés industriels.

Source naturelle : décomposition de matières organiques par des microorganismes dans le sol.

### Phénomènes associés

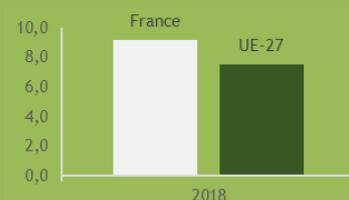
L'ammoniac est un précurseur de particules secondaires : il réagit avec les composés acides tels que les oxydes d'azote ou de soufre (émis par d'autres secteurs d'activité anthropiques) pour former par nucléation des particules très fines (PM<sub>2,5</sub>) de nitrate ou de sulfate d'ammonium. Ceci renforce donc l'impact de l'ammoniac sur la santé. Il contribue à l'acidification et à l'eutrophisation des milieux (excès de dépôts d'azote).

### Effets

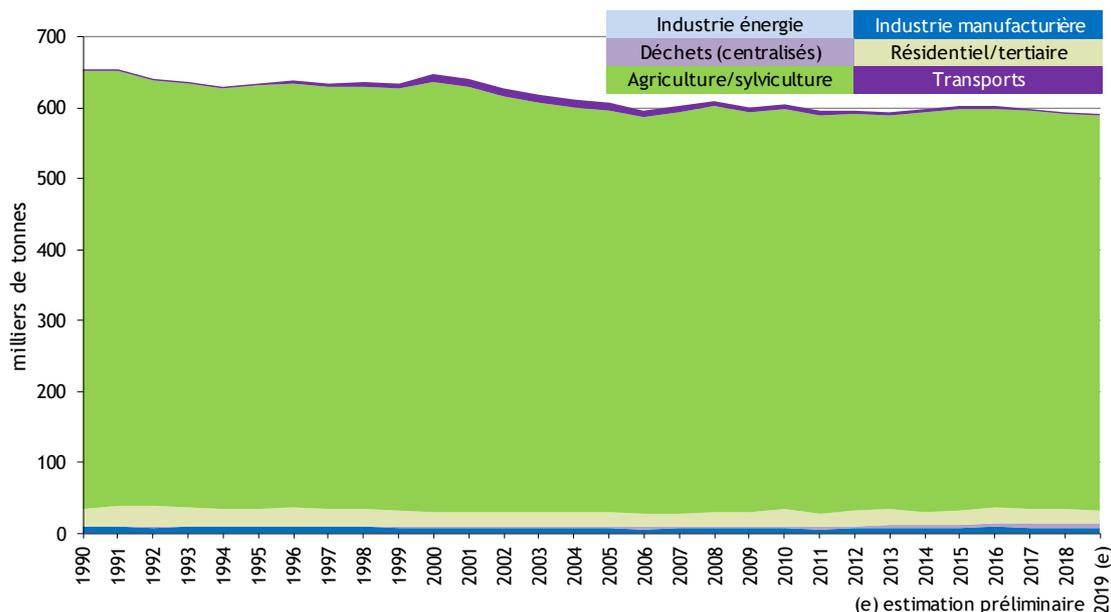
Acidification, Eutrophisation

Santé

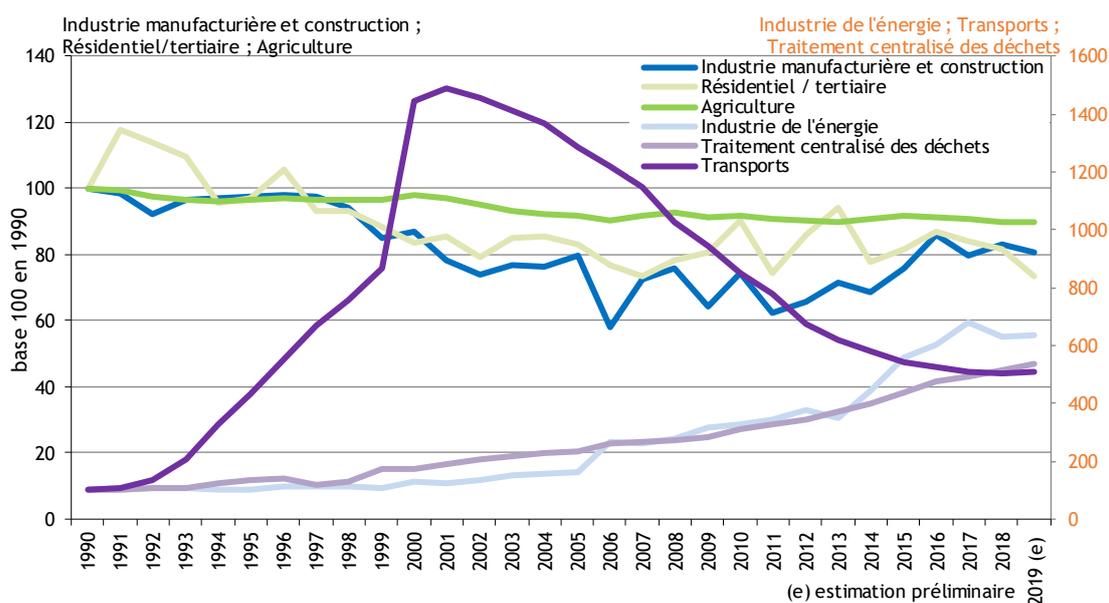
### Emissions par habitant kg/hab/an en 2018.



Evolution des émissions dans l'air de NH<sub>3</sub> depuis 1990 en France (Métropole)



Evolution des émissions dans l'air de NH<sub>3</sub> en base 100 en France (Métropole)



Emissions de NH<sub>3</sub> (kt/an)

Périmètre : Métropole

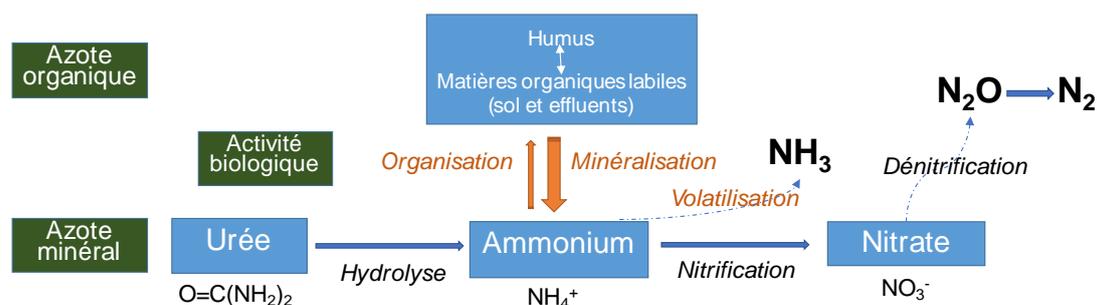
	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019 (e)
Industrie de l'énergie	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0
Industrie manufacturière et construction	9,1	8,6	8,7	8,4	7,5	6,9	6,4	6,6	7,4	6,9	7,2	7,0
Traitement centralisé des déchets	0,9	1,0	1,1	1,5	1,9	2,6	3,4	4,9	5,3	5,5	5,7	5,9
Résidentiel / tertiaire	22,2	27,0	25,0	24,2	20,9	20,8	22,6	20,5	21,8	21,0	20,4	18,3
Agriculture	605,6	623,3	617,7	596,8	605,2	565,7	565,8	566,3	563,2	560,4	556,0	556,0
Agriculture hors total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transports	0,6	0,7	0,8	3,4	11,2	10,0	6,6	4,2	4,1	4,0	3,9	4,0
Transport hors total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL national hors UTCATF	638,6	660,6	653,4	634,5	646,9	606,3	605,4	603,3	602,7	598,8	594,2	592,2
UTCATF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UTCATF Hors total	0,2	0,5	0,8	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1
Emissions naturelles hors total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL national avec UTCATF	638,6	660,6	653,4	634,5	646,9	606,3	605,4	603,3	602,7	598,8	594,2	592,2
Hors total	0,2	0,5	0,8	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1

## Analyse

### Enjeux

#### Un phénomène agricole

Les émissions d'ammoniac sont presque exclusivement d'origine agricole. La volatilisation de l'ammoniac en agriculture est un processus de surface. Elle correspond à l'émission dans l'air d'ammoniac gazeux (NH<sub>3</sub>) issu de l'ion ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), contenu dans le produit émetteur, ou dans la solution du sol.



Cette volatilisation a lieu généralement suite aux apports d'engrais azotés organiques (déjections animales, boues, composts...), et minéraux, contenant de l'azote uréique (précurseur de l'ammonium) ou ammoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).

Les principaux facteurs influençant la volatilisation de l'ammoniac sont la quantité d'azote ammoniacal contenue dans le produit, la surface de contact entre le produit et l'air, le pH du produit, les conditions pédoclimatiques et météorologiques (température, vent, précipitation, pH du sol) au moment de l'apport ou encore la capacité d'absorption par la culture.

Si l'on considère la fertilisation azotée d'une parcelle, cette pollution est particulièrement préjudiciable pour l'agriculteur car l'azote perdu par volatilisation est autant d'azote qui ne sera pas utilisé pour la croissance des plantes, entraînant une baisse de l'efficacité des apports de produits azotés. Minimiser les pertes ammoniacales est donc une stratégie gagnant-gagnant pour l'agriculteur.

#### Enjeux environnementaux et sanitaires

De manière générale, la qualité de l'air est un enjeu majeur pour la santé : sa dégradation est responsable de 48 000 décès prématurés par an (Santé publique France, 2016) et son coût annuel pour la société française a été évalué à environ 100 milliards d'euros (Sénat, 2015). Les polluants atmosphériques sont également responsables d'une dégradation de la santé des animaux, des espaces naturels et des agrosystèmes.

Le NH<sub>3</sub> présente un enjeu majeur pour l'environnement car les substances qui résultent de ses transformations chimiques (nitrate d'ammonium par exemple) sont impliquées à la fois dans l'acidification et l'eutrophisation des milieux en raison de dépôts excessifs en milieu naturel, et dans la dégradation de la qualité de l'air. Une fois émis dans l'atmosphère, le NH<sub>3</sub> peut se combiner avec les oxydes d'azote issus des activités industrielles et du trafic routier pour former des particules fines (PM<sub>2,5</sub>) dites secondaires, qui peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et pénétrer dans le sang, causant asthme, allergies, maladies respiratoires ou cardiovasculaire, cancers. Voilà pourquoi le NH<sub>3</sub> est généralement pointé du doigt lors des épisodes de pics de particules printaniers. Par exemple, les observations atmosphériques du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) ont montré que les PM<sub>2,5</sub> de type nitrate d'ammonium lors de l'épisode de pollution aux particules fines en Ile-de-France en mars 2014, s'étaient formées dans l'atmosphère à partir de NH<sub>3</sub> émis par les activités agricoles et d'oxyde d'azote émis notamment par le transport routier.

En ce début d'année 2020, le NH<sub>3</sub> et le secteur agricole sont revenus sur le devant de la scène lors de la gestion de la pandémie de Covid-19, avec l'évaluation des impacts directs et indirects des mesures de confinement sur les émissions de polluants atmosphériques. En effet, un épisode de pollution aux particules fines a été observé les 28-29 mars 2020, notamment dans les régions Ile-de-France et Grand Est. Différentes raisons peuvent expliquer cet épisode de pollution : la poursuite d'activités émettrices localement (chauffage au bois dans le secteur résidentiel-tertiaire, épandages en agriculture), le transport par le vent de particules venant de sources plus lointaines (autres pays), ou de sources naturelles. Il est important de garder à l'esprit que de tels épisodes sont le résultat de processus complexes, dont il est parfois difficile de tirer des conclusions.

## Réglementations et objectifs de réduction

Différentes réglementations visant la qualité de l'air ont été mises en place aux niveaux international, européen, national, régional ou infrarégional. Parmi ces réglementations, certaines fixent des engagements de réduction d'émissions de NH<sub>3</sub> ou des plafonds d'émissions à ne pas dépasser.

Le premier objectif de réduction des émissions de NH<sub>3</sub> a été fixé par le protocole de Göteborg pour l'année 2010. Ce plafond, fixé à 780 kt NH<sub>3</sub>, a été largement respecté, les émissions n'ayant jamais atteint ce niveau sur la période inventoriée. Amendé en 2012, le protocole propose de nouveaux objectifs plus ambitieux, avec un engagement de réduction des émissions de NH<sub>3</sub> de 4% en 2020 par rapport à 2005, c'est-à-dire un plafond calculé de 582 kt.

Cet objectif est repris au niveau européen dans la directive NEC (National Emission Ceilings), dont la révision en 2016 (Directive UE 2016/2284) a ajouté un objectif de réduction d'émissions de NH<sub>3</sub> à horizon 2030, fixé à 13% par rapport à 2005 pour la France (soit un plafond calculé de 527 kt).

Enfin cet objectif a été inclus au niveau national dans le Plan national de Réduction des Émissions de Polluants Atmosphériques (PRÉPA) adopté par le gouvernement français en 2017. Un objectif intermédiaire a été ajouté dans le PRÉPA pour 2025, correspondant à un plafond de 558 kt NH<sub>3</sub>.

International	<b>PROTOCOLE DE GÖTEBORG</b> (1999, amendé en 2012, non encore ratifié) Réduction en 2020 par rapport à 2005 de - 4% pour le NH <sub>3</sub> et - 27% pour les PM <sub>2,5</sub>	
Union européenne	<b>DIRECTIVE UE 2016/2284 REVISANT LA DIRECTIVE NEC*</b> Réduction en 2020 par rapport à 2005 de - 4% pour le NH <sub>3</sub> et - 27% pour les PM <sub>2,5</sub> Réduction en 2030 par rapport à 2005 de -13% pour le NH <sub>3</sub> et - 57% pour les PM <sub>2,5</sub>	<b>DIRECTIVE 2010/75/UE DITE DIRECTIVE IED</b> Mise en place de <b>meilleures techniques disponibles</b> (MTD) d'ici le 21 février 2021 pour les élevages intensifs de <b>porcs</b> (>2000 emplacements en porcs charcutiers ou >750 emplacements en truies), et les élevages intensifs de <b>volailles</b> (>40000 volailles).
National	<b>PLAN NATIONAL DE REDUCTION DES EMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES (PREPA, 2017)</b> Réduction en 2020 par rapport à 2005 de - 4% pour le NH <sub>3</sub> et - 27% pour les PM <sub>2,5</sub> Réduction en 2030 par rapport à 2005 de -13% pour le NH <sub>3</sub> et - 57% pour les PM <sub>2,5</sub> Les mesures détaillées sont décrites dans l' <b>Arrêté du 10 mai 2017</b> .	<b>ARRETE DU 31 JANVIER 2008</b> Déclaration des émissions de NH <sub>3</sub> lorsqu'elles sont <b>supérieures à 10000 kg/an</b> pour les installations classées soumises à autorisation ou enregistrement, à l'exclusion des élevages, sauf les installations relevant de la rubrique 3660.
Régional ou infrarégional	<b>SCHEMAS REGIONAUX CLIMAT AIR ENERGIE (SRCAE, 2013)</b> Désormais intégrés au sein des Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires ( <b>SRADDET</b> ), ils donnent des orientations régionales pour le climat, la qualité de l'air et l'énergie à horizon <b>2020 et 2050</b> destinées à prévenir ou à réduire la pollution atmosphérique afin de respecter les objectifs de qualité de l'air.	<b>PLANS DE PROTECTION DE L'ATMOSPHERE (PPA, 2014)</b> 38 plans d'actions visant la réduction des émissions de polluants atmosphériques. Applicables aux agglomérations de plus de 250000 habitants et aux zones en dépassements de normes de qualité de l'air ou qui risquent de l'être.

\*National Emission Ceilings

Figure 1 : Réglementations visant le NH<sub>3</sub> à différentes échelles

En 2018, les émissions nationales de NH<sub>3</sub> sont estimées, hors UTCATF, à 594 kt. Des réductions supplémentaires sont nécessaires pour atteindre l'objectif 2020 : il faudra une baisse de 12 kt entre 2018 et 2020, représentant une baisse de 2,05% entre ces deux années. Si l'on s'intéresse à la tendance entre 2016 et 2018, elle est de l'ordre de -1,4% : il s'agit donc d'accélérer le rythme de diminution des émissions de NH<sub>3</sub>.

Pour rappel, le principal secteur émetteur de NH<sub>3</sub> est le secteur agricole, représentant 93% des émissions en 2018. Les émissions étant très stables sur la période, il est difficile d'anticiper l'atteinte ou non des objectifs. Différentes pistes sont cependant mentionnées dans le PRÉPA : utilisation d'engrais moins émissifs, utilisation de matériels d'épandage moins émissifs (pendillards, injecteurs, enfouissement post-épandage rapide), contrôle de l'interdiction des épandages aériens, financement de projets pilotes et mobilisation des financements (exemple des projets AGR'AIR). Un accompagnement du secteur agricole est également prévu dans le plan pour la diffusion des bonnes pratiques avec, entre autres, la diffusion en 2019 d'un guide des bonnes pratiques agricoles pour l'amélioration de la qualité de l'air composé de 14 fiches pratiques à destination des agriculteurs et des conseillers agricoles.

## Une gestion intégrée de l'azote

Tout comme les autres composés azotés, les enjeux liés aux émissions de NH<sub>3</sub> doivent être pensés dans le contexte plus large du cycle de l'azote, pour éviter tout transfert de pollution. L'azote est un nutriment majeur, tant au niveau de la production d'aliments, de fibres ou encore de biocombustibles. Il se présente sous des formes variées, certaines

non réactives (N<sub>2</sub>), et d'autres, comme le NH<sub>3</sub>, réactives, souvent perdues sous forme de pollution de l'air ou de l'eau. Depuis plusieurs années, différentes initiatives voient le jour pour favoriser une gestion intégrée de l'azote, en optimisant son efficacité d'utilisation, jugée faible à l'heure actuelle si l'on considère la chaîne complète de la fertilisation à la consommation humaine et aux déchets.

En particulier, dans le cadre de la Convention CEE-NU sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, un groupe dédié à l'azote (*Task Force on Reactive Nitrogen - TFRN*) a été créé pour développer des informations techniques et scientifiques afin d'élaborer des stratégies à l'échelle de la CEE-NU pour encourager la coordination des politiques de pollution de l'air sur l'azote dans le contexte du cycle de l'azote. Parmi les publications phares de la TFRN, citons le document « *Option for Ammonia Mitigation* » dédié aux pratiques pour réduire le NH<sub>3</sub> en agriculture. Plus récemment, ce groupe a été mandaté pour produire un document d'orientation sur la gestion intégrée durable de l'azote.

Ce principe de gestion intégrée des nutriments est également inclus dans le pacte vert pour l'Europe (*European Green Deal*), au sein de la stratégie nommée « Farm to Fork ». On peut y lire que la Commission agira pour réduire les pertes d'éléments nutritifs (dont l'azote) d'au moins 50%, tout en veillant à ce qu'il n'y ait pas de détérioration de la fertilité des sols. Cette diminution entraînerait alors une réduction du recours aux engrais d'au moins 20% d'ici 2030. Le document ne précise en revanche pas l'année prise en compte pour le niveau de référence ni les types d'engrais visés (minéraux et/ou organiques). La Commission précise qu'il sera nécessaire d'élaborer avec les États membres des plans d'action, visant entre autres à promouvoir les techniques de fertilisation de précision et des pratiques agricoles plus durables, en particulier dans les zones sensibles d'élevage.

### A noter

Sont exclues du total national les émissions liées aux feux de forêt.

### Tendance générale

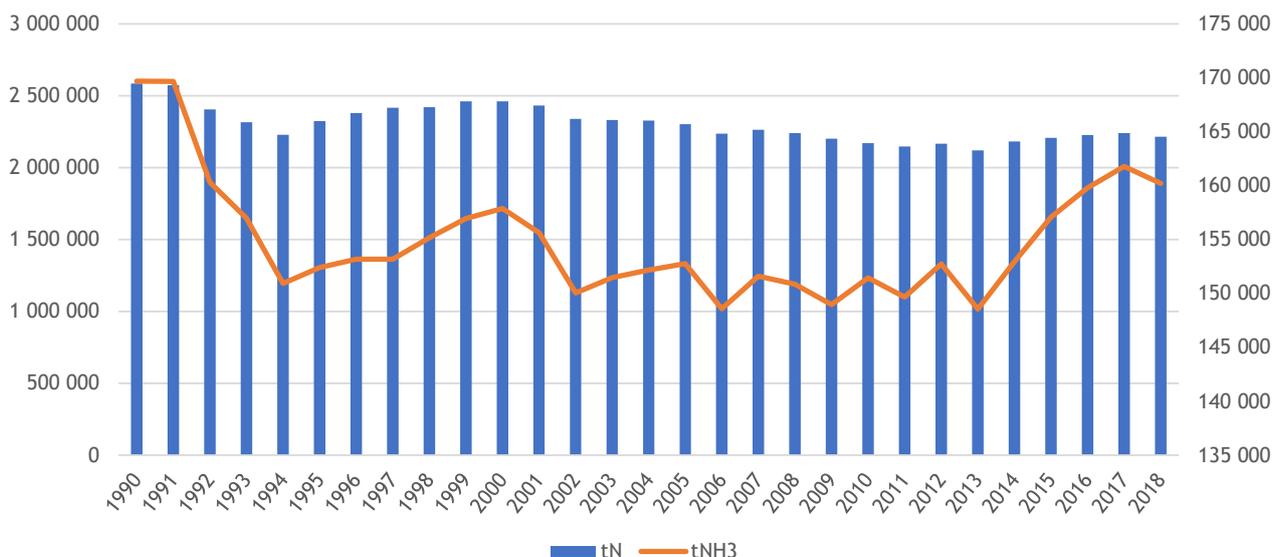
Globalement, les émissions de NH<sub>3</sub> ont diminué de 9% entre 1990 et 2006 : elles sont passées d'environ 653 kt NH<sub>3</sub> en 1990 à 596 kt NH<sub>3</sub> en 2006. Depuis 2006, les émissions se stabilisent et oscillent entre 594 kt et 610 kt. Bien que ces émissions semblent graviter autour d'un point d'équilibre, il faut souligner qu'elles sont en baisse depuis 2015.

La majeure partie des émissions de NH<sub>3</sub> provient du secteur de l'agriculture/sylviculture : il représente, en 2018, 94% du total national. Au sein du secteur, en 2018, les principaux postes contribuant aux émissions sont en premier lieu l'apport d'engrais et d'amendements minéraux (29% des émissions du secteur), suivi de la gestion des déjections bovines au bâtiment et au stockage (26% des émissions du secteur), puis de l'apport d'engrais et d'amendements organiques (21% des émissions du secteur). Les émissions restantes se répartissent entre la pâture et la gestion des déjections des animaux hors bovins au bâtiment et au stockage.

La tendance générale est principalement dirigée par les évolutions du cheptel bovin, en particulier les vaches laitières, et par la quantité d'engrais azotés minéraux épandus.

La gestion des déjections bovines au bâtiment et au stockage est le premier poste contribuant à la baisse sur la période : les émissions de NH<sub>3</sub> ont diminué de 14 % entre 1990 et 2018, soit -23,8 kt, principalement du fait d'une baisse du cheptel bovin.

Vient ensuite la fertilisation azotée minérale, dont les émissions ont diminué de 9,5 kt entre 1990 et 2018, soit 6% de baisse. Pour ce poste, les variations d'émissions de NH<sub>3</sub> interannuelles proches (entre l'année n et l'année n+1) s'expliquent en partie par les fluctuations des livraisons d'engrais. Il est difficile de donner une règle générale mais, de manière simplifiée, les livraisons annuelles augmentent lorsque les prix des produits agricoles sont forts car les agriculteurs souhaitent maximiser leur rendement. Inversement, si les prix des produits agricoles sont bas, les agriculteurs ont plutôt tendance à limiter leurs dépenses et donc les achats de fertilisants. Les évolutions en termes d'émissions sur ce poste sont également liées aux variations du mix des engrais utilisés. En effet, la forme des engrais influe fortement sur les émissions : l'utilisation d'engrais sous forme d'urée a progressé ces dernières années, cette forme étant globalement plus émettrice que les ammonitrates par exemple, les émissions s'en trouvent impactées à la hausse.

Azote apporté par les fertilisants minéraux et émissions de NH<sub>3</sub> associées

Concernant les autres postes agricoles, des réductions notables se retrouvent également chez les porcins, notamment du fait de la progression de l'alimentation biphase et du traitement des effluents par nitrification-dénitrification, et enfin au niveau des volailles, avec la disparition progressive jusqu'en 2006 des systèmes en fosse profondes chez les poules pondeuses (systèmes très émetteurs) et l'ajustement de l'alimentation aux besoins en azote entraînant une baisse de l'azote excrété pour certaines catégories de volailles.

Enfin, parmi les autres secteurs émetteurs de NH<sub>3</sub>, on retrouve le transport routier, qui, malgré sa faible contribution, a connu une hausse entre 1993 et 2001 suite à l'introduction des premiers véhicules catalysés en 1993. La baisse observée depuis 2002 s'explique par l'introduction dans le parc roulant (véhicules particuliers et utilitaires légers) de véhicules de type Euro 3 et Euro 4, moins émetteurs. Cette baisse devrait cependant s'atténuer du fait de la mise en place de systèmes SCR (Selective Catalytic Reduction) sur les véhicules lourds et légers.

## Évolution récente

Depuis 2006, les émissions de NH<sub>3</sub> au niveau national sont très stables. L'année 2018 correspond cependant au niveau le plus bas atteint sur la période, avec 594 kt NH<sub>3</sub>. Cette tendance se retrouve également au niveau du secteur agricole, majoritaire dans les émissions nationales. Si l'on s'intéresse aux principaux postes contributeurs, on constate que la constance de la trajectoire depuis 2006 est la résultante d'évolutions différentes par poste.

Pour l'apport d'engrais et d'amendements minéraux, les émissions ont augmenté de 5% entre 2005 et 2018, tandis que la quantité totale d'azote minéral apportée a diminué de 3,8%. L'évolution à la hausse des émissions est ici entraînée par la progression de l'urée dans le mix des engrais azotés utilisés. Cette tendance à la hausse constatée depuis 2013 semble ralentir en 2017, avec même une légère baisse des émissions en 2018.

Les émissions liées à la gestion des déjections bovines au bâtiment et au stockage ont quant à elles légèrement diminué entre 2005 et 2018 (-3%) suivant l'évolution du cheptel bovin (-5% sur la même période).

Enfin, les émissions liées à l'apport d'engrais et d'amendements organiques ont très légèrement diminué entre 2005 et 2018 (-0,6%). Cette tendance s'explique par une baisse de l'azote épandu issu des déjections produites en France, en lien avec le recul des cheptels et le développement des stations de nitrification-dénitrification. Elle s'accompagne d'une baisse des émissions de NH<sub>3</sub> par unité d'azote épandue, avec l'utilisation plus importante par les agriculteurs de matériels d'épandage moins émissifs. Cependant, cette baisse est en grande partie compensée par une hausse des imports de déjections en provenance des pays frontaliers à la métropole (Belgique, Luxembourg, Pays-Bas, Italie principalement) ainsi que des émissions de NH<sub>3</sub> qui y sont associées.

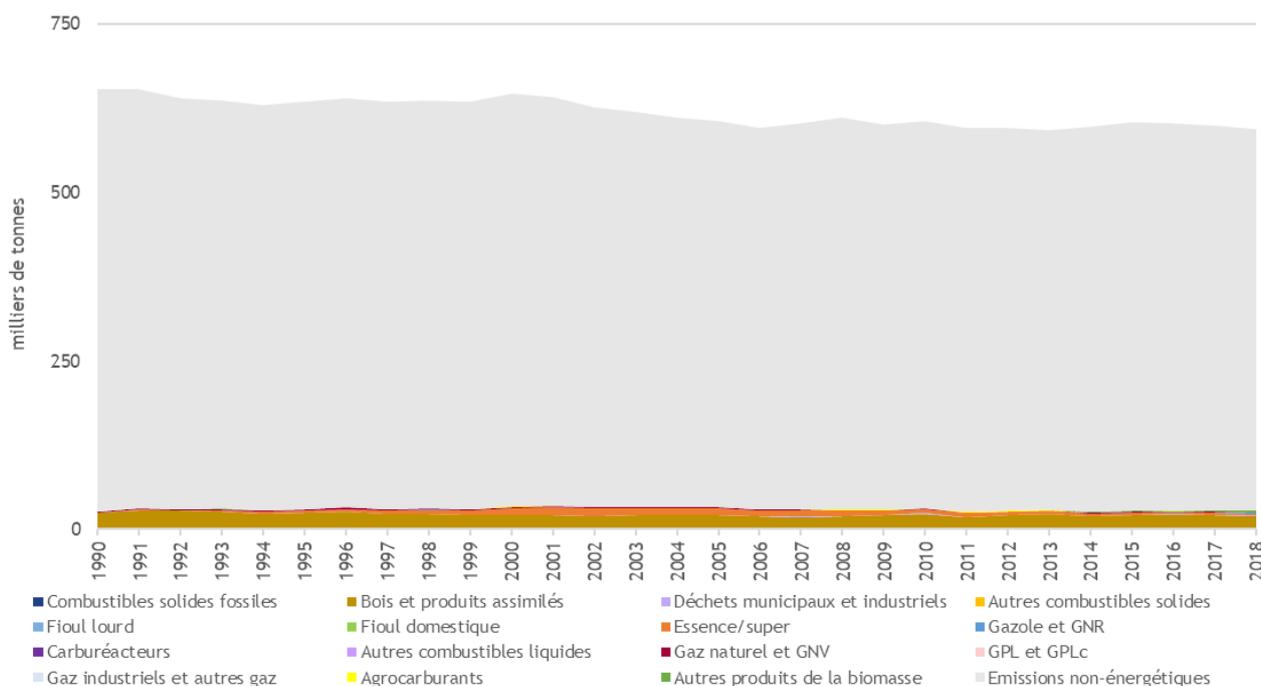
La profession agricole entreprend des efforts de réduction des émissions. Des progrès ont déjà été accomplis par le secteur, par exemple au niveau de l'alimentation animale avec l'ajustement des apports protéiques dans les rations, au niveau du bâtiment avec la mise en place de laveurs d'air, au niveau du stockage par la couverture de fosse et au niveau de l'épandage avec l'utilisation de matériels moins émissifs. Sur ce dernier point, il est indiqué dans le PRÉPA qu'un plan d'actions devrait être mis en place pour assurer l'utilisation de matériels moins émissifs (pendillards, injecteurs) ou l'enfouissement des effluents, dans des délais adaptés, en distinguant les différents types d'effluents

et leurs caractéristiques, ainsi que la nature et la taille des élevages, dans la perspective de supprimer l'utilisation des matériels les plus émissifs d'ici 2025. Ce plan devrait bientôt voir le jour.

Selon les techniques à mettre en place, les coûts associés peuvent être très importants. De tels investissements peuvent à l'heure actuelle être soutenus par le biais de plans de compétitivité et d'adaptation des exploitations agricoles (PCEA). En revanche, dans la Politique Agricole Commune actuelle (2014-2020), il n'existe pas de mesures financières ciblant exclusivement la réduction des émissions de NH<sub>3</sub> et l'amélioration de la qualité de l'air.

### Part des émissions liée aux combustibles

En France, les émissions de NH<sub>3</sub> ne sont que très peu liées aux combustibles.

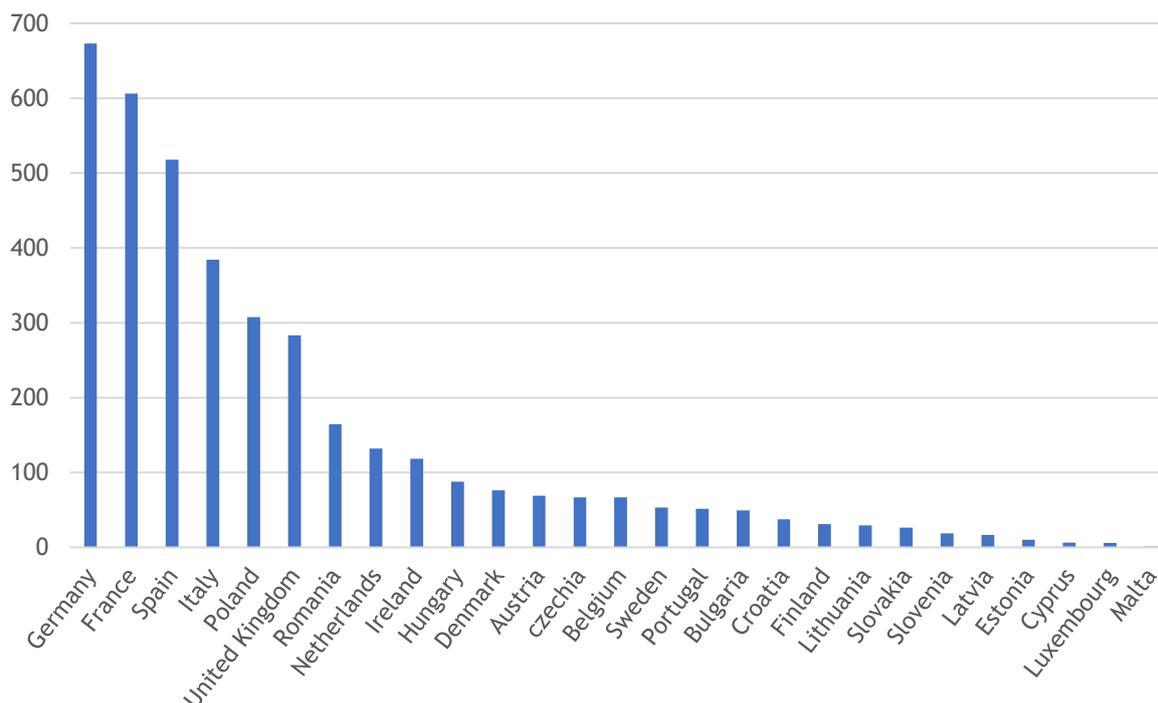


### Et ailleurs ?

L'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) a publié, le 28 juin 2019, une note d'analyse sur la mise en œuvre de la directive NEC fixant les plafonds d'émission nationaux pour chaque Etat membre pour les quatre polluants visés (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COVNM, NH<sub>3</sub>). La note comporte les données d'émission pour la période 2010-2017, ainsi qu'une évaluation des projections d'émissions pour 2020 et 2030. Les messages clés concernant le NH<sub>3</sub> mentionnés dans cette note sont les suivants :

- En 2017, l'année la plus récente pour laquelle des données ont été communiquées, les émissions totales de NH<sub>3</sub> étaient inférieures au plafond fixé pour l'UE dans son ensemble.
- Pour la quatrième année consécutive, les émissions de NH<sub>3</sub> ont augmenté : +0,4% entre 2016 et 2017, +2,5% entre 2014 et 2017. Ces augmentations sont dues au manque de réduction des émissions dans le secteur agricole.
- Six États membres ont dépassé leurs plafonds nationaux pour au moins un polluant en 2017 ; tous n'étaient pas conformes à leur plafond NH<sub>3</sub>, tandis que l'un d'entre eux dépassait son plafond pour les COVNM.
- Pour respecter les engagements de réduction de 2020 pour le NH<sub>3</sub>, des réductions supplémentaires de 2,3% sont nécessaires. Pour 2030, ces réductions supplémentaires seraient de l'ordre de 15%.
- Seize États membres ne se considèrent pas en bonne voie pour respecter leurs engagements de réduction pour 2020 pour un ou plusieurs polluants, et vingt États membres ne sont pas en voie de respecter un ou plusieurs engagements de réduction des émissions à l'horizon 2030 sur la base de leurs politiques actuelles.

Ci-dessous les données d'émission de NH<sub>3</sub> des pays concernés pour l'année 2017 présentées sur le site de l'AEE :

Total NH<sub>3</sub> - 2017

*A noter : ces émissions correspondent aux inventaires édition 2019. Ces estimations ont été mises à jour en 2020, mais les données ne sont pas encore disponibles sur l'interface.*

Cette problématique de stabilité des émissions de NH<sub>3</sub> se rencontre également en dehors de l'Europe, avec notamment l'exemple de la Chine qui, depuis 2010, a mis en place des mesures de contrôle des émissions et surtout a mis en œuvre, dès 2013, un plan quinquennal « Clean Air Action », ce qui a permis une réduction de la majorité des émissions de polluants. Cependant, aucune mesure spécifique n'est prévue pour le NH<sub>3</sub>, qui voit ses émissions quasiment stagner entre 2010 et 2017 (+1 %) (Zheng, B. et al., 2018).

## En savoir plus

Directive (EU) 2016/2284 du Parlement Européen et du Conseil du 14 décembre 2016 concernant la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques, modifiant la directive 2003/35/CE et abrogeant la directive 2001/81/CE. [Lien](#).

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. Arrêté du 10 mai 2017 établissant le plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PRÉPA). [Lien](#).

ADEME, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Citepa (2019). Guide des bonnes pratiques agricoles pour l'amélioration de la qualité de l'air. [Lien](#).

Task Force on Reactive Nitrogen - TFRN (2014). Option for Ammonia Mitigation. [Lien](#).

Commission Européenne. European Green Deal - Farm to Fork Strategy. [Lien](#).

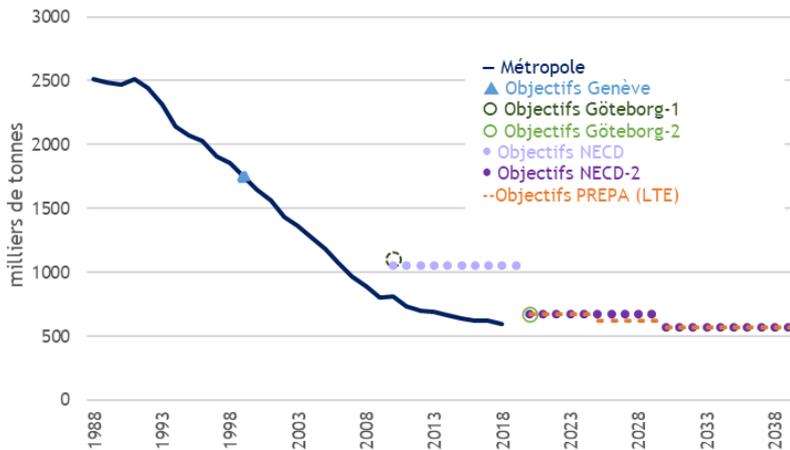
Agence Européenne pour l'Environnement - AEE (2019). NEC Directive reporting status. [Lien](#).

Agence Européenne pour l'Environnement - AEE (2019). National Emission Ceilings Directive emissions data viewer 1990-2017. [Lien](#).

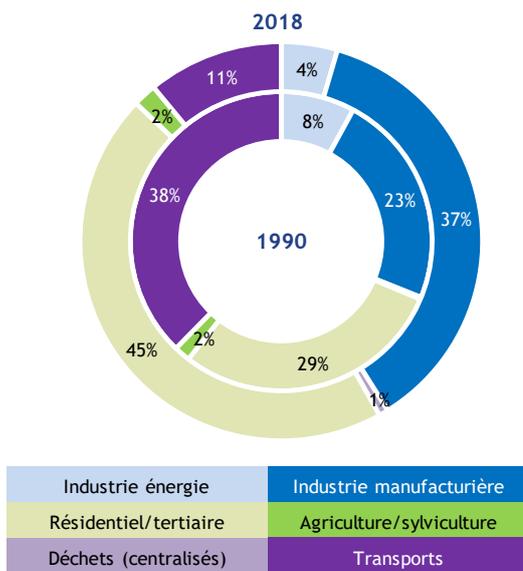
B. Zheng, D. Tong, M. Li, F. Liu, C. Hong, G. Geng, H. Li, X. Li, L. Peng, J. Qj, L. Yan, Y. Zhang, H. Zhao, Y. Zheng, K. He, Q. Zhang Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions Atmos. Chem. Phys., 18 (2018), pp. 14095-14111. [Lien](#).

## Emissions de COVNM en bref

### Evolution des émissions de COVNM en France



### Répartition des émissions de COVNM en France



# COVNM

## Composés organiques volatils non méthaniques

### Type

Polluant atmosphérique

### Définition

Les COVNM sont des espèces organiques gazeuses issues des phénomènes de combustion, d'évaporation, de réactions chimiques ou biologiques...

La notation COVNM est utilisée afin de distinguer le méthane (gaz à effet de serre (CH<sub>4</sub>)) des autres COV.

### Composition chimique

Contiennent au moins un atome de carbone associé à des atomes d'hydrogène, oxygène, azote, soufre, halogènes, phosphore, silicium.

### Origine

Sources anthropiques : procédés industriels impliquant des solvants (chimie de base, chimie fine, dégraissage des métaux, application de peintures, encres, colles, etc.); raffinage de pétrole, production de boissons alcoolisées et de pain; installations de combustion industrielles et équipements de combustion domestiques au bois; distribution des carburants; usages domestiques de solvants.

Sources naturelles : COV biotiques issus des forêts, prairies et cultures.

### Phénomènes associés

Les COVNM réagissent avec les NO<sub>x</sub>, sous l'effet du rayonnement solaire, pour former de l'ozone troposphérique. Ce sont aussi des précurseurs d'aérosols secondaires.

### Effets

 Précurseur d'ozone

 Effet de serre

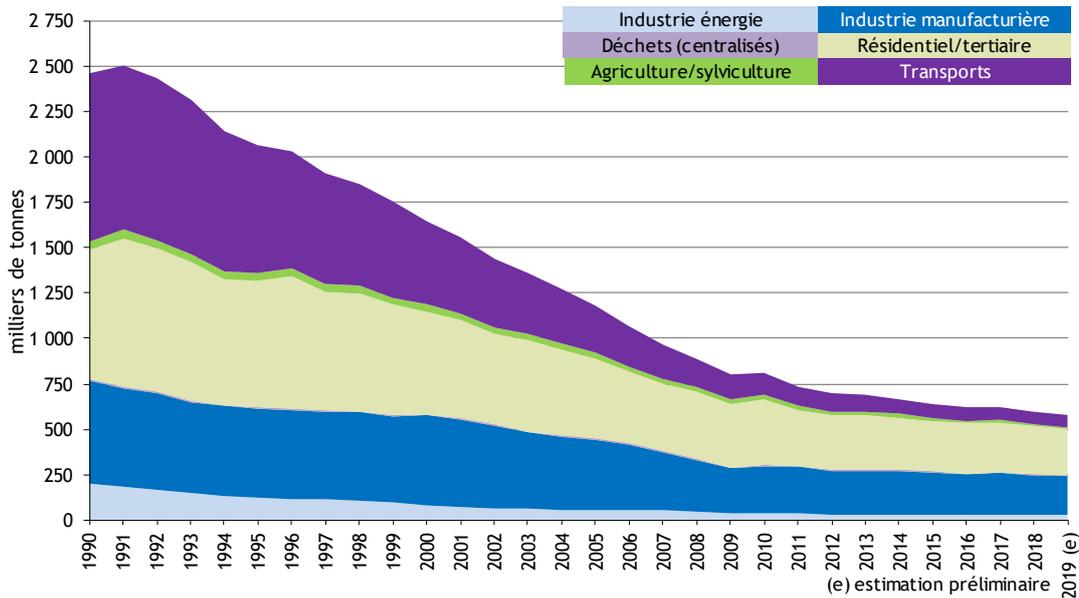
 Santé (difficultés respiratoires, irritations oculaires, certains COV sont cancérogènes...)

### Emissions par habitant

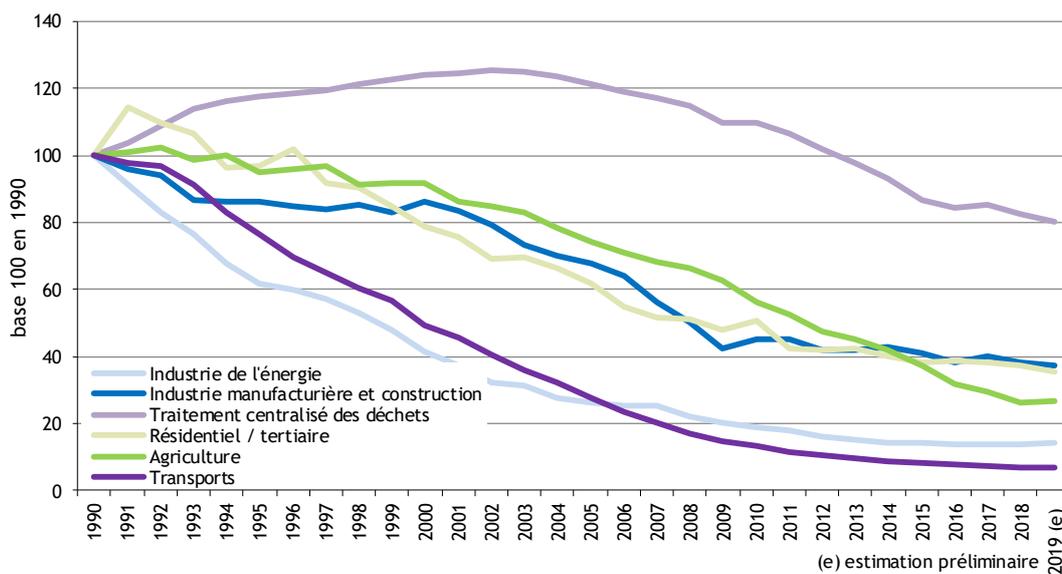
kg/hab/an en 2018



Evolution des émissions dans l'air de COVNM depuis 1990 en France (Métropole)



Evolution des émissions dans l'air de COVNM en base 100 en 1990 en France (Métropole)



Emissions de COVNM (kt/an)		1988	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019
Périmètre : Métropole												(e)
Industrie de l'énergie		247,9	195,6	121,1	81,5	51,1	36,6	27,6	27,4	27,1	26,9	27,5
Industrie manufacturière et construction		568,5	572,2	494,1	494,0	387,1	259,5	234,0	219,9	230,1	217,9	212,8
Traitement centralisé des déchets		4,9	5,4	6,4	6,7	6,6	5,9	4,7	4,6	4,6	4,5	4,3
Résidentiel / tertiaire		676,0	720,2	697,7	566,6	444,9	365,9	274,9	280,2	276,8	269,5	256,6
Agriculture		45,5	43,1	40,9	39,6	32,0	24,1	16,1	13,8	12,6	11,3	11,6
Agriculture hors total		122,9	354,9	362,3	352,5	344,7	332,2	344,1	341,1	343,2	340,8	340,8
Transports		970,9	930,0	709,8	460,4	256,7	122,2	77,2	72,1	69,0	65,1	63,4
Transport hors total		7,1	8,0	7,4	10,0	9,5	8,9	7,1	6,9	7,2	7,9	7,3
TOTAL national hors UTCATF		2 514	2 466	2 070	1 649	1 178	814	634	618	620	595	576
UTCATF		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UTCATF Hors total		0,8	9,1	3,0	2,8	2,6	1,4	2,5	2,0	3,2	0,8	0,8
Emissions naturelles hors total		1 219	1 204	1 257	1 232	1 329	1 193	1 357	1 308	1 372	1 372	1 372
TOTAL national avec UTCATF		2 514	2 466	2 070	1 649	1 178	814	634	618	620	595	576
Hors total		1 350	1 576	1 629	1 598	1 686	1 535	1 711	1 658	1 726	1 722	1 721

## Analyse

### Enjeux

#### Sources principales

Que cela soit au sein du secteur résidentiel/tertiaire ou du secteur industriel, une source significative d'émissions anthropiques de Composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) est l'utilisation de solvants (peintures, colles, etc.). Cependant, c'est la combustion du bois dans les petits équipements domestiques qui place le secteur résidentiel/tertiaire en tête des principaux secteurs émetteurs. Des sources naturelles (biogéniques) de COVNM sont aussi comptabilisées en hors-total (voir plus bas).

Si l'on distingue spécifiquement l'utilisation de solvant, on constate qu'il s'agit de la source principale d'émissions de COVNM en France (50% en 2018).

#### Effets environnementaux et sanitaires

Les COVNM réagissent avec les NO<sub>x</sub>, sous l'effet du rayonnement solaire, pour former de l'ozone troposphérique. Ce sont aussi des précurseurs d'aérosols secondaires. Ils ont aussi des effets sanitaires : difficultés respiratoires, irritations oculaires, certains COV sont cancérigènes...

#### Objectifs de réduction

La première directive NEC (*National Emission Ceilings* communément appelée NECD) de 2001 (2001/81/CE), avait repris les plafonds du Protocole de Göteborg en en sévérant d'ailleurs certains. La Commission européenne a présenté un nouveau programme « Clean Air for Europe » le 13 décembre 2013, ainsi qu'une proposition de révision de la directive NEC, devant les progrès à réaliser pour limiter les impacts de la pollution sur les écosystèmes et la santé humaine. Ce texte a été adopté le 14 décembre 2016 en tant que directive (UE) 2016/2284 concernant la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques. Cette dernière fixe les engagements de réduction d'émissions pour chaque Etat membre et pour cinq polluants : SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COVNM, PM<sub>2.5</sub> et NH<sub>3</sub> à l'horizon 2020 et 2030 par rapport à l'année de référence 2005. Ainsi les objectifs fixés pour la France, concernant ses émissions de COVNM, sont une réduction de 43% pour 2020 et de 52% pour 2030 par rapport à l'année 2005.

#### Enjeux méthodologiques et incertitudes

Pour une présentation très détaillée des méthodologies d'estimation des émissions, téléchargez la dernière édition de notre rapport méthodologique « Ominea ». Au global, on estime l'incertitude (en niveau) sur ce polluant à 25% en 2018.

#### A noter

Des émissions de COVNM biotiques de l'agriculture et des forêts sont présentées hors total national, conformément aux règles de comptabilisation de la CEE-NU/NEC. Ces émissions "hors bilan" contribuent aussi aux réactions photochimiques dans l'atmosphère conduisant en particulier, à la formation d'ozone troposphérique. Voir aussi le chapitre « Emissions naturelles » de ce rapport.

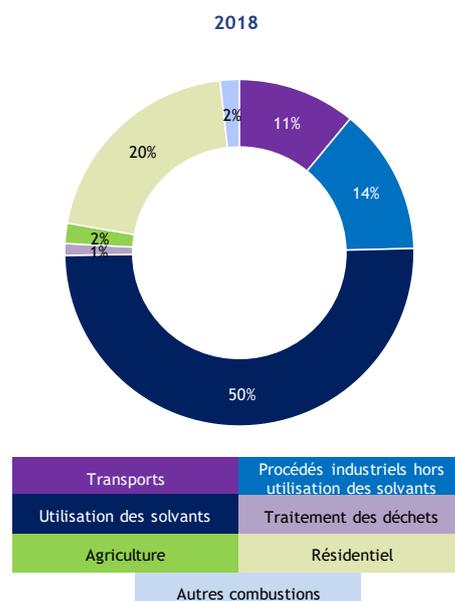
Enfin il est important de rappeler que les cultures sont fortement émettrices de COVNM de même que l'élevage mais les quantités n'apparaissent pas sur ce graphique car elles sont actuellement comptabilisées hors total national

### Tendance générale

La baisse des émissions de COVNM a commencé dès 1992, sans interruption jusqu'en 2010 avec les diminutions annuelles les plus fortes observées entre 2005 et 2009, plus de 10% en 2009. Grâce à ces résultats, la France respecte déjà l'objectif qui lui a été fixé par la directive (UE) 2016/2284, sur une diminution des émissions de COVNM de 43% entre 2005 et 2020.

Globalement, la baisse des émissions, de 76%, constatée entre 1990 et 2018 s'explique par une réduction dans chacun des secteurs d'activité détaillés ci-dessous :

Transport routier (-94% entre 1990 et 2018) : la baisse constatée est liée, d'une part, à l'équipement des véhicules essence en pots catalytiques depuis 1993, qui deviennent de plus en plus performants, auquel s'ajoute la gestion des évaporations de ces véhicules équipés de filtre à charbon actif dans les réservoirs, et, d'autre part, à la part croissante de véhicules diesel moins émetteurs de COVNM.



**Résidentiel/tertiaire** (-63% entre 1990 et 2018) : les produits contenant des solvants sont substitués par des produits à plus faible teneur ou sans solvant. Des progrès sont également accomplis dans le domaine de la combustion de la biomasse du fait du renouvellement du parc par des appareils plus performants et moins émetteurs.

**Industrie manufacturière** (-62% entre 1990 et 2018) : d'importants progrès ont été réalisés dans de nombreux secteurs pour réduire les émissions à la source et diverses techniques de réduction ont été mises en œuvre sur certains procédés, conformément à la réglementation en vigueur.

**Transformation d'énergie** (-86% entre 1990 et 2018) : des améliorations ont été obtenues en matière de stockage et de distribution des hydrocarbures et l'ensemble des mines de charbon a fermé, la dernière datant de 2004.

**Agriculture et sylviculture** (-74% entre 1990 et 2018) : les émissions de COVNM en agriculture sont en grande majorité produites par les engins, moteurs et chaudières. La réduction des émissions s'explique par le renouvellement du parc des engins agricoles dont les normes d'émissions à l'échappement ont été sévériées au cours du temps.

### Évolution récente

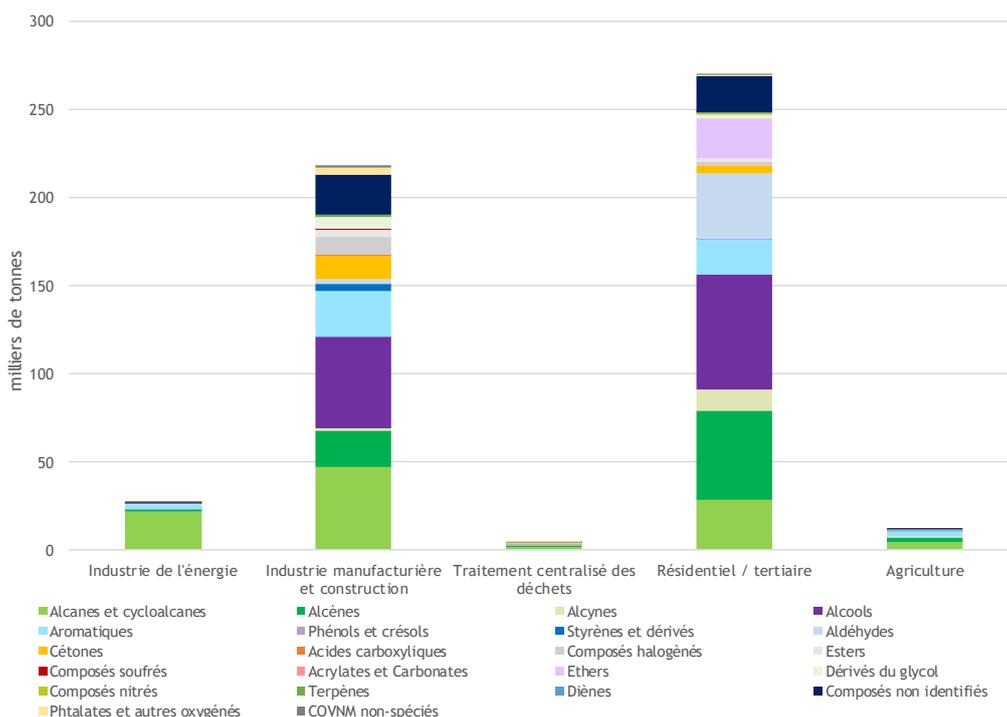
Bien que les émissions de COVNM soient en forte baisse depuis 1990, cette tendance s'est fortement ralentie depuis 2009. Entre 2016 et 2017, les émissions étaient légèrement reparties à la hausse (+0,4%), principalement en raison d'une hausse de 4,6% dans le secteur de l'industrie manufacturière. Ce ralentissement s'explique notamment par le fait que la plupart des réglementations ont atteint un niveau élevé de pénétration (dans le transport, l'industrie et le résidentiel/tertiaire notamment).

Néanmoins, entre 2017 et 2018, les émissions de COVNM de tous les secteurs inclus dans le total national sont reparties à la baisse (-5% dans l'industrie manufacturière, -3% dans le résidentiel-tertiaire). Les émissions liées à l'agriculture continuent de baisser fortement (-11%) mais ce secteur ne représente qu'une très faible part des émissions totales de COVNM et influence très peu la tendance globale. D'après les pré-estimations provisoires des émissions de 2019, cette baisse se poursuivrait.

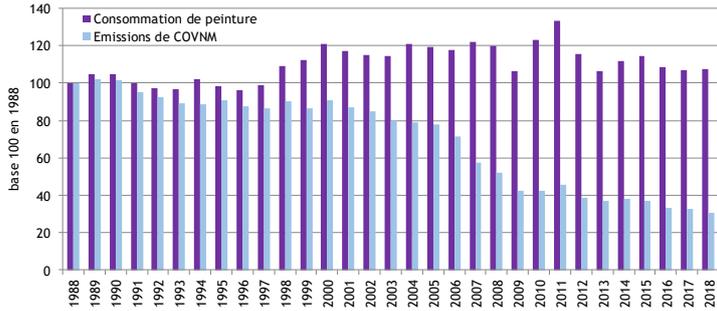
### Spéciation / Analyse solvants

Le fichier « Emissions par substance », onglet COVNM, présente le détail des émissions de COVNM par usages de peintures, vernis et autres solvants. Les graphiques ci-après présentent, pour l'année 2018, la répartition des émissions de COVNM en 21 familles de composés organiques pour les grands secteurs émetteurs. La spéciation des COVNM est réalisée à partir de profils de répartition des émissions déterminées par catégorie de COVNM pour un grand nombre d'activités émettrices. La quasi-totalité des émissions de COVNM en France métropolitaine est ainsi couverte par un profil.

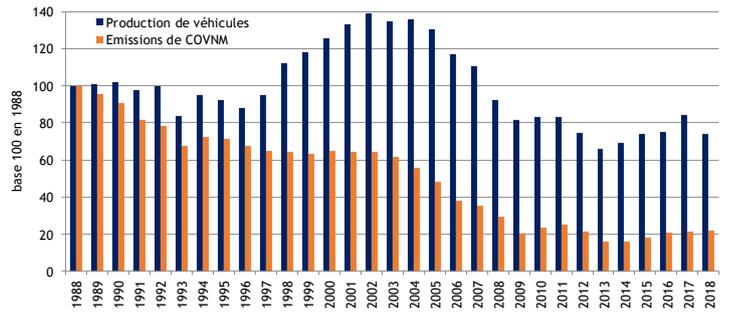
**Répartition des émissions par famille et par secteur en France en 2018 (Métropole)**



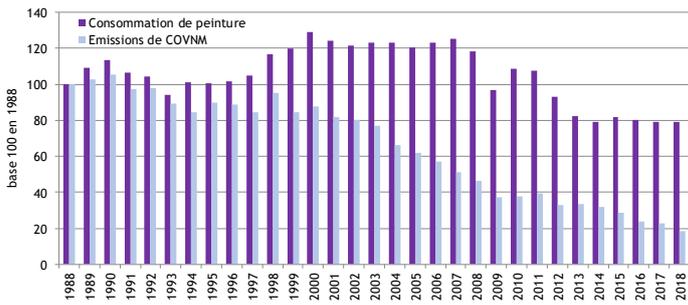
**Usage de peintures et vernis toutes sources confondues en France (Métropole)**



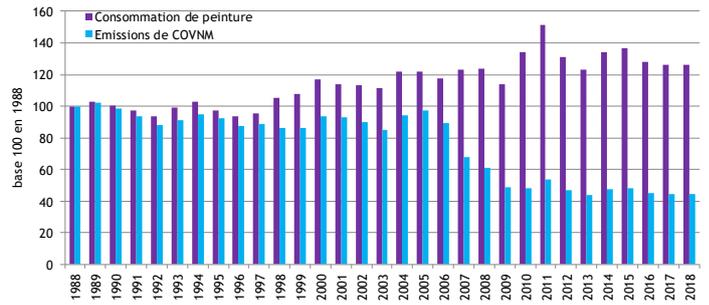
**Usage de peintures et vernis dans les véhicules routiers en France (Métropole)**



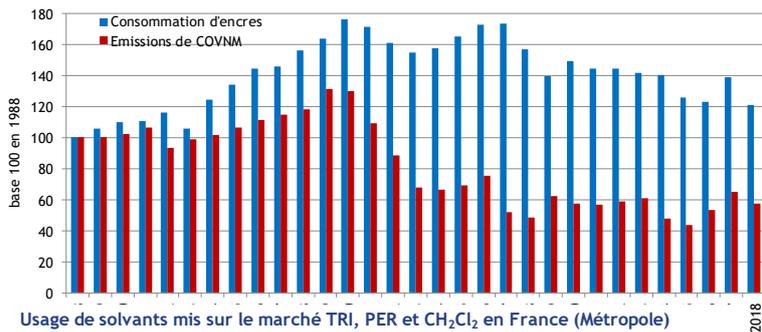
**Usage de peintures et vernis dans l'industrie (dont automobile) en France (Métropole)**



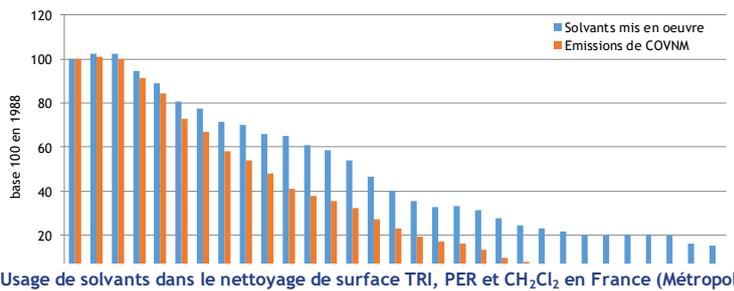
**Usage de peintures et vernis dans le bâtiment et grand public en France (Métropole)**



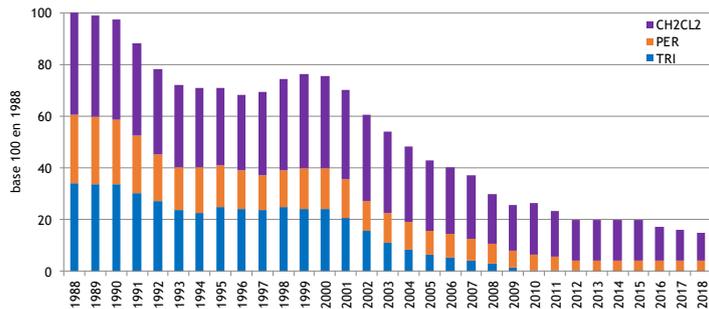
**Usage de solvants dans l'imprimerie en France (Métropole)**



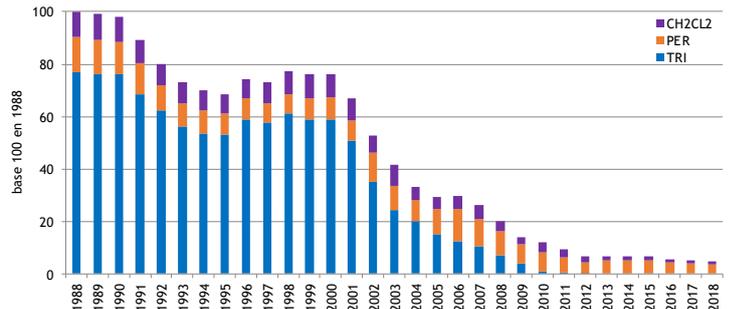
**Usage de solvants chlorés et non-chlorés dans le nettoyage de surface en France (Métropole)**



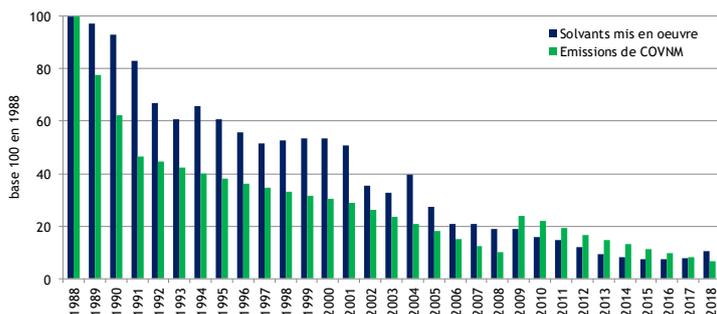
**Usage de solvants mis sur le marché TRI, PER et CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> en France (Métropole)**



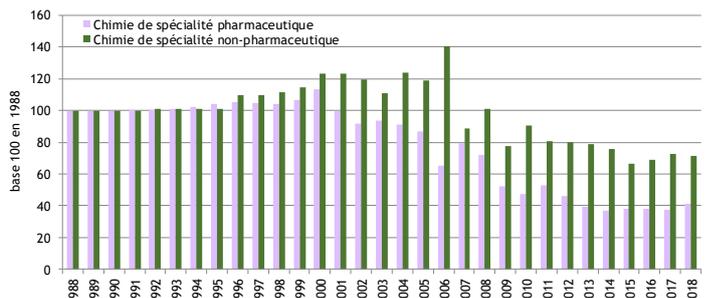
**Usage de solvants dans le nettoyage de surface TRI, PER et CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> en France (Métropole)**



**Usage de solvants dans le nettoyage à sec en France (Métropole)**

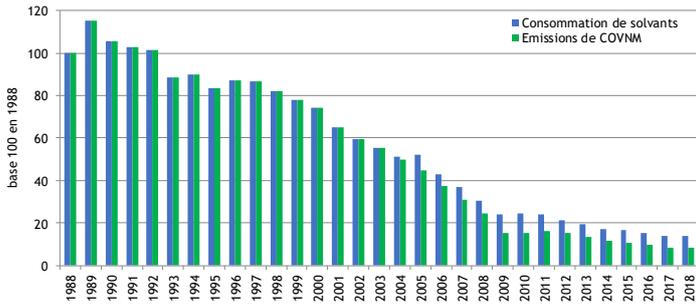


**Emissions de COVNM liées à l'usage de solvants dans la chimie de spécialité en France (Métropole)**

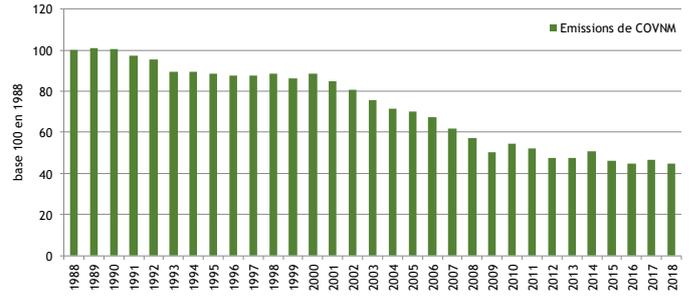


## Acidification, eutrophisation et pollution photochimique

Usage de solvants dans la production de pneumatiques en France (Métropole)

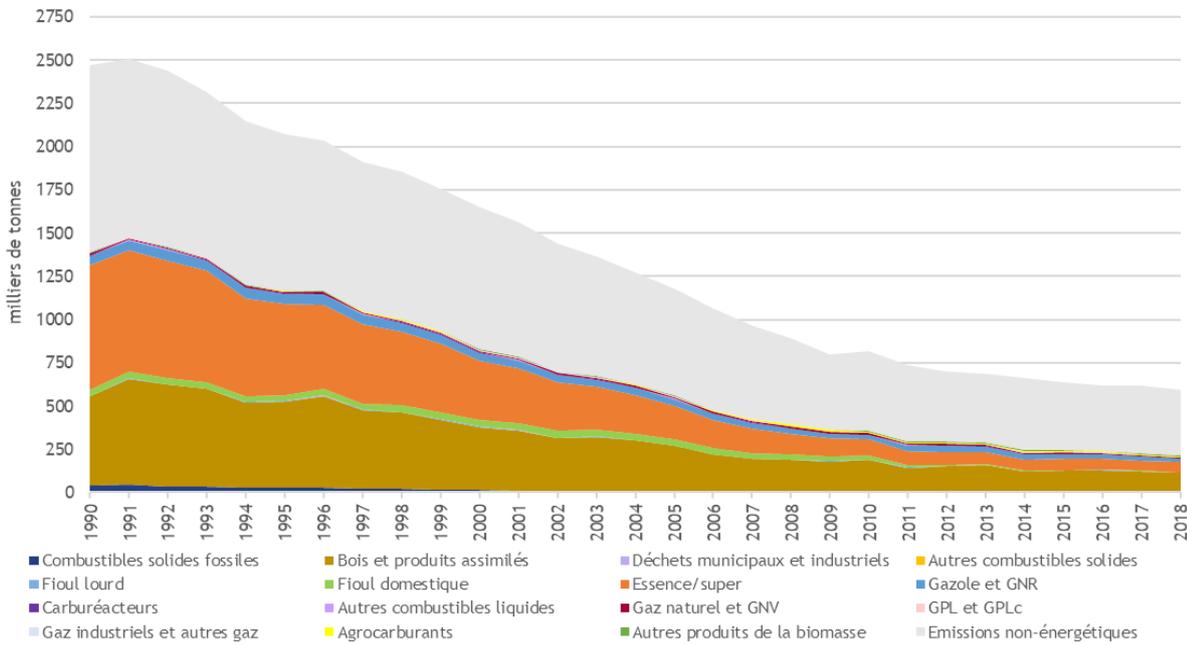


Emissions de COVNM liées à l'usage des solvants (toutes sources confondues) en France (Métropole)



### Part des émissions liée aux combustibles

En 2018, 63% des émissions totales de COVNM ne sont pas liées aux combustibles. Sur les 37% restant, c'est le bois qui représente la plus grande part (19% des émissions totales).

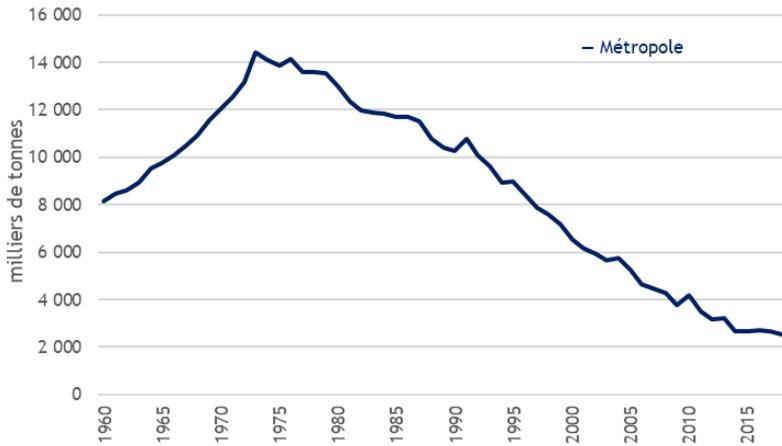


### Et ailleurs ?

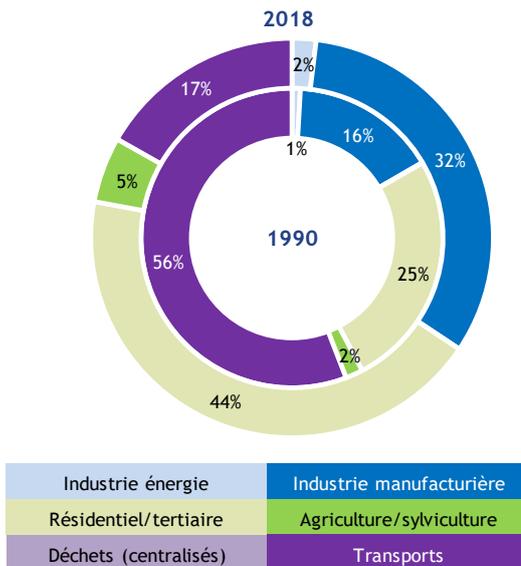
En Chine, même si, depuis 2010, les mesures de contrôle des émissions et surtout la mise en œuvre, dès 2013, du plan quinquennal « Clean Air Action » a permis une réduction de la majorité des émissions de polluants, ce n'est pas le cas pour les COVNM qui ne sont pas visés par des mesures spécifiques de réduction. Ainsi, les émissions de COVNM en Chine ont augmenté de +11 % entre 2010 et 2017 (Zheng, B. et al., 2018).

En bref

Evolution des émissions de CO en France



Répartition des émissions de CO en France



# CO

## Monoxyde de carbone

**Type**

Polluant atmosphérique et gaz à effet de serre indirect

**Définition**

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz incolore et inodore essentiellement formé de manière anthropique. A forte concentration en milieu confiné, il peut être mortel.

**Composition chimique**

Un atome d'oxygène et un atome de carbone.

**Origine**

Sources anthropiques : formation de CO lors de combustions incomplètes de tout combustible fossile ou non (gaz, charbon, fioul ou bois) dans le trafic routier (gaz d'échappement) et le chauffage résidentiel (bois notamment) ; procédés industriels (métallurgique).

Source naturelle : aucune.

**Phénomènes associés**

Le CO participe à la formation d'ozone troposphérique. Son oxydation aboutit aussi à la formation de CO<sub>2</sub>, principal gaz à effet de serre.

**Effets**

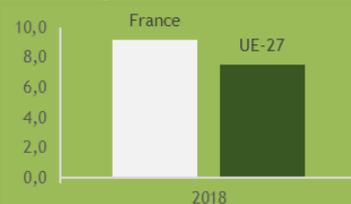
Précurseur d'ozone

Acidification

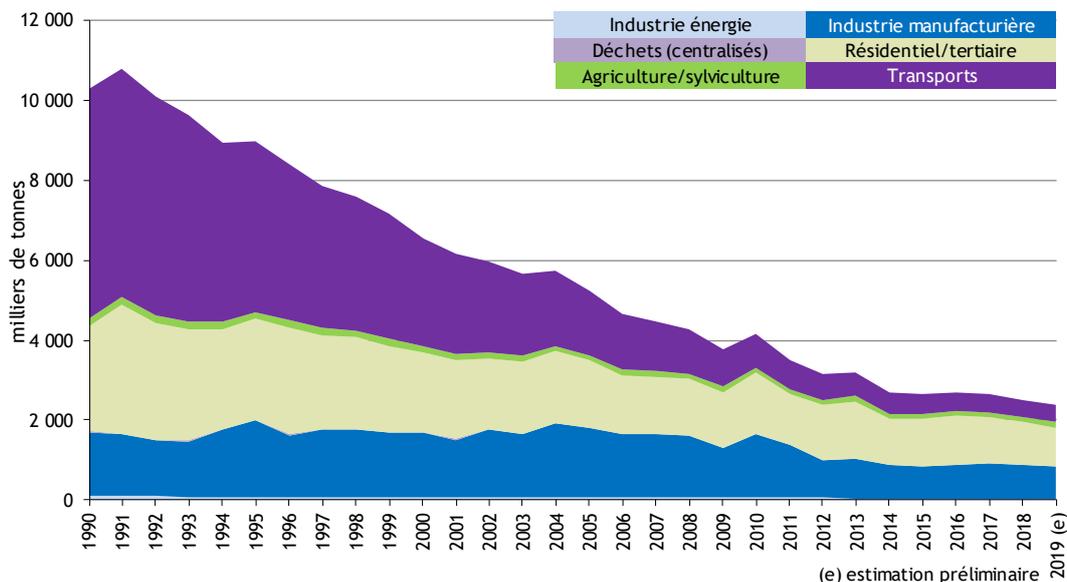
Effet de serre

Santé (intoxications causant maux de têtes et vertiges, nausées voire un effet asphyxiant mortel. Le CO se fixe à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang.)

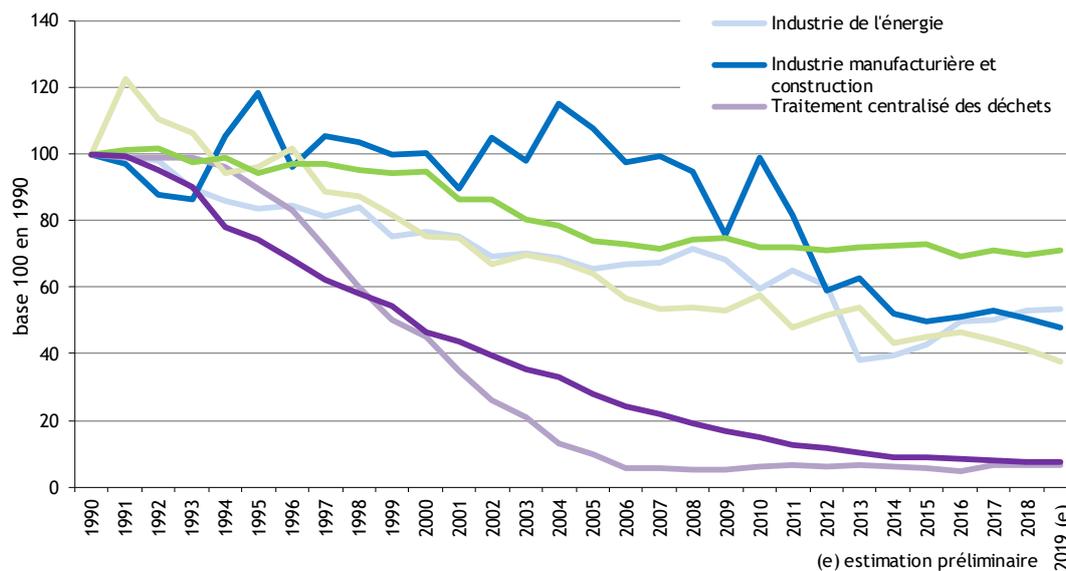
**Emissions par habitant**  
kg/hab/an en 2018



## Evolution des émissions dans l'air de CO depuis 1990 en France (Métropole)



## Evolution des émissions dans l'air de CO en base 100 en 1990 en France (Métropole)



Emissions de CO (kt/an) Périmètre : Métropole		1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019 (e)
Industrie de l'énergie		134,1	145,8	159,2	142,7	143,2	107,7	91,6	76,4	70,1	60,0	54,5	39,2	45,5	46,0	48,4	49,1
Industrie manufacturière et construction		2 418	2 658	3 095	3 433	2 843	1 905	1 615	1 914	1 619	1 740	1 599	803	822	857	816	775
Traitement centralisé des déchets		1,3	1,7	2,2	2,7	3,2	3,4	4,0	3,6	1,8	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
Résidentiel / tertiaire		2 341	2 319	2 331	2 427	2 273	2 719	2 641	2 539	1 990	1 693	1 520	1 187	1 232	1 167	1 094	996
Agriculture		794,8	702,4	484,6	246,6	252,9	206,6	192,1	181,4	182,1	141,8	138,2	140,3	132,6	136,8	133,9	136,0
Agriculture hors total		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transports		2 470	3 948	5 981	7 603	7 465	6 765	5 743	4 254	2 670	1 607	863	500	471	449	421	417
Transport hors total		12,3	16,0	29,9	36,3	30,7	19,5	21,6	19,9	26,3	24,8	22,9	17,7	17,1	17,9	19,8	18,2
<b>TOTAL national hors UTCATF</b>		<b>8 158</b>	<b>9 775</b>	<b>12 054</b>	<b>13 855</b>	<b>12 981</b>	<b>11 706</b>	<b>10 287</b>	<b>8 968</b>	<b>6 532</b>	<b>5 242</b>	<b>4 176</b>	<b>2 671</b>	<b>2 703</b>	<b>2 655</b>	<b>2 514</b>	<b>2 373</b>
UTCATF		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UTCATF Hors total		330,3	467,3	471,8	397,3	384,1	494,8	750,4	675,8	698,9	577,6	565,1	584,3	607,4	641,9	616,3	616,3
Emissions naturelles hors total		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL national avec UTCATF</b>		<b>8 158</b>	<b>9 775</b>	<b>12 054</b>	<b>13 855</b>	<b>12 981</b>	<b>11 706</b>	<b>10 287</b>	<b>8 968</b>	<b>6 532</b>	<b>5 242</b>	<b>4 176</b>	<b>2 671</b>	<b>2 703</b>	<b>2 655</b>	<b>2 514</b>	<b>2 373</b>
Hors total		342,6	483,3	501,8	433,6	414,8	514,3	771,9	695,6	725,2	602,4	588,0	602,1	624,4	659,7	636,1	634,5

## Analyse

### Enjeux

#### Effets sanitaires

Le monoxyde de carbone, résultat de la combustion incomplète, est un gaz toxique pouvant causer des intoxications mortelles chez l'Homme (environ 100 décès par an en France (Ministère des Solidarité et de la Santé)).

#### Objectifs de réduction

Aucun objectif de réduction ou limite d'émission de monoxyde de carbone ne doit être respecté par la France.

#### Enjeux méthodologiques et incertitudes

Pour une présentation très détaillée des méthodologies d'estimation des émissions, téléchargez la dernière édition de notre rapport méthodologique « Ominea ». Au global, on estime l'incertitude (en niveau) sur ce polluant à 49 %.

#### A noter

La part hors total des émissions de CO provient en majorité (entre 95 et 97 % sur la période 1990-2018) de la comptabilisation « hors-total national » du secteur UTCATF. Cette comptabilisation inclue notamment les émissions de polluants liées aux feux de forêt (pour plus de précision sur cette comptabilisation, consulter le chapitre consacré à l'UTCATF). La part hors total représente une proportion relative croissante du total national, évoluant entre 6 % en 1991 et 25 % en 2018.

### Tendance générale

Selon les décennies, la répartition des émissions de monoxyde de carbone (CO) fluctue entre secteurs mais celles-ci ont globalement augmenté entre 1960 et 1973, et sont en baisse depuis.

Ces variations s'expliquent par les évolutions dans 3 secteurs :

- L'industrie manufacturière et plus précisément le secteur sidérurgique (fonte, acier, aggloméré) a subi de fortes variations de la production, ainsi que des fluctuations selon les années de la valorisation des gaz sidérurgiques, paramètre jouant directement sur le facteur d'émission du CO.
- Le transport routier doit ses évolutions au développement de normes environnementales pour les véhicules routiers au début des années 1970, suivi par la mise en place de pots catalytiques à compter de 1993 pour les véhicules essence et 1997 pour les véhicules diesel.
- Le résidentiel-tertiaire contribue aux émissions de CO du fait principalement de la combustion du bois dans le résidentiel, et notamment dans les foyers ouverts.

Ainsi, sur l'ensemble de la période, la plupart des secteurs d'activité connaît une baisse des émissions, sauf pour les autres modes de transport du fait de l'augmentation du trafic intérieur (plaisance) dont les émissions sont cependant en baisse depuis le pic de 2004 et la mise en place de normes d'émission.

### Évolution récente

Ces dernières années, une baisse progressive et substantielle des émissions au niveau national est observée, du fait d'événements spécifiques.

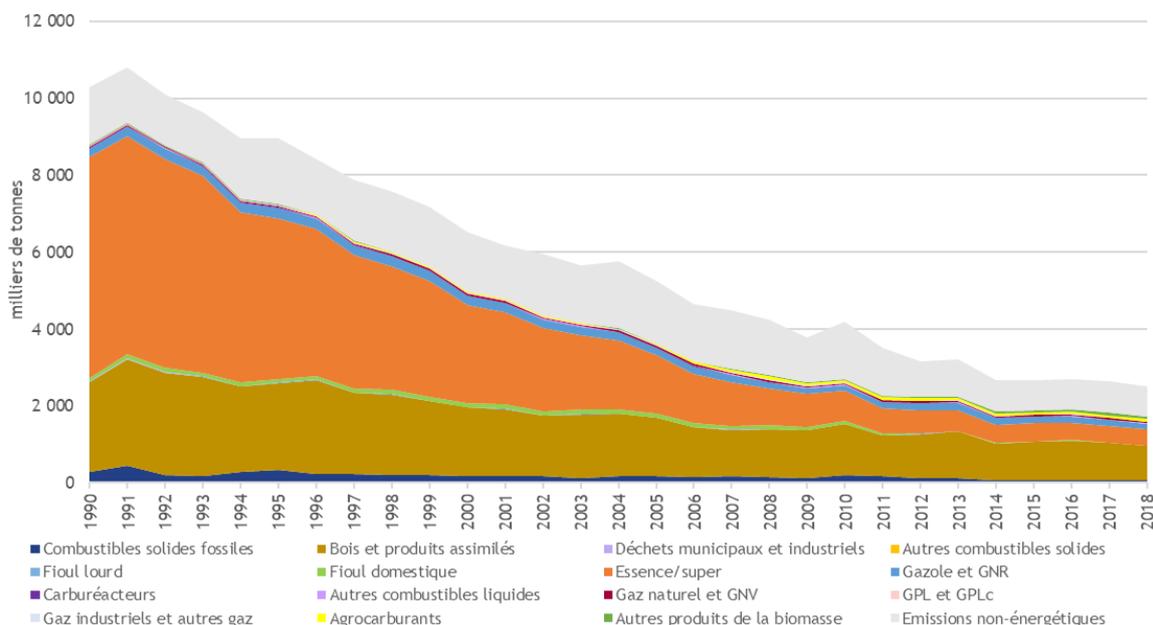
En 2004, l'augmentation des émissions est liée en grande partie à une forte quantité de gaz de haut-fourneau produite et consommée, dont la part non valorisée est plus importante que les autres années. La crise économique de 2008 a fortement impacté le secteur sidérurgique dont les émissions en baisse sont particulièrement observables en 2009. En 2010, c'est suite à la reprise de l'activité sidérurgique que le secteur retrouve son niveau d'émissions avant crise. En 2012, la forte baisse des émissions observée au sein du secteur industriel s'explique par la fermeture, fin 2011, du site sidérurgique de Florange et par une meilleure valorisation du gaz de haut-fourneau en sidérurgie.

Le sous-secteur du résidentiel est devenu le plus gros contributeur aux émissions de CO depuis quelques années. En cause, la combustion du bois dans les appareils de chauffage et notamment les foyers ouverts. Des augmentations d'émissions sont observées directement en lien avec l'augmentation de la consommation de bois dans le secteur.

La volonté du gouvernement de réduire la part des véhicules diesel dans le parc automobile français (actée dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte) pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub> et de particules pourrait avoir un effet inverse sur les émissions de CO.

## Part des émissions liée aux combustibles

L'introduction des pots catalytiques sur les véhicules à essence en 1993 a permis de très fortement réduire la part des émissions de CO provenant de la combustion de l'essence (moins de 20% sur au cours des dernières années), alors que ce combustible était le principal contributeur dans les années 1990. Aujourd'hui, les émissions proviennent essentiellement (pour environ deux tiers) de la combustion du bois (36% en 2018) et des usages non-énergétiques (32% en 2018).



## Et ailleurs ?

A titre de comparaison, les émissions de CO en France métropolitaine sont estimées en 2018 à 38,8 g par habitant et par an contre 37,7 g dans l'Union Européenne (UE-27) en moyenne (table NFR UE éd. 2020). L'écart et les émissions se sont toutefois réduits par rapport à 1990 (181 g/hab/an pour la France, 134 g/hab/an pour l'UE-27).

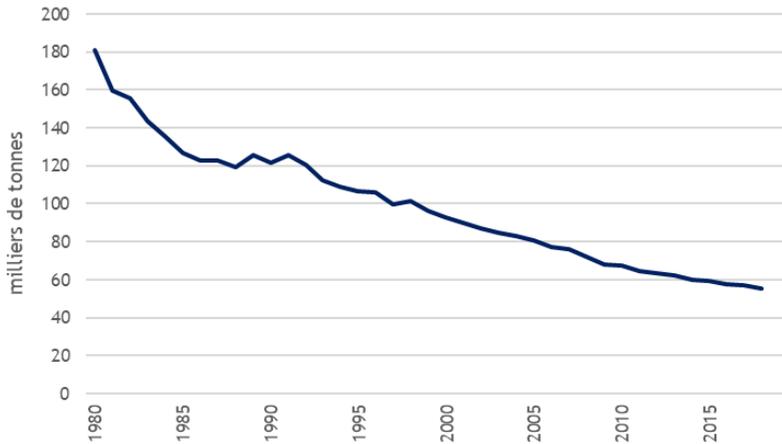
En Chine, depuis 2010, les mesures de contrôle des émissions et surtout la mise en œuvre, dès 2013, du plan quinquennal « Clean Air Action » a permis une réduction de la majorité des émissions de polluants. Les émissions de CO ont ainsi baissé de 27 % entre 2010 et 2017. (Zheng, B. et al., 2018)

## En savoir plus

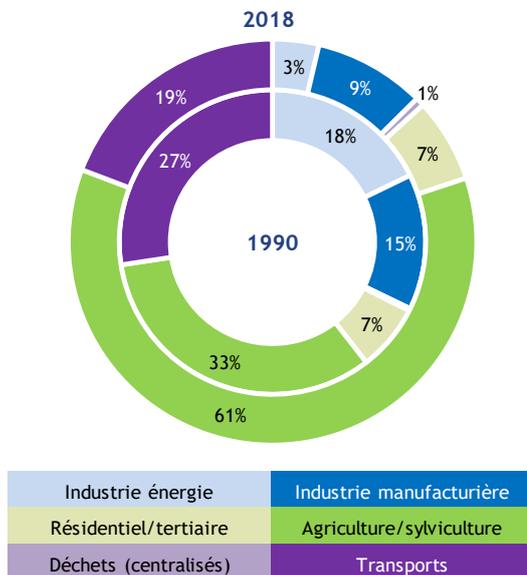
B. Zheng, D. Tong, M. Li, F. Liu, C. Hong, G. Geng, H. Li, X. Li, L. Peng, J. Qj, L. Yan, Y. Zhang, H. Zhao, Y. Zheng, K. He, Q. Zhang Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions Atmos. Chem. Phys., 18 (2018), pp. 14095-14111

## Emissions de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et NH<sub>3</sub> en acide équivalent en bref

### Evolution des émissions de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et NH<sub>3</sub> en acide équivalent en France



### Répartition des émissions de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et NH<sub>3</sub> en acide équivalent en France



# Aeq

## Acide équivalent

### Définition

Aeq : indicateur acide équivalent calculé sur la base de la part en masse des ions H<sup>+</sup>

soit : 0,0313 pour SO<sub>2</sub>, 0,0217 pour NO<sub>x</sub> et 0,0588 pour NH<sub>3</sub>.

### Composition chimique

Voir chaque substance

### Origine

Voir chaque substance

### Type

indicateur

### Phénomènes associés

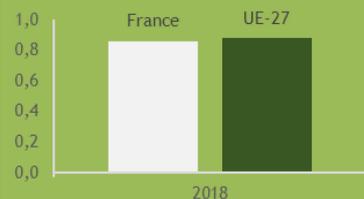
Ces polluants se transforment et retombent sous forme de retombées sèches ou humides. SO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> se transforment respectivement en sulfates et en nitrates ainsi qu'en acide sulfurique et en acide nitrique selon les conditions. Le NH<sub>3</sub>, émis principalement par les activités agricoles, se transforme aussi en ammonium

### Effets

 Précurseur d'ozone

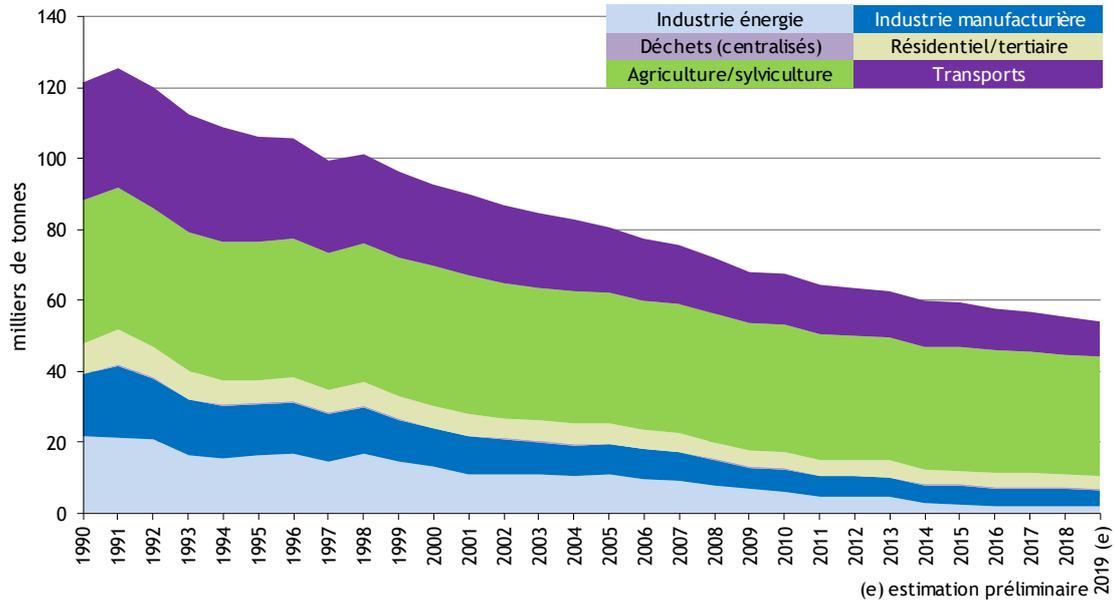
 Acidification

### Emissions par habitant kg/hab/an en 2018

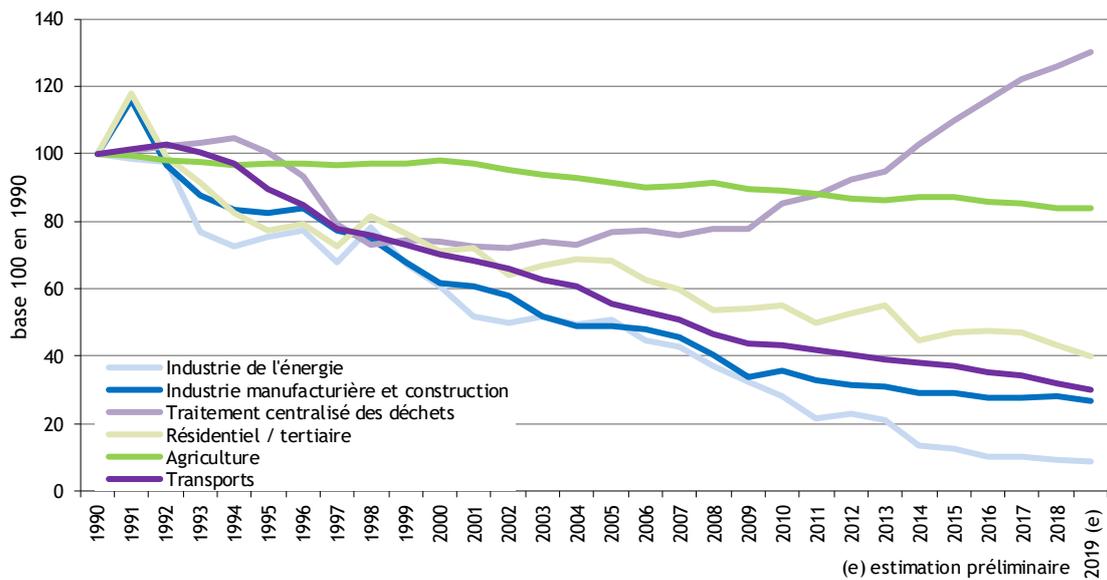


# SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et NH<sub>3</sub> en aeq.

Evolution des émissions dans l'air de Aeq depuis 1990 en France (Métropole)



Evolution des émissions dans l'air de Aeq en base 100 en 1990 en France (Métropole)



Emissions de Aeq (kt/an) Périmètre : Métropole		1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019 (e)
Industrie de l'énergie		62,7	26,6	21,6	16,2	13,1	11,0	6,1	2,7	2,2	2,2	2,0	1,9
Industrie manufacturière et construction		38,1	21,4	17,5	14,5	10,8	8,5	6,3	5,1	4,9	4,9	4,9	4,7
Traitement centralisé des déchets		0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Résidentiel / tertiaire		12,9	10,3	8,6	6,6	6,1	5,8	4,7	4,0	4,1	4,0	3,7	3,4
Agriculture		39,6	40,2	40,2	38,9	39,5	36,8	35,8	34,9	34,5	34,2	33,8	33,8
Agriculture hors total		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transports		27,6	27,9	33,3	29,8	23,3	18,5	14,3	12,3	11,8	11,4	10,6	10,0
Transport hors total		14,9	8,2	9,4	8,2	10,7	10,4	8,0	6,7	6,3	6,8	7,6	6,9
<b>TOTAL national hors UTCATF</b>		<b>181,2</b>	<b>126,7</b>	<b>121,4</b>	<b>106,3</b>	<b>93,0</b>	<b>80,8</b>	<b>67,5</b>	<b>59,3</b>	<b>57,8</b>	<b>57,0</b>	<b>55,4</b>	<b>54,2</b>
UTCATF		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UTCATF Hors total		0,3	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Emissions naturelles hors total		0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
<b>TOTAL national avec UTCATF</b>		<b>181,2</b>	<b>126,7</b>	<b>121,4</b>	<b>106,3</b>	<b>93,0</b>	<b>80,8</b>	<b>67,5</b>	<b>59,3</b>	<b>57,8</b>	<b>57,0</b>	<b>55,4</b>	<b>54,2</b>
Hors total		15,1	8,6	9,9	8,6	11,1	10,8	8,4	7,1	6,7	7,2	8,0	7,2

## Références utilisées dans le chapitre

AEE 2018 - Agence de l'environnement européenne - Air quality in Europe - 2018 report. N° 12. ISBN 978-92-9213-989-6

Agence américaine de protection de l'environnement. Nitrogen Oxides (NOx): Why and How They Are Controlled. Novembre 1999. Disponible sur : <https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/fnoxdoc.pdf>

Amann 2018 - Amann M. - Ozone strategies in the context of other policy objectives - Workshop on 'Air quality policy implementation related to ozone' Madrid, November 21-22, 2018.

Citepa 2020 - rapport CCNUCC - Rapport National d'Inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et du Protocole de Kyoto. Mars 2020

Derwent, 1998 - Derwent, R. ; Jenkin, M. ; Saunders, S. ; Pillings, M. : Photochemical creation potentials for organic compounds in northwest Europe calculated with a master chemical mechanism - Atmospheric environment. Volume 32. n° 15 - pp. 2429-2441 - 1998.

Maas 2016 - Maas, R., P. Grennfelt (eds), 2016. Towards Cleaner Air. Scientific Assessment Report 2016. EMEP Steering Body and Working Group on Effects of the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution

IPCC- AR5-2014 - Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Seigneur 2018 - Seigneur Ch. - Pollution atmosphérique - Concepts, théorie et applications - BELIN éducation - ISBN 978 -2-410-00855-5.

B. Zheng, D. Tong, M. Li, F. Liu, C. Hong, G. Geng, H. Li, X. Li, L. Peng, J. Qi, L. Yan, Y. Zhang, H. Zhao, Y. Zheng, K. He, Q. Zhang Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions Atmos. Chem. Phys., 18 (2018), pp. 14095-14111

