



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

Qualité de l'air 2020

---

# Polluants atmosphériques azotés en Suisse

## Situation en lien avec l'agriculture entre 2000 et 2018

---



## **Impressum**

### **Éditeur**

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

La Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) est une commission extraparlamentaire instituée par le Conseil fédéral et composée d'experts du domaine de la protection de l'air. Elle conseille le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) ainsi que l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) pour les questions de méthodologie scientifique liées à la protection de l'air et aux effets de la pollution atmosphérique sur la santé de l'homme et sur la nature. Du point de vue fonctionnel, elle est une commission administrative indépendante et interdisciplinaire qui peut aussi consulter d'autres spécialistes de différents domaines pour traiter certaines questions.

### **Membres de la commission**

Nino Künzli, président; Beat Achermann; Christof Ammann; Urs Baltensperger; Brigitte Buchmann; Luca Colombo; Alexandre Flückiger; Hans Gygax; Pierre Kunz; Meltem Kutlar Joss; Linda Kren; Barbara Rothen-Rutishauser; Eva Schüpbach; Andrea von Känel

### **Auteur**

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

### **Référence bibliographique**

Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) 2020: Polluants atmosphériques azotés en Suisse. Situation en lien avec l'agriculture entre 2000 et 2018. Berne. 23 p.

### **Secrétariat de la CHFA**

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

### **Photo de couverture**

© iStockphoto / Magic Dreamer

### **Téléchargement du fichier PDF**

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

Cette publication est également disponible en allemand.

© CFHA 2020

**Table des matières**

**Abstracts** ..... **4**

**Résumé**..... **7**

**1 Introduction** ..... **8**

**2 Émissions d’ammoniac et d’oxydes d’azote de 2000 à 2018** ..... **9**

2.1 Émissions en Suisse ..... 9

2.2 Émissions d’ammoniac de l’agriculture en comparaison internationale ..... 10

**3 Mesures d’immissions et effets des polluants atmosphériques azotés** ..... **11**

3.1 Concentrations d’ammoniac et d’oxydes d’azote en Suisse de 2000 à 2018..... 11

3.2 Charge excessive d’azote dans les écosystèmes proches de l’état naturel..... 12

3.3 Formation de poussières fines (PM) ayant des effets sur la santé humaine ..... 14

3.4 Émissions de gaz à effet de serre induites par les apports d’azote dans les écosystèmes proches de l’état naturel..... 15

**4 Actions nécessaires en vue de réduire les émissions**..... **16**

4.1 Niveau de l’ammoniac par rapport aux objectifs environnementaux pour l’agriculture (OEA) du Conseil fédéral..... 16

4.2 Niveau des oxydes d’azote par rapport à la Stratégie de lutte contre la pollution de l’air du Conseil fédéral..... 16

4.3 Synergies entre les mesures visant à réduire les émissions d’ammoniac et celles visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre tels que le méthane et le protoxyde d’azote ..... 16

**5 Conclusion**..... **18**

**Bibliographie**..... **20**

## Abstracts

The high levels of nitrogen-containing air pollutants in Switzerland have harmful effects on (semi-) natural ecosystems. While exhaust emissions of nitrogen oxides have been reduced by one third relative to the year 2000, ammonia emissions from agriculture are stagnating at too high a level. A substantial reduction of agricultural ammonia emissions is necessary and possible. The Swiss agricultural policy AP22+ must implement appropriate measures, taking advantage of greenhouse gas reductions that occur while reducing ammonia emissions.

### Key words:

Nitrogen deposition, ammonia, greenhouse gases, agriculture, agricultural policy, eutrophication, semi-natural ecosystems, biodiversity

Die Belastung durch stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz ist nach wie vor zu hoch und beeinträchtigt naturnahe Ökosysteme. Zwar hat der Stickoxid-Ausstoss aus Abgasen und Verbrennungsprozessen seit dem Jahr 2000 um rund ein Drittel abgenommen, die Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft stagnieren jedoch auf zu hohem Niveau. Weitere Massnahmen zur Verminderung der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen sind nötig und möglich. Mit der Agrarpolitik AP22+ sind diese konsequent umzusetzen. Dabei bestehen auch Synergien zur Reduktion von klimarelevanten Treibhausgasen.

### Stichwörter:

Stickstoffeinträge, Ammoniak, Treibhausgase, Landwirtschaft, Agrarpolitik, Überdüngung, naturnahe Ökosysteme, Biodiversität

La charge en polluants atmosphériques azotés reste trop élevée et affecte les écosystèmes proches de l'état naturel. Alors que les rejets d'oxydes d'azote provenant des gaz d'échappement et des processus de combustion ont diminué d'environ un tiers depuis 2000, les émissions d'ammoniac issues de l'agriculture stagnent à un niveau trop élevé. Des mesures supplémentaires visant à réduire les émissions d'ammoniac d'origine agricole sont nécessaires et possibles. Elles devront être mises en œuvre de manière cohérente dans le cadre de la Politique agricole PA22+. Des synergies existent par ailleurs avec des mesures visant à réduire les gaz à effet de serre.

### Mots-clés:

Dépôts d'azote, ammoniac, gaz à effet de serre, agriculture, politique agricole, surfertilisation, écosystèmes proches de l'état naturel, biodiversité

L'esposizione agli inquinanti atmosferici contenenti azoto in Svizzera è ancora troppo elevata e colpisce gli ecosistemi seminaturali. Sebbene le emissioni di ossido di azoto dai gas di scarico e dai processi di combustione siano diminuite di circa un terzo dal 2000, le emissioni di ammoniaca provenienti dall'agricoltura ristagnano a livelli troppo elevati. Sono necessarie e possibili ulteriori misure per ridurre le emissioni di ammoniaca in agricoltura. La politica agricola PA22+ è stata concepita per attuarle in modo coerente. Esistono anche sinergie per la riduzione dei gas serra rilevanti per il clima.

**Parole chiave:**

azoto in ingresso, ammoniaca, gas a effetto serra, agricoltura, politica agricola, eutrofizzazione, ecosistemi quasi naturali, biodiversità

### **Avant-propos**

La charge excessive des écosystèmes proches de l'état naturel due aux dépôts de composés atmosphériques azotés pose depuis longtemps problème dans toute l'Europe, et pas uniquement en Suisse. Les principales sources de polluants atmosphériques azotés sont l'agriculture et les transports. Avec sa Stratégie de lutte contre la pollution de l'air et la définition d'objectifs environnementaux pour l'agriculture, le Conseil fédéral a mis en évidence le besoin urgent d'agir et déterminé les champs d'action.

La Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) a déjà traité en détail la problématique des polluants atmosphériques azotés en 2005 et en 2014, et publié deux rapports, « Les polluants atmosphériques azotés en Suisse » et « Immissions d'ammoniac et dépôts de composés azotés », dans lesquels elle a évalué l'impact des composés azotés réactifs sur les écosystèmes sensibles et formulé des recommandations. Ces analyses se fondaient principalement sur les charges critiques d'azote, mais portaient en outre sur les niveaux critiques d'ammoniac. Le présent rapport se concentre sur l'évolution de la charge atmosphérique au cours de la période de 2000 à 2018 et identifie les synergies existant entre la lutte contre les polluants atmosphériques azotés et la réduction des gaz à effet de serre issus de l'agriculture ayant une incidence sur le climat. La mise en œuvre de mesures ciblées ne devrait plus être retardée.

Je tiens à remercier tous les membres de la CFHA ainsi que les autres experts impliqués pour leur précieux travail. La CFHA a adopté ce rapport à l'unanimité lors de ses séances de mai 2020.

Prof. Dr. Nino Künzli

Président de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air

## Résumé

Les composés azotés réactifs présents dans l'air ont pour effet un apport excessif d'azote dans les écosystèmes proches de l'état naturel, tels que les marais, les forêts et les prairies sèches riches en espèces, avec des conséquences néfastes sur la stabilité et sur la diversité des espèces. En Suisse, une grande partie des écosystèmes proches de l'état naturel sont toujours pollués par des dépôts excessifs d'azote.

Les principales sources de composés azotés réactifs sont, d'une part, les processus de combustion dans lesquels se forment les oxydes d'azote et, d'autre part, l'agriculture, en particulier la détention d'animaux de rente, qui libère de l'ammoniac dans l'air. Les émissions d'oxydes d'azote ont diminué de plus d'un tiers en Suisse entre 2000 et 2018 grâce à des dispositions sévères s'appliquant aux transports, au chauffage et à l'industrie. S'agissant du secteur agricole, principal responsable des émissions d'ammoniac, des prescriptions contraignantes faisaient encore largement défaut, raison pour laquelle la charge d'ammoniac n'a que peu diminué.

Les émissions d'ammoniac sont responsables des deux tiers des apports excessifs d'azote dans les écosystèmes. Outre la dégradation des écosystèmes, les dépôts d'azote génèrent également des émissions de protoxyde d'azote, un gaz à effet de serre. De nombreuses mesures visant à réduire les émissions d'ammoniac entraînent également une réduction des gaz à effet de serre, soit indirectement en réduisant les émissions de protoxyde d'azote induites, soit directement en diminuant les émissions de méthane.

La CFHA parvient à la conclusion qu'une réduction du niveau toujours trop élevé des émissions de polluants atmosphériques azotés reste nécessaire. S'agissant notamment de l'ammoniac, l'état de la technique doit être pris en considération dans le secteur agricole par le biais de prescriptions contraignantes à l'échelon national. La modification de l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair), qui entrera en vigueur à partir de 2022 et s'appliquera au stockage et à l'épandage de lisier, constituera une première étape. Des mesures contraignantes, allant en particulier dans le sens de systèmes de stabulation à faibles émissions et d'une détention d'animaux de rente adaptée au site, en vue d'atteindre les objectifs environnementaux de réduction de l'ammoniac et des gaz à effet de serre fixés pour l'agriculture seront absolument nécessaires dans les prochaines étapes de la politique agricole, notamment dans la PA22+.

## 1 Introduction

La Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) a déjà donné son avis sur les effets de niveaux trop élevés des émissions de polluants atmosphériques azotés dans deux rapports détaillés publiés en 2005 et en 2014 (CFHA 2005, CFHA 2014). Ces évaluations portaient sur les émissions d'oxydes d'azote générées par les processus de combustion ainsi que sur les émissions d'ammoniac, qui proviennent principalement de l'agriculture. Les dépôts excessifs de polluants atmosphériques azotés dans les écosystèmes proches de l'état naturel (p. ex. les forêts, les marais et les prairies et pâturages secs riches en espèces) ont été jugés comme posant particulièrement problème.

Dans ses deux rapports, la CFHA a conclu à la nécessité impérieuse d'agir afin de réduire les émissions, en particulier les émissions d'ammoniac issues de l'agriculture. Elle a également constaté que le potentiel technique de réduction des émissions est important et qu'une agriculture adaptée au site peut contribuer de manière substantielle à la réduction des émissions. Dans cette optique, il est essentiel de prendre en considération les effets sur les écosystèmes proches, où des exploitations isolées ou en nombre restreint peuvent être responsables d'une grande partie des apports d'azote.

Se fondant sur ces deux rapports, la CFHA analyse ci-après, à l'aide des données nationales et internationales disponibles pour la période de 2000 à 2018, l'évolution temporelle des émissions de polluants atmosphériques azotés, l'évolution des charges (immissions) et les conséquences sur la nécessité d'agir en vue de réduire les émissions en mettant principalement l'accent sur la situation liée à l'agriculture.

## 2 Émissions d'ammoniac et d'oxydes d'azote de 2000 à 2018

### 2.1 Émissions en Suisse

Les émissions d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) issues principalement de l'agriculture, tout comme les émissions d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) générées lors des processus de combustion, contribuent à la pollution excessive des écosystèmes proches de l'état naturel par des apports de polluants atmosphériques azotés. À cet égard, il est intéressant d'examiner l'évolution temporelle des émissions de ces deux polluants. La Suisse déclare chaque année ses émissions à la Convention de la CEE-ONU sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (OFEV [FOEN] 2020a). Selon ce rapport, les émissions d'oxydes d'azote provenant des processus de combustion ont diminué d'environ 35% en Suisse entre 2000 et 2018, alors que les émissions totales d'ammoniac ont enregistré un recul de quelque 10%, la baisse de celles d'origine agricole ne représentant qu'environ 4%. La figure 1 montre l'évolution des émissions totales d'oxydes d'azote et des émissions d'ammoniac d'origine agricole, exprimées en azote (N).

Émissions d'oxydes d'azote (N- $\text{NO}_x$ ) en Suisse et émissions d'ammoniac (N- $\text{NH}_3$ ) de l'agriculture de 2000 à 2018

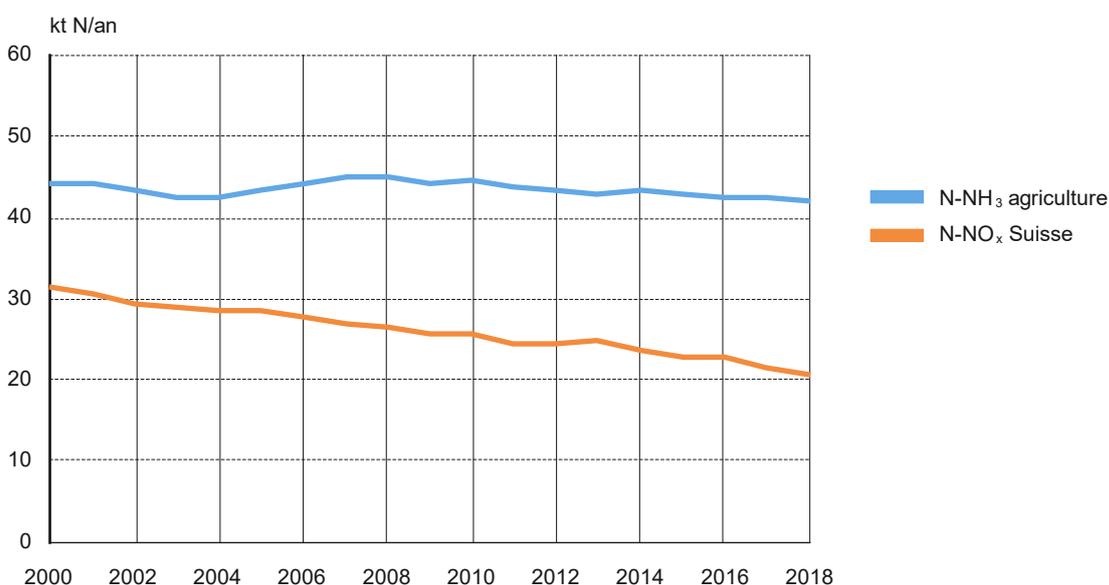


Figure 1 – Évolution des émissions totales d'oxydes d'azote (N- $\text{NO}_x$  en kilotonnes d'azote par an) et des émissions d'ammoniac d'origine agricole (N- $\text{NH}_3$  en kilotonnes d'azote par an) en Suisse de 2000 à 2018 (OFEV [FOEN] 2020a)

En 2018, les émissions d'ammoniac provenant de toutes les sources sur l'ensemble du territoire se sont élevées au total à 45,1 kt de N- $\text{NH}_3$ , celles de l'agriculture représentant 42,3 kt de N- $\text{NH}_3$ . L'agriculture a donc contribué à raison de 94% aux émissions totales d'ammoniac de la Suisse (OFEV [FOEN] 2020a).

## 2.2 Émissions d'ammoniac de l'agriculture en comparaison internationale

Afin de comparer le niveau des émissions d'ammoniac d'origine agricole de la Suisse avec celui d'autres pays, on utilise la densité d'émission, c'est-à-dire la quantité d'ammoniac émise par hectare de superficie agricole utilisée. Les données disponibles pour l'année 2016 pour les pays européens montrent que la Suisse fait partie des pays à forte densité d'émission (Eurostat 2020a, Eurostat 2020b, OFEV [FOEN] 2020a, OFAG 2019): elle occupe, en comparaison internationale, la troisième place après les Pays-Bas et la Belgique (figure 2).

Il est frappant de constater que les émissions d'ammoniac de la Suisse rapportées à sa superficie sont nettement plus élevées que celles du Danemark, par exemple, bien que les deux pays aient une densité d'animaux de rente similaire (Eurostat 2020c). Cela s'explique notamment par le fait qu'au Danemark, les mesures techniques disponibles en vue de réduire les émissions d'ammoniac à tous les niveaux dans les exploitations agricoles sont assorties de prescriptions contraignantes et davantage mises en œuvre qu'en Suisse, et ce depuis de nombreuses années (Gyldenkaerne et Mikkelsen 2007, Kronvang et al. 2008, Jacobsen 2012, Dalgaard et al. 2014, Danish Environmental Protection Agency 2020).

### Émissions de NH<sub>3</sub> par ha de SU en 2016

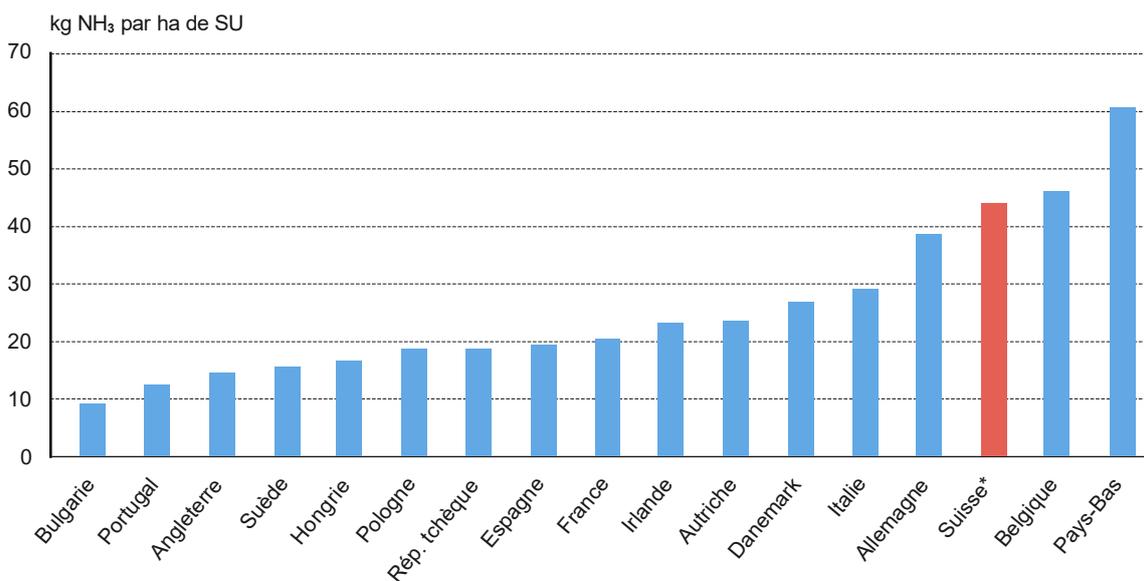


Figure 2 – Comparaison internationale des émissions d'ammoniac par hectare de superficie agricole utilisée (SU) en 2016 (unité: kg de NH<sub>3</sub> par hectare et par an)

\* Pour la Suisse, 25% de la surface des pâturages d'estivage a été prise en compte (CFHA 2005)

### 3 Mesures d'immissions et effets des polluants atmosphériques azotés

#### 3.1 Concentrations d'ammoniac et d'oxydes d'azote en Suisse de 2000 à 2018

En Suisse, les concentrations d'ammoniac sont relevées depuis 2000 dans un nombre croissant de stations de mesure (fub 2019). Dans treize de ces stations, des mesures sont effectuées en continu depuis 2000, dans huit autres depuis 2004 et, depuis 2013, 70 stations de mesure sont en service. En 2018, la charge d'ammoniac a été mesurée sur 83 emplacements tout au long de l'année. La couverture spatiale par des stations de mesure a donc augmenté de manière significative depuis 2000. Elle permet une meilleure représentation des différents types de pollution, qui vont de l'élevage intensif aux pâturages alpins exploités de manière extensive, et comprend également des emplacements proches de zones de circulation et des centres-villes.

L'évolution temporelle des mesures de la concentration d'ammoniac est présentée dans la figure 3 pour les treize stations dans lesquelles des mesures ont été effectuées depuis 2000 et pour les 21 stations dont les résultats sont disponibles depuis 2004. Ces huit stations de mesure supplémentaires ont permis d'inclure également des emplacements présentant des niveaux de pollution plus hauts, ce qui a donné lieu à des valeurs moyennes plus élevées des charges sur l'ensemble des stations mais n'a toutefois guère modifié l'évolution temporelle des immissions. Les valeurs moyennes des concentrations d'ammoniac des 70 stations dans lesquelles des mesures sont effectuées depuis 2013 se situent au même niveau que celles relevées par les 21 stations (fub 2019). Les niveaux de pollution enregistrés par ces 21 stations peuvent donc être considérés comme représentatifs de la situation en Suisse.

Certaines fluctuations observées d'une année à l'autre sont dues aux conditions météorologiques. Dans l'ensemble, on constate que les concentrations d'ammoniac n'ont pas diminué depuis 2000. Les mesures des immissions confirment ainsi l'évolution temporelle des émissions annuelles calculées (cf. figure 1).

#### Immissions de NH<sub>3</sub> en Suisse de 2000 à 2018

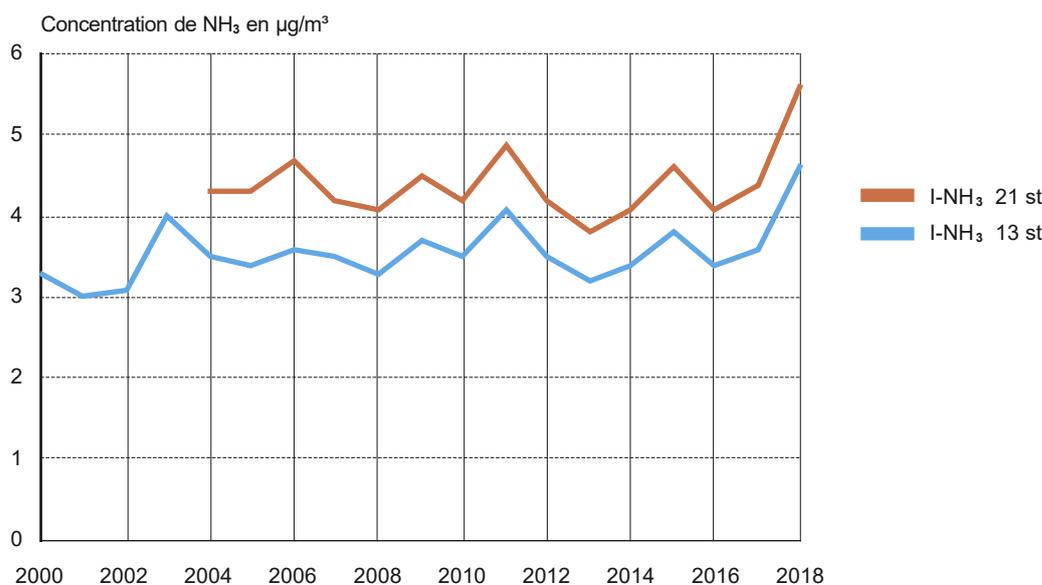


Figure 3 – Évolution temporelle des valeurs moyennes des concentrations d'ammoniac (NH<sub>3</sub> en microgrammes par m<sup>3</sup>) aux 13 stations (st) de Suisse dans lesquelles des mesures sont effectuées depuis 2000, ainsi qu'aux 21 stations (st) dans lesquelles des mesures sont effectuées depuis 2004. Les données sont basées sur les moyennes mensuelles (fub 2019).

En Suisse, les concentrations d'oxydes d'azote sont enregistrées par les stations de mesure du Réseau national d'observation de la pollution atmosphérique (NABEL) ainsi que par de nombreuses stations de mesure cantonales. L'évolution des concentrations d'oxydes d'azote mesurées sur différents emplacements du NABEL présentée à la figure 4 (OFEV et Empa 2019) confirme le recul significatif d'environ 35% des émissions calculées entre 2000 et 2018 (cf. figure 1).

#### Immissions de NO<sub>x</sub> en Suisse de 2000 à 2018

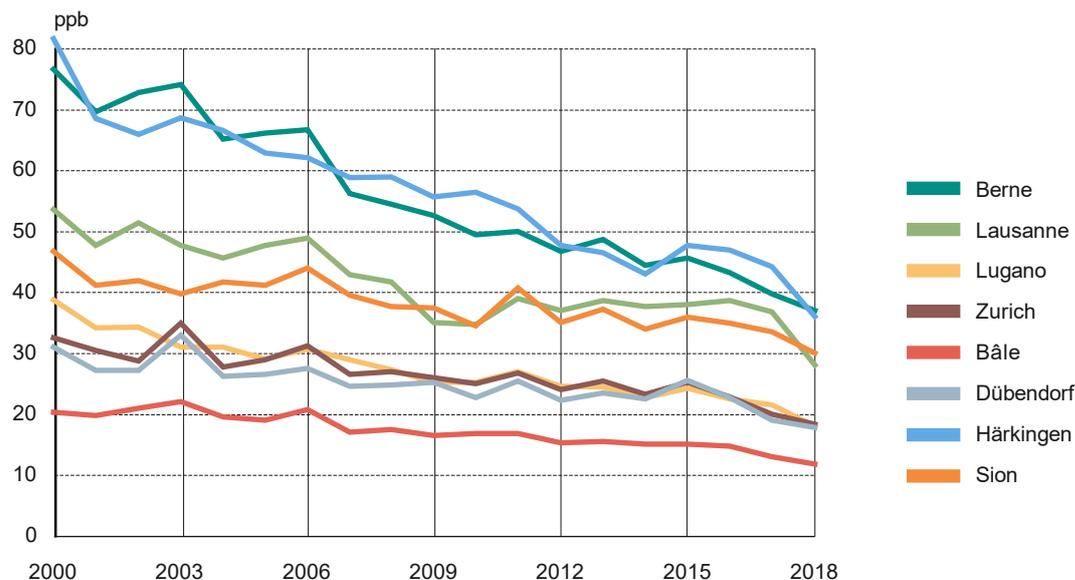


Figure 4 – Évolution temporelle des moyennes annuelles des concentrations d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub> en ppb) mesurées à différentes stations du Réseau national d'observation de la pollution atmosphérique (NABEL) (OFEV et Empa 2019)

### 3.2 Charge excessive d'azote dans les écosystèmes proches de l'état naturel

Au cours des dernières décennies, on observe un recul significatif des émissions et des immissions d'oxydes d'azote. En revanche, les émissions calculées d'ammoniac n'ont que légèrement diminué depuis 2000 et les concentrations d'ammoniac (immissions) restent toujours à un niveau élevé. Aussi, selon l'approche de modélisation adoptée, les dépôts d'azote n'ont diminué que de 16 à 22% en Suisse entre 2000 et 2015 (EMEP 2019, Rihm et Künzle 2019). Les dépôts d'azote sont formés par déposition sèche d'oxydes d'azote gazeux, d'acide nitrique, d'ammoniac et d'aérosols azotés (p. ex. du nitrate d'ammonium) et par déposition humide de composants azotés des précipitations (nitrates, ammonium).

Selon les calculs effectués pour 2017 dans le cadre du Programme de coopération pour la surveillance et l'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe (EMEP), les composés azotés réduits provenant des émissions d'ammoniac contribuent à raison d'environ 69% aux dépôts totaux d'azote atmosphériques en Suisse. Les 31% restants proviennent des émissions de composés azotés oxydés (NO<sub>x</sub>) générés lors des processus de combustion (EMEP 2019). En 2000, la proportion de composés azotés réduits dans les dépôts d'azote se situait encore à 57%, mais elle n'a cessé d'augmenter pour atteindre 69% en 2017. Cet accroissement peut s'expliquer par l'évolution des émissions totales

de la Suisse (cf. 2.1): entre 2000 et 2018, les rejets de composés azotés oxydés ont sensiblement diminué (–35%) grâce aux mesures de réduction des émissions prises dans les secteurs de l'énergie et des transports, tandis que la baisse des émissions de composés azotés réduits (ammoniac) a été beaucoup plus faible (–10%), et celle du secteur agricole seulement de –4% (OFEV [FOEN] 2020a).

Pour évaluer la nécessité d'une protection contre les charges excessives d'azote, on utilise des limites de charge pour les apports annuels d'azote atmosphérique dans les écosystèmes sensibles définies au plan international, appelées charges critiques (*critical loads*, exprimées en kg de N ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup>), qui sont fixées en fonction de l'écosystème (CEE-ONU 2010, Bobbink et Hettelingh 2011, Rihm et Achermann 2016). Il existe également des limites de charge définies au plan international pour les effets directs des concentrations d'ammoniac gazeux sur la végétation appelées niveaux critiques (*critical levels*, correspondant à la moyenne annuelle de la concentration en ammoniac en µg de NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>; CFHA 2014, CEE-ONU 2017).

Prenant en considération ces limites de charge définies au plan international, la CFHA a examiné, dans son rapport de 2014, le pourcentage d'écosystèmes proches de l'état naturel ayant été exposés à des apports excessifs d'azote ou à des concentrations excessives d'ammoniac en 2007 (CFHA 2014). Les charges excessives d'azote ont été indiquées sous la forme du pourcentage de surface affectée dans les différents écosystèmes. La même méthode d'évaluation a été utilisée pour analyser les charges excessives d'azote dans le présent rapport et les documenter pour l'année 2015 (Rihm et Künzle 2019, OFEV et Meteotest 2020). Les résultats figurant dans le tableau 1 ci-dessous montrent qu'une grande partie des écosystèmes présente encore une charge excessive d'azote (dépassement des charges critiques). En comparaison, la proportion de la surface des écosystèmes affectés par une exposition directe à des concentrations élevées d'ammoniac (dépassement des niveaux critiques pour l'ammoniac) est plus faible. La répartition spatiale des dépassements des charges critiques pour l'azote est présentée à la figure 5.

<b>Inventaire des écosystèmes</b>	<b>Charges critiques dépassées pour les apports d'azote en 2015 (Rihm et Künzle 2019)</b>	<b>Niveaux critiques dépassés pour l'ammoniac en 2015 (OFEV et Meteotest 2020)</b>
Hauts-marais	94%	47%
Bas-marais	77%	18%
Prairies sèches	36%	2%
Forêt	87%	17%

Tableau 1 – Proportion des surfaces polluées par des apports excessifs d'azote et des concentrations excessives d'ammoniac par rapport aux surfaces totales de différents écosystèmes proches de l'état naturel en Suisse en 2015 (Rihm et Künzle 2019, OFEV et Meteotest 2020)

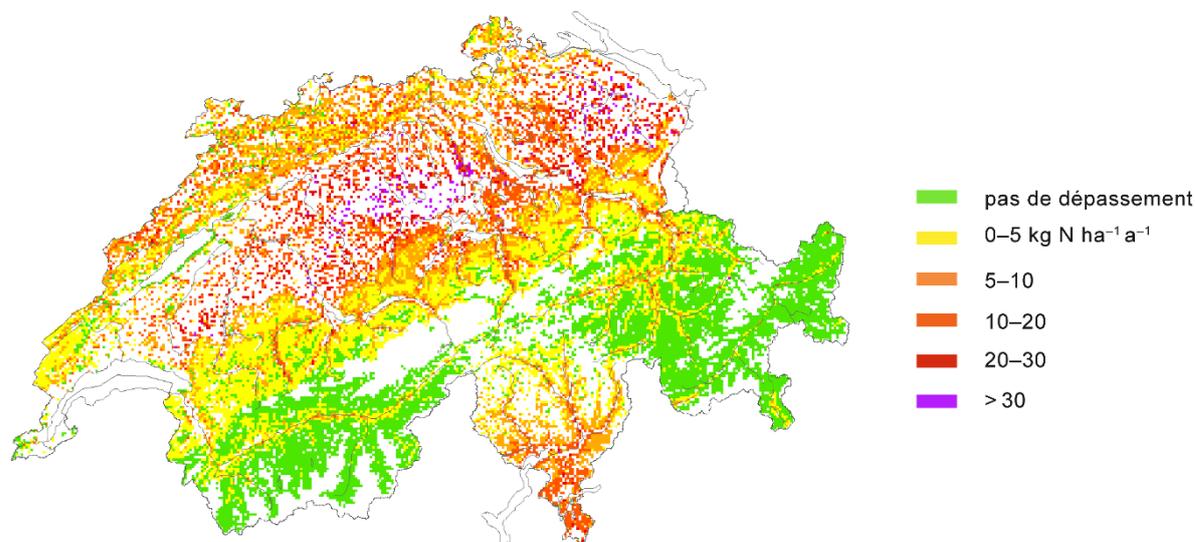


Figure 5 – Dépassement des charges critiques pour l'azote dans des écosystèmes proches de l'état naturel en Suisse en 2015 (OFEV et Meteotest 2020). Les surfaces marquées en jaune, orange, rouge et violet représentent des immissions excessives.

Des dépassements significatifs des charges critiques d'azote ont un impact sur les écosystèmes proches de l'état naturel (tels que les écosystèmes forestiers, les hauts-marais, les bas-marais et les prairies et pâturages secs riches en espèces), en particulier:

- une acidification du sol, entraînant une péjoration de l'approvisionnement en substances nutritives et de la stabilité (p. ex. une augmentation du risque de déracinement par le vent et de dommages causés par la sécheresse et de la mortalité de diverses espèces d'arbres dans les écosystèmes forestiers);
- une eutrophisation ou une surfertilisation (de tous les écosystèmes proches de l'état naturel répertoriés) avec, pour conséquence, une lixiviation des nitrates de la zone racinaire vers les eaux souterraines;
- des effets sur la biodiversité, en particulier des atteintes aux plantes tributaires d'un milieu pauvre en nutriments. L'appauvrissement de la diversité végétale a aussi une incidence sur la faune qui vit dans des milieux proches de l'état naturel (notamment sur la diversité des insectes).

Ces effets négatifs ont également été mis en évidence en Suisse dans des études portant sur des écosystèmes proches de l'état naturel importants (p. ex. Rion et al. 2018, Braun et al. 2018, de Witte et al. 2017, Braun et al. 2017, Etzold et al. 2014, Roth et al. 2013, Egli et Brunner 2011, Senn-Irlet et al. 2007, CFHA 2005, Mayer et al. 2005, Braun et al. 2003).

### 3.3 Formation de poussières fines (PM) ayant des effets sur la santé humaine

Après leur émission, l'ammoniac et les oxydes d'azote contribuent à la formation d'aérosols secondaires, qui sont des composants des particules fines. Pour résumer, on peut dire que l'ammonium, les nitrates et les sulfates constituent environ la moitié des poussières fines PM<sub>2,5</sub> (particules d'un diamètre inférieur à 2,5 micromètres) en Suisse et qu'ils représentent environ un tiers des PM<sub>2,5</sub> sur les sites routiers et dans le sud de la Suisse (OFEV 2019). Les effets des particules fines sur la santé humaine sont documentés

dans de nombreuses études; ils vont de problèmes de santé aigus et chroniques (atteintes des voies respiratoires et du système cardiovasculaire) à un décès prématuré, et ont pour conséquence une diminution de l'espérance de vie (CFHA 2013).

### **3.4 Émissions de gaz à effet de serre induites par les apports d'azote dans les écosystèmes proches de l'état naturel**

Une intensité d'azote trop élevée dans la production agricole n'entraîne pas seulement des émissions accrues de gaz à effet de serre tels que le protoxyde d'azote ( $N_2O$ ) sur les surfaces agricoles: l'ammoniac et les oxydes d'azote émis sont transportés par l'air et se déposent dans les écosystèmes proches de l'état naturel. Du protoxyde d'azote se forme alors également dans ces écosystèmes, par le biais de processus se déroulant dans le sol, qui est ensuite libéré. C'est ce que l'on appelle la formation d'émissions indirectes de protoxyde d'azote. Ce phénomène a été étudié et quantifié pour la Suisse (Bühlmann et al. 2015).

Les études ont montré qu'en 2010, les émissions indirectes de protoxyde d'azote s'élevaient à 1,61 kt de  $N-N_2O$ . Comme environ deux tiers des dépôts d'azote en Suisse sont constitués de composés azotés réduits (cf. 3.2.), dont la plupart proviennent des émissions d'ammoniac de l'agriculture, les deux tiers environ de ces émissions indirectes de protoxyde d'azote peuvent être attribués aux émissions d'ammoniac de l'agriculture. À titre de comparaison, les émissions directes de protoxyde d'azote de l'agriculture s'élevaient à 5,12 kt de  $N-N_2O$  par an et celles du secteur de l'énergie à 0,65 kt de  $N-N_2O$  par an. Par rapport aux émissions totales de ce gaz à effet de serre en Suisse, la part des émissions indirectes de protoxyde d'azote représentait donc 21%.

## 4 Actions nécessaires en vue de réduire les émissions

### 4.1 Niveau de l'ammoniac par rapport aux objectifs environnementaux pour l'agriculture (OEA) du Conseil fédéral

Dans son rapport du 9 décembre 2016 en réponse au postulat 13.4284 Bertschy du 13 décembre 2013, le Conseil fédéral a confirmé l'objectif environnemental pour l'agriculture (OEA) pour les émissions d'ammoniac d'origine agricole (Conseil fédéral 2016). La réalisation de cet objectif est nécessaire afin de réduire les dépôts excessifs d'azote que l'on retrouve dans beaucoup d'écosystèmes proches de l'état naturel en Suisse. L'OEA pour les émissions d'ammoniac d'origine agricole a été fixé à 25 kt de N-NH<sub>3</sub> par an (Conseil fédéral 2016, OFEV et OFAG 2016).

Les émissions d'ammoniac issues de l'agriculture s'élevaient au total à 42,3 kt de N-NH<sub>3</sub> en 2018 (OFEV [FOEN] 2020a, cf. 2.1.). Les émissions d'ammoniac d'origine agricole doivent donc être réduites de 41% par rapport à leur niveau de 2018.

Par conséquent, la nécessité d'agir est toujours pratiquement la même que celle énoncée par le Conseil fédéral en 2009 dans sa Stratégie de lutte contre la pollution de l'air (Conseil fédéral 2009). À l'époque, la réduction d'émissions nécessaire était estimée à environ 40% par rapport au niveau de 2005.

### 4.2 Niveau des oxydes d'azote par rapport à la Stratégie de lutte contre la pollution de l'air du Conseil fédéral

Les émissions d'oxydes d'azote ont enregistré un recul significatif depuis 2000 qui devrait, selon les prévisions, se poursuivre. L'objectif fixé en 2009 dans la Stratégie de lutte contre la pollution de l'air, soit une réduction des émissions d'oxydes d'azote d'environ 50% par rapport à leur niveau de 2005, sera vraisemblablement atteint entre 2025 et 2030 (Conseil fédéral 2009, OFEV [FOEN] 2020a).

### 4.3 Synergies entre les mesures visant à réduire les émissions d'ammoniac et celles visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre tels que le méthane et le protoxyde d'azote

S'agissant des émissions de gaz effet de serre, l'agriculture est la principale source d'émissions de méthane et de protoxyde d'azote en Suisse, alors que les sources énergétiques sont dominantes en ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub> (OFEV [FOEN] 2020b). Les émissions de ces gaz à effet de serre en Suisse en 2018 sont présentées dans le tableau 2, qui prend uniquement en compte les émissions des combustibles et des carburants, pour le CO<sub>2</sub>, mais également celles issues de l'utilisation de la biomasse pour le méthane et le protoxyde d'azote.

Secteurs	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Énergie	34 714	275	246
Processus industriels et utilisation de produits	2 114	3	588
Agriculture	46	4 040	1 905
Déchets	9	521	140
Autres	12	0,7	0,6
Total	36 895	4 840	2 880

Tableau 2 – Émissions de gaz à effet de serre en Suisse en 2018, exprimées en kilotonnes d'équivalents CO<sub>2</sub>, sans les émissions indirectes de protoxyde d'azote (OFEV [FOEN] 2020b). Les sources dominantes des différents gaz à effet de serre sont mises en évidence en rouge. CO<sub>2</sub> = dioxyde de carbone; CH<sub>4</sub> = méthane; N<sub>2</sub>O = protoxyde d'azote

Les émissions de gaz à effet de serre résultant des activités agricoles font l'objet de nombreuses publications (notamment Grossi et al. 2019, Bretscher et al. 2018, Hasler et al. 2017, Conseil fédéral 2016, Wagner et al. 2015, Domingo et al. 2014, Hristov et al. 2013, Oenema et al. 2012, OFAG 2011, Smith et al. 2007). Les synergies entre les mesures visant à réduire les émissions d'ammoniac et celles visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre tels que le méthane et le protocole d'azote sont également examinées et documentées.

Outre les émissions de protoxyde d'azote provenant de la surface agricole utile et des installations de détention d'animaux, les émissions indirectes de protoxyde d'azote des écosystèmes proches de l'état naturel résultant d'un apport excessif d'azote atmosphérique dans ces derniers (cf. 3.4.) sont également importantes. L'agriculture est responsable d'environ deux tiers de ces émissions indirectes de protoxyde d'azote, environ deux tiers des apports d'azote dans les écosystèmes proches de l'état naturel étant constitués de composés azotés réduits provenant des émissions d'ammoniac de l'agriculture. Dans ce contexte, on peut affirmer que toutes les mesures visant à réduire les émissions d'ammoniac (en particulier les systèmes de stabulation à faibles émissions, le stockage et l'épandage d'engrais de ferme, la substitution des engrais contenant de l'urée par des engrais minéraux à base de calcium, de potassium, d'ammonium et de nitrate) ont au final aussi pour effet une réduction des émissions indirectes de protoxyde d'azote.

Des études ont également montré qu'il existe des synergies, sous la forme de réductions directes des émissions de gaz à effet de serre tels que le méthane et le protoxyde d'azote, avec certaines mesures visant à réduire les émissions d'ammoniac d'origine agricole. Des synergies de ce type sont documentées pour les mesures suivantes:

- l'augmentation de l'efficacité de l'azote lors de l'exploitation des engrais de ferme par un apport d'engrais minéraux ou de ferme adapté aux besoins des plantes (agriculture de précision; *precision farming*);
- une alimentation du bétail optimisée en fonction des besoins en azote (affouragement par phases, aliments à teneur réduite en azote et en phosphore, rapport énergie-protéine équilibré dans la ration alimentaire);
- la réduction des émissions de méthane par des méthodes d'élevage visant une efficacité élevée de conversion nutritionnelle et de faibles émissions de méthane;
- la réduction des excédents d'azote, entre autres par la réduction des intrants d'azote dans le système agricole (notamment la réduction des importations d'aliments pour animaux) et par une adaptation de l'intensité de l'élevage au site;
- la couverture des réservoirs à lisier visant à réduire les émissions d'ammoniac a également pour effet de diminuer les émissions de méthane;
- des systèmes de stabulation à faibles émissions, avec un nettoyage plus fréquent des aires d'exercice, une évacuation rapide de l'urine et des excréments et un déversement rapide du lisier dans des installations de stockage couvertes;
- la fermentation anaérobie des engrais de ferme dans des installations de biogaz;
- la promotion de la culture des légumineuses en plein champ (cultures permanentes, semences intermédiaires).

La mise en œuvre rigoureuse des mesures de réduction des émissions d'ammoniac peut donc contribuer de manière significative à la réalisation des objectifs de la stratégie Climat de l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) et du Conseil fédéral visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture (OFAG 2011).

## 5 Conclusion

Il ressort de cette analyse que les constats concernant le problème posé par des émissions trop élevées de polluants atmosphériques azotés formulés par la CFHA dans ses deux rapports publiés en 2005 et en 2014, ainsi que ses recommandations en vue de les réduire, sont toujours valables (CFHA 2005, CFHA 2014). La nécessité d'agir afin de réduire les émissions d'ammoniac d'origine agricole est toujours aussi importante. Les conclusions de ces deux rapports étayaient également les exigences de réduction des émissions définies dans la Stratégie de lutte contre la pollution de l'air adoptée par le Conseil fédéral en 2009 (Conseil fédéral 2009) et dans le rapport du Conseil fédéral du 9 décembre 2016 en réponse au postulat 13.4284 Bertschy du 13 décembre 2013, dans lequel l'objectif environnemental pour l'agriculture (OEA) défini pour les émissions d'ammoniac d'origine agricole a été confirmé (Conseil fédéral 2016).

Se fondant sur la présente analyse de l'évolution temporelle des émissions d'ammoniac calculées et des concentrations d'ammoniac mesurées, la CFHA constate une stagnation des charges à un niveau nettement trop élevé entre 2000 et 2018. Les objectifs intermédiaires de réduction des émissions d'ammoniac maintes fois formulés dans toutes les politiques agricoles (PA 2007, PA 2011 et PA 2014-17) n'ont pas été atteints et ont été à chaque fois reportés, plus ou moins inchangés, à l'étape suivante de la politique agricole. Ces différentes étapes n'étaient pas assorties d'objectifs suffisamment contraignants en vue de réduire les émissions. Les mesures devaient en grande partie être prises sur une base volontaire, en particulier grâce à la participation des agriculteurs à des programmes qui créaient une incitation à mettre en œuvre des mesures spécifiques de réduction des émissions par le biais de contributions financières. S'agissant des pays de l'UE, le Conseil de l'Union européenne indique, dans des conclusions sur l'amélioration de la qualité de l'air adoptées le 5 mars 2020, que les émissions d'ammoniac ont diminué nettement moins que les autres émissions au cours des dix dernières années, notamment en raison de l'absence de dispositions légales spécifiques relatives à la limitation des émissions à la source (Conseil de l'Union européenne 2020). Le Conseil souligne aussi que des mesures visant à réduire les émissions d'ammoniac sont déjà disponibles et viables sur les plans technique et économique.

La CFHA parvient donc à la conclusion que les prochaines étapes de la politique agricole devront inclure un engagement nettement plus contraignant. Une trajectoire contraignante de réduction des émissions d'ammoniac devra être définie, incluant aussi la spécification et la quantification des mesures nécessaires pour atteindre l'objectif environnemental de l'agriculture (OEA). Dans ce contexte, la CFHA salue le fait que le Conseil fédéral ait approuvé le 12 février 2020 l'introduction, dans l'ordonnance sur la protection de l'air, de dispositions contraignantes concernant la couverture efficace des réservoirs à lisier et l'épandage du lisier à l'aide d'un système à faible taux d'émission, qui entreront en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2022. La CFHA accueille aussi favorablement l'orientation vers une écologisation supplémentaire de l'agriculture, que le Conseil fédéral a approuvée le 12 février 2020 dans son message relatif à l'évolution future de la Politique agricole à partir de 2022 (PA22+), qui présente les principales réglementations nouvelles visant à réduire les pertes de substances nutritives. La CFHA espère qu'avec la PA22+ en complément des mesures qui seront introduites dans l'ordonnance sur la protection de l'air, des progrès significatifs seront réalisés en matière de systèmes de stabulation à faibles émissions et de détention d'animaux de rente adaptée au site.

La réduction des émissions d'ammoniac et la réalisation de l'objectif environnemental de l'agriculture y relatif (OEA) devraient permettre de protéger de manière durable les écosystèmes proches de l'état naturel des effets négatifs, tels que l'acidification et l'eutrophisation, et contribuer aussi à améliorer de manière substantielle le maintien de la biodiversité, notamment les conditions de vie des espèces végétales et de la faune tributaires de milieux pauvres en nutriments. Parallèlement, on peut également s'attendre à une amélioration de la situation en matière d'hygiène de l'air grâce à une diminution de la pollution par des particules, qui s'accompagne d'effets positifs sur la santé humaine. Enfin, lorsque des mesures sont

prises en vue de réduire les émissions d'ammoniac, on peut en outre s'attendre à des synergies qui permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre ayant un impact sur le climat, en particulier le protoxyde d'azote et le méthane, ainsi qu'à une diminution de la lixiviation des nitrates des écosystèmes proches de l'état naturel.

La CFHA considère qu'il est important que le potentiel technique de réduction des émissions d'ammoniac soit pleinement exploité à tous les niveaux d'une exploitation agricole dans le cadre de la future politique agricole PA22+. Ce potentiel est encore très élevé (Amann et al. 2015, Conseil fédéral 2016). En outre, il convient de tendre vers une agriculture adaptée au site, qui renonce, en particulier pour la détention d'animaux de rente, à un approvisionnement en azote par le biais d'importations de fourrage et qui contribue ainsi à la réduction de la charge environnementale en diminuant l'intensité de la production.

## Bibliographie

Amann M., Borken-Kleefeld J., Cofala J., Kieseewetter G., Klimont Z., Sander R., Schoepp W., Winiwarter W., 2015: Scenarios for further improvements of air quality in Switzerland. International Institute for Applied Systems Analysis IIASA. 84 p. Peut être obtenu sur demande auprès de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne

Bobbink R., Hettelingh J.-P. (eds.), 2011: Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships. Proceedings of an expert workshop held under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Noordwijkerhout, 23-25 June 2010. Coordination Centre for Effects, RIVM report 680359002

Braun S., Schindler Ch., Volz R., Flückiger W., 2003: Forest damages by the storm « Lothar » in permanent observation plots in Switzerland: The significance of soil acidification and nitrogen deposition. *Water, Air and Soil Pollution* 142, 327–34

Braun S., Schindler Ch., Rihm B., 2017: Growth trends of beech and Norway spruce in Switzerland: The role of nitrogen deposition, ozone, mineral nutrition and climate. *Science of the Total Environment* 599–600, 637–646

Braun S., Hopf S., de Witte L., 2018: Wie geht es unserem Wald? 34 Jahre Walddauerbeobachtung. Programme d'observation de longue durée des forêts sur mandat de plusieurs cantons (AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH et les cantons de Suisse centrale) avec la participation de l'OFEV. Rapport 2013–2017. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP), Schönenbuch. 140 p.

Bretscher D., Ammann Ch., Wüst Ch., Nyfeler A., Felder D., 2018: Reduktionspotenziale von Treibhausgasemissionen aus der Schweizer Nutztierhaltung. *Agrarforschung Schweiz* 9 (11–12), 376–383

Bühlmann T., Hiltbrunner E., Körner Ch., Rihm B., Achermann B., 2015: Induction of indirect N<sub>2</sub>O and NO emissions by atmospheric nitrogen deposition in (semi-)natural ecosystems in Switzerland. *Atmospheric Environment* 103, 94–101

CEE-ONU, 2010: Empirical critical loads and dose-response relationships. Report on an expert workshop held from 23 to 25 June 2010 in Noordwijkerhout, The Netherlands. Prepared by the Coordination Centre for Effects on behalf of the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Working Group on Effects, 13 July 2010, ECE/EB.AIR/WG.1/2010/14

CEE-ONU, 2017: Manual on methodologies and criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels, Chapter 3, Mapping Critical Levels for Vegetation (update 2017). Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Working Group on Effects, International Cooperative Programme on Modelling and Mapping Critical Levels and Loads and Air Pollution Effects, Risks and Trends, Coordination Centre for Effects (CCE, Umweltbundesamt Germany), United Nations Economic Commission for Europe

CFHA, 2005: Les polluants atmosphériques azotés en Suisse. Rapport de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA). Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Cahier de l'environnement n° 384. 176 p.

CFHA, 2013: Les poussières fines en Suisse 2013. Un état des lieux dressé par la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA). 66 p.

CFHA, 2014: Immissions d'ammoniac et dépôts de composés azotés. Clarifications de la CFHA au sujet des immissions excessives. Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA). 62 p.

Conseil de l'Union européenne, 2020: Conclusions sur la qualité de l'air adoptées par le Conseil de l'Union européenne lors de sa 3754<sup>e</sup> session du 5 mars 2020

Conseil fédéral, 2009: Rapport Stratégie fédérale de protection de l'air du Conseil fédéral du 11 septembre 2009. Feuille fédérale (FF) n° 40 du 6 octobre 2009

Conseil fédéral, 2016: Bases naturelles de la vie et efficacité des ressources dans la production agricole. Actualisation des objectifs. Rapport du Conseil fédéral du 9 décembre 2016 en réponse au postulat 13.4284 Bertschy du 13 décembre 2013

Dalgaard T., Hansen B., Hasler B., Hertel O., Hutchings N.J., Jacobsen B.H., Stoumann Jensen L., Kronvang B., Olesen J.E., Schjorring J.K., Kristensen I.S., Graversgaard M., Termansen M., Vejre H., 2014: Policies for agricultural management – trends, challenges and prospects for improved efficiency in Denmark. *Environmental Research Letters* 9, 115002, 16 p.

Danish Environmental Protection Agency, 2020: Environmental Technologies for Livestock Holdings. Internet Access: [eng.mst.dk](http://eng.mst.dk) > trade > agriculture > environmental-technologies-for-livestock-holdings > list-of-environmental-technologies

de Witte L.C., Rosenstock N.P., van der Linde S., Braun S., 2017: Nitrogen deposition changes ectomy-corrhizal communities in Swiss beech forests. *Science of the Total Environment* 605–606, 1083–1096

Domingo J., De Miguel E., Hurtado B., Métayer N., Bochu J.-L., Pointereau Ph., 2014: Measures at farm level to reduce greenhouse gas emissions from EU agriculture. Report prepared on the request of the European Parliament's Committee on Agriculture and Rural Development

Egli S., Brunner I., 2011: Mykorrhiza. Eine faszinierende Lebensgemeinschaft im Wald. Merkblatt für die Praxis 35, 3<sup>e</sup> éd. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le *paysage* (WSL), CH-8903 Birmensdorf

EMEP, 2019: Transboundary air pollution by main pollutants (S, N, O<sub>3</sub>) and PM in 2017, Switzerland. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe. Norwegian Meteorological Institute. MSC-W Data Note 1/2019. August 2019

Etzold S., Waldner P., Thimonier A., Schmitt M., Dobbertin M., 2014: Tree growth in Swiss forests between 1995 and 2010 in relation to climate and stand conditions: Recent disturbances matter. *Forest Ecology and Management* 311, 41–55

Eurostat, 2020a: Ammonia emissions from agriculture (source AEE), Table, online data code: SDG\_02\_60. Eurostat, téléchargé le 9 avril 2020

Eurostat, 2020b: Farm indicators by agricultural area, type of farm, standard output, legal form and NUTS 2 regions, Table, online data code: ef\_m\_farmleg. Eurostat, téléchargé le 9 avril 2020

Eurostat, 2020c: Livestock density index (Livestock units per ha), Table, online data code: TAI09. Eurostat, téléchargé le 9 avril 2020

fub, 2019: Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000-2018. Rapport de mesures. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), d'OSTLUFT, de ZUDK, de la Principauté du Liechtenstein et de plusieurs cantons (AG, AI, BE, BL/BS, FR, GL, GR, LU, NE, SG, SH, SO, TG, ZG et ZH). Forschungsstelle für Umweltbeobachtung (fub). 76 p. Téléchargement sous Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Grossi G., Goglio P., Vitali A., Williams A.G., 2019: Livestock and climate change: impact of livestock on climate change and mitigation strategies. *Animal Frontiers* Vol. 9, No. 1, January 2019

Gyldenkaerne S., Mikkelsen M.H., 2007: Projection of the Ammonia Emission from Denmark from 2005 until 2025. NERI Technical Report No. 239. National Environmental Research Institute, University of Aarhus, Denmark. 47 p.

Hasler K., Bröring S., Omta O., Olf H.-W., 2017: Eco-innovations in the German fertilizer supply chain: Impact on the carbon footprint of fertilizers. *Plant, Soil and Environment* 63, 12, 531–544

Hristov A.N., Oh J., Lee C., Meinen R., Montes F., Ott T., Firkins J., Rotz A., Dell C., Adesogan A., Yang W., Tricarico J., Kebreab E., Waghorn G., Dijkstra J., Oosting S., 2013: Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production – A review of technical options for non-CO<sub>2</sub> emissions. Edited by Gerber P.J., Henderson B. and Makkar H.P.S. FAO Animal Production and Health Paper No. 177. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy

Jacobsen B.H., 2012: Ammonia Emissions in Europe – Costs, Regulation and Targets with Focus on Denmark. *Journal of Agricultural Science and Technology A* 2, 285–293

Kronvang B., Andersen H.E., Borgesen C., Dalgaard T., Larsen S.E., Bogestrand J., Blicher-Mathiasen G., 2008: Effects of policy measures implemented in Denmark on nitrogen pollution of the aquatic environment. *Environmental Science & Policy* 11, 144–152

Mayer Ph., Brang P., Dobbertin M., Hallenbarter D., Renaud J.-P., Walthert L., Zimmermann S., 2005: Forest storm damage is more frequent on acidic soils. *Ann. For. Sci.* 62, 303–311

Oenema O., Velthof G., Klimont Z., Winiwarter W., 2012: Emissions from agriculture and their control potentials. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), TSAP Report#3

OFAG, 2011: Stratégie Climat pour l'agriculture. Protection du climat et adaptation au changement climatique pour une agriculture et une économie alimentaire suisses durables. Département fédéral de l'économie (DFE), Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Berne, 31 mai 2011

OFAG, 2019: Rapport agricole 2018. Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Berne

OFEV et OFAG, 2016: Objectifs environnementaux pour l'agriculture. Rapport d'état 2016. Publié par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG). Office fédéral de l'environnement, Berne, *Connaissance de l'environnement* n° 1633, 144 p.

OFEV, 2019: Poussières fines PM2.5. Questions et réponses concernant les propriétés, les émissions, les immissions, les effets sur la santé et les mesures. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne, état en janvier 2019

OFEV et Empa, 2019: Réseau national d'observation des polluants atmosphériques NABEL. Résultats 2018. Publié par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et par le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherches (Empa), Berne, 2019, 96 p.

OFEV et Meteotest, 2020: Données suisses relatives aux dépassements des charges critiques d'azote et des niveaux critiques d'ammoniac en 2015. Carte des dépassements des charges critiques d'azote élaborées par Meteotest. Données et cartes mises à disposition par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne

OFEV [FOEN] 2020a: Switzerland's Informative Inventory Report 2020 (IIR). Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Federal Office for the Environment FOEN, Bern. 374 p.

OFEV [FOEN] 2020b: Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2018. National Inventory Report, including reporting elements under the Kyoto Protocol. Submission of April 2020 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment FOEN, Bern. 660 p.

Rihm B., Achermann B., 2016: Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). Federal Office for the Environment, Bern. Environmental studies no. 1642. 78 p.

Rihm B., Künzle Th., 2019: Mapping Nitrogen Deposition 2015 for Switzerland. Technical Report on the Update of Critical Loads and Exceedance, including the years 1990, 2000, 2005 and 2010. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement. 49 p.

Rion V., Gallandat J.-D., Gobat J.-M., Vittoz P., 2018: Recent changes in the plant composition of wetlands in the Jura mountains. *Appl. Veg. Sci.* 21, 121–131

Roth T., Kohli L., Rihm B., Achermann B., 2013: Nitrogen deposition is negatively related to species richness and species composition of vascular plants and bryophytes in Swiss mountain grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 178, 121–126

Senn-Irlet B., Bieri G., Egli S., 2007: Liste Rouge des espèces menacées en Suisse: Champignons supérieurs. *L'environnement pratique* n° 0718. Éd. Office fédéral de l'environnement, Berne, et Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le *paysage* (WSL), Birmensdorf. 94 p.

Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O., 2007: Agriculture. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of the Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Metz B., Davidson O.R., Bosch P.R., Dave R., Meyer L.A. (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Wagner S., Angenendt E., Beletskaya O., Zeddies J., 2015: Costs and benefits of ammonia and particulate matter abatement in German agriculture including interactions with greenhouse gas emissions. *Agricultural Systems* 141, 58–68