

ARTICLES

Élaboration d'un cadastre d'émissions interrégional pour la plate-forme de modélisation de prévisions cartographiques ESMERALDA

Elaboration of an interregional emissions inventory for the modelling platform of cartographic previsions ESMERALDA

Jérôme CORTINOVIS*, Frédérique MORETO**,
Abderrazak YAHYAOU***, Anne SAUVAGE****, Laurent LETINOIS*****

Résumé

Cet article présente la méthodologie appliquée pour la constitution du cadastre d'émissions d'ESMERALDA. Ce cadastre couvre un domaine comprenant cinq régions (Ile-de-France, Haute-Normandie, Picardie, Champagne-Ardenne et Centre) récemment étendu au Nord-Pas-de-Calais. Pré-requis indispensable à toute modélisation de la qualité de l'air, cet inventaire doit pouvoir allier exhaustivité des sources avec simplicité de mise à jour des données. La méthodologie repose donc sur des données simples (consommations énergétiques, facteurs d'émission...) obtenues auprès de différents organismes nationaux (INSEE, SESSI...) et internationaux (IPCC, IER...). Les sources d'émission sont identifiées suivant des considérations géométriques portant sur leurs émissions. Trois grandes catégories ont ainsi été prises en compte : ponctuelle, surfacique et linéique. Les émissions anthropiques et biogéniques annuelles ainsi calculées sont alors projetées sur une grille kilométrique en utilisant des clefs de répartition telles que l'occupation du sol. Cette étude met en exergue la richesse et l'importance des données sources qui constituent le fondement d'un cadastre d'émissions pour un modèle de prévision de la qualité de l'air. Les cartes d'émissions et les tableaux de synthèses élaborés pour les polluants soumis à réglementations (i.e. NO_x, COVNM, PM₁₀, SO₂, CO, CO₂, CH₄) font état de cette diversité. Si la région parisienne apparaît comme le plus gros émetteur tous polluants confondus, les résultats par polluant sont plus nuancés. La Haute-Normandie rejette en effet la plus importante quantité de SO₂, la région Centre et la Picardie se sont révélées comme de forts émetteurs de COVNM et de NO_x pour la première et de CO pour la deuxième. Par ailleurs, si l'Ile-de-France présente des émissions très majoritairement anthropiques, les autres régions voient l'émission de certaines espèces (NO_x et COVNM) nettement influencée par les sources biogéniques. Par exemple, en Champagne-Ardenne, 70 % des COVNM sont émis par les forêts. Pour sa pérennité, ce cadastre sera remis à jour périodiquement en fonction de l'importance et de la fréquence de réactualisation des bases de données servant à son élaboration. Le modèle de prévision d'ESMERALDA sera ainsi initialisé par des émissions récentes.

Abstract

This article focus on the methodology developed for the elaboration of the ESMERALDA emissions inventory. This inventory covers a large domain including five regions (Ile-de-France, Haute-Normandie, Picardie, Champagne-Ardenne and Centre) recently extended to the Nord-Pas-de-Calais region. Essential required tool for any air quality modeling exercise, this inventory has to combine data exhaustiveness with simple updating. This methodology is based on simple data obtained from national (INSEE, SESSI...) and international (IPCC, IER...) agencies periodically updated for energy consumptions and for emission factors. The different sources are identified following geometrical considerations on their emissions. Three emission categories are introduced: great point sources, surface sources and linear sources. Calculated anthropogenic and biogenic

* AIR NORMAND – 21, avenue de la Porte des Champs – 76000 Rouen – E-mail : jerome.cortinovis@airnormand.fr

** AIRPARIF – 7, rue Crillon – 75004 Paris.

*** LIG'AIR – 135, rue du Faubourg Bannier – 45000 Orléans.

**** ATMO Picardie – 44, rue Alexandre Dumas – 80094 Amiens.

***** ATMO Champagne-Ardenne – 2, esplanade Roland-Garros BP 236 – 51686 Reims Cedex 2.

annual emissions are then projected on a kilometric grid using spatial repartition keys as ground occupations. This study points out the richness and the importance of the data sources constituting the emissions inventory basement for an air quality prevision model. Emissions maps and synthesis tables elaborated for pollutants under regulations (i.e. NO_x, NMVOC, PM₁₀, SO₂, CO, CO₂, CH₄) highlight this diversity. If the Paris region appears to be the greatest emitter all pollutants taken into account, the results are more nuanced for each pollutant. The Haute-Normandie region rejected the biggest amount of SO₂, Centre and Picardie regions are strong emitters of NMVOC and NO_x for the first one and CO for the second one. If the Ile-de-France region is more influenced by anthropogenic emissions, in the other regions some chemical species (NO_x and NMVOC) are strongly influenced by biogenic emissions. For example, in the Champagne-Ardenne region, 70 % of NMVOC emissions are due to forests sources. For the durability, this emissions inventory will be periodically updated depending on the availability and the updating frequency of the data bases used for its elaboration. The prevision model ESMERALDA will be then initialized with recent emissions.

Glossaire

- AASQA : Association agréée de surveillance de la qualité de l'air.
- CEREN : Centre d'études et recherche économique sur l'énergie.
- CH₄ : méthane.
- C₆H₆ : benzène.
- CITEPA : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique.
- CNRS : Centre national de la recherche scientifique.
- CO : monoxyde de carbone.
- CO₂ : dioxyde de carbone.
- COPERT : computer programme to calculate emissions from road transport.
- CORINAIR : core inventory of air emissions in Europe.
- CORINE : co-ordination of information on the environment.
- COVNM : composés organiques volatils non méthaniques.
- CPDP : Comité professionnel du pétrole.
- DDE : Direction départementale de l'équipement.
- DREIF : Direction régionale de l'équipement d'Ile-de-France.
- DRIRE : Direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement.
- EEA : european environment Agency.
- EPA : environmental protection Agency.
- ESMERALDA : études multirégionales de l'atmosphère.
- GENEMIS : generation of european emission data for episodes.
- GES : gaz à effet de serre.
- GIC : grandes installations de combustion.
- GSP : grande source ponctuelle.
- HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques.
- HFC : hydrofluorocarbures.
- IER : Institut für energiewirtschaft und rationelle energieanwendung.
- IFEN : Institut français de l'environnement.
- INRA : Institut national de la recherche agro-nomique.
- INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques.
- IPCC : intergovernmental panel on climate changes.
- IPSL : Institut Pierre-Simon Laplace.
- IRIS : îlots regroupés pour l'information statistique (IRIS-2000).
- LMD : Laboratoire de météorologie dynamique.
- LOTOS : long term ozone simulation project.
- NAF : nomenclature d'activités française.
- NH₃ : ammoniac.
- NO : monoxyde d'azote.
- NO₂ : dioxyde d'azote.
- NO_x : oxydes d'azote (NO + NO₂)
- N₂O : protoxyde d'azote.
- OFEFP : Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage.
- PAR : rayonnement photo synthétiquement actif.
- PCDD/F : dioxines et furanes.
- PFC : perfluorocarbures.
- PM₁₀ : particules en suspension d'un diamètre inférieur ou égal à 10 µm (inclut PM_{2,5}).
- PM_{2,5} : particules en suspension d'un diamètre inférieur ou égal à 2,5 µm.
- SCEES : Service central des enquêtes et des études statistiques.
- SETRA : Service d'études techniques des routes et autoroutes.
- SESSI : Service des études et des statistiques industrielles.
- SF₆ : hexafluorure de soufre.
- SIER : Service interdépartemental d'exploitation routière.
- SIG : système d'information géographique.
- SIRENE : système national d'identification et répertoire des entreprises et de leurs établissements.
- SNAP : selected nomenclature for sources of air pollution.
- SNCF : Société nationale des chemins de fer.
- SO₂ : dioxyde de soufre.
- STNA : Service technique de la navigation aérienne.
- TGAP : taxe générale sur les activités polluantes.
- UIOM : unité d'incinération d'ordures ménagères.
- VNF : voie navigable de France.

- ATMO Picardie, association régionale de Picardie ;
- LIG'AIR, association régionale de la région Centre.

Le domaine d'ESMERALDA retenu correspond à un rectangle de 441 km du nord au sud et de 468 km d'est en ouest centré sur l'Ile-de-France et contenant intégralement les régions des cinq AASQA (Figure 1). Il comprend donc les régions Haute-Normandie, Ile-de-France, Champagne-Ardenne, Picardie et Centre, ainsi qu'une partie des régions Lorraine, Franche-Comté, Poitou-Charentes, Pays de la Loire, Basse-Normandie et Bourgogne, régions qui n'ont pas participé à cet inventaire. Son extension est prévue avec l'introduction de la région Nord-Pas-de-Calais. Ce domaine est représenté au travers d'un maillage régulier et homogène de résolution $1 \times 1 \text{ km}^2$.

Cette zone englobe l'ensemble du grand bassin parisien avec des sources très diverses.

2.2 La population

Ce domaine interrégional comprend environ 31 % de la population française, soit 18 371 000 habitants (en incluant la région Nord-Pas-de-Calais, cette proportion atteint 38 % soit 22 368 000 habitants). Les régions Centre, Champagne-Ardenne et Picardie présentent des densités de population inférieures à la moyenne nationale ($106 \text{ habitants/km}^2$) avec respectivement 62, 52 et $96 \text{ habitants/km}^2$. La forte densité de population francilienne (plus de $911 \text{ habitants/km}^2$) va induire de fortes consommations d'énergie dans les secteurs tertiaire et résidentiel sur l'ensemble de la région Ile-de-France. En Haute-Normandie (densité autour de $145 \text{ habitants/km}^2$), comme dans les trois autres régions, les besoins énergétiques les plus importants vont surtout se localiser dans les grandes villes (par exemple Rouen, Le Havre et Evreux pour la Haute-Normandie). Les principales sources d'émiss-

sions associées à ces consommations sont les grandes chaufferies urbaines présentes dans toutes ces villes du domaine ainsi que le chauffage individuel utilisant le fioul, le bois ou le charbon.

2.3 Relief et impact sur la circulation atmosphérique

Le relief du domaine est relativement contrasté. L'Ile-de-France s'identifie surtout par ses vastes plaines (la Beauce et la Brie), tout comme la région Centre et la Picardie. Par opposition, la Champagne-Ardenne est caractérisée par une alternance de plaines, de plateaux plus marquée (plateau de Langres) et de vallées fluviales avec au nord le massif pré-ardennais profondément entaillé par la Meuse.

La Haute-Normandie présente un relief côtier très accidenté (présence de falaises). Ces caractéristiques côtières vont induire une circulation des masses d'air en basse altitude relativement complexe. Les effets des brises de terre et des brises de mer vont impliquer une recirculation de la pollution pendant l'été.

La vallée de la Seine va aussi jouer un rôle important dans l'écoulement de la pollution. Par exemple, le méandre de la Seine à Rouen peut provoquer par un effet de cuvette une stagnation de la pollution sous certaines conditions météorologiques.

2.4 Les espaces naturels et agricoles

Les forêts occupent une surface importante du domaine, équivalente à environ 2 460 000 ha (Figure 2). Le tableau 1 reprend les taux d'occupation des forêts pour chaque région. Les espaces forestiers représentent un peu plus de 22 % de la surface totale du domaine.

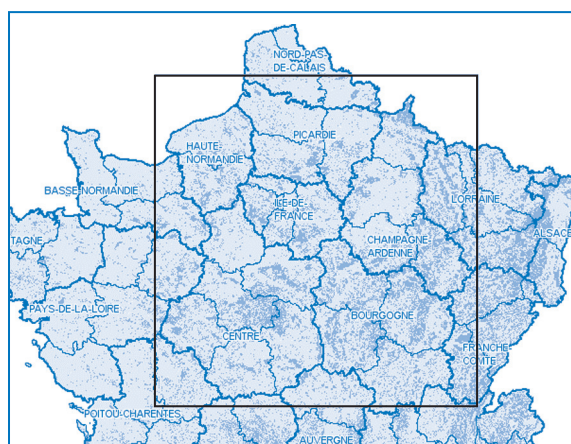


Figure 2.

Zones forestières (toutes espèces confondues)
présentes dans le domaine ESMERALDA (en noir).
(Source IFN)

Forests areas (all species included)
inside the ESMERALDA domain (in black).
(Source IFN)

Tableau 1.
Surfaces et taux d'occupation des forêts
dans les régions du domaine ESMERALDA.
(Source : IFN)

Regional surfaces and occupation ratios
of forest areas in the ESMERALDA domain.
(Source: IFN)

Régions	Surface forêts (ha)	Surface régions (ha)	Taux d'occupation (%)
Haute-Normandie	236 880	1 231 700	20
Ile-de-France	282 610	1 201 200	24
Picardie	323 200	1 939 900	17
Centre	928 800	3 915 100	24
Champagne-Ardenne	691 550	2 560 600	27

Les vastes forêts de la région Centre, de la Champagne-Ardenne (Ardennes et Haute-Marne) et du sud de l'Ile-de-France représentent une source de composés organiques volatils (COVNM) biogéniques non négligeable dans l'inventaire d'ESMERALDA.

L'agriculture recouvre une superficie considérable du domaine d'étude (Tableau 2). Le recensement agricole de l'année 2000 a permis d'estimer la surface agricole utilisée totale à environ 6 645 000 ha.

Les espaces agricoles occupent en moyenne 61 % du territoire. L'agriculture est un secteur d'activité très productif (la région Centre est la première région céréalière d'Europe et la Champagne-Ardenne occupe le premier rang national pour la production de fourrages déshydratés, soit la moitié de la production européenne). Les émissions agricoles sont donc très diffuses et sont surtout liées à la quantité d'engrais apportée sur chaque culture. Cette source prend toute son importance par l'émission de précurseurs de l'ozone (les oxydes d'azote NO_x), surtout au printemps et en été, et toute l'année par l'émission de gaz à effet de serre (méthane CH_4 et protoxyde d'azote N_2O).

Notons, par ailleurs, que ces territoires agricoles reçoivent des quantités conséquentes de produits phytosanitaires. Leurs répercussions sur la qualité de l'air font l'objet d'études régulières de la part des AASQA, avec par exemple les études menées par ATMO Champagne-Ardenne et LIG'AIR [6, 7].

Tableau 2.

Surfaces et taux d'occupation des zones agricoles dans les régions du domaine ESMEALDA

(Source : Agreste – recensement agricole 2000).

Surfaces and occupation ratios of agricultural areas in the ESMEALDA domain

(Source : Agreste – recensement agricole 2000).

Régions	Surfaces agricoles utilisées (ha)	Surfaces régions (ha)	Taux d'occupation (%)
Haute-Normandie	794 026	1 231 700	64,5
Ile-de-France	583 246	1 201 200	48,5
Picardie	1 341 461	1 939 900	69
Centre	2 365 694	3 915 100	60
Champagne-Ardenne	1 560 325	2 560 600	61

2.5 L'industrie

La répartition sectorielle des emplois salariés industriels est relativement homogène entre la production des biens de consommation (habillement, imprimerie, pharmacie...), des biens d'équipement (construction ferroviaire, équipements électroniques et mécaniques) et des biens intermédiaires (textile, bois, papier, chimie, métallurgie...) en Ile-de-France (Tableau 3). Cette région comprend de nombreux pôles industriels dans la couronne extérieure alors que Paris intra-muros concentre essentiellement les sièges sociaux.

Par contre, dans les autres régions, la production de biens intermédiaires compte une bonne part des effectifs (60 % en Champagne-Ardenne, 57 % en Picardie, 46 % en Haute-Normandie et 42 % en région Centre). Par exemple, l'industrie pétrochimique est très développée dans la vallée de la Seine entre le Havre et Rouen où se trouvent la plupart des raffineries.

2.6 Les transports

La couronne parisienne constitue le cœur du tissu routier interrégional avec une très forte concentration journalière de véhicules (près de 172 millions de kilomètres parcourus par jour ouvrable pour l'année 2000). Ce réseau périphérique représente une source de pollution majeure (étude d'AIRPARIF autour de la Porte de Bagnolet [8]).

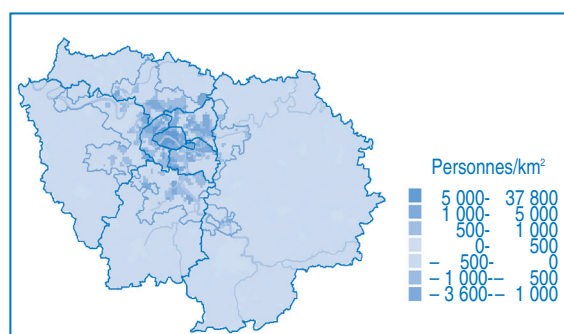


Figure 3.

Différence de densité de population entre le jour et la nuit en Ile-de-France.

Density of population differences between nighttimes and daytimes in Ile-de-France region.

Tableau 3.

Effectifs salariés par région et par secteurs d'activités en 1999.

(Source : SESSI)

Number of salaried employees per region and per activity in 1999.

(Source : SESSI)

	Biens de consommation	Automobiles	Biens équipement	Biens intermédiaires	Énergie	Total
Ile-de-France	152 000	48 000	152 000	127 000	64 900	543 900
Champagne-Ardenne	13 700	4 000	12 500	49 000	3 700	82 900
Haute-Normandie	17 500	14 700	24 000	54 000	8 100	118 300
Picardie	20 300	6 600	19 500	65 500	3 300	115 200
Centre	38 300	11 000	29 400	64 000	11 000	153 800

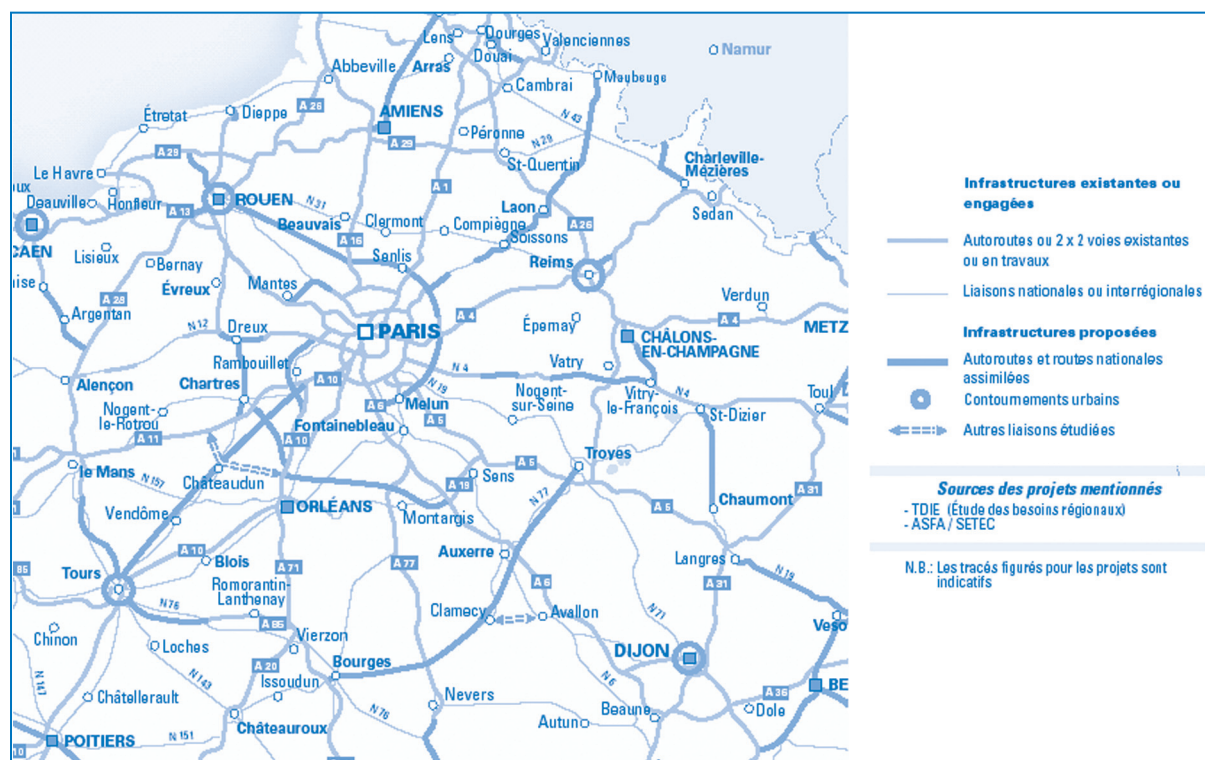


Figure 4.

Réseau routier du domaine.

(Source : Conseil national des transports – novembre 2003)

Road network of the domain.

(Source: Conseil national des transports – novembre 2003)

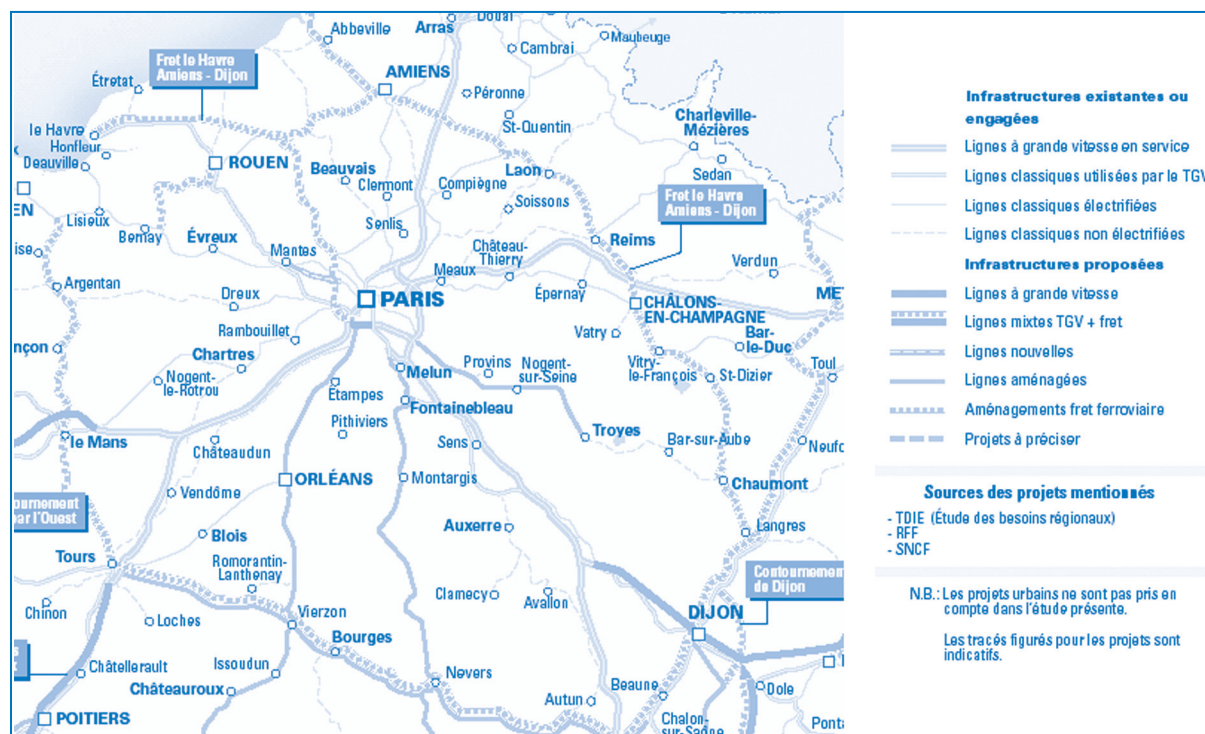


Figure 5.

Réseau ferroviaire du domaine.

(Source : Conseil national des transports – novembre 2003)

Rail network of the domain.

(Source: Conseil national des transports – novembre 2003)

Les abords de la capitale présentent une infrastructure routière et ferroviaire très développée (Figures 4 et 5) caractérisée par des flux de population considérables. La figure 3 atteste de ces mouvements dans cette zone : déplacement vers Paris intra-muros la journée et retour vers la périphérie en soirée.

Dans les autres régions du domaine, le transport routier (axes autoroutiers : A1, A4, A5, A6, A10, A11, A13, A16, A26, A29...) et ferroviaire sont en pleine expansion à cause de la dispersion de l'habitat et la proximité de Paris (Figures 4 et 5). Les grandes lignes du réseau ferroviaire desservent les villes de Rouen, Lille, Strasbourg et Bordeaux, auxquelles vient s'ajouter toute l'infrastructure d'Ile-de-France (Figure 5).

Les autres régions du domaine sont des régions de transit entre l'Ile-de-France, les façades atlantique et méditerranéenne et les pays européens limitrophes. Ceci leur vaut d'être traversées par des flux croissants de marchandises et de populations [9].

La Seine constitue une voie privilégiée pour le trafic maritime et fluvial (Figure 6), avec un mouvement conséquent de navires marchands et de voyageurs aux abords des ports du Havre et de Rouen jusqu'à l'agglomération parisienne. Des études sont en cours pour juger de la pertinence d'une liaison fluviale directe entre le Havre et Paris [9].

Enfin, les aéroports franciliens Roissy-Charles de Gaulle et Orly (étude menée par AIRPARIF [10]) et l'aéroport de Beauvais (étude menée par ATMO Picardie [11]) conditionnent l'essentiel du trafic aérien civil sur le domaine d'étude.

Le nombre considérable de déplacements entrant ou sortant du domaine ESMERALDA quel que soit le mode de transport en fait une source importante de polluants primaires tels que NO_x, CO, CO₂ et PM₁₀.

3. Méthodologie générale et données sources du cadastre des émissions

Un des objectifs d'un cadastre d'émissions est de pouvoir documenter le modèle de qualité de l'air sur les polluants atmosphériques émis par les différentes sources recensées (industries, transports, agriculture, sources biogéniques...).

3.1 Quelle approche ?

La méthode d'élaboration retenue est basée sur l'approche *bottom up* qui consiste à croiser une information statistique de base avec des facteurs d'émission unitaires dépendant de l'activité émettrice caractérisée par son code SNAP (*Selected Nomenclature for sources of Air Pollution*, EMEP/CORINAIR 1997).

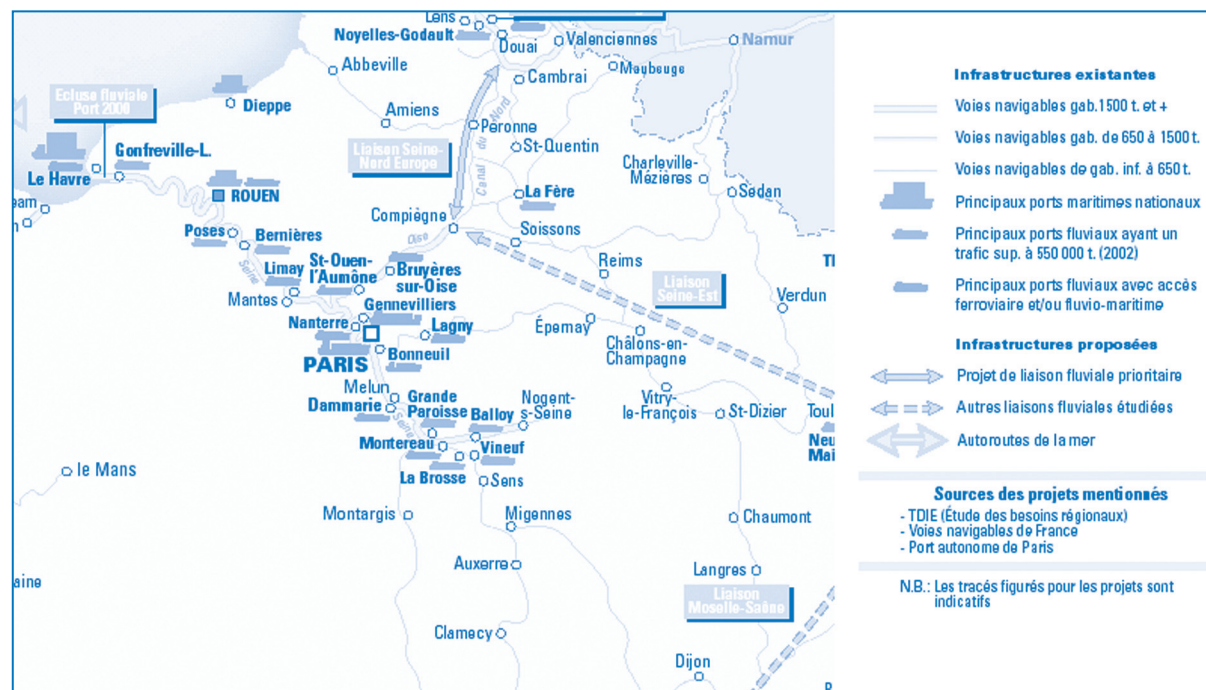


Figure 6.

Réseau maritime et fluvial du domaine.
(Source : Conseil national des transports – novembre 2003)
Maritime and river network of the domain.
(Source: Conseil national des transports – november 2003)

Le cadastre d'émissions d'ESMERALDA est basé sur l'année 2000. Dans la mesure du possible, les informations de base ont été collectées pour l'année 2000. Seules les informations statistiques qui proviennent du dernier recensement général de l'INSEE et les consommations énergétiques fournies par le CEREN sont relatives à l'année 1999.

Dans un premier temps, les émissions annuelles sont calculées au niveau administratif le plus fin (« IRIS-2000[®] »*, commune, département...) sous forme de bilan, puis dans un deuxième temps, elles sont spatialisées selon une grille en utilisant des clefs de répartition spatiales telles que l'occupation du sol.

Chaque source d'émissions est classée selon la nomenclature SNAP développée par l'Union européenne dans le cadre du projet CORINAIR [12]. Cette nomenclature comporte 11 niveaux, chacun étant lui-même divisé en sous-niveaux (Annexe 1).

3.2 Quelles espèces chimiques dans l'air ambiant ?

Les espèces chimiques répertoriées dans cet inventaire sont les suivantes :

- polluants réglementés dans l'air ambiant : le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO), les particules (PM₁₀), le benzène (C₆H₆) ;
- polluants faisant l'objet d'une surveillance : l'ammoniac (NH₃) ;
- principaux gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) ;
- polluants indispensables à la modélisation : les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM).

D'autres polluants sont en cours d'intégration : hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), métaux toxiques (nickel, arsenic, cadmium, mercure, plomb), les perfluorocarbures (PFC), les hydrofluorocarbures (HFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆). D'autres encore sont en cours de validation : dioxines et furanes (PCDD/F), l'acide chlorhydrique (HCl).

3.3 Quelles sources ?

On distingue les sources d'émissions selon des considérations géométriques portant sur les émissions. Trois grandes catégories d'émission ont ainsi été prises en compte :

- les grandes sources ponctuelles (GSP) qui regroupent les installations fixes parfaitement identifiées dont les rejets excèdent un certain seuil. Ce seuil constitue une spécification propre à chaque inventaire. Dans le cadre du présent inventaire, le critère retenu a été de considérer comme GSP l'ensemble des

sources soumises à la TGAP (établissements dont la puissance est supérieure à 20 MW ou dont les émissions annuelles de SO₂, NO_x exprimé en équivalent NO₂ et COV excèdent 150 tonnes) ainsi que les installations de traitement des déchets ;

- les sources linéiques qui regroupent les émissions du trafic routier, du trafic ferroviaire et du trafic fluvial ;
- les sources surfaciques qui représentent les sources d'émissions qui n'ont pas été comptabilisées dans les autres types de sources. On peut citer par exemple : les émissions du chauffage domestique, les sources biogéniques, les petites sources industrielles, le trafic diffus sur le réseau fin urbain.

Les activités aéroportuaires représentent des sources d'émissions tout à fait particulières qui seront réparties en plusieurs catégories. En effet, les activités aéroportuaires regroupent des grandes sources ponctuelles industrielles (centrales thermiques), des émissions surfaciques telles que les engins spéciaux utilisés sur les zones aéroportuaires (tracteurs/pousseurs des avions, transporteurs de bagages, groupes électrogènes thermiques...) ou les émissions fixes diffuses propres à l'activité aéroportuaire (avitaillement des avions, opérations d'antigivrage/dégivrage des avions, maintenance des avions...), enfin des sources volumiques qui correspondent aux mouvements des avions.

L'annexe 1 présente pour chaque code d'activité SNAP, le type de source qui lui a été associé.

3.4 Quels traitements ?

3.4.1 Traitement des sources industrielles

Les émissions des grandes sources industrielles sont issues des émissions déclarées à la DRIRE ou des questionnaires sur les grandes installations de combustion (GIC). Tous les polluants n'étant pas soumis à déclaration, les émissions manquantes ont été calculées à partir des données de consommations énergétiques présentes dans ces questionnaires couplées à des facteurs d'émission européens CORINAIR [12]. Ces émissions appartiennent aux catégories SNAP : 01, 02, 03 et 04. Chaque émissaire est associé à des caractéristiques thermodynamiques (hauteur, diamètre, température et vitesse d'éjection). En cas d'indisponibilité de ces paramètres dans la TGAP, des valeurs moyennes ont été appliquées en tenant compte de la catégorie SNAP.

Toutes les émissions de la SNAP 01 ont pu être traitées à partir des déclarations à la DRIRE ou des questionnaires GIC.

Les émissions de la SNAP 02 qui concernent les combustions hors industrie (essentiellement combustions dans les secteurs résidentiels et tertiaires) ont été calculées à partir des données énergétiques du CEREN, et des fichiers statistiques de l'INSEE (IRIS

* L'iris est un sous-découpage du territoire défini par l'INSEE et représentatif d'une zone d'activité, d'une zone naturelle ou d'une zone résidentielle de 2 000 habitants au moins.

Profil relatifs aux logements pour le résidentiel et fichiers SIRENE pour les secteurs tertiaires et agricoles). Pour le secteur résidentiel, le CEREN fournit les consommations énergétiques par type de fuel et par type de chauffage de la région. Ces consommations ont été réparties selon les entités géographiques IRIS-2000®, établies par l'INSEE en utilisant le nombre de logements par mode de chauffage donné par IRIS par l'INSEE. Les consommations ainsi obtenues au niveau de IRIS-2000 sont croisées avec des facteurs d'émissions (CORINAIR ou LOTOS [12, 13]) pour donner les émissions liées à la combustion résidentielle (SNAP 0202) au niveau de chaque iris.

Les émissions des autres sources industrielles (SNAP 03 et 04) ont été traitées, en grande majorité, comme des sources diffuses surfaciques et ont fait l'objet d'un bouclage énergétique sur les consommations énergétiques régionales de l'enquête CEREN.

Les émissions sont calculées à partir des données énergétiques moyennes par salarié et par code NAF (disponibles auprès du SESSI) et de la répartition du nombre de salariés par code NAF et par commune des fichiers SIRENE de l'INSEE. Le principe est de coupler le nombre de salariés par commune et par activité émettrice avec la consommation énergétique par salarié attribuée à cette activité pour obtenir une consommation énergétique totale par commune attribuée à un code NAF et donc consécutivement à un code SNAP. Cette consommation énergétique couplée aux facteurs d'émissions de la SNAP considérée aboutit à une émission sur la commune pour ce code SNAP.

Une partie des émissions de la SNAP 04 proviennent de grandes sources ponctuelles et ont donc été traitées à partir des dossiers de déclarations à la DRIRE comme mentionné précédemment.

Les émissions classifiées dans la SNAP 05 (distribution d'essence) sont calculées en croisant les livraisons de carburants fournies par le CPDP (Comité professionnel du Pétrole) au niveau régional et des facteurs d'émission de l'OFEFP [14]. La spatialisation de ces émissions au niveau de la commune a été faite en utilisant le nombre de sociétés répertoriées selon le code NAF 505z par l'INSEE.

Les émissions classifiées dans la SNAP 06 associées à l'utilisation de solvants, sont calculées sur la base du nombre de salariés des activités d'utilisations de solvants pour ce qui concerne le domaine industriel ou la population pour ce qui concerne les usages domestiques. Cette répartition spatiale à l'IRIS est basée sur le fichier SIRENE de l'INSEE. Les facteurs d'émission utilisés proviennent de l'IER.

Les émissions associées à la SNAP 09 regroupent les émissions des usines d'incinération et de traitement des déchets et les émissions des centres techniques d'enfouissement des déchets communément appelés « décharges ». Les usines d'incinération et de traitement des déchets ont été traitées comme des GSP et proviennent des déclarations à la DRIRE. Par contre, les émissions des décharges ont

été calculées par croisement des tonnages de déchets mis en décharge fournis par les DRIRE avec des facteurs d'émissions IPCC [15].

3.4.2 Traitement des sources

*liées au transport routier, ferroviaire,
fluvial, maritime et aérien
(sources surfaciques et linéiques)*

Une attention toute particulière a été portée au transport routier sur l'ensemble des régions. L'Ile-de-France (SNAP 07) dont le réseau routier est le plus dense de France fait l'objet d'un calcul spécifique puisqu'il est issu de la chaîne de calcul des émissions en temps réel développée par AIRPARIF et dont les résultats sont disponibles tous les jours sur le site Internet (www.airparif.asso.fr).

L'évaluation du trafic routier de l'Ile-de-France pour l'année 2000 a été réalisée en collaboration avec la DREIF, les services de la Voirie de Paris et le bureau d'études SETEC dans le cadre du projet européen Heaven, sur la base des historiques de trafic. Le réseau francilien est représenté par 39 942 brins pour lesquels des évolutions de flux de trafic, de vitesse moyenne, de fraction à froid sont décrites heure par heure pour une vingtaine de jours types (jour ouvrable, samedi, dimanche, vacances scolaires, jour férié, jour ouvrable du mois d'août...). Les émissions sont ensuite calculées à partir de ces évaluations de trafic en les couplant avec les facteurs d'émission européens COPERT III [16]. Ce calcul d'émission prend en compte la vitesse, la fraction des véhicules circulant moteur froid, la température ambiante, la répartition en grandes catégories de véhicules sur les brins en fonction de l'heure [17-19] décrite selon le type de voirie considéré (urbaine, routière, autoroutière) et la décomposition technologique du parc roulant de l'année 2000 [17-18] qui correspond à une adaptation du parc roulant national proposé par l'ADEME. Le principe est de coupler le flux de trafic d'un brin avec le facteur d'émission qui correspond à la vitesse du brin, au pourcentage de moteurs circulant à froid, à la température ambiante, à la saison et au parc roulant technologique et ce, pour chaque heure de la journée d'un jour ouvrable moyen en trafic, d'un samedi et d'un dimanche. Les résultats d'émissions journaliers sont ensuite ramenés à des résultats annuels.

Le trafic routier hors Ile-de-France a été décomposé en deux types de sources : des sources linéiques correspondant à des axes pour lesquels des données de comptage existent et des sources diffuses qui correspondent au trafic non renseigné par des données de comptage. Le trafic des grands axes est bien caractérisé spatialement car les positions géographiques des brins des voies routières sont connues de façon précise. Ce trafic a ainsi été traité en linéique avec pour données de base, d'une part les données SIG du SETRA sur des trafics autoroutiers et nationaux, et d'autre part les cartes de trafic des différents départements concernés pour l'année 2000 fournies par la direction départementale de l'équipement (DDE) et les conseils généraux.

Pour chacun des grands axes pour lesquels il existe des données fiables de trafic (autoroutes, nationales et départementales structurantes), la SETEC a exploité les fichiers de comptages selon les mêmes principes que lors du projet Heaven afin d'obtenir les différentes moyennes de débits de trafic pour les différentes tranches horaires suivantes :

Jour ouvrable 0-6 h	Samedi, dimanche et fête : 21-02 h
Jour ouvrable 6-10 h	
Jour ouvrable 10-12 h	Dimanche et fête : 02-08 h
Jour ouvrable 12-14 h	
Jour ouvrable 14-16 h	Dimanche et fête : 12-14 h
Jour ouvrable 16-20 h	
Jour ouvrable 20-24 h	Dimanche et fête : 14-18 h
Samedi 0-8 h	
Samedi 8-10 h	Dimanche et fête : 18-21 h
Samedi 12-14 h	
Samedi 14-18 h	Dimanche et fête : 21-24 h
Samedi 18-21 h	

Le trafic diffus a été calculé ensuite par différence sur la base du chiffre national de 23,4 km parcourus par jour et par habitant.

Les engins mobiles, autres que le transport routier, appartiennent à la SNAP 08 :

- concernant les émissions liées aux mouvements des avions des principales plates-formes aéroportuaires franciliennes, le calcul des émissions s'est appuyé sur les recommandations du guide EPA [20] ainsi que sur la méthodologie de calcul des émissions aéroportuaires développée par le CITEPA [21] pour le Service technique de la navigation aérienne (STNA) ;
- les émissions associées au trafic ferroviaire sont calculées sur la base de données de trafic des locomotives diesel fournies par la SNCF et de facteurs d'émission prenant en compte le type de locomotive diesel, le type de conduite et le type d'activité (voyageurs, fret...) ;
- les émissions associées au trafic fluvial sont calculées à partir des tonnes de marchandises transportées par kilomètre parcouru obtenues auprès de Voies navigables de France (VNF) [22] ;
- en ce qui concerne les émissions maritimes (SNAP 0804), les facteurs d'émissions utilisés sont identiques sur l'ensemble des ports et issus de l'US EPA [23]. Ils sont fonctions de la puissance des moteurs : ces puissances varient selon le type de bateaux, leurs régimes moteur et le tonnage transporté par bateau. Les types de navires considérés sont : les pétroliers, les cargos, les navires avec conteneur, les bateaux de croisière et ferries, les remorqueurs et avitaillement, tous les types de bateaux lestés (pétroliers, cargos, porte-containers...). On différencie ensuite les émissions selon que ces navires utilisent leurs moteurs principaux (pour la navigation – en haute mer et sur la Seine – et les manœuvres d'approche) ou auxiliaires (pour la navigation sur la Seine, les manœuvres d'approche et le stationne-

ment à quai). Des facteurs d'émissions spécifiques sont alors définis pour l'utilisation des moteurs auxiliaires. Outre ces facteurs, les émissions sont calculées à partir des données suivantes : le nombre de bateaux, leur nombre de mouvements, leur puissance et le temps associé à chaque régime moteur par type de bateau. L'ensemble de ces informations est fourni par les ports autonomes (par exemple, le Havre et Rouen). L'emploi de facteurs d'émission d'origine américaine peut induire quelques biais, notamment dans la définition des puissances et les tonnages susceptibles d'être transportés par les bateaux ;

- les émissions des engins mobiles agricoles ont été calculées en couplant les facteurs d'émissions CORINAIR [12] avec le nombre d'engins agricoles recensés par puissance par l'AGRESTE (Statistiques et études sur l'agriculture, la forêt, les industries agroalimentaires, l'occupation du territoire, les équipements et l'environnement en zone rurale).

3.4.3 Traitement des sources biogéniques : forêts et agriculture (sources surfaciques)

Les forêts émettent des COVNM. L'agriculture est source de NO, N₂O, NH₃, CH₄ (élevage) et de PM₁₀.

Le calcul des émissions par les sources forestières (SNAP 11) est basé sur le calcul de potentiels d'émission à la résolution du kilomètre carré dont la méthodologie a été développée au Laboratoire d'aérodologie par Fabien Solmon et Robert Rosset de l'université de Toulouse [24-26]. Ils se sont basés sur l'inventaire national forestier pour obtenir la distribution spatiale des arbres par essence. Vingt-quatre essences d'arbres ont été différenciées. Des facteurs d'émission spécifiques à chaque essence d'arbre de l'inventaire ont été utilisés pour calculer les potentiels d'émissions d'isoprène et de monoterpènes. Ces potentiels d'émissions sont ensuite modulés selon la température et, dans le cas de l'isoprène, le rayonnement actif photosynthétique (PAR).

Les émissions de NO par l'agriculture (SNAP 10) sont traitées à partir d'un algorithme développé à l'INRA de Grignon, qui tient compte de la quantité d'azote sous la forme ammoniacale apportée aux cultures, de la température de l'air et de l'humidité du sol [28]. La spatialisation de ces émissions à l'échelle régionale est réalisée grâce aux enquêtes réalisées en 2000 par le SCEES (AGRESTE) dans le cadre du Recensement général agricole (RGA). La spatialisation de ces émissions s'est faite en se basant sur la répartition des cultures et prairies du CORINE LAND COVER (IFEN, 2000). Les émissions de NH₃ et de N₂O (SNAP 10) sont déterminées par le produit des quantités d'engrais apportées par les facteurs d'émissions de l'agence européenne de l'environnement (EEA, 2001) [12].

3.5 Quelle résolution temporelle ?

À partir de ce cadastre annuel, on calcule des émissions horaires pour chacun des mois et pour chaque jour. Pour cela, des profils de modulations

mensuelles, journalières et horaires sont appliqués à chaque code SNAP. Ces profils sont définis à partir de sources européennes (GENEMIS), bibliographiques et industrielles. Les profils utilisés pour le trafic routier sont issus des observations en temps réel obtenues dans le cadre de la chaîne de calcul des émissions du trafic routier en temps réel développée par AIRPARIF pour l'Ile-de-France et sont issus d'une étude approfondie de l'historique de trafic sur l'année 2000 pour les autres régions. Dans le cadre de la prévision de la qualité de l'air par la plate-forme ESMERALDA, les émissions du trafic routier de l'Ile-de-France sont celles calculées en temps réel à partir des boucles de comptage de trafic de la ville de Paris et du SIER. Pour les autres régions, les émissions du trafic routier sont celles calculées à partir du cadastre annuel et des modulations temporelles. Par ailleurs, les émissions biogéniques de COVNM et de NO_x liées aux épandages d'engrais qui alimentent ESMERALDA sont recalculées chaque heure à partir de la température ambiante et/ou du rayonnement photo-synthétiquement actif (PAR) obtenu à partir du rayonnement incident.

3.6 Quelles spéciations ?

Les NO_x ont été classiquement répartis en 20 % de NO₂ et 80 % de NO. Les émissions de COVNM totaux sont spéciées selon la matrice de spéciation développée par IER dans le cadre du projet GENEMIS et réactualisés en 1998, réactualisation portant essentiellement sur les catégories SNAP associées à l'utilisation de solvants. Cette matrice permet d'estimer les émissions de chacun des COVNM à partir d'une quantité totale pour chacune des catégories émettrices.

3.7 Quelle répartition spatiale ?

Le cadastre d'émission a été constitué en prenant en compte la localisation la plus fine disponible pour les différentes sources d'émission, à savoir :

- les coordonnées géographiques pour les sources ponctuelles ;
- la position des brins pour les réseaux de transports terrestres ;
- le taux d'utilisation des différentes pistes de décollage et d'atterrissage ainsi que les profils des trajectoires pour les mouvements aériens ;
- les différentes classes d'occupation du sol (données du *CORINE LAND COVER*) pour les sources surfaciques.

L'agrégation des données d'émissions s'est faite ensuite selon une grille régulière à la résolution spatiale du kilomètre carré. On aboutit ainsi à des données d'émission pour chaque type de sources (86 catégories différenciées), pour chaque maille kilométrique du domaine d'étude.

3.8 Incertitudes

La détermination des incertitudes sur les émissions fait intervenir des données d'incertitudes relatives aux

facteurs d'émission mais aussi des données d'incertitudes relatives aux activités et paramètres retenus pour caractériser le fonctionnement des sources émettrices. Lorsque les données d'émissions proviennent de mesures effectuées de façon permanente ou à intervalles réguliers, l'évaluation des émissions est plus précise (exemple : des émissions issues des déclarations à la DRIRE). Généralement, l'incertitude est considérée comme faible, c'est-à-dire inférieure ou de l'ordre de 5 % pour les sources/gaz pour lesquelles il est possible de recouper les calculs par des bilans de matières ; c'est le cas du SO₂ et du CO₂. Les incertitudes sont généralement élevées sur les émissions des NO_x, CO, COVNM et particules. Selon le type de sources, elles peuvent être de l'ordre de 20 % pour les NO_x ou de l'ordre de 50 à 100 % pour les COVNM, le CO et les particules.

Dans notre cas, les émissions de la SNAP 01 sont presque toutes issues de la TGAP et proviennent donc en majorité d'une estimation basée sur des mesures. Les émissions des SNAP 02, 03, 04, 05, 06 et 08 sont majoritairement calculées à partir de facteurs d'émissions qui, selon les polluants et l'activité SNAP à laquelle on se réfère peuvent varier jusqu'à un facteur 2. On retiendra notamment, l'hétérogénéité des facteurs d'émission associés aux particules. Dans ces cas-là, le calcul dépend beaucoup des choix des facteurs d'émission faits par l'expert. Les émissions de la SNAP 07 (transport routier) sont fortement dépendantes du parc roulant utilisé et des incertitudes associées. Il convient de rappeler la fragilité des connaissances dans ce domaine. En outre, l'impact de certains équipements de confort ou de sécurité sur les émissions n'a pas été intégré faute de méthodologie disponible.

Les émissions de la SNAP 09 sont, soit issues des mesures (TGAP) pour les usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM), soit calculées pour les décharges à partir de facteurs d'émission moyens quelle que soit la décharge. Il y a donc, pour les décharges, une grande source d'incertitude car on ne tient pas compte des améliorations technologiques (méthodes de dépollution) éventuellement mises en place.

Les émissions des SNAP 10 (liées aux épandages d'engrais) sont calculées à partir de la quantité d'engrais utilisés et en prenant en compte la dépendance à la température du sol de ce phénomène.

De la même manière, les émissions de la SNAP 11 sont calculées à partir de formulations mathématiques qui dépendent du rayonnement et/ou de la température de l'air et de l'espèce végétale considérés. Un travail minutieux de repérage des espèces a été effectué dans cet inventaire. Une chronique horaire de température et de rayonnement a été appliquée à ces calculs permettant une bonne prise en compte de la dépendance à ces paramètres. Cependant, l'algorithme de calcul fait encore l'objet de recherche pour affiner notamment les émissions pour les saisons intermédiaires que sont le printemps et l'automne.

4. Résultats et interprétations

4.1 Bilan des émissions sur le domaine ESMERALDA et comparaison avec l'inventaire du CITEPA

Le tableau 4 regroupe les émissions des polluants soumis à réglementation par région, toutes activités confondues.

De par la diversité et multiplicité de ses sources, l'Ile-de-France apparaît comme la région la plus émettrice du domaine (45 % du CO, 36 % des NO_x, 37 % des PM₁₀ et 31 % des COVNM). Si l'Ile-de-France contribue pour moitié aux émissions de méthane, ces résultats sont à nuancer car certaines régions peuvent fortement influencer le bilan des émissions sur le domaine. Par exemple, le SO₂ n'est plus une problématique francilienne mais concerne surtout la Haute-Normandie (48 % des émissions ont lieu dans cette région), principalement à cause des raffineries. La région Centre est le deuxième contributeur en COVNM (30 %, surtout liés aux émissions de COV biogéniques atteignant 87 000 t/an) et la Picardie est le deuxième émetteur de CO (16 %, surtout dû au transport avec 111 200 t/an).

Le tableau donné en annexe 3 présente le bilan (en kilotonnes/an) des émissions polluantes obtenues pour l'année 2000 sur le domaine interrégional, suivant les 11 grandes catégories d'activités émettrices (SNAP).

L'ensemble des émissions ainsi calculées pour les cinq régions impliquées dans le projet représente environ **un tiers** des émissions françaises d'oxyde d'azote (NO_x) et de dioxyde de soufre (SO₂), près **d'un quart** des émissions des Composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) et du dioxyde de

carbone (CO₂), et un peu plus de **13 %** des émissions des particules fines (PM₁₀) et du monoxyde de carbone (CO).

Le tableau 5 présente les bilans pour ces cinq régions calculés par le CITEPA [29].

La figure 7 montre les écarts relatifs, calculés pour les émissions de ces polluants, entre la méthodologie développée dans le cadre du projet ESMERALDA et le CITEPA.

Les écarts les plus importants entre les deux inventaires concernent, dans l'ordre croissant : les particules (PM₁₀), le CO, le SO₂, les COVNM et les NO_x. Notons que l'explication des écarts ne peut se faire que superficiellement car l'origine des données d'entrée et des facteurs d'émission sont les seules informations disponibles dans la méthodologie du CITEPA. Les valeurs des facteurs d'émission et des consommations énergétiques au sein des différentes sources sont rarement citées explicitement [30].

Concernant les PM₁₀, les écarts calculés (par exemple, 68 % d'émission en plus pour le CITEPA en région Centre) sont essentiellement liés aux émissions attribuées au secteur agricole. Dans l'inventaire du CITEPA, cette catégorie regroupe essentiellement : le labourage, la combustion dans les installations et l'utilisation des engins mobiles (i.e. SNAP 10 + SNAP 0203 + SNAP 0806). La plus grande différence concerne le calcul des émissions liées aux engins mobiles agricoles, catégorie dont les facteurs d'émission peuvent être très variables d'une source à l'autre (jusqu'à un facteur 3) et qui ont des origines différentes d'un inventaire à l'autre. Pour la SNAP 0806, le CITEPA calcule les émissions à partir de la méthodologie COPERT III, alors qu'ESMERALDA se base sur

Tableau 4.

Bilan des émissions de polluants par région dans l'inventaire d'ESMERALDA (en t/an).

Regional pollutant emissions budgets from ESMERALDA inventory (in t/year).

Régions	CO	NO _x	SO ₂	COVNM	PM ₁₀
Ile-de-France	398 505	149 522	65 261	178 370	21 944
Haute-Normandie	119 602	85 109	98 630	77 461	9 989
Picardie	147 375	71 575	19 330	78 025	8 807
Champagne-Ardenne	97 080	52 815	13 527	96 700	8 039
Centre	135 853	82 383	10 075	138 628	11 311
Total	898 415	441 404	206 823	569 184	60 090

Tableau 5.

Bilan des émissions de polluants par région, réalisé par le CITEPA (en t/an, février 2005).

Regional pollutant emissions budgets carried out by CITEPA (in t/year, february 2005).

Régions	CO	NO _x	SO ₂	COVNM	PM ₁₀
Ile-de-France	598 795	144 217	44 954	209 206	30 363
Haute-Normandie	178 555	67 681	89 930	106 856	18 614
Picardie	220 225	50 052	15 018	81 981	21 814
Champagne-Ardenne	222 734	42 908	10 346	101 897	22 582
Centre	307 986	70 349	10 079	165 205	35 751
Total	1 305 561	375 207	170 327	665 145	129 124

le nombre des machines agricoles du recensement AGRESTE de 2000, le temps de fonctionnement et la puissance des engins. Concernant le labourage (SNAP 10), les deux inventaires le prennent en compte, mais les sources des facteurs d'émissions utilisés sont également différentes. Enfin, l'activité liée à la combustion dans ce secteur (SNAP 0203) se base sur des consommations énergétiques d'origine différente : Observatoire de l'Énergie et CPDP pour le CITEPA et CEREN pour l'inventaire d'ESMERALDA.

Concernant le CO, les émissions utilisées pour la plate-forme ESMEALDA sont, pour toutes les régions, très inférieures (31 à 56 %) à celles estimées par le CITEPA. Les secteurs d'activités pour lesquels les émissions sont les plus divergentes sont le secteur agricole et, au sein de celui-ci, l'utilisation d'engins spéciaux agricoles, l'industrie manufacturière et le transport routier. Concernant les engins spéciaux, notons que la source des facteurs d'émissions des deux inventaires est différente. L'origine de ces écarts est la même que pour les PM₁₀. Concernant les écarts sur le transport routier, bien qu'utilisant les mêmes facteurs d'émissions, les méthodologies divergent sur l'estimation du trafic routier. La méthodologie du cadastre interrégional est basée sur des kilométrages parcourus, tandis que le CITEPA se base sur des consommations de carburants. Pour l'industrie manufacturière, les écarts sont, compte tenu des éléments connus de la méthodologie CITEPA, difficiles à expliquer.

Pour le SO₂, les émissions du cadastre interrégional sont supérieures de 20 % sur l'ensemble du

domaine à celles de l'inventaire CITEPA. Ces écarts peuvent sans doute s'expliquer par les différences sur les consommations énergétiques utilisées pour le calcul des SNAP 02 et 03. Le CITEPA se base sur les données du CPDP et de l'Observatoire de l'Énergie alors que le cadastre interrégional d'ESMERALDA utilise les données du CEREN.

Pour les COVNM, les émissions du cadastre d'ESMERALDA sont inférieures à celles du CITEPA dans chacune des régions (14 % en moyenne). Les différences sont essentiellement liées au secteur du transport automobile (SNAP 07). La même explication que celle donnée pour le CO semble possible.

Concernant les émissions de NO_x, les résultats du cadastre interrégional sont supérieurs d'environ 18 % en moyenne à ceux du CITEPA. D'après la description du calcul proposée par le CITEPA [30], il semble que les écarts obtenus proviennent essentiellement de la combustion dans l'industrie manufacturière (SNAP 03).

Les écarts et le sens des différences observés entre le cadastre interrégional d'ESMERALDA et les inventaires régionaux du CITEPA pour ces cinq polluants sont également observés pour d'autres cadastres régionaux [31] sur la région Nord-Pas-de-Calais et l'Alsace.

La multiplicité des secteurs d'activité et des données d'entrée nécessaires à l'élaboration d'un cadastre d'émissions rendent difficile la comparaison une à une de nos données et de celles du CITEPA. Cet exercice souligne surtout l'incertitude qui règne dans le choix et le poids des données de base.

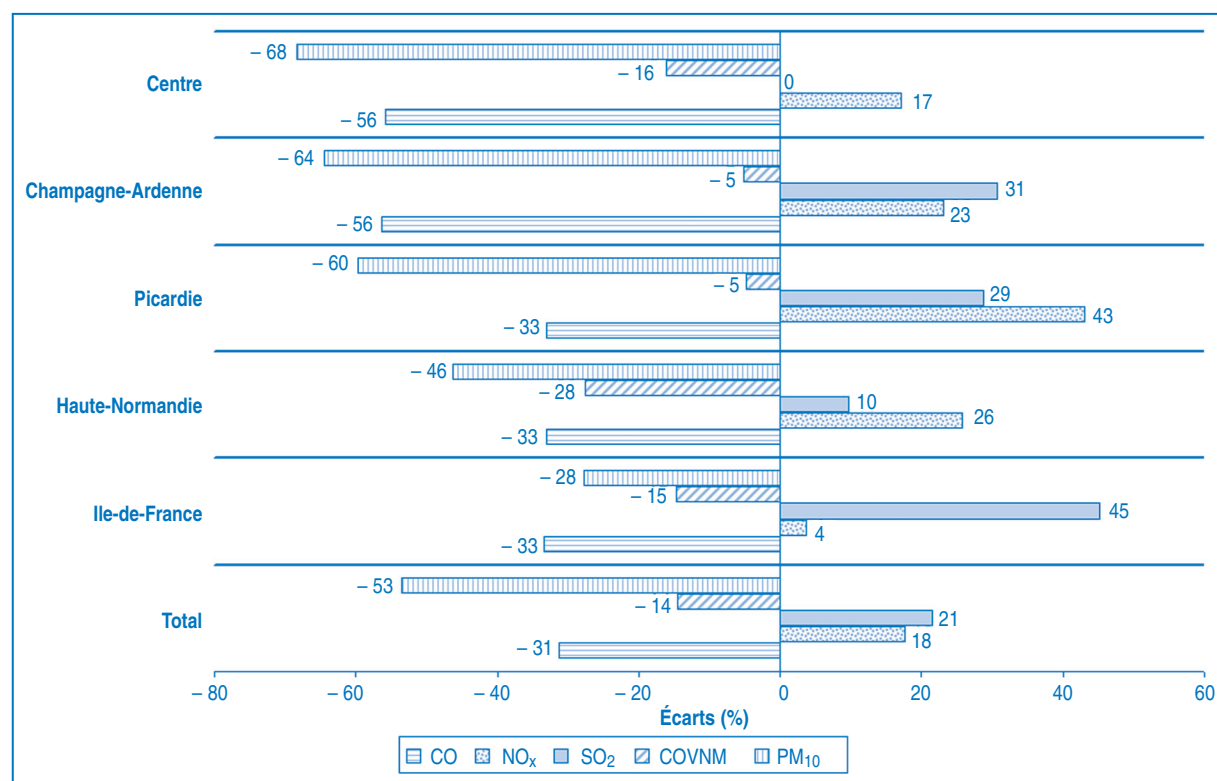


Figure 7.

Différence relative entre le cadastre interrégional et les données CITEPA.

Relative difference between inter-regional inventory vs. CITEPA data.

4.2 Contribution des 11 secteurs d'activité par région

Dans toutes les régions, le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote sont essentiellement émis par le transport (SNAP 07 et 08).

Concernant le dioxyde de soufre, la combustion dans l'industrie manufacturière (SNAP 03) en est le principal émetteur dans la quasi-totalité des régions, sauf en Haute-Normandie où la combustion dans les industries de l'énergie (raffineries et pétrochimie – SNAP 01) domine.

Seule l'Ile-de-France présente des émissions de COVNM dues à la fabrication ou l'utilisation de solvants (SNAP 06). Dans les autres régions, les sources sont essentiellement biogéniques (forêts de feuillus ou de conifères – SNAP 11). Cependant, l'intensité des sources biogéniques ne doit pas être sur-

évaluée. En effet, excepté en régions Champagne-Ardenne et Centre où les émissions biogéniques dominent les émissions anthropiques (respectivement 69 % vs. 31 % et 63 % vs. 37 %), en Haute-Normandie, Picardie et Ile-de-France cette tendance s'inverse avec les proportions respectives suivantes : 30 % vs. 70 %, 38 % vs. 62 % et 25 % vs. 75 %.

Si les NO_x et le CO ont des sources bien identifiées (respectivement 69 % et 66 % des émissions sont dues au transport toutes régions confondues), le cas des PM₁₀ est plus contrasté (30 % dû au transport). L'industrie et le résidentiel (processus de combustions et procédés – SNAP 01, 02 et 03) peuvent représenter une part conséquente des émissions de poussières : 62 % en Champagne-Ardenne, 55 % en région Centre, 62 % en Haute-Normandie, 57 % en Ile-de-France et 47 % en Picardie.

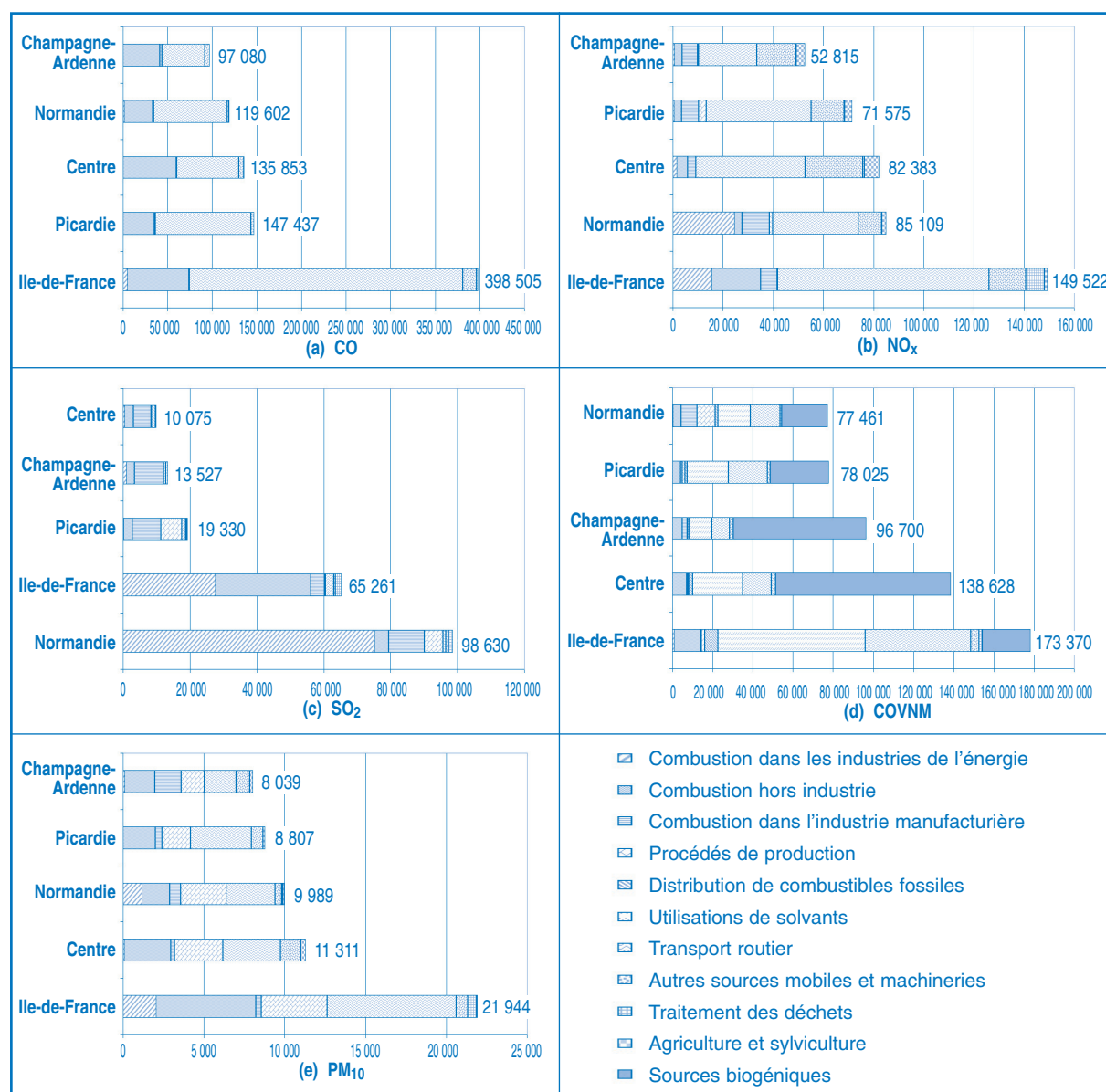


Figure 8.

Contributions régionales des secteurs d'activités par polluant en T/an : (a) CO, (b) NO_x, (c) SO₂, (d) COVNM et (e) PM₁₀.
Regional contributions of the selected activities by pollutant in T/year : (a) CO, (b) NO_x, (c) SO₂, (d) COVNM and (e) PM₁₀.

Tableau 6.
Contributions relatives des sources de polluants par région (en %).
Relative contributions of the pollutant sources in each region (in %).

Régions ESERALDA	Polluants	Commentaires	%	kT/an
Champagne-Ardenne	CO	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	50	48
	NO _x	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	73	39
	SO ₂	Émissions dominées par la combustion dans l'industrie manufacturière (SNAP 03)	65	9
	COVNM	Émissions dominées par les sources biogéniques (SNAP 11)	69	66
	PM ₁₀	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	25	2
Centre	CO	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	55	75
	NO _x	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	81	67
	SO ₂	Émissions dominées par la combustion dans l'industrie manufacturière (SNAP 03)	53	5
	COVNM	Émissions dominées par les sources biogéniques (SNAP 11)	63	87
	PM ₁₀	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	42	5
Haute-Normandie	CO	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	71	85
	NO _x	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	50	43
	SO ₂	Émissions dominées par la combustion dans les industries de l'énergie (SNAP 01)	76	75
	COVNM	Émissions dominées par les sources biogéniques (SNAP 11)	30	23
	PM ₁₀	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	35	3
Ile-de-France	CO	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	80	321
	NO _x	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	66	100
	SO ₂	Émissions dominées par la combustion (SNAP 01, 02 et 03)	92	60
	COVNM	Émissions dominées par l'utilisation de solvants (SNAP 06)	41	73
	PM ₁₀	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	36	8
Picardie	CO	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	75	111
	NO _x	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	77	55
	SO ₂	Émissions dominées par la combustion dans l'industrie manufacturière (SNAP 03)	44	9
	COVNM	Émissions dominées par les sources biogéniques (SNAP 11)	38	30
	PM ₁₀	Émissions dominées par le transport (SNAP 07 et 08)	51	4

4.3 Cartographie des émissions sur le domaine ESERALDA

La distribution spatiale des émissions de COVNM montre une nette influence des grandes villes (Figure 9) : l'agglomération parisienne en Ile-de-France, Rouen, Evreux et Le Havre en Haute-Normandie, Beauvais, Amiens, Compiègne, Abbeville et Saint-Quentin en Picardie, Chartres, Orléans, Blois, Tours, Bourges et Châteauroux en région Centre et Troyes, Châlon-en-Champagne, Reims et Charleville-Mézières en Champagne-Ardenne.

En comparant la figure 9 à la figure 2, on observe que les sources biogéniques de COVNM (forêts) ressortent fortement dans chaque région avec des émissions de l'ordre de 5 à 10 t/km².an. Ces émissions peuvent induire une sensibilité notable dans la formation locale de l'ozone.

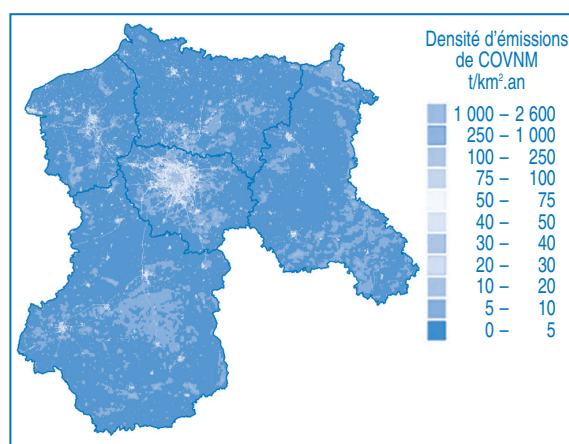


Figure 9.
Carte d'émissions de COVNM sur le domaine ESERALDA.
NMHC emissions map for the ESERALDA domain.

Concernant les émissions de NO_x (Figure 10), les grands axes routiers (les autoroutes) et secondaires (les nationales) reliant les principales agglomérations apparaissent très nettement. Les mailles contenant des autoroutes présentent des densités d'émission relativement élevées (de l'ordre de 50 $\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{an}$). Ces voies privilégiées desservent l'ensemble des pays européens en passant par les grands centres urbains du domaine. Par ailleurs, de grands complexes industriels, notamment situés le long de la Seine entre Le Havre et Rouen, apparaissent nettement. Les méandres de la Seine entre Le Havre et Rouen ressortent fortement essentiellement à cause des émissions dues au transport fluvial et maritime (plus de 8 000 t/an soient 5 % des émissions totales de NO_x en Haute-Normandie). Enfin, bien que plus faibles (entre 2 et 5 $\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{an}$ suivant les régions) par rapport aux grandes villes, les émissions issues de l'agriculture sont beaucoup plus diffuses et sont réparties sur l'ensemble du domaine ESERALDA. À l'image des COVNM biogéniques, ces sources peuvent induire une sensibilité de la formation d'ozone aux émissions de NO_x en zone rurale.

Les grandes villes du domaine présentent de fortes émissions dues au transport en agglomérations et aux sources résidentielles et industrielles. Les axes autoroutiers sont aussi d'importants émetteurs de PM_{10} sur le domaine (Figure 11). Contrairement au cas des oxydes d'azote, les émissions de PM_{10} par le transport fluvial et maritime n'apparaissent pas sur la carte, car elles représentent une faible part des émissions totales, environ 130 t/an soient 1 % en Haute-Normandie.

Si, sur la figure 12, les sources urbaines de SO_2 (combustion résidentielle et transport) semblent prédominer sur l'industrie dans les différentes régions, cette tendance s'inverse par les chiffres, notamment en Haute-Normandie. En effet, la combustion industrielle est le principal émetteur de SO_2 du domaine avec 142 kt/an (voir tableau en annexe 3). Les émissions par ce type de source apparaissent plus faibles car la majeure partie provient de grandes sources ponctuelles, donc spatialement très localisées.

Par ailleurs, comme pour les émissions de NO_x , les méandres de la Seine sont visibles en Haute-Normandie ainsi qu'au niveau de l'estuaire (Antifer, Le Havre et Honfleur du nord au sud), là encore sous l'effet des émissions dues au transport fluvial et maritime. Ce mode de transport de personnes et de marchandises représente 3 % des émissions totales de SO_2 en Haute-Normandie.

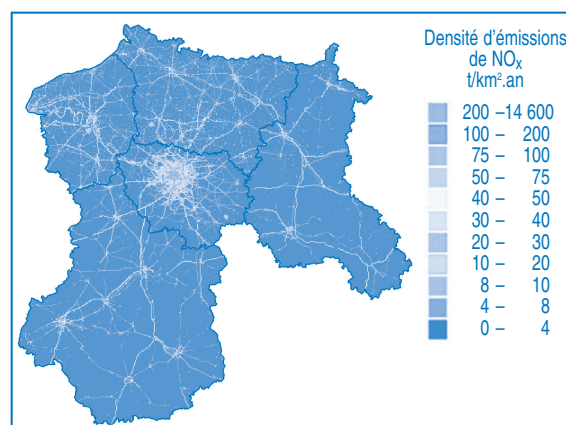


Figure 10.

Carte d'émission de NO_x sur le domaine ESERALDA.
 NO_x emissions map for the ESERALDA domain.

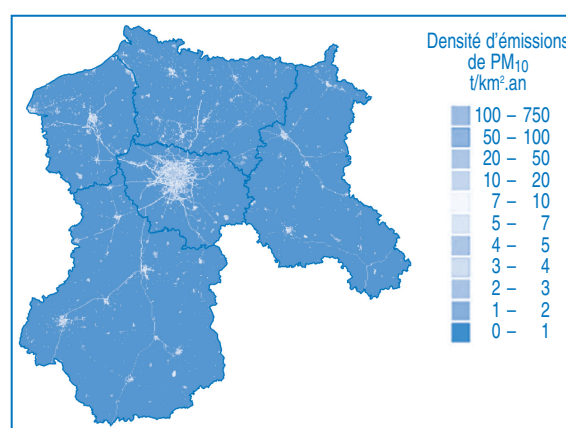


Figure 11.

Carte d'émission de PM_{10} sur le domaine ESERALDA.
 PM_{10} emissions map for the ESERALDA domain.

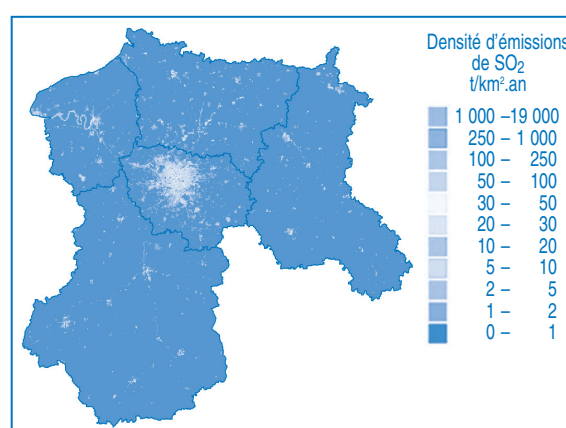


Figure 12.

Carte d'émission de SO_2 sur le domaine ESERALDA.
 SO_2 emissions map for the ESERALDA domain.

5. Conclusions et perspectives

L'élaboration d'un cadastre d'émissions de qualité est apparue comme un travail très minutieux et met en évidence l'importance des données d'entrée nécessaires. La multiplicité des sources d'émissions prises en compte demande le développement de méthodologies diverses, contraintes en partie par la disponibilité des données statistiques de base. La collaboration entre ASQAA a rendu homogène les résultats de par l'utilisation d'une méthodologie commune. Par ailleurs, la validation des résultats s'est avérée nécessaire et a mis en lumière le rôle essentiel de chaque ASQAA dans la validation des valeurs d'émission sur sa zone de compétence, de par sa connaissance du terrain.

La région parisienne apparaît comme le plus gros émetteur pour tous les polluants, excepté pour le SO₂. La Haute-Normandie rejette la plus importante quantité de SO₂. La région Centre est un fort émetteur de COVNM et de NO_x. La Champagne-Ardenne se distingue par l'intensité de l'ensemble de ses émissions biogéniques compte tenu du fait de sa plus faible industrialisation comparativement aux autres régions.

L'inventaire utilisé en opérationnel prévoit des adaptations annuelles pour le trafic routier (incluant un renouvellement des données du parc roulant). Les grandes sources ponctuelles feront aussi l'objet d'une réactualisation annuelle.

Ce cadastre d'émissions permet depuis le 1^{er} juin 2004 de délivrer des cartes de prévisions en NO₂ et O₃ pour le jour même, le lendemain et le surlendemain, ainsi que des cartes d'indice cartographié *via* le système de modélisation de la plate-forme ESMERALDA. Ce système constitue ainsi un outil précieux d'aide aux prévisionnistes des ASQAA puisqu'il permet de rendre compte des phénomènes de pollution interrégionaux comme le sont les épisodes de pollution à l'ozone.

De futures investigations prévoient d'affiner l'inventaire de PM₁₀ et PM_{2,5} en vue de son utilisation dans le modèle de chimie-transport version aérosol qui permettra de réaliser des cartes de concentration en particules et d'aider ainsi les prévisionnistes des ASQAA partenaires pour leur prévisions quotidiennes.

Ces informations sur la qualité de l'air sont disponibles pour le public sur le site Internet : <http://www.esmeralda-web.fr>

Mots clés

Cadastre des émissions interrégional. ESMERALDA. Émissions industrielles. Émissions du transport. Émissions biogéniques. Projection spatiale. Résolutions temporelles. Spéciation des COV.

Keywords

Inter-regional emissions inventory. ESMERALDA. Industrial emissions. Transport emissions. Biogenic emissions. Spatial projection. Temporal resolution. VOC speciation.

Références

1. Ponche J-L, Vinuesa J-F. Emission scenarios for air quality management and applications at local and regional scales including the effects of the future European emission regulation (2015) for the upper Rhine valley. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2005.
2. AIRPARIF. Évaluation de la qualité de l'air en Ile-de-France à l'échéance 2010 et impact du Plan de protection de l'atmosphère, novembre 2004.
3. AIR NORMAND. Les plans de protection de l'atmosphère de la région Haute-Normandie (Rouen, Le Havre et Port-Jérôme), juin 2005.
4. LIG'AIR. Plans de protection de l'atmosphère de Tours et d'Orléans : état des lieux et projection 2010 pour les oxydes d'azote et le benzène, septembre 2004.
5. François S. Méthodologie d'établissement de cadastre d'émissions à l'échelle régionale : application au cadastre ESCOMPTE et à son extension à la région PACA. Thèse de doctorat de Chimie-Physique, Université Louis Pasteur Strasbourg I, juin 2004 ; 273 p.
6. ATMO Champagne-Ardenne. Mesure des produits phytosanitaires dans l'air en zone viticole en Champagne-Ardenne en 2004.
7. LIG'AIR. Contamination de l'air par les pesticides en zone pomicole, mars 2004.
8. AIRPARIF. Caractérisation de la qualité de l'air au voisinage d'un échangeur autoroutier urbain. L'échangeur entre le boulevard périphérique et l'autoroute A3 au niveau de la porte de Bagnolet, décembre 2004.
9. Conseil national des Transports. Rapport sur le transport combiné, 29 mars 2005.
10. AIRPARIF. Étude de la qualité de l'air sur l'ensemble du secteur limitrophe de la plate-forme aéroportuaire d'Orly, août 2004.
11. ATMO Picardie. Qualité de l'air sur le site de l'aéroport de Beauvais-Tillé, 2003.
12. European Environment Agency, Copenhagen. Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook, third edition, 2001.
13. LOTOS : a) Builtjes PJH. The LOTOS - Long Term Ozone Simulation Project; Summary report, TNO report TNO-Mw R 92/240, 1992. b) Olivier J, Bouwman AF, Van der Maas CWM, Berdowski JJM, Veldt C, Bloos JPJ, Visschedijk AJH, Zandveld PYJ, Haverlag JL. Description of EDGAR Version 2.0: a set of emission inventories of greenhouse gases and ozone depleting substances for all anthropogenic and most natural sources on a per country basis and on 1° x 1° grid. *RIVM Report nr. 771060002* and *TNO-MEP Report nr. R96/119*, 1996.
14. OFEFP. Coefficients d'émission des sources stationnaires, 1995.
15. IPCC/OECD/IEA. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. OECD, Paris, 1997.
16. Méthodologie COPERT : <http://vergina.eng.auth.gr/mech/lat/copert/docs.htm>
17. Bourdeau B. Évolution du parc automobile français entre 1970 et 2020, Rapport LEN n° 9801, janvier 1998.
18. INRETS. Parc, usage et émissions des véhicules routiers en France de 1970 à 2020, Rapport n° LTE 0208, mai 2002.
19. Mairie de Paris. Observatoire des déplacements. Composition du trafic routier dans Paris d'après enquêtes réalisées en novembre 2001, 2002.
20. US-EPA. Evaluation of Air Pollutant Emissions from Subsonic Commercial Jet Aircraft, EPA420-R-99-013, April 1999. <http://www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/aviation/r99013.pdf>
21. Direction générale de l'Aviation Civile, Service technique de la navigation aérienne. Outil d'évaluation des émissions dues aux sources aéroportuaires, avril 2000.
22. U.S. Department of Transportation, Washington DC. Environmental Advantages of Inland Barge Transportation, Final Report, august 1994. <http://marad.dot.gov/Publications/PDF/Environmental%20Advanges.pdf>
23. U.S. EPA. Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data. Office of Air and Radiation EPA420-R-00-002, February 2000. <http://www.epa.gov/otaq/models/nonrdmdl/c-marine/r99020.pdf>
24. Solmon F. Modélisation méso-échelle des émissions biogéniques d'hydrocarbures volatils en France – Intégration spatiale des flux d'isoprène et monoterpènes « de la feuille au paysage » et impact sur la chimie atmosphérique. Thèse de doctorat des Sciences de l'Environnement, Institut national agronomique Paris-Grignon, mars 2001 ; 240 p.
25. Guenther A, Zimmerman P, Harley P, Monson R, Fall R. Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluation and sensitivity analysis. *J Geophys Res* 1993 ; 98 : 12609-17.

26. Guenther A. Modeling Biogenic VOC Emissions to the Atmosphere, in *Reactive Hydrocarbons into the Atmosphere*, ed. Hewitt C, Academic Press, 1999 ; 97-118.
27. Pajot K, Carlier P, Henriot A. Application du modèle UAM-V à l'étude de la pollution photochimique sur la région lyonnaise. *Pollution Atmosphérique*, avril-juin 2004 ; 182 : 199-233.
28. Laville P, Hénault C, Gabrielle B, Serça D. Measurement and modelling of NO fluxes over maize and wheat crops during their growing seasons: effect of crop management, soumise à *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 2005.
29. CITEPA. Inventaire dans l'air en France – Émissions dans l'air en France – Régions de la métropole, février 2005.
30. CITEPA. Calcul des émissions dans l'air – Principes méthodologiques généraux, février 2005.
31. Martinet Y. Conception, validation et exploitation d'un cadastre des émissions de polluants atmosphériques sur la région Nord-Pas-de-Calais ; thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 17 décembre 2004.

ANNEXE 1

Liste des codes SNAP :

SNAP 01 : combustion dans l'industrie de l'énergie et de la transformation de l'énergie.

Grosses installations de combustion liées à la production d'électricité, au chauffage urbain, au raffinage de pétrole, à la transformation des combustibles minéraux solides et gazeux...

⇒ *Sources ponctuelles exclusivement.*

SNAP 02 : combustion hors industrie.

Petites installations de combustion des secteurs résidentiel, tertiaire, agricole... moteurs fixes, équipements ménagers...

⇒ *Sources surfaciques.*

SNAP 03 : combustion dans l'industrie manufacturière.

Toutes les installations de combustion pour la fabrication (hors procédés) du secteur de l'industrie manufacturière.

⇒ *Sources ponctuelles et surfaciques.*

SNAP 04 : procédés de production.

Tous procédés de productions et procédés utilisés en fabrication pour les secteurs industriels et artisanaux et non liés à des combustions définies précédemment (SNAP 03)...

⇒ *Sources ponctuelles et surfaciques.*

SNAP 05 : extraction et distribution de combustibles fossiles/énergie géothermique.

Industries extractives des différents

combustibles gazeux, liquides et solides, distribution et stockage des différents combustibles et carburants...

⇒ *Sources surfaciques.*

SNAP 06 : utilisation des solvants et autres produits.

Tous secteurs industriels et artisanaux utilisant des produits à base de solvants en traitement de surface ainsi que les solvants utilisés en milieu hospitalier.

⇒ *Sources surfaciques.*

SNAP 07 : transport routier.

Voitures, véhicules utilitaires, poids lourds, motos, évaporation d'essence...

⇒ *Sources linéiques.*

SNAP 08 : autres sources mobiles et machineries.

Trafic ferroviaire, fluvial, maritime et aérien.

⇒ *Sources linéiques et surfaciques.*

SNAP 09 : traitement et élimination des déchets.

Toutes les installations d'incinération de déchets, les torchères industrielles, les décharges...

⇒ *Sources ponctuelles exclusivement.*

SNAP 10 : agriculture, sylviculture et aquaculture.

Cultures avec engrais, élevages...

⇒ *Sources surfaciques.*

SNAP 11 : autres sources et puits.

Forêts de feuillus et conifères, prairies...

⇒ *Sources surfaciques.*

ANNEXE 2

Tableau 7.

Niveau de spatialisation des sources surfaciques en fonction du code SNAP.

Spatial distribution of surface sources represented by the different SNAP codes.

Codes SNAP	Niveaux de spatialisation	
	IRIS 2000	Commune
0201		X
0202	X	
0203		X
03		X
04		X
050503		X
060101		X
060102		X
060103	X	
060104	X	
060105		X
060106		X
060107		X
060108		X
060109		X
060201		X
060202	X	
060203		X
060204		X
0603		X
060401 à 060407		X
060408 à 060412	X	

ANNEXE 3

Tableau 8.

Bilan des émissions de polluants sur le domaine ESMERALDA.

Total annual amounts of pollutants emissions in the ESMERLADA domain.

Interrégional	SNAP	CO	NO _x	SO ₂	COVNM	PM ₁₀
Combustion dans les industries de l'énergie	1	6 471	42 764	104 405	1 165	3 384
Combustion hors industrie	2	236 933	33 056	40 410	33 206	14 688
Combustion dans l'industrie manufacturière	3	6 225	33 742	37 464	12 296	3 251
Procédés de production	4	20	4 961	12 342	13 145	13 071
Distribution de combustibles fossiles	5	0	0	0	11 512	0
Utilisations de solvants	6	0	0	0	146 289	0
Transport routier	7	613 295	226 666	6 126	109 510	20 347
Autres sources mobiles et machineries	8	32 393	75 441	2 765	10 333	3 872
Traitement des déchets	9	2 838	9 109	3 311	1 782	683
Agriculture et sylviculture	10	0	15 665	0	0	795
Sources biogéniques	11	0	0	0	229 946	0
Total des émissions annuelles						
(en T/an)	TOTAL	898 175	441 405	206 824	569 183	60 090