



# Rapport **OMINEA** | Sources naturelles

## Ed. 2026

Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France

# Rapport **OMINEA** | Sources naturelles Ed. 2026

## Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France

Avril 2026

Rédaction	
Contributeurs	Etienne DELORT

Coordination, Vérification et Approbation finale		
Coordination et Vérification	Etienne MATHIAS, Responsable Division Inventaires	16/02/2026
Approbation finale	Jean-Pierre CHANG, Directeur adjoint Jérôme BOUTANG, Directeur général	16/02/2026

Pour citer ce document :

Citepa, 2026. Rapport OMINEA | Sources naturelles – 23<sup>ème</sup> édition

© Citepa 2026

Ce Rapport a été réalisé avec la participation financière du Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche (MTBFMT).

Cette édition annule et remplace toutes les éditions antérieures relatives au même format d'inventaire.

Rapport n°2590omi/ 2026 | 6. Autres.docx

Ce rapport national d'inventaire est disponible sur le site Internet du Citepa, à la page suivante :

<https://www.citepa.org/methodologie-de-linventaire-omine/>

@ Citepa

42, rue de Paradis – 75010 PARIS – Tel. 01 44 83 68 83 – Fax 01 40 22 04 83

[www.citepa.org](http://www.citepa.org) | [contact@citepa.org](mailto:contact@citepa.org)



# Sommaire

Table des illustrations .....	3
Préambule .....	4
Autres   Introduction .....	5
Emissions de COV biotiques par la végétation / Forêts et prairies naturelles.....	6
Volcans .....	10
Foudre .....	13
Crédit des illustrations .....	16

## Table des illustrations

Figure 1 : Logigramme du processus d'estimation des émissions .....	8
Figure 2 : Logigramme du processus d'estimation des émissions .....	12
Figure 3 : Logigramme du processus d'estimation des émissions .....	15

# Préambule

Le rapport OMINEA comprend une description détaillée, par secteur émetteur, des méthodologies utilisées pour estimer les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques (approche utilisée, données sources, hypothèses, facteurs d'émissions, etc.).

Le présent document s'attache à décrire les méthodologies utilisées pour estimer les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques du secteur **Autres sources naturelles**.

En parallèle, les méthodologies détaillées par secteur sont disponibles sur le site internet du Citepa et sont déclinées comme suit :

0. Parties générales
  - OMINEA. Parties générales
  - OMINEA. Références & Annexes
1. Energie
  - OMINEA. Énergie. Éléments généraux
  - OMINEA. Industrie de l'énergie
  - OMINEA. Industrie manufacturière
  - OMINEA. Transports
  - OMINEA. Autres secteurs
  - OMINEA. Non spécifiés
  - OMINEA. Émissions fugitives des combustibles
2. Procédés industriels & usages de produits (IPPU)
  - OMINEA. Produits minéraux
  - OMINEA. Chimie
  - OMINEA. Métallurgie
  - OMINEA. Produits non énergétiques des carburants et de l'utilisation de solvants
  - OMINEA. Industrie électronique
  - OMINEA. Consommation d'halocarbures et SF6
  - OMINEA. Autres usages et fabrication de produits
  - OMINEA. Autres procédés
3. Agriculture
  - OMINEA. Agriculture
4. Déchets
  - OMINEA. Déchets
5. UTCTAF
  - OMINEA. UTCATF
6. Autres
  - OMINEA. Autres

Toutes les références et annexes citées dans le présent document font références au document OMINEA. Références & Annexes évoqué ci-dessus. **Il est conseillé de télécharger ce document en parallèle dans le cadre d'une consultation du présent guide méthodologique.**



## Autres | Introduction

Dans le cadre des reportages officiels, seules les émissions anthropiques de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques doivent être inventoriées et rapportées dans le total national. Néanmoins, plusieurs sources d'émissions naturelles sont estimées, même si l'incertitude reste importante, et que ces calculs ne se veulent pas exhaustifs.

Une première source naturelle concerne des émissions liées à la végétation : les composés organiques volatiles d'origine biotique. Le second type de sources d'émissions naturelles concerne des procédés abiotiques : foudre et volcanisme.

Cette section présente les méthodes de calcul des émissions des activités suivantes :

- Emissions naturelles de la végétation
- Emissions naturelles des volcans
- Emissions naturelles de la foudre

Rédaction : **Etienne DELORT**, **Vincent MAZIN**



Date de mise à jour	Responsable	Date de validation	Vérificateur
13/02/2026	EtD	16/02/2026	EM

# Emissions de COV biotiques par la végétation / Forêts et prairies naturelles

Cette section concerne les émissions de COV biotiques des forêts et prairies naturelles. Dans le cadre de la CEE-NU, les émissions des forêts et prairies naturelles sont rapportées hors total national, celles des autres prairies et cultures sont désormais incluses dans les totaux nationaux (cf. *OMINEA\_3D\_agricultural soils*).

## Correspondance dans divers référentiels :

CCNUCC / CRT	4G (Forêts gérées)
CEE-NU / NFR	6B (Forêts gérées) et 11C (Forêts et prairies naturelles)
SNAPc (extension Citepa)	1101, 1102, 1111, 1112, 110401
CE / directive IED	Hors champ
CE / E-PRTR	Hors champ
CE / directive GIC	Hors champ

## Approche méthodologique :

Activité	Facteurs d'émission
Surfaces par type de formation végétale	Facteurs d'émissions nationaux

## Niveau de méthode (EMEP/EEA) :

Rang 3

## Références utilisées :

- [14] CPDP (Comité Professionnel Du Pétrole, valeurs de Météo France)
- [85] SCEES - AGRESTE, Statistique agricole annuelle
- [92] Citepa - PAJOT K., GABORIT G. FONTELLE J-P. - Estimation annuelle des émissions de COVNM des sources biotiques dans la basse atmosphère en France (modèle COBRA) - Mai 2003
- [292] IFN – Inventaire des surfaces forestières par département, surface par essence, mise à jour annuelle
- [293] RENECOFOR (REseau National de suivi à des ECOsystèmes FOrestiers) – Communication annuelle de données de températures diurnes et nocturnes[294] GUENTHER A-B - Seasonal and spatial variation in natural volatile organic compound emissions. Ecological Application, 1997, vol. 7, pp 34-45
- [295] LAMBERT - Influence du climat et de la disponibilité en azote sur la croissance printanière du ray-grass anglais. 2001, Université catholique de Louvain – Faculté des sciences agronomiques – Laboratoire d'écologie des prairies.
- [296] Citepa - Logiciel COBRA version 2002 (Composés Organiques de la Biomasse Rejetés dans l'Atmosphère)

## Caractéristiques de la catégorie (IIR uniquement) :

Les formations végétales présentes dans les forêts, les prairies et les cultures synthétisent naturellement des composés organiques volatils, au cours de leur croissance, en réponse à des blessures, aux variations de températures, etc. On parle de COV biotique, ou biogénique.

Ces émissions biotiques de COVNM dépendent de multiples paramètres dont le type d'essence végétale, la masse foliaire, la superficie occupée par l'essence végétale, de la température et de la luminosité. Les fonctions d'émission faisant intervenir ces paramètres ne sont pas linéaires et certains de ces paramètres sont fortement variables au cours de l'année (masse foliaire, température, ensoleillement), de la journée (température, ensoleillement), de la localisation (espèce végétale, température, ensoleillement), etc. La méthode de calcul des émissions prend en compte ces différents paramètres.

Les émissions biotiques de COVNM répertoriées actuellement dans l'inventaire différencient les sous-ensembles suivants : Isoprène (ISO), Monoterpènes (MT) et Autres COV (ACOV).

L'intégration de tous ces éléments est réalisée dans le modèle COBRA (Composés Organiques de la Biomasse Rejetés dans l'Atmosphère) [92] développé par le Citepa. Ce modèle fait appel à diverses données pour caractériser l'activité de cette source [14, 292, 293].

Du fait de la structure de certaines données sources, l'ensemble des émissions de COVNM des forêts est actuellement rapporté dans la catégorie des forêts restant forêts pour la CCNUCC et en mémo item NFR pour la CEE-NU.

## Méthode d'estimation des émissions de polluants (IIR) :

### **Emissions de COVNM**

Les émissions de COV biotiques sont estimées grâce au modèle COBRA (Composés Organiques de la Biomasse Rejetés dans l'Atmosphère) [92], développé par le Citepa, qui fait appel à diverses données pour caractériser l'activité de cette source [14, 292, 293] et dont les principaux éléments sont présentés ci-après.

Les algorithmes utilisés par le modèle COBRA appliquent l'équation suivante :

$$EM = \varepsilon \cdot D \cdot S \cdot \gamma$$

avec :

- EM : Emissions de COVNM par essence végétale,
- $\varepsilon$  : Taux normalisé d'émission,
- D : Densité de feuillage ou coefficient de biomasse foliaire,
- S : Superficie recouverte par l'essence végétale,
- $\gamma$  : Facteur environnemental correctif (généralement lié à la température et à la luminosité),

Les paramètres sont expliqués ci-dessous de manière succincte. Pour le détail des calculs, se rapporter au rapport spécifique sur le modèle [92].

### Taux normalisé d'émission ( $\varepsilon$ )

Le modèle comporte six taux normalisés d'émission ( $\varepsilon$ ) pour la forêt. Ils sont classés en quatre catégories :

- les feuillus forts émetteurs d'isoprène,
- les feuillus faiblement émetteurs d'isoprène,
- les feuillus non émetteurs d'isoprène,
- les conifères.



Ils sont exprimés en fonction de la température et de la luminosité. Il est considéré que les essences productrices d'isoprène émettent seulement le jour et que les essences à l'origine d'autres composés chimiques (terpènes et autres) émettent indifféremment le jour et la nuit.

#### Densité de feuillage (D)

La densité de feuillage forestier est déterminée pour cinq essences d'arbres feuillus (le chêne, le platane, le peuplier, le saule, le palmier) et deux familles de végétation (autres feuillus, conifères). A chacune de ces sept familles est attribué le taux normalisé d'émission ( $\epsilon$ ) adéquat.

#### Surfaces des peuplements (S)

Les surfaces forestières par département des 27 essences retenues pour la réalisation de l'inventaire sont issues de l'IFN [292]. Comme il est fréquent de rencontrer en forêt des essences en mélange, l'essence à prendre en considération pour le décompte des surfaces est celle qui correspond au plus grand couvert libre dans un rayon de 25 m. Une résolution plus fine de l'inventaire forestier est également utilisée afin d'attribuer spécifiquement aux hautes altitudes avec les températures appropriées les surfaces réelles par essence et par département en prenant en compte le nombre de tiges par région forestière. Les résultats de surface par région forestière sont donc déduits du nombre de tiges par région forestière et par département et la surface du département. Les surfaces de cultures et de prairies par département sont issues de l'AGRESTE, statistiques agricoles [85] remises à jour annuellement.

#### Facteur environnemental correctif ( $\gamma$ )

Les algorithmes utilisés pour calculer les flux d'émissions sont ceux de Guenther [294] qui tiennent compte de la température foliaire et indirectement du rayonnement.

La température foliaire est assimilée dans le cadre de cet inventaire à la température ambiante. Les données de températures sont issues du réseau de RENECOFOR (REseau National de suivi à des ECosystèmes FORestiers) [293] de l'Office National des Forêts. Ce réseau est constitué d'un peu moins de trente stations de mesure de température réparties sur tout le territoire, de 1996 à nos jours. Il est complété à partir des moyennes de températures mensuelles éditées dans le CPDP [14] (valeurs de Météo France) de 1988 à 1995, grâce à une correspondance établie entre des mois de thermicité identique de la période 1996-2001. Ce qui signifie que ce sont des moyennes mensuelles de températures récentes, sélectionnées selon leur propriété à ressembler aux situations antérieures à 1996, qui ont été utilisées pour les années 1988 à 1996.

Le rayonnement est pris en compte sous la forme du PAR (Photosynthetically Active Radiation), utilisé dans l'équation de Guenther [294] qui correspond à une fraction du rayonnement global (RG) comprise entre 400 et 700 nm. Sa valeur est donc estimée selon  $PAR = 0,45 RG$  (Lambert [295]).

#### Résultats

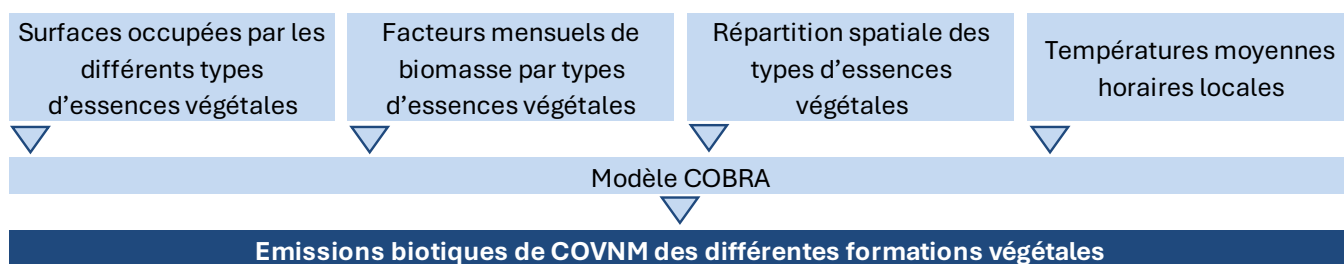
Le calcul des émissions suit donc un processus de type bottom-up spatio-temporel. Un module de calcul développé par le Citepa permet de déterminer les émissions par catégorie d'essence végétale, par mois, par département et pour les catégories de COVNM : isoprène (ISO), monoterpènes (MT) et autres COV (ACOV) [296].

Le facteur d'émissions moyen sur les forêts françaises de la métropole varie autour de 80 kg/ha. Il varie d'une année à l'autre en fonction des conditions climatiques, ce qui peut engendrer des écarts très significatifs sur des périodes mensuelles et/ou des zones géographiques particulières.

Les émissions biotiques de COVNM représentent une part importante des émissions totales de COVNM. Cependant, ces émissions ne sont pas prises en compte dans les totaux nationaux de certains formats d'inventaire mais interviennent de façon notable dans les processus photochimiques conduisant à la formation de composés tels que l'ozone.

La méconnaissance des valeurs des paramètres pris en compte dans les calculs pour ce qui concerne les forêts tropicales ne permet pas d'appliquer le modèle en dehors de la métropole, notamment en Guyane, territoire où se situe une part importante de la forêt française.

#### **Figure 1 : Logigramme du processus d'estimation des émissions**



Date de mise à jour	Responsable	Date de validation	Vérificateur
13/02/2026	EtD	16/02/2026	EM

# Volcans

Cette section traite des émissions provoquées au cours des éruptions volcaniques.

## Correspondance dans divers référentiels :

CCNUCC / CRT	Hors champ
CEE-NU / NFR	Hors champ
SNAPc (extension Citepa)	11.08.00
CE / directive IED	Hors champ
CE / E-PRTR	Hors champ
CE / directive GIC	Hors champ

## Approche méthodologique :

Activité	Facteurs d'émission
Indice d'éruption volcanique. Durée de l'éruption	Valeurs par défaut pour chaque type de volcan

## Niveau de méthode :

Sans objet

## Références utilisées :

[405] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook — 2009, Technical report No 9/2009 – chapter 11.A Volcanoes

[406] Smithsonian Institution, National Museum of Natural History, Global Volcanism Program, <http://www.volcano.si.edu/>

[788] Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP). Observatoires volcanologiques <https://www.ipgp.fr/observation/> (consulté le 19/08/2025)

## Caractéristiques de la catégorie :

Les émissions naturelles liées aux activités géothermiques sont très incertaines et difficiles à quantifier. Ces émissions sont liées :

- aux éruptions volcaniques de surface
- aux éruptions volcaniques sous-marines
- aux fumerolles
- aux geysers
- aux phénomènes de dégazage métamorphique.

Le volcanisme est responsable d'émissions de polluants que ce soit pendant les phases d'activité (éruptions notamment) qu'en dehors. Des émissions de différents polluants sont observées.

Les émissions les plus importantes sont issues du magma très chaud. En l'état actuel des connaissances cela concerne le SO<sub>2</sub> et le CO<sub>2</sub> principalement.

Des particules sont également émises, ayant pour origine :

- les matières pyroclastiques (tephra),
- la condensation des gaz volcaniques, lors de leur refroidissement,
- la transformation des particules existantes,
- les réactions à basse température.

Il n'est considéré pour l'instant que ces trois polluants et la phase éruptive.

## Méthode générale d'estimation des émissions (GES) :

L'activité est caractérisée par un indice d'éruption volcanique actualisé et publié régulièrement [406]. Le détail des durées de chaque épisode d'éruption, en nombre de jours, est fourni plus précisément par l'IPGP [788].

De cet indice et du type de volcan, les émissions de SO<sub>2</sub> sont estimées par éruption. Ces dernières permettent, au moyen d'un ratio SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> propre à chaque type de volcan, d'estimer les émissions de CO<sub>2</sub> par éruption. Les ratios CO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> par défaut d'EMEP 2019 sont utilisés : 1,5 pour les volcans de type « arc » et 4,125 pour les volcans de type « non-arc ».

Des émissions de particules peuvent être estimées à partir d'un flux moyen par éruption [405] et de la durée de l'éruption [406].

Les incertitudes liées à aux émissions volcaniques sont pour le moment très élevées.

NB : les émissions de GES des volcans ne sont pas rapportées dans le rapport NID pour la CCNUCC, même en mémoire. En effet, de façon générale, les sources naturelles ne sont pas rapportées à la CCNUCC, même en mémoire hors total national. En revanche, ces émissions apparaissent dans les sorties Secten en mémoire hors total national.

## Méthode d'estimation des émissions de gaz à effet de serre (NID) :

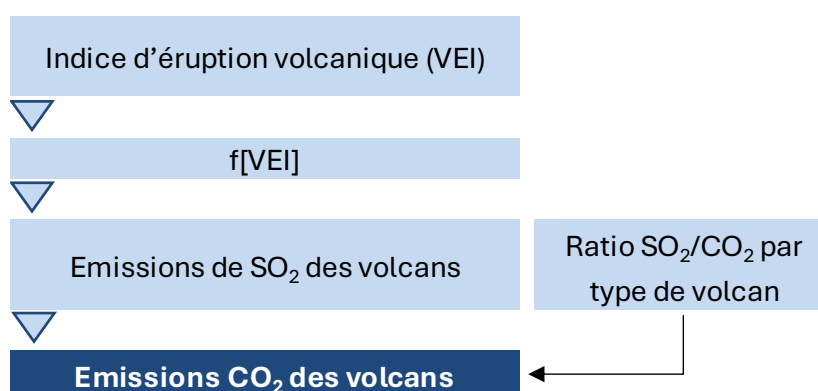
### Emissions de CO<sub>2</sub>

Les émissions de CO<sub>2</sub> sont déterminées à partir des émissions de SO<sub>2</sub> par éruption et d'un ratio SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> propre à chaque type de volcan [405]. Pour information, les émissions de SO<sub>2</sub> sont estimées par éruption à partir de l'indice d'éruption volcanique et du type de volcan.

## Méthode d'estimation des émissions de polluants (IIR) :

En France, les émissions des volcans ont toutes lieu en Outre-mer, en dehors du périmètre du rapportage CEE-NU, qui se limite à la métropole. Aucune émission n'est donc comptabilisée dans cette catégorie NFR.

Figure 2 : Logigramme du processus d'estimation des émissions



Date de mise à jour	Responsable	Date de validation	Vérificateur
13/02/2026	EtD	16/02/2026	EM

# Foudre

Cette section traite des émissions de NOx provoquées au cours des phénomènes orageux.

## Correspondance dans divers référentiels :

CCNUCC / CRT	Hors champ
CEE-NU / NFR	Hors champ
SNAPc (extension Citepa)	11.10.00
CE / directive IED	Hors champ
CE / E-PRTR	Hors champ
CE / directive GIC	Hors champ

## Approche méthodologique :

Activité	Facteurs d'émission
Nombre d'impacts de foudre	Valeur nationale par défaut

## Niveau de méthode GIEC :

Sans objet

## Références utilisées :

[299] METEO FRANCE – Données Meteorage (incrémentation permanente), <https://www.meteorage.com/fr/ressources/bilans-de-foudroiment-france/bilan-de-foudroiment-2023-en-france> (consulté le 14/11/2025)

[912] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 - 11.C Other natural sources B111000 Lightning 2023

# Caractéristiques de la catégorie (IIR) :

Les éclairs constituent une importante source naturelle d'oxydes d'azote. Bien que cette source produise moins de 20 % de NOx que les sources anthropiques, elle est la plus efficace en ce qui concerne la production d'ozone (O<sub>3</sub>). En effet, contrairement aux sources anthropiques qui produisent les NOx en surface, les éclairs les produisent en altitude où, le temps de vie des NOx est supérieur à celui qu'ils ont en surface et les réactions photochimiques sont favorisées. Ainsi, la production d'ozone est plus importante. Au cours des orages, les décharges électriques que constituent les éclairs provoquent localement des augmentations de température très fortes (jusqu'à 30 000 K) qui induisent une forte ionisation des molécules présentes, notamment celles d'oxygène et d'azote. Ce phénomène conduit à la formation de NO qui reste stable par l'effet de trempe lié à la baisse brutale de la température. Parmi les composés formés dans les décharges de foudre, seules les émissions de NO et le NO<sub>2</sub> (en équivalent NOx) sont rapportées.

Il convient de différencier les éclairs IC (de type nuage-nuage ou intra-nuage) et CG (de type nuage-sol). Les éclairs IC se produisent à des altitudes supérieures à environ 5 km et peuvent être négligés dans certains modèles de couche limite,

tandis que les éclairs CG peuvent atteindre le sol depuis environ 7 km d'altitude (au nord de 30° de latitude) ou 10 km d'altitude (au sud de 30° de latitude). Seuls les éclairs de type « nuage-sol », sont considérés. Les nuages de type « nuage-nuage » ne sont pas pris en compte (il a été rapporté que les rejets IC peuvent être jusqu'à dix fois moins efficaces dans la production de NOx que les rejets CG).

## Méthode générale d'estimation des émissions de polluants (IIR) :

L'activité est caractérisée par le nombre d'impacts de foudre et/ou d'arcs de foudre qui est recensé par les services météorologiques [299]. La répartition géographique de ces données est disponible. La valeur de l'année 1989 est appliquée rétrospectivement de manière uniforme à toutes les années antérieures.

Les émissions sont déterminées au moyen d'un facteur d'émission associé à l'activité.

## Méthode d'estimation des émissions de gaz à effet de serre (NID) :

Il n'y a pas d'émission de GES attendue.

## Méthode d'estimation des émissions de polluants (IIR) :

### **Emissions de NOx**

La foudre engendre la formation de NO. Les émissions sont égales au produit du nombre de moles de NO produit par Joule et l'énergie développée par un éclair. Le facteur d'émission est issu du Guidebook EMEP/EEA [912]. Le NO formé est distribué de manière décroissante avec la hauteur en fonction de la densité de l'air. Pour un éclair de 7 km, environ 20 % des émissions se produisent alors dans les 1 000 m les plus bas. Par conséquent, seulement 20% des émissions de NOx produites par éclair (produites à moins de 1 000 m) sont considérées dans l'inventaire.

$$CG_{NO} = E \times M$$

où :

- $CG_{NO}$  = NO produit par la partie nuage-sol de l'éclair,
- $E = 4 \times 10^8$  J par éclair nuage-sol,
- $M = 9 \times 10^{16}$  molécules NO/J.

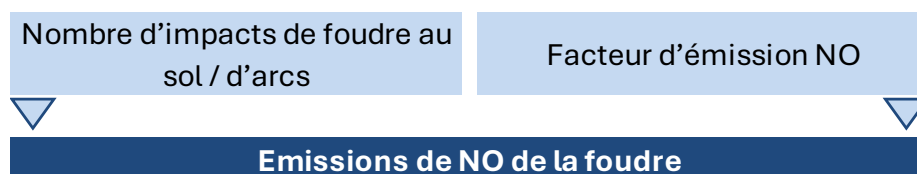
Calculé en unités de masse, on obtient 2,75 kg de NOx (en équivalent NO<sub>2</sub>) par éclair. Environ 20 % de cette quantité est supposée être émise en dessous de 1 km d'altitude pour prise en compte dans l'inventaire.



**Emissions des autres polluants**

Il n'est pas attendu d'émission pour les autres polluants que le NOx.

**Figure 3 : Logigramme du processus d'estimation des émissions**



# Crédit des illustrations

## Couverture

@ Pierre Yves BURGI / Unsplash

## Introduction (de gauche à droite)

@ Boudhayan BARDHAN / Unsplash

@ Johannes PLENIO / Unsplash

@ Pierre Yves BURGI / Unsplash

