

T1.1.1 Cadre de référence pour capitalisation des projets GNL

Rapport de capitalisation

Table des matières

1. Objectifs	3
2. Méthodologie de calcul des émissions côté mer	4
2.1 Type de navires	4
2.2 Calcul de la durée des mouvements portuaires	5
2.3 Calcul de l'énergie absorbée par les navires	5
2.4 Calcul des émissions de polluants	6
2.4.1 Calcul des NO_x	7
2.4.2 Calcul du CO₂, SO₂, CO et PM 10	7
2.4.3 Calcul de N₂O, CH₄ et PM_{2.5}	8
3. Résultats des activités navales	9
3.1 Temps de mouvement des navires de Livourne	9
3.2 Résultats émissions navires Livourne	11
3.3 Durées mouvements navires Piombino	17
3.4 Résultats émissions navires Piombino	19
3.5 Durées mouvements navires Portoferraio	24
3.6 Résultats émissions navires Portoferraio	26
4. Incertitude des coefficients de charge	29
5. Comparaison émissions navires/voitures	32
6. Stratégies de réduction des émissions provenant des navires	34
6.1 Électrification des quais (Cold Ironing)	34
6.2 Utilisation de carburants alternatifs (GNL)	35
7. Méthodologie de calcul des émissions côté terre	38
7.1 Émissions de sources rattachées à AdSP-MTS	38
7.1.1 Livourne	39
7.1.2 Piombino	42
7.2 Émissions de sources non rattachées à AdSP-MTS	44
7.2.1 Livourne	45
7.2.2 Piombino	46
8. Conclusions	47
9. Représentation SIG	50
Bibliographie	54

1. Objectifs

Cette étude est basée sur les Lignes directrices du Ministère italien de l'Environnement et de la Protection du Territoire et de la Mer pour l'élaboration des Documents de planification énergétique environnementale des systèmes portuaires dits DEASP (1), et vise à élaborer une méthodologie innovante de calcul des émissions des principaux polluants émis dans les ports du ressort de l'ADSP-MTS et dans les zones limitrophes, provoquées par toutes les sources directement ou indirectement imputables aux activités liées au transport maritime.

La zone étudiée a été divisée en deux sections :

- Côté mer : dans lequel sont calculées les émissions produites par les navires au cours des opérations portuaires ordinaires ;
- Côté terre : dans lequel ont été calculées les émissions produites par les grands exploitants de terminaux portuaires et par les industries à l'intérieur du port ou dans les zones limitrophes, qui contribuent directement ou indirectement aux émissions de polluants dans le port.

L'étude réalisée associe les méthodologies existantes de mesure de l'empreinte carbone (2) aux technologies innovantes développées par ADSP-MTS comme la plateforme MONICA, afin de calculer les quantités de polluants émis dans l'atmosphère tels que : NO_x, SO_x, CO₂, CO, N₂O, CH₄, PM₁₀ et PM_{2.5}. En particulier, pour le calcul des émissions côté mer, la méthodologie innovante proposée se base sur la surveillance en temps réel des navires à l'intérieur des ports. Les données acquises en temps réel via le système SIA (Système d'identification automatique) convergent sur la plateforme MONICA où elles sont analysées et intégrées aux bases de données contenant les données techniques des navires opérant dans les ports telles que, par exemple, la puissance des moteurs principaux et des générateurs auxiliaires installés à bord, l'année de construction et la vitesse de croisière. Le traitement de ces données permet de calculer le temps exact nécessaire à chaque navire pour effectuer les différents mouvements portuaires et les énergies absorbées correspondantes. Après avoir calculé les énergies absorbées par les navires, il est possible d'estimer les émissions produites par les navires à l'intérieur des ports.

Afin de valider les modèles mathématiques, des capteurs environnementaux pour la surveillance des polluants seront installés à des points stratégiques spécifiques ; ainsi, il sera possible d'une part, de corriger les modèles mathématiques avec les données ponctuelles obtenues à partir du traitement des données des capteurs et, d'autre part, d'identifier les navires qui pourraient ne pas respecter les limites d'émission.

Cette méthodologie permettra donc de formuler une estimation plus précise et exacte des émissions portuaires, car les données en temps réel permettent de calculer les émissions de chaque navire à la fois lors des différents mouvements portuaires et lors de la phase de stationnement.

Enfin, ce modèle a été structuré de manière à pouvoir être reproduit dans tous les ports.

2. Méthodologie de calcul des émissions côté mer

Le calcul des émissions polluantes générées par les activités navales dans les ports est très complexe et articulé en raison d'une grande hétérogénéité en ce qui concerne les typologies de navire, les caractéristiques mécaniques, les opérations, les puissances des moteurs et les durées nécessaires pour effectuer les différentes opérations.

Pour le calcul, les outils suivants ont été utilisés :

- Plateforme MONICA, outil fondamental pour l'étude réalisée car, en plus de fournir des informations génériques sur chaque navire arrivant dans des ports telles que : OMI, nom du navire, dimensions, type de navire et chargement, elle indique les heures d'arrivée, de mouvement interne et de départ de chaque navire, grâce auxquelles il est possible de calculer la durée de chaque phase de navigation ;
- Base de données IHS Markit, à partir de laquelle les données relatives aux puissances et vitesses des navires étudiés ont été extraites ;
- Guide sur les émissions provenant des navires (*Ship Emissions Toolkit*) qui contient à la fois les méthodes de calcul des émissions polluantes des navires et les coefficients d'émission à utiliser ;

La méthodologie adoptée prévoit :

- Classification des navires étudiés ;
- Calcul des durées des différents mouvements portuaires de chaque navire ;
- Calcul des puissances des moteurs principaux et des générateurs auxiliaires de chaque navire lors de chaque mouvement portuaire ;
- Calcul de l'énergie absorbée par chaque navire lors des différents mouvements ;
- Calcul des émissions de polluants lors des différents mouvements portuaires.

2.1 Typologie de navires

Cette étude a analysé les principaux types de navires opérant dans des ports caractérisés par un nombre élevé d'arrivées, par des temps de stationnement prolongés et par une puissance installée élevée. Les typologies de navires qui présentent une ou plusieurs de ces caractéristiques sont les suivantes :

- Passenger/Cruise (Cruise) : caractérisés par des durées de stationnement moyennes/longues et par une puissance installée élevée ;
- RO-RO Cargo ship (Ro-Ro) : caractérisés par des durées de stationnement moyennes/courtes, par de faibles puissances des générateurs et par un nombre élevé d'arrivées
- Passenger/RO-RO Cargo (Ro-Ro/Pax) : caractérisés par des durées de stationnement moyennes/courtes, par de faibles puissances des générateurs et par un nombre élevé d'arrivées ;
- Container ship : caractérisés par des durées de stationnement élevées ;
- Vehicles Carrier : caractérisés par des durées de stationnement moyennes et par des puissances moyennes des générateurs.

L'étude sera ensuite étendue à toutes les autres catégories de navires opérant dans des ports telles que General Cargo, Products Tanker, Tug, etc ...

2.2 Calcul de la durée des mouvements portuaires

La plateforme Monica permet de connaître les horaires d'arrivée, de mouvement interne et de départ de chaque navire. À partir de ces données, il a été possible de calculer le temps nécessaire aux navires pour effectuer les opérations suivantes :

- **arrivée**, c'est-à-dire la durée qui s'écoule entre l'horaire d'entrée dans le port et l'horaire d'amarrage au poste d'amarrage attribué ;
- **mouvement interne**, c'est-à-dire la durée qui s'écoule entre l'appareillage depuis le poste d'amarrage et l'amarrage au nouveau poste (ce mouvement n'est pas toujours effectué) ;
- **stationnement**, c'est-à-dire la durée qui s'écoule entre l'horaire d'amarrage et celui d'appareillage ;
- **départ**, c'est-à-dire la durée qui s'écoule entre l'horaire d'appareillage et l'horaire auquel le navire quitte le port.

Ces calculs ont été effectués pour chaque navire opérant dans les ports, à ce stade, ils ont été filtrés en fonction des types de navires d'intérêt

2.3 Calcul de l'énergie absorbée par les navires

Les énergies absorbées par les navires au cours de chacune des phases décrites ci-dessus ont été calculées selon la méthodologie décrite par les guides de l'OMI, en multipliant la puissance maximale des moteurs principaux et des générateurs par des coefficients de puissance appropriés pour les durées de chaque phase. Les puissances maximales des moteurs principaux et des générateurs de tous les navires opérant dans les ports étudiés ont été obtenues à partir de la base de données IHS Markit, qui a également permis d'obtenir les vitesses de croisière maximales des navires.

Les énergies absorbées par les moteurs principaux des navires ont été calculées en multipliant les puissances maximales des moteurs principaux, pour la durée de chaque phase, par un coefficient approprié (C1) fonction de la vitesse du navire pendant la phase en question. Le facteur de charge C1 des moteurs principaux a été calculé pour les phases en supposant que l'énergie absorbée est fonction de la vitesse de mouvement du navire par rapport à la vitesse maximale du navire avec le rapport suivant :

$$C1_{i,j} = \left(\frac{w_{i,j}}{w_{max,i}} \right)^3$$

Où :

- $C1_{i,j}$ = facteur de charge du i-ème navire pour la j-ème opération ;
 - $w_{i,j}$ = vitesse moyenne du i-ème navire pour la j-ème opération ;
 - $w_{max,i}$ = vitesse maximale du i-ème navire.
-

Les énergies des générateurs auxiliaires ont été calculées en multipliant la puissance maximale absorbée par ceux-ci, pour la durée de chaque phase, par un coefficient approprié (C2). Il convient de souligner que le calcul de l'énergie réelle absorbée par les générateurs des navires est très complexe à la fois parce que ces informations ne sont pas disponibles dans le commerce et en raison de l'hétérogénéité des configurations d'installation et de la gestion des chargements utilisées par les flottes au niveau mondial.

D'après les informations disponibles dans la littérature (3), il a été émis l'hypothèse que les générateurs auxiliaires fonctionnent à 100 % de leur puissance maximale pendant les phases d'arrivée, de mouvement interne et de départ, et à 25 % de leur puissance maximale pendant les phases de stationnement. Les facteurs de charge des générateurs (C2) ont été supposés être égaux à :

- 1 : pendant les phases d'arrivée, de mouvement interne et de départ ;
- 0,25 : pendant les phases de stationnement.

Les facteurs de charge C2 seront ensuite vérifiés et corrigés en les comparant avec les données obtenues à partir de la campagne de mesure à l'aide de capteurs.

Les énergies globalement requises par chaque navire ont été calculées à l'aide du rapport suivant :

$$E_i = \sum [(Load1_i * C1_{i,j} + Load2_i * C2_j) * time_{i,j}] \text{ [kWh]}$$

Où :

- E_i = énergie absorbée par le i-ème navire ;
- $Load1_i$ = puissance maximale des moteurs principaux du i-ème navire ;
- $Load2_i$ = puissance maximale des générateurs du i-ème navire ;
- $C2_j$ = facteur de charge des générateurs lors de la j-ème opération ;
- $time_{i,j}$ = durée exprimée en heures par le i-ème navire lors de la j-ème opération.

L'énergie totale requise par tous les navires opérant dans le port a été obtenue à partir du rapport suivant :

$$E = \sum E_i \text{ [kWh]}$$

2.4 Calcul des émissions de polluants

Le calcul des émissions des principaux polluants provenant des opérations navales a été effectué à l'aide des guides de l'OMI (4), qui fixent les valeurs d'émission exprimées en g/kWh pour les différents types de moteurs principaux et auxiliaires.

Catégorie de moteur	Intervalle année du modèle	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}	SO ₂	HC	CO	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
Moteur principal à faible vitesse (Niveau 0)	1999 et plus ancien	18.1	1.42	1.34	10.29	0.60	1.40	620	0.03	0.01
Moteur principal à faible vitesse (Niveau 1)	2000 à 2010	17.0	1.42	1.34	10.29	0.60	1.40	620	0.03	0.01
Moteur principal à faible vitesse (Niveau 2)	2011 à 2016	15.3	1.42	1.34	10.29	0.60	1.40	620	0.03	0.01
Moteur principal à faible vitesse (Niveau 3)	2016 +	3.6	1.42	1.34	10.29	0.60	1.40	620	0.03	0.01
Moteur principal à vitesse moyenne (Niveau 0)	1999 et plus ancien	14.0	1.43	1.34	11.35	0.50	1.10	683	0.03	0.01
Moteur principal à vitesse moyenne (Niveau 1)	2000 à 2010	13.0	1.43	1.34	11.35	0.50	1.10	683	0.03	0.01
Moteur principal à vitesse moyenne (Niveau 2)	2011 à 2016	11.2	1.43	1.34	11.35	0.50	1.10	683	0.03	0.01
Moteur principal à vitesse moyenne (Niveau 3)	2016 +	2.8	1.43	1.34	11.35	0.50	1.10	683	0.03	0.01
Turbomoteur	Tous	6.1	0.06	0.06	16.10	0.10	0.20	970	0.08	0.00
Moteur principal à vapeur et chaudière	Tous	2.1	0.93	0.87	16.10	0.10	0.20	970	0.08	0.00

Tableau 1 : Coefficients OMI pour le calcul des émissions

2.4.1 Calcul des NO_x

En ce qui concerne les NO_x, les guides de l'OMI prévoient l'utilisation de plusieurs coefficients soit en fonction de l'année de construction des navires, allant du niveau 0 (année de construction avant 1999) au niveau III (année de construction à partir de 2016), soit en fonction de la vitesse de rotation des moteurs : faible vitesse (moins de 130 tr/min) ou vitesse moyenne (de 130 à 2000 tr/min). L'année de construction et le régime des moteurs ont été obtenus à partir de la base de données IHS Markit. La formule utilisée pour calculer les émissions est la suivante :

$$NO_x = \frac{(Load1_i * C1_{i,j} * C1_{NO_x} + Load2_i * C2_j * C2_{NO_x}) * time_{i,j}}{10^6} \text{ [Ton]}$$

Où :

- $C1_{NO_x}$ = facteur d'émission des NO_x (g/kWh) produits par les moteurs principaux du navire ;
- $C2_{NO_x}$ = facteur d'émission des NO_x (g/kWh) produits par les générateurs auxiliaires du navire.

2.4.2 Calcul du CO₂, SO₂, CO et PM₁₀

En ce qui concerne le CO₂, le SO₂, le CO et les PM₁₀, les guides de l'OMI fixent les valeurs d'émission (exprimées en g/kWh) en fonction du régime moteur uniquement et non de l'année de construction. Il convient également de noter que les oxydes de soufre, SO_x, ont été supposés avoir la même composition chimique : SO₂, car ils représentent plus de 90 % (5) de tous les SO_x produits.

La relation utilisée pour ces polluants est la suivante :

$$CO_2 = \frac{(Load1_i * C1_{i,j} * C1_{CO_2} + Load2_i * C2_j * C2_{CO_2}) * time_{i,j}}{10^6} \text{ [Ton]}$$

Où :

- C_{CO_2} = facteur d'émission des CO_2 (g/kWh) produits par les moteurs principaux du navire ;
- C_{CO_2} = facteur d'émission des CO_2 (g/kWh) produits par les moteurs auxiliaires du navire.

2.4.3 Calcul des N_2O , CH_4 et $PM_{2.5}$

En ce qui concerne les émissions de $PM_{2.5}$, N_2O et CH_4 , les guides de l'OMI fixent également des coefficients d'émission qui sont toutefois indépendants du type de moteur et du régime de celui-ci. En particulier, l'oxyde d'azote (N_2O) et le méthane (CH_4) sont des gaz dont le potentiel sur le changement climatique est comparable à celui du CO_2 . Par le biais de l'utilisation de coefficients spécifiques : Potentiel de réchauffement global (PRG), qui expriment la contribution à l'effet de serre d'un gaz modifiant le climat par rapport à l'effet du CO_2 , dont le potentiel de référence est égal à 1, il est possible de considérer les effets communs des trois gaz sur l'environnement.

3. Résultats des activités navales

Ci-dessous, les résultats de l'étude réalisée concernant le nombre de navires traversant les ports de Livourne, Piombino et Portoferraio, les durées de chaque phase et les émissions atmosphériques produites.

Aux fins du calcul, seuls les navires dont toutes les données nécessaires à l'estimation des émissions sont connues ont été pris en considération. Le calcul n'a donc pas pris en considération tous les navires dont :

- on ne connaît pas tout ou partie des données techniques telles que la puissance installée, l'année de construction, les caractéristiques des moteurs, etc.
- les données relatives aux horaires des mouvements portuaires (arrivée, mouvement interne et départ) sont incomplètes ;
- les données relatives aux horaires sont incorrectes, telles que des durées d'arrivée et/ou de départ trop courtes ou trop longues ;

Les navires présents dans les ports pour réparation ou entretien ont également été exclus du calcul.

Le nombre de navires étudiés est donc nettement inférieur au nombre réel d'arrivées annuelles.

3.1 Durées des mouvements des navires de Livourne

Du 01-05-2018 au 02-05-2019, plus de 5309 navires appartenant aux 5 catégories étudiées sont arrivés dans le port de Livourne. Parmi ceux-ci, plus de 45 % appartiennent à la catégorie Passenger/Ro-Ro et 27 % à la catégorie Ro-Ro.

Calcul durées Livourne						
Mouvement	Unit	Cruise	RO-RO	Container	Vehicules Carrier	Ro-Ro/Pax
Total arrivées navires	Nbr	326	1 485	656	351	2 491
Total arrivée	Heu	147	920	437	174	969
Total mouvement int.	Heu	0	13	22	16	4
Total heures	Heu	5 185	17 791	14 610	6 136	11 444
Total départ	Heu	64	582	338	189	663
Moyenne arrivée	Heu	0.5	0.6	0.7	0.5	0.4
Moyenne mouvement int.	Heures	0.3	1.0	1.5	0.9	0.5
Moyenne stationnement	Heures	15.9	12.0	22.3	17.5	4.6
Moyenne départ	Heu	0.2	0.4	0.5	0.5	0.2

Tableau 2 : Durées des mouvements des navires de Livourne

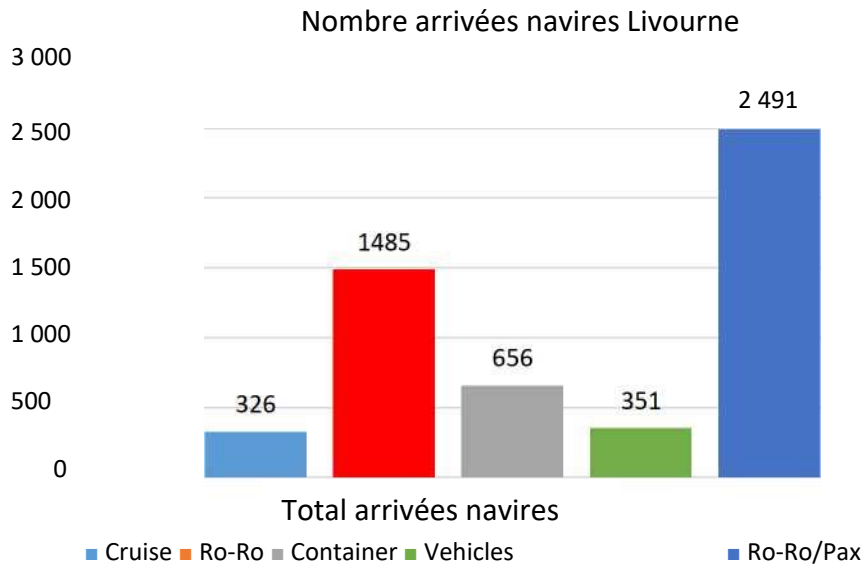


Figure 1 : Nombre arrivées navires Livourne

Globalement, les durées d'activité de tous les navires étudiés dans le port de Livourne ont été supérieures à 59 000 heures (soit environ 7 ans). En particulier, la phase de stationnement représente plus de 90 % du nombre total d'heures (55 000 heures), dans cette phase les moteurs principaux ne fonctionnent pas, seuls les générateurs auxiliaires nécessaires au fonctionnement de l'instrumentation et des systèmes à bord restent allumés.

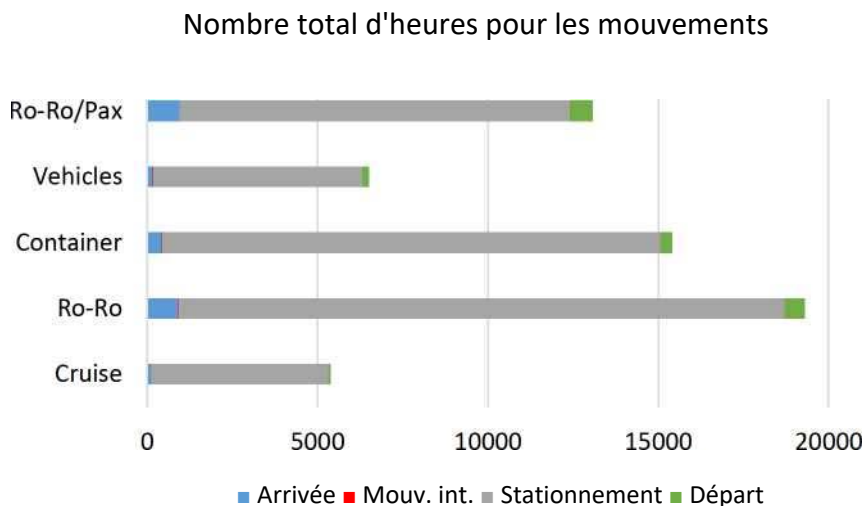


Figure 2 : Nombre total d'heures pour les mouvements de navires à Livourne

Quant aux durées moyennes de chaque phase, pour les 5 types de navires étudiés, la phase de stationnement est la plus longue, allant de 22 heures pour les porte-conteneurs à environ 4 heures pour les navires Passenger/Ro-Ro. En revanche, les durées des phases d'arrivée et de départ sont beaucoup plus courtes et varient de 20 à 50 minutes, selon le type de navire.

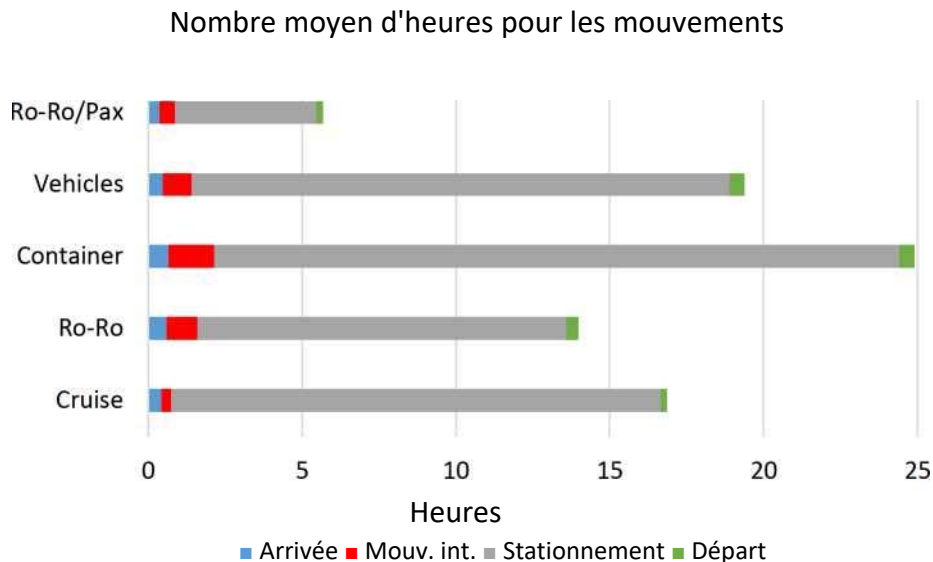


Figure 3 : Nombre moyen d'heures pour les mouvements de navires à Livourne

3.2 Résultats émissions navires Livourne

Les résultats de l'étude réalisée ont été indiqués dans le tableau ci-dessous. En particulier, les résultats indiquent les quantités de polluants produites (exprimées en tonnes) par les activités maritimes au cours de la période comprise entre le 1-05-2018 et le 02-05-2019.

CALCUL DES ÉMISSIONS

Cruise	Arrivée	Mouv. int.	Stationnement	Départ	Total
NOx (TONNES)	24	0	177	10	212
N2O (TONNES)	0.1	0.0	0.6	0.0	0.7
CH4 (TONNES)	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2
PM2.5 (TONNES)	3	0	26	1	31
PM10 (TONNES)	4	0	28	2	33
CO2 (TONNES)	1 766	8	13 244	755	15 772
CO (TONNES)	2	0	17	1	21
SOx (TONNES)	31	0	230	13	274
Ro-Ro	Arrivée	Mouv. int.	Stationnement	Départ	Total
NOx (TONNES)	45	1	191	29	266
N2O (TONNES)	0.1	0.0	0.5	0.1	0.7
CH4 (TONNES)	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2

PM2.5 (TONNES)	6	0	24	4	34
PM10 (TONNES)	6	0	26	4	36
CO2 (TONNES)	2 892	35	12 710	1 863	17 500
CO (TONNES)	4	0	18	3	25
SO2 (TONNES)	49	1	216	32	298
Ro-Ro/Pax	Arrivée	Mouv. int.	Stationnement	Départ	Total
NOx (TONNES)	73	0	174	47	295
N2O (TONNES)	0.2	0.0	0.5	0.1	0.8
CH4 (TONNES)	0.1	0.0	0.2	0.0	0.3
PM2.5 (TONNES)	9	0	22	6	37
PM10 (TONNES)	10	0	23	6	39
CO2 (TONNES)	4 647	27	11 162	2 972	18 808
CO (TONNES)	6	0	15	4	25
SOx (TONNES)	80	0	194	51	326
Container	Arrivée	Mouv. int.	Stationnement	Départ	Total
NOx (TONNES)	48	3	360	36	447
N2O (TONNES)	0.1	0.0	0.9	0.1	1.1
CH4 (TONNES)	0.0	0.0	0.3	0.0	0.4
PM2.5 (TONNES)	5	0	39	4	48
PM10 (TONNES)	5	0	42	4	51
CO2 (TONNES)	2 674	135	20 820	1 999	25 628
CO (TONNES)	4	0	32	3	39
SOx (TONNES)	44	2	346	33	426
Vehicules	Arrivée	Mouv. int.	Stationnement	Départ	Total
NOx (TONNES)	8	1	65	8	82
N2O (TONNES)	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2
CH4 (TONNES)	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
PM2.5 (TONNES)	1	0	7	1	9
PM10 (TONNES)	1	0	8	1	10
CO2 (TONNES)	464	42	3 954	466	4 927
CO (TONNES)	1	0	6	1	8
SOx (TONNES)	8	1	66	8	82

Tableau 3 : Émissions de polluants par type de mouvement et navire (Livourne)

Dans le tableau, on observe que les polluants les plus émis sont :

- CO₂ avec 82 635 tonnes ;
- SO_x avec 1 404 tonnes ;
- NO_x avec 1 301 tonnes ;
- PM₁₀ avec 169 tonnes ;
- PM_{2.5} avec 159 tonnes.

Globalement, ces polluants représentent plus de 99 % en masse des émissions totales, et plus particulièrement le dioxyde de carbone représente à lui seul plus de 96 % en masse de toutes

les émissions. Il y a également des émissions de N₂O (4 tonnes), de CO (2 tonnes), de CH₄ (1 tonne) bien qu'en quantités beaucoup plus réduites et limitées.

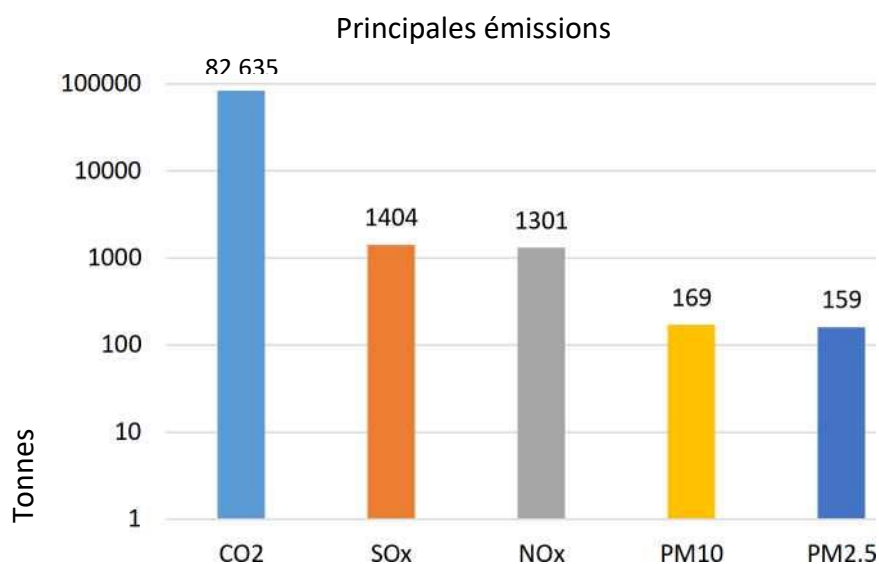


Figure 4 : Principaux polluants émis dans l'atmosphère (Livourne)

D'après une analyse des différents types de navires, ceux qui ont un impact environnemental plus important se révèlent être les porte-conteneurs en raison des longues durées de stationnement et de la puissance élevée que les générateurs à bord du navire doivent fournir pour les opérations normales (en particulier pour maintenir en marche les conteneurs réfrigérés).

En deuxième et troisième place en termes d'émissions, on trouve respectivement les navires de catégorie Passenger Ro-Ro et Ro-Ro cargo, dont les valeurs élevées sont dues au grand nombre d'arrivées annuelles pour cette catégorie (ces catégories représentent à elles deux plus de 75 % des toutes les arrivées).



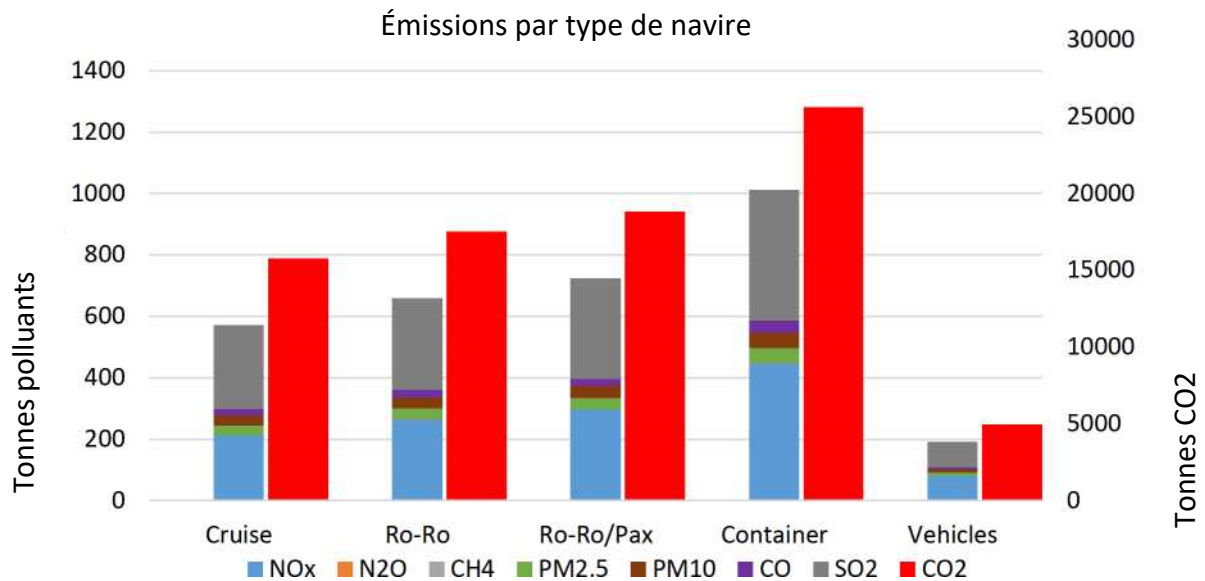


Figure 5 : Émissions de polluants par type de navire (Livourne)

Enfin, en observant les émissions par type de mouvement portuaire, comme souligné précédemment, les émissions les plus importantes se produisent lors des phases de stationnement (75 % du total). Les émissions élevées estimées dans cette phase sont dues à la fois aux longues durées de stationnement (qui peuvent dépasser les 24 heures), mais surtout aux énergies absorbées élevées lors des activités normales de fonctionnement. La plupart des navires sont en effet équipés de leurs propres générateurs auxiliaires dont la puissance nominale peut être supérieure à 10 MW nécessaires pour garantir le bon fonctionnement de tous les dispositifs embarqués.

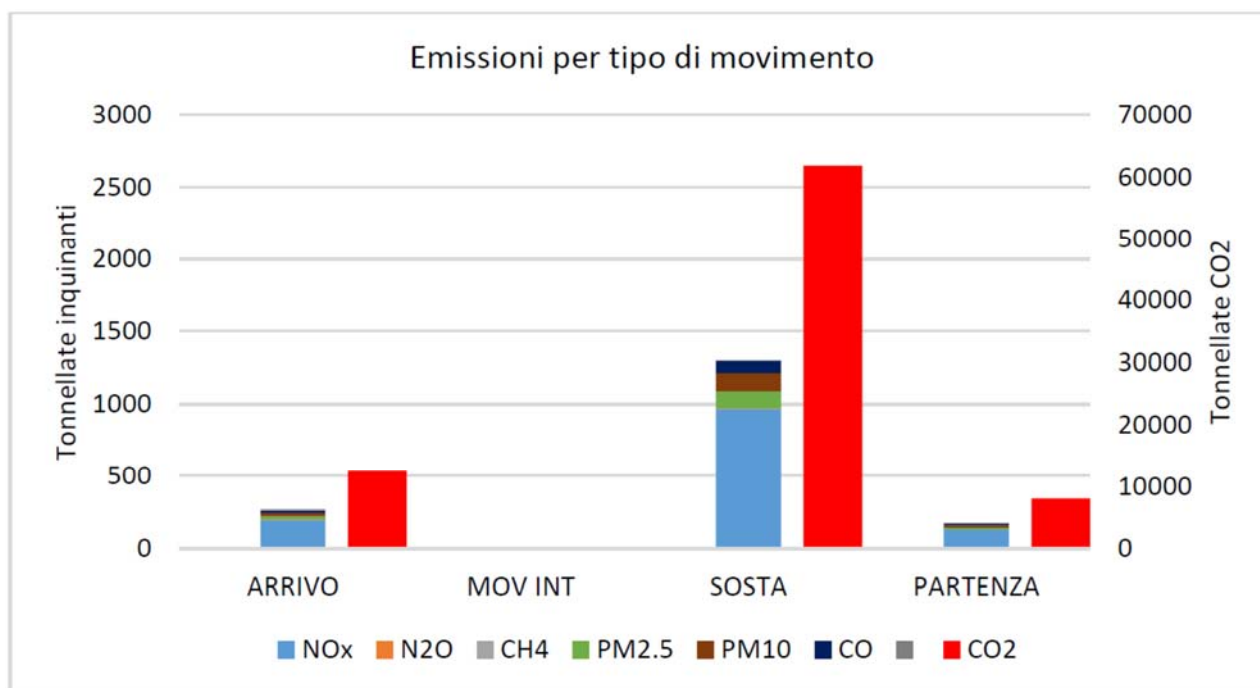


Figure 6 : Émissions de polluants par type de mouvement (Livourne)

En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre tels que : CO₂, CH₄ et N₂O, celles-ci peuvent être regroupées en les exprimant en termes d'équivalent CO₂ (éq. CO₂), à l'aide des coefficients spécifiques : Global Warning Potential (GWP), et Global Temperature Potential (GTP) (6). Ces deux indicateurs, GWP et GTP, représentent respectivement dans quelle mesure un élément polluant contribue au réchauffement climatique, et dans quelle mesure il contribue à l'augmentation de la température de la surface terrestre, par rapport au CO₂, dont le potentiel de référence est égal à 1.

POLLUANT	DURÉE DE VIE	GWP20	GWP100	GTP20	GTP100
CO ₂		1	1	1	1
CH ₄	12.4	85	30	68	6
N ₂ O	121	264	265	277	234

Tableau 4 : Coefficients GWP et GTP à 20 et 100 ans

À l'aide de ces coefficients, les quantités d'éq. CO₂ ont été calculées pour les différentes catégories de navires. Les données sont présentées dans le tableau suivant.

Polluant	Cruise	RO-RO	Ro-Ro/Pax	Container	Vehicles Carrier
CO ₂ (TONNES)	15 772	17 500	18 808	25 628	4 927
ÉQ. CO ₂ (GWP20)	15 972	17 718	19 047	25 940	4 987
ÉQ. CO ₂ (GWP100)	15 960	17 705	19 033	25 922	4 983
ÉQ. CO ₂ (GTP20)	15 977	17 724	19 053	25 948	4 989
ÉQ. CO ₂	15 934	17 676	19 001	25 880	4 975

Tableau 5 : Émissions de CO₂ et d'équivalent CO₂ (Livourne)

En analysant spécifiquement les effets des émissions de N₂O et de CH₄ sur le réchauffement climatique (GWP), on observe qu'en l'espace de 20 ans, ils produisent un effet sur l'environnement comparable à celui de 1 030 tonnes de CO₂, entraînant une augmentation équivalente d'environ 1,2 % sur les émissions totales de CO₂ (82 635 tonnes). Cependant, en l'espace de 100 ans, les effets des deux gaz chutent à une valeur équivalente à 969 tonnes de CO₂.

Pour ce qui est des effets sur l'augmentation de la température moyenne en surface (GTP), on observe qu'à 20 ans d'intervalle, les deux gaz étudiés produisent un effet comparable à celui de 1 056 tonnes de CO₂, tandis qu'à 100 ans d'intervalle, les effets diminuent pour atteindre une valeur équivalente à 832 tonnes de CO₂. Les résultats sont présentés sur la figure 7.

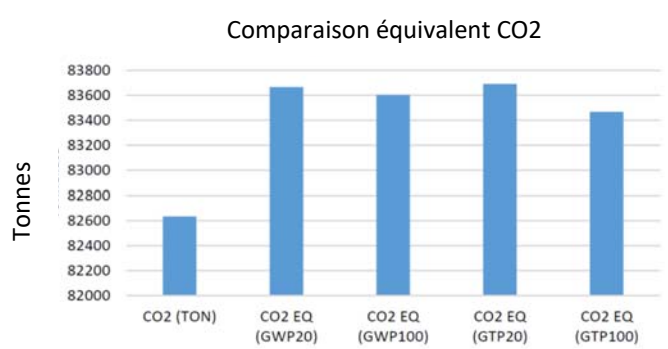


Figure 7 : Comparaison CO₂ et équivalent CO₂ (Livourne)

3.3 Durées mouvements navires Piombino

Le trafic maritime du port de Piombino diffère sensiblement de celui du port de Livourne tant par le type de navires que par le nombre d'arrivées. Plus de 12 500 navires sont arrivés au cours de la période considérée, dont 86 % appartiennent à la catégorie Passenger/Ro-Ro et 11 % à la catégorie Passenger. De plus, en raison de la conformation géographique du port de Piombino, les durées d'arrivée et de départ des navires sont inférieures à celles de Livourne, alors qu'il n'y a pas de mouvements internes des navires, c'est-à-dire de changement de quai d'amarrage pendant la phase de stationnement. Le tableau ci-dessous indique le nombre d'arrivées et les durées des mouvements de tous les navires étudiés.

Calcul durées Piombino						
Mouvement	Unité	Ro-Ro/Pax	Pax	General Cargo	Ro-Ro	Cruise
Total arrivées	Nbre	10 830	1 332	246	174	11
Total arrivée	Heures	1 644	201	37	27	2
Total stationnement	Heures	17 092	1 636	6 975	775	138
Total départ	Heures	1 315	161	30	21	1
Moyenne arrivée	Heures	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16
Moyenne stationnement	Heures	1.6	1.2	28.4	4.5	12.5
Moyenne départ	Heures	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13

Tableau 6 : Durées mouvements navires Piombino

Il est intéressant de noter que 54 % de toutes les arrivées sont attribuées à seulement 6 navires, dont chacun a effectué plus de 1000 amarrages à quai par an, soit en moyenne plus de 3 arrivées par jour. Ces navires appartiennent tous aux catégories Passenger et Passenger Ro-Ro, et sont des ferries qui relient Piombino à l'île d'Elbe qui effectuent plusieurs trajets pendant la journée, optimisant au maximum les temps de stationnement.

Nombre arrivées navires Piombino

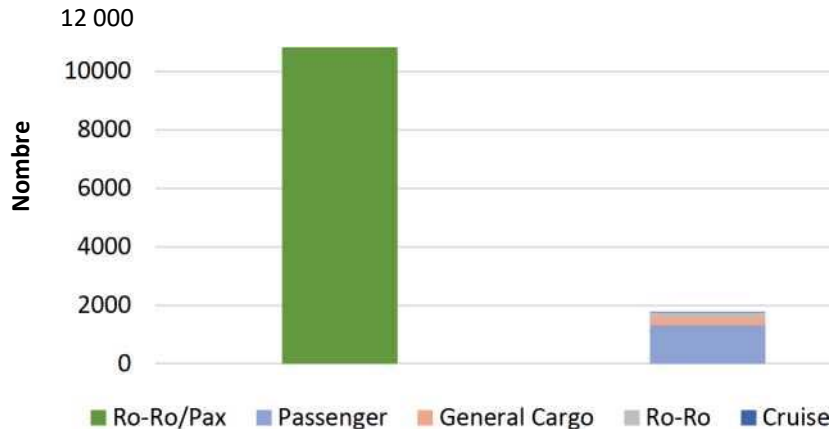


Figure 8 : Nombre arrivées Piombino

Globalement, les temps d'activité de tous les navires étudiés dans le port de Piombino ont été supérieurs à 30 000 heures (soit environ 3 ans). La phase de stationnement représente plus de 88 % du total des heures (26 000 heures).

Nombre total d'heures pour les mouvements



Figure 9 : Nombre total d'heures pour les mouvements des navires à Piombino

Pour les navires opérant dans le port de Piombino, la phase la plus longue est celle du stationnement. La durée moyenne du stationnement varie considérablement selon le type de navire, et va d'environ une heure pour les navires appartenant à la catégorie Passenger à plus de 50 heures pour les navires de la catégorie Container. Les durées moyennes d'arrivée et de départ sont nettement réduites, et ne dépassent pas 10 minutes pour toutes les catégories de navires.

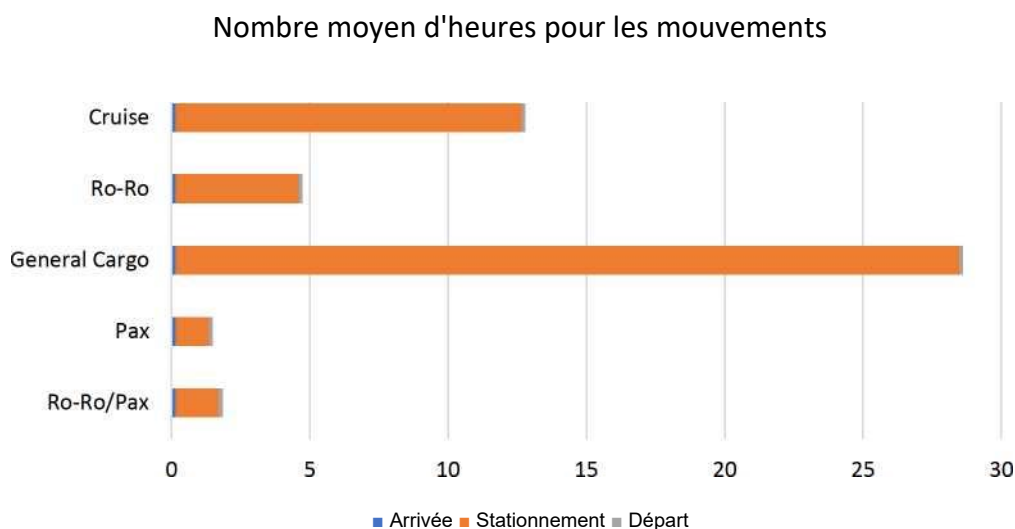


Figure 10 : Nombre moyen d'heures pour les mouvements des navires à Piombino

3.4 Résultats émissions navires Piombino

Le tableau ci-dessous présente les quantités de polluants produites (exprimées en tonnes) par les activités maritimes dans le port de Piombino au cours de la période du 1-05-2018 au 02-05-2019.

CALCUL DES ÉMISSIONS				
Ro-Ro/Pax	ARRIVÉE	STATIONNEMENT	DÉPART	TOTAL
NOx (TONNES)	21	71	17	109
N2O (TONNES)	0.0	0.2	0.0	0.2
CH4 (TONNES)	0.0	0.1	0.0	0.1
PM2.5 (TONNES)	2.4	6.9	1.9	11.1
PM10 (TONNES)	0.7	7.3	2.0	10.0
CO2 (TONNES)	1 205	3 511	964	5 679
CO (TONNES)	1.7	4.6	1.3	7.6

SO _x (TONNES)	21	61	17	98
Pax	ARRIVÉE	STATIONNEMENT	DÉP	TOTAL
NO _x (TONNES)	0	0	0	1
N ₂ O (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.0
CH ₄ (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.0
PM _{2.5} (TONNES)	0.0	0.1	0.0	0.1
PM ₁₀ (TONNES)	0.0	0.1	0.0	0.1
CO ₂ (TONNES)	17	26	14	56
CO (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.1
SO ₂ (TONNES)	0	0	0	1
General Cargo	ARRIVÉE	STATIONNEMENT	DÉP	TOTAL
NO _x (TONNES)	1	20	0	21
N ₂ O (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.0
CH ₄ (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.0
PM _{2.5} (TONNES)	0.1	2.1	0.1	2.3
PM ₁₀ (TONNES)	0.0	2.3	0.1	2.4
CO ₂ (TONNES)	34	1 098	27	1 159
CO (TONNES)	0.0	1.4	0.0	1.5
SO _x (TONNES)	1	19	0	20
Ro-Ro	ARRIVÉE	STATIONNEMENT	DÉP	TOTAL
NO _x (TONNES)	1	4	0	5
N ₂ O (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.0
CH ₄ (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.0
PM _{2.5} (TONNES)	0.1	0.4	0.1	0.5
PM ₁₀ (TONNES)	0.0	0.4	0.1	0.5
CO ₂ (TONNES)	34	196	27	257
CO (TONNES)	0.0	0.3	0.0	0.3
SO _x (TONNES)	1	3	0	4
Cruise	ARRIVÉE	STATIONNEMENT	DÉP	TOTAL
NO _x (TONNES)	0	5	0	5
N ₂ O (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.0
CH ₄ (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.0
PM _{2.5} (TONNES)	0.0	0.5	0.0	0.5
PM ₁₀ (TONNES)	0.0	0.5	0.0	0.5
CO ₂ (TONNES)	13	236	10	259
CO (TONNES)	0.02	0.3	0.0	0.3
SO _x (TONNES)	0	4	0	5

Tableau 7 : Émissions de polluants par type de mouvement et navire (Piombino)

Dans ce cas également, les polluants les plus émis ont été les suivants :

- CO₂ avec 7 411 tonnes ;
- NO_x avec 141 tonnes ;
- SO_x avec 128 tonnes ;
- PM_{2.5} avec 15 tonnes ;
- PM₁₀ avec 13 tonnes ;

Globalement, ces polluants représentent plus de 99 % en masse des émissions totales, et en particulier le dioxyde de carbone représente à lui seul près de 95 % en masse de toutes les émissions, comme le montre la figure ci-dessous.

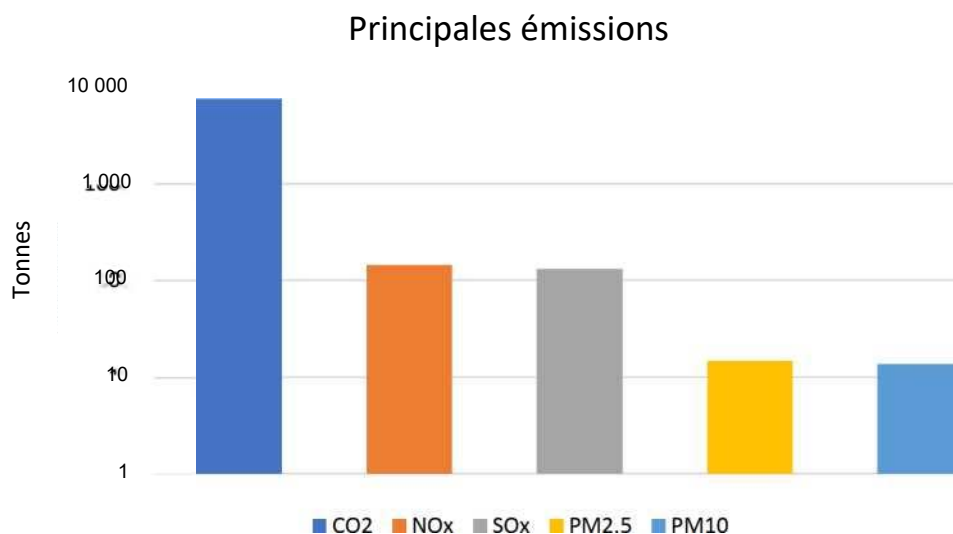


Figure 11 : Principaux polluants émis dans l'atmosphère (Piombino)

D'après l'analyse des différents types de navires, ceux qui ont un impact environnemental plus important sont les Ro-Ro/Pax (77 % des émissions totales) en raison du nombre élevé d'arrivées. En deuxième place en termes d'émissions, on trouve les navires de la catégorie General Cargo (16 % des émissions totales) en raison des longues durées de stationnement et de la puissance élevée que les générateurs à bord du navire doivent fournir pour les opérations normales.

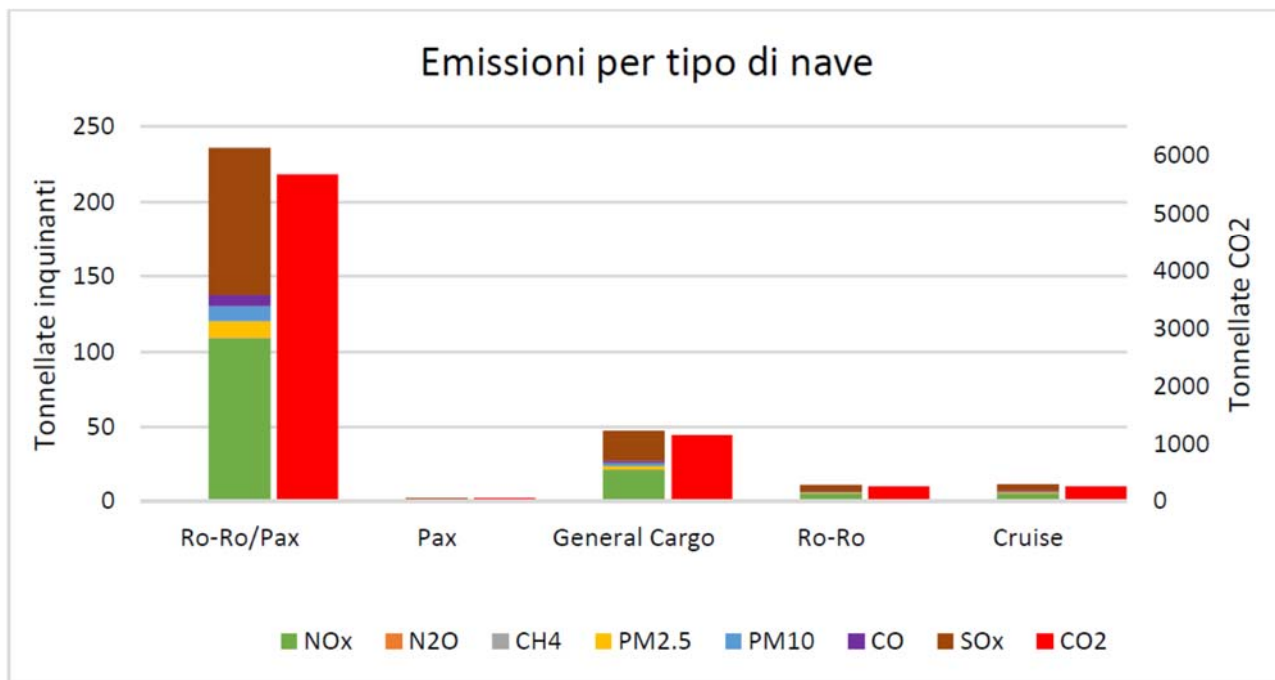


Figure 12 : Émissions de polluants par type de mouvement (Piombino)

En observant les émissions par type de mouvement portuaire, on remarque que 68 % des émissions ont été produites pendant la phase de stationnement. Le pourcentage est inférieur aux émissions du port de Livourne à la fois en raison de la durée plus courte de la phase de stationnement et de la puissance plus faible des générateurs installés à bord des navires en question ; en effet, comme mentionné ci-dessus, dans cette phase, les émissions proviennent uniquement du fonctionnement des générateurs auxiliaires, car les moteurs principaux sont arrêtés pendant le stationnement.

Pendant la phase d'arrivée, on estime que 18 % des émissions ont été produites, tandis que le départ est responsable de 14 % des émissions restantes.

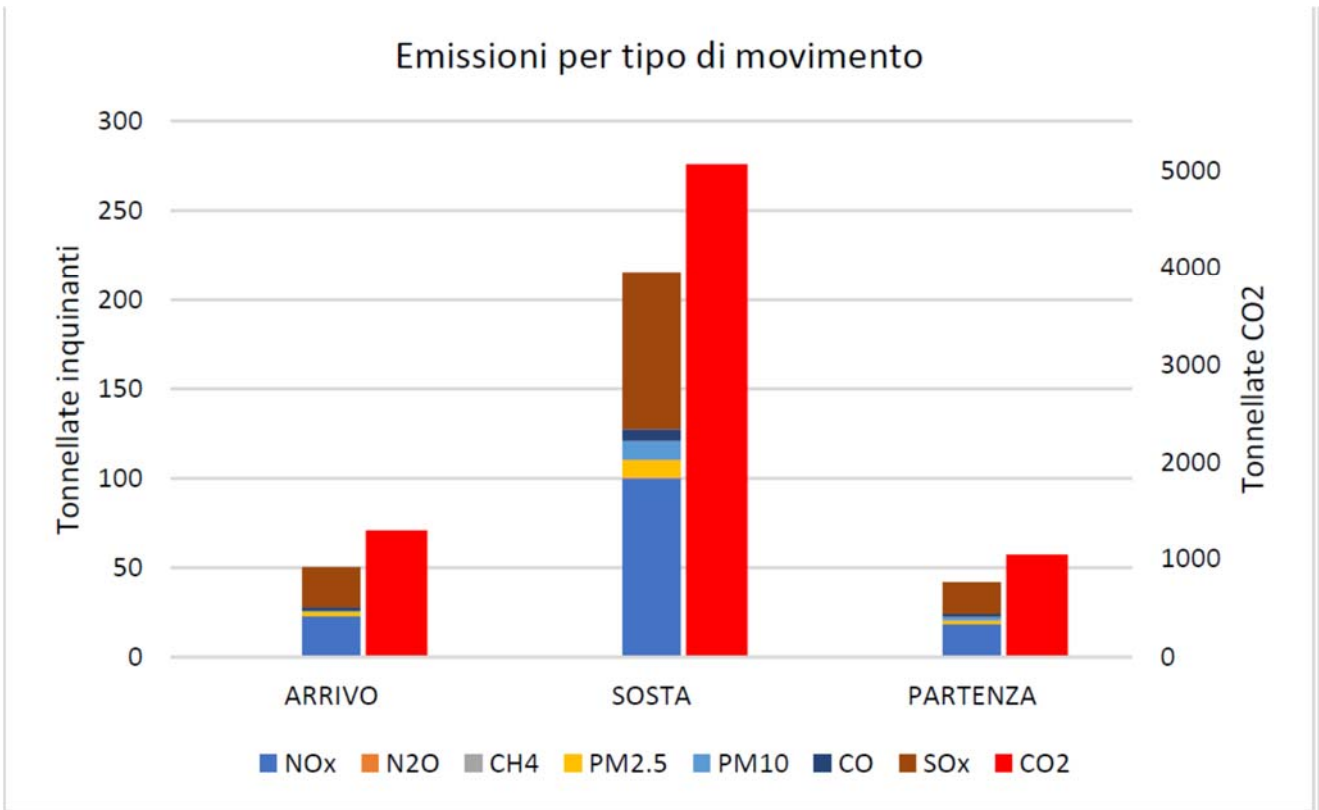


Figure 13 : Émissions de polluants par type de mouvement (Piombino)

3.5 Durées mouvements navires Portoferraio

Le trafic maritime du port de Portoferraio est principalement constitué de navires de catégorie Passenger et Passenger/Ro-Ro. Plus de 9900 navires sont arrivés au cours de la période considérée, dont 88 % appartiennent à la catégorie Passenger/Ro-Ro et les 12 % restants à la catégorie Passenger. Dans ce cas également, en raison de la conformation géographique du port de Portoferraio, les durées d'arrivée et de départ des navires sont inférieures à ceux de Livourne, alors qu'il n'y a pas de mouvements internes des navires, c'est-à-dire de changement de quai d'amarrage pendant la phase de stationnement. Le tableau ci-dessous indique le nombre d'arrivées et les durées des mouvements de tous les navires étudiés.

Calcul durées			
Mouvement	Unité de mesure	Ro-Ro/Pax	Pax
Total arrivées navires	Nbre	8 709	1 242
Total heures arrivée	Heures	1 322	188
Total heures stationnement	Heures	13 744	1 525
Total heures départ	Heures	1 058	150
Nombre moyen de minutes	Heures	0.15	0.15
Nombre moyen de minutes stationnement	Heures	1.58	1.23
Nombre moyen de minutes	Heures	0.12	0.12

Tableau 8 : Durées mouvements navires Portoferraio

Il est intéressant de noter que dans ce cas, 60 % de toutes les arrivées sont attribuées à seulement 5 navires, dont chacun a effectué plus de 1000 amarrages à quai par an, soit en moyenne plus de 3 arrivées par jour. Ces navires sont des ferries qui relient le port de Portoferraio à celui de Piombino, qui effectuent plusieurs trajets tout au long de la journée, optimisant au maximum les temps de stationnement.

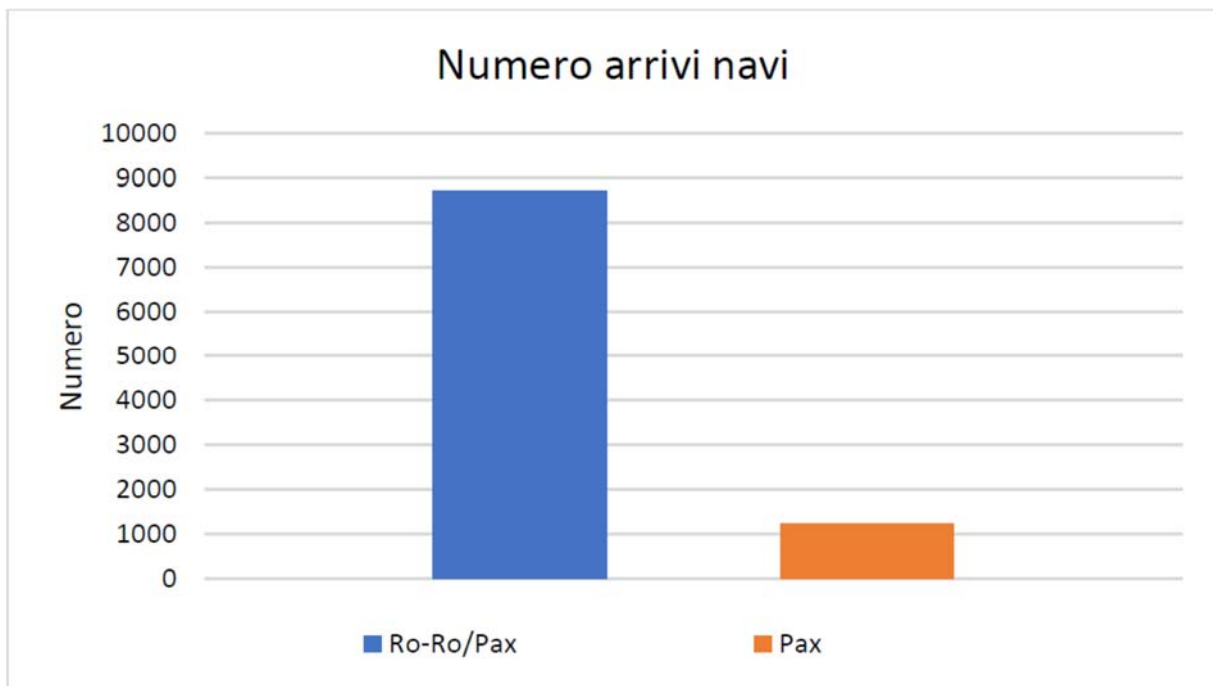


Figure 14 : Nombre arrivées Portoferraio

Globalement, les temps d'activité de tous les navires étudiés dans le port de Portoferraio ont été supérieurs à 18 000 heures (ce qui équivaut à plus de 2 ans). La phase de stationnement représente près de 85 % du nombre total d'heures (15 000 heures).

Nombre total d'heures pour les mouvements

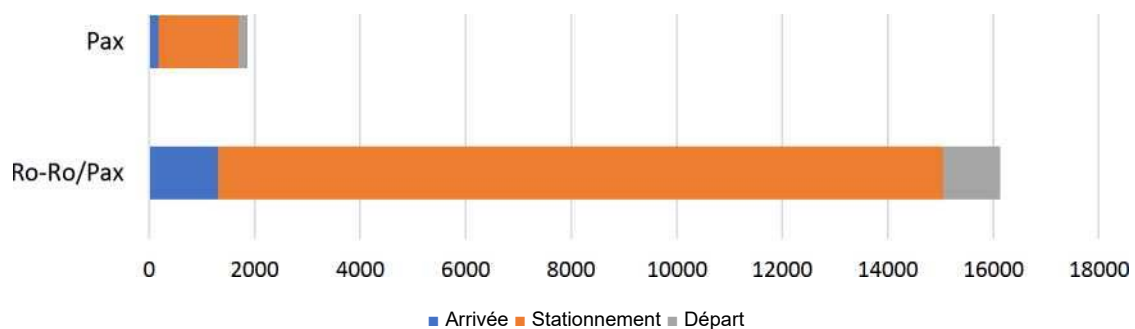


Figure 15 : Nombre total d'heures pour les mouvements de navires à Portoferraio

Pour les navires opérant dans le port de Portoferraio, la phase la plus longue est aussi celle du stationnement. La durée moyenne de stationnement varie d'environ une heure pour les navires Passenger à 2 heures pour les navires Passenger/Ro-Ro. Les durées moyennes d'arrivée et de



et de départ sont nettement réduites, ne dépassent pas 10 minutes pour tous les navires.

Nombre moyen d'heures pour les mouvements

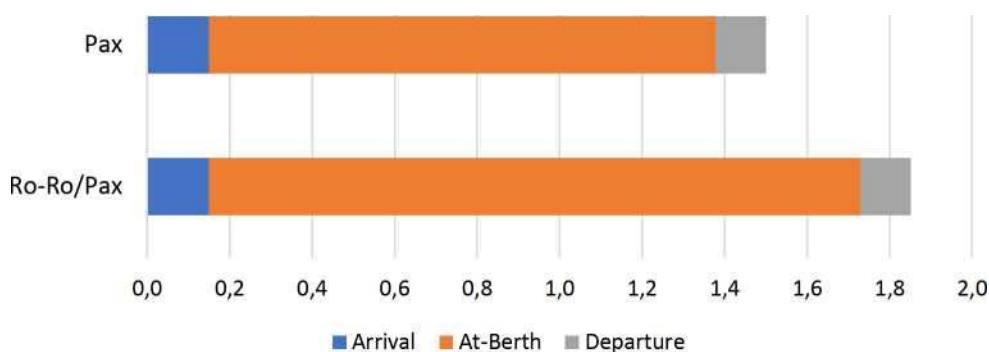


Figure 16 : Nombre moyen d'heures pour les mouvements des navires à Piombino

3.6 Résultats émissions navires Portoferraio

En particulier, le tableau ci-dessous présente les quantités de polluants produites (exprimées en tonnes) par les activités maritimes dans le port de Portoferraio au cours de la période du 1-05-2018 au 02-05-2019.

CALCUL DES ÉMISSIONS				
Passenger/Ro-Ro	ARRIVÉE	STATIONNEMENT	DÉPART	TOTAL
NOx (TONNES)	17	57	14	88
N2O (TONNES)	0	0	0	0
CH4 (TONNES)	0	0	0	0
PM2.5 (TONNES)	2	6	2	9
PM10 (TONNES)	1	6	2	8
CO2 (TONNES)	969	2 824	775	4 567
CO (TONNES)	1	4	1	6
SOx (TONNES)	17	49	13	79
Passenger Ship	ARRIVÉE	STATIONNEMENT	DÉPART	TOTAL
NOx (TONNES)	0.3	0.5	0.2	0.9
N2O (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.0
CH4 (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.0
PM2.5 (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.1

PM10 (TONNES)	0.0	0.1	0.0	0.1
CO2 (TONNES)	15.8	24.1	12.6	52.5
CO (TONNES)	0.0	0.0	0.0	0.1
SO2 (TONNES)	0.3	0.4	0.2	0.9

Tableau 9 : Émissions de polluants par type de mouvement et navire (Portoferraio)

Dans ce cas également, les polluants les plus émis ont été les suivants :

- CO₂ avec 4 620 tonnes ;
- NO_x avec 88 tonnes ;
- SO_x avec 80 tonnes ;
- PM_{2.5} avec 9 tonnes ;
- PM₁₀ avec 8 tonnes ;

Globalement, ces polluants représentent plus de 99 % en masse des émissions totales, et en particulier le dioxyde de carbone représente à lui seul près de 95 % en masse de toutes les émissions, comme le montre la figure ci-dessous.

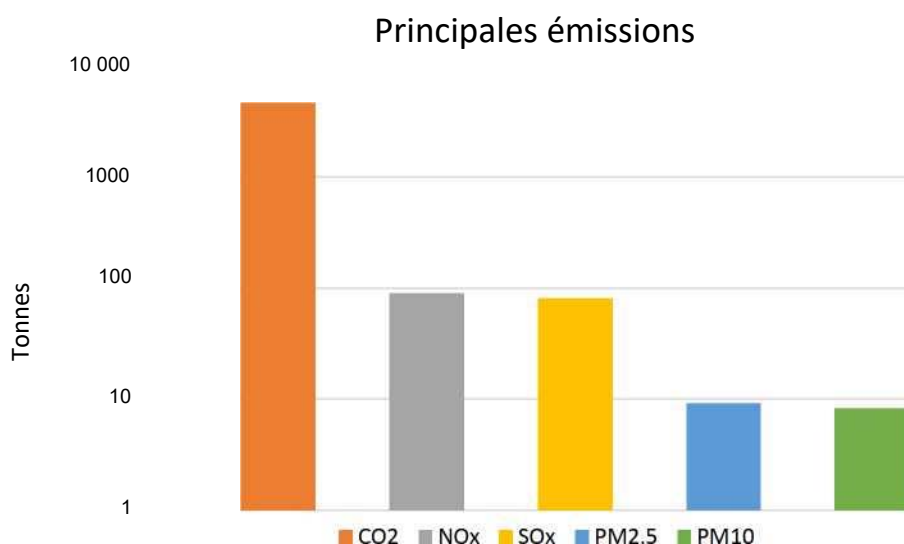


Figure 17 : Principaux polluants émis dans l'atmosphère (Piombino)

En observant les émissions par type de mouvement portuaire, on remarque que 62 % des émissions ont été produites pendant la phase de stationnement. Le pourcentage est inférieur aux émissions du port de Livourne à la fois en raison de la durée plus courte de la phase de stationnement et de la puissance plus faible des générateurs installés à bord des navires en question ; en effet, comme mentionné ci-dessus, dans cette phase, les émissions proviennent uniquement du fonctionnement des générateurs auxiliaires, car les moteurs principaux sont arrêtés pendant le stationnement.

Pendant la phase d'arrivée, on estime que 21% des émissions ont été produites, tandis que le départ est responsable de 17 % des émissions restantes.

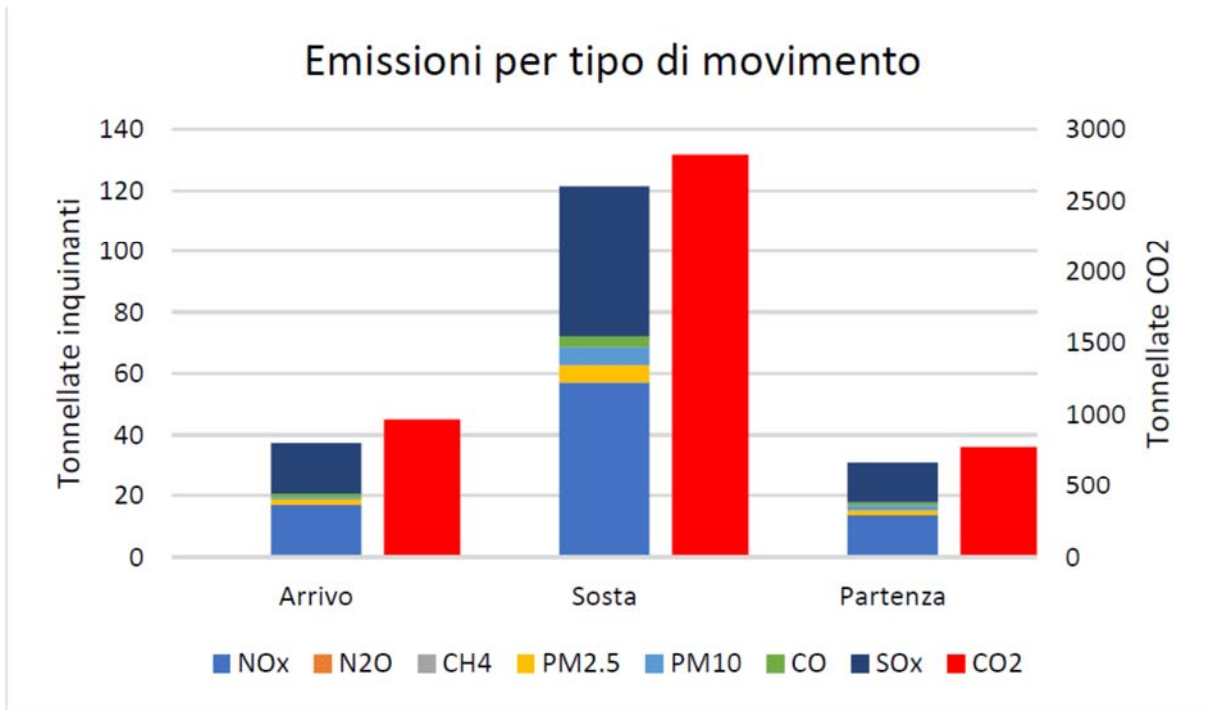


Figure 18 : Émissions de polluants par type de mouvement (Portoferraio)

4. Incertitude des coefficients de charge

Comme mentionné ci-dessus, des coefficients d'utilisation des puissances du moteur principal et des générateurs auxiliaires ont été utilisés pour calculer les énergies absorbées par les navires. En particulier, conformément aux guides de l'OMI, il a été émis l'hypothèse que :

- le coefficient de charge des moteurs principaux est proportionnel au cube du rapport entre la vitesse du navire pendant chaque phase et la vitesse maximale pouvant être atteinte par le navire lui-même ;
- le coefficient de charge des générateurs auxiliaires atteint son maximum (égal à 1) pendant les phases d'arrivée, de mouvement interne et de départ, et est égal à 0,25 pendant la phase de stationnement.

Ces coefficients sont indiqués à titre purement indicatif et varient d'un cas à l'autre, notamment en ce qui concerne l'utilisation des générateurs auxiliaires. Dans la littérature, il est précisé qu'en général pour le calcul de la puissance totale des groupes électrogènes installés, il faut considérer que le point de fonctionnement optimal des générateurs correspond à 75 % de leur puissance maximale nominale. Il est également courant d'installer une puissance supérieure à celle nécessaire aussi bien en vue d'une éventuelle extension future que pour disposer, en cas de panne de l'un des générateurs, d'une puissance plus élevée fournie par les autres générateurs qui continuent de fonctionner. C'est pourquoi les émissions ont été calculées en faisant varier les coefficients de charge des moteurs principaux et des générateurs auxiliaires. En particulier, les hypothèses suivantes ont été émises :

- variation du coefficient de puissance des moteurs principaux (C1) supposé être égal à 1 ;
- variation du coefficient de puissance des générateurs lors des phases d'arrivée, de mouvement interne et de départ (C2) supposé être égal à 1 ;
- variation du coefficient de puissance des générateurs pendant la phase de stationnement (C3) supposé être égal à 0,25 ;

Le coefficient C1 représente le pourcentage nominal de puissance maximale utilisée par les moteurs principaux. Le graphique ci-dessous montre qu'en faisant varier ce coefficient de 75 %, les émissions varient en moyenne de 10 %, ce qui indique que les émissions globales des navires dépendent de manière limitée des émissions provenant des principaux moteurs. En particulier, il convient d'observer que la plus grande variation des émissions se produit pour les navires de la catégorie Passenger (17 %), tandis que la catégorie la moins sensible à cette variation est celle Container (5 %).

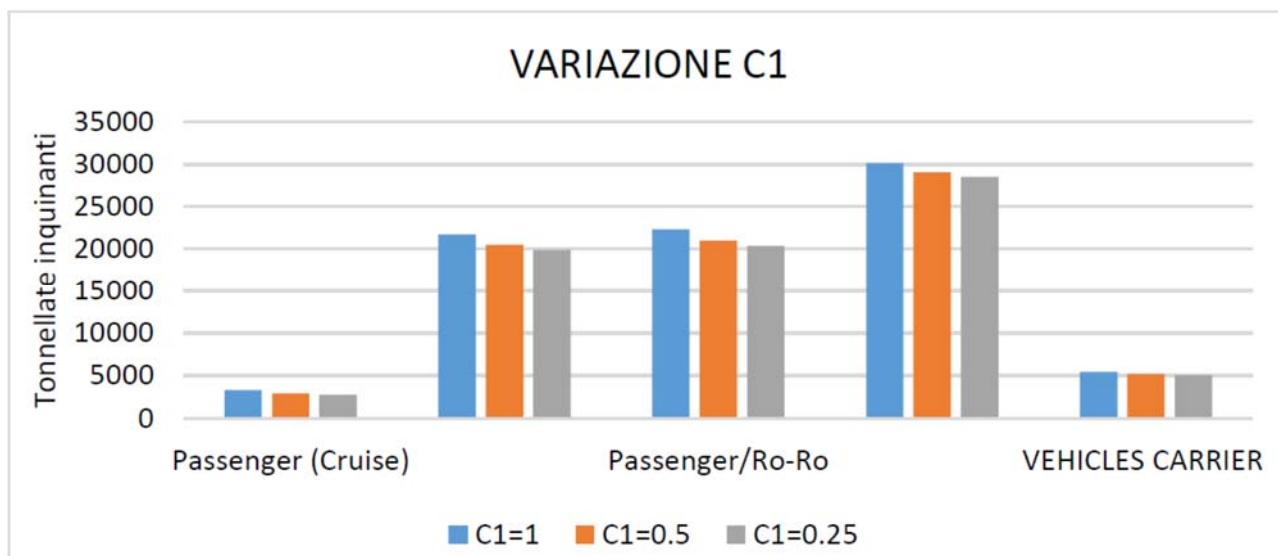


Figure 19 : Analyse de la sensibilité des émissions aux variations de C1

En gardant le même facteur de charge des moteurs principaux et des générateurs pendant la phase de stationnement, on peut observer comment varient les émissions lorsque le facteur de charge C2 varie pendant les phases d'arrivée, de mouvement interne et de départ. Dans ce cas, pour une variation de 75 % du facteur de charge en question, on observe que les émissions varient en moyenne de 18 %. Dans ce cas, la plus grande variation (29 %) est observée pour les émissions des navires de catégorie Passenger/Ro-Ro, tandis que la plus petite variation (11 %) est enregistrée pour les navires de la catégorie Passenger Cruise.

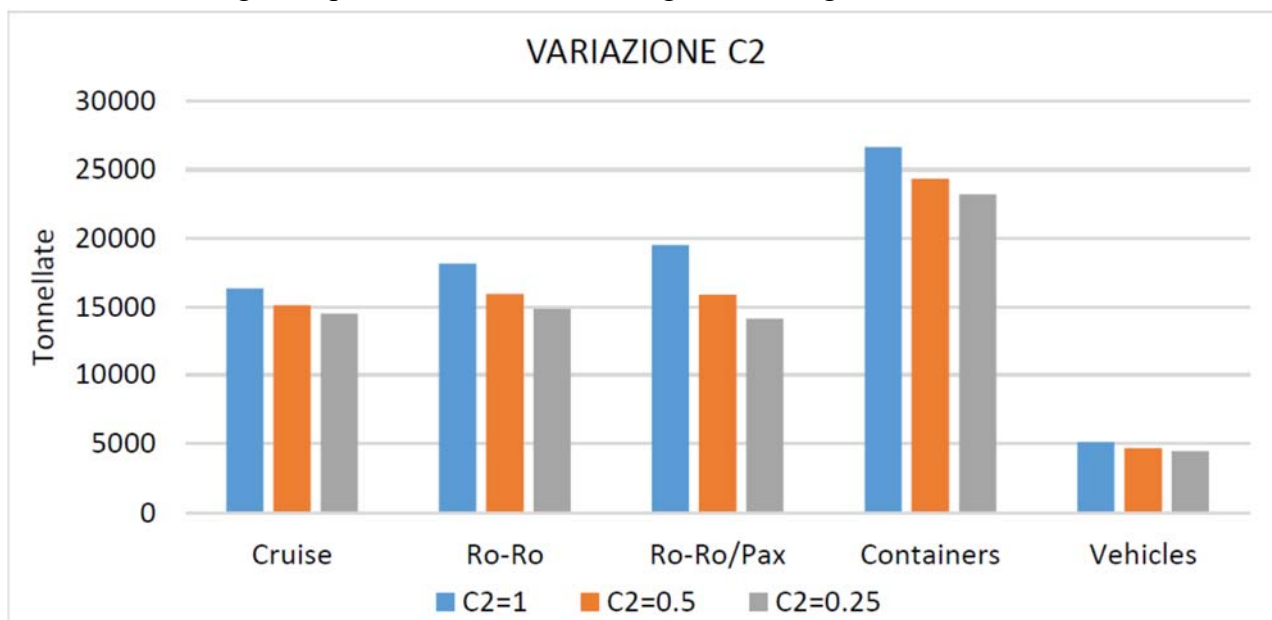


Figure 20 : Analyse de la sensibilité des émissions aux variations de C2

Enfin, en variant le seul facteur de charge C3 des générateurs pendant la phase de stationnement, on observe que les émissions varient en moyenne de 226 %. En particulier, la variation la plus importante des émissions se produit pour les navires de la catégorie Passenger Cruise (252 %), tandis que la plus petite variation est observée pour les navires de la catégorie Passenger/Ro-Ro (178 %).

5. Comparaison émissions navires/voitures

Les émissions produites par les navires étudiés ont été comparées à celles produites en moyenne par une voiture en un an, en Italie. Pour effectuer cette comparaison, il convient de définir les émissions annuelles moyennes du parc automobile. Les émissions des voitures sont mesurées en g/km et varient en fonction du type de véhicule, de l'année d'immatriculation et du carburant utilisé. Les émissions annuelles dépendent également des kilomètres parcourus en moyenne dans une année, ceux-ci varient selon le pays considéré, et en Italie, une voiture parcourt en moyenne 11 200 km par an (7). En prenant comme exemple le parc automobile de voitures diesel, les émissions moyennes des principaux polluants sont les suivantes (8) :

- SO_x = 0,0122 kg/an ;
- NO_x = 3,905 kg/an ;
- PM_{2,5} = 0,445 kg/an ;
- CO₂ = 1 259 kg/an (9) ;

En comparant les émissions des navires opérant dans le port de Livourne, il convient de noter que les 5309 navires appartenant aux 5 catégories étudiées produisent en un an autant de CO₂ qu'environ 66 000 voitures. En continuant la comparaison, en ce qui concerne les particules, le nombre de voitures équivalentes s'élève à 356 000, tandis que pour les NO_x, l'équivalence s'élève à 333 000 voitures. Enfin, en ce qui concerne les SO_x, plus de 115 millions de voitures sont nécessaires pour égaliser les émissions. Les résultats sont présentés sur la figure suivante.

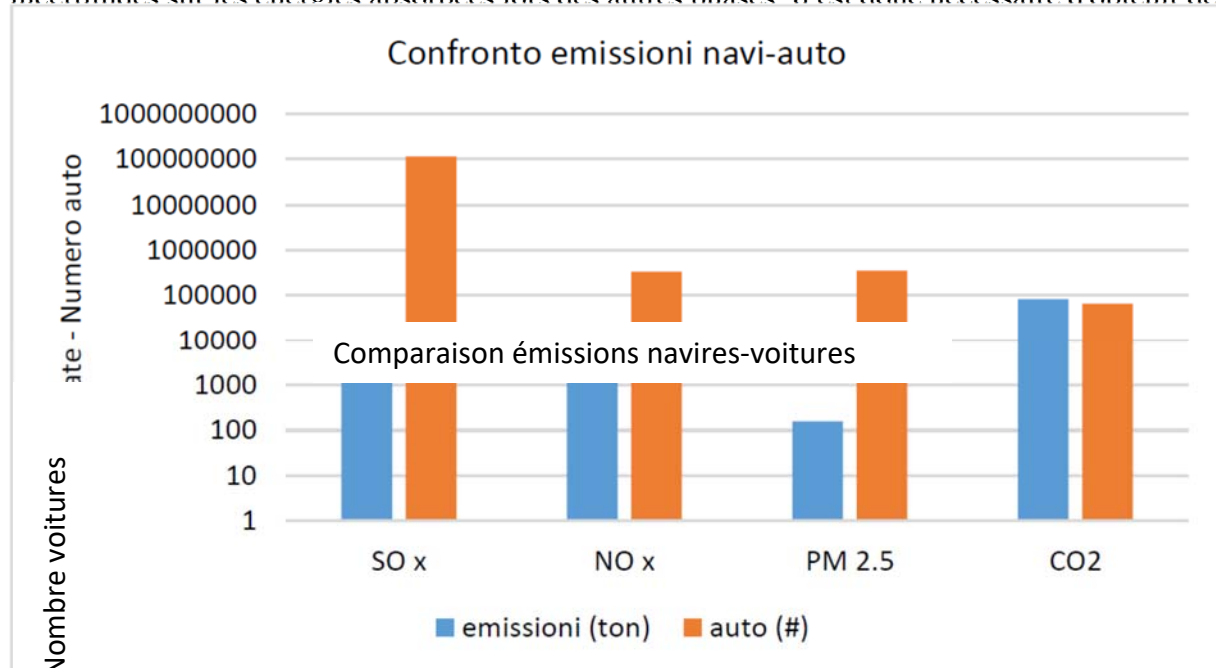


Figure 22 : Comparaison des émissions des navires avec le nombre de voitures équivalentes

Il est intéressant de comparer les émissions produites par les navires étudiés avec celles émises par les voitures de la ville de Livourne. Les voitures immatriculées dans la ville de Livourne en 2018 s'élèvent à environ 87 000 (10), les émissions annuelles produites par le parc automobile de Livourne ont été estimées comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Polluant	Émissions des navires	Émissions des voitures	Unité de mesure
SOx	1 404	1.06	Tonnes
NOx	1 301	340	Tonnes
PM	159	39	Tonnes
CO ₂	82 635	109 512	Tonnes

Tableau 10 : Comparaison entre les émissions des navires et celles des voitures dans la ville de

Connaissant les émissions moyennes produites par les voitures de Livourne, il est possible d'établir une comparaison entre les émissions du port et de la ville de Livourne ; une telle comparaison fait notamment ressortir que le CO₂ émis par les navires étudiés correspond à 75 % de celui émis par le parc automobile de Livourne en une année ; les émissions des oxydes d'azote et des particules sont respectivement 3,8 et 4 fois supérieures à celles des voitures, tandis qu'en ce qui concerne les oxydes de soufre, les émissions des navires correspondent à plus de 1300 fois les émissions de l'ensemble du parc automobile de la ville de Livourne.

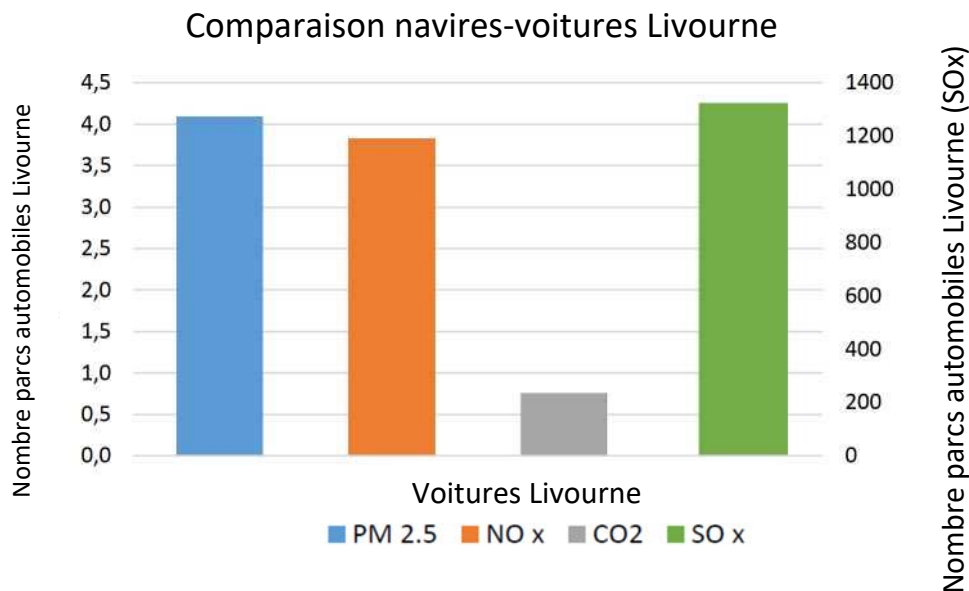


Figure 23 : Comparaison entre les émissions des navires et celles des voitures dans la ville de Livourne

6. Stratégies de réduction des émissions provenant des navires

L'étude réalisée montre que la plupart des émissions des navires se produisent lors de la phase de stationnement dans les ports. Les stratégies de réduction des émissions des GES doivent donc se concentrer sur cette réduction. À cet effet, plusieurs solutions sont envisagées pour atteindre les objectifs fixés, telles que l'électrification des quais ou l'utilisation de carburants avec un impact environnemental moins important que ceux traditionnellement utilisés.

6.1 Électrification des quais (Cold Ironing)

L'électrification des quais est un projet très innovant, en plein développement, qui a déjà rencontré un vif succès dans le monde entier. À ce jour, les ports qui se sont dotés de cette technologie sont peu nombreux, mais les avantages en termes de pollution, de coûts, d'énergie et d'image poussent les ports et les compagnies maritimes à se diriger dans ce sens. Le quai électrifié est un système destiné à fournir l'électricité nécessaire aux navires en stationnement via une ligne électrique terrestre généralement raccordée au réseau électrique national. Cela permet de réduire considérablement les émissions produites pendant la phase de stationnement, car les facteurs d'émission du parc électrique national sont inférieurs à ceux des générateurs des navires.

En prenant comme exemple le port de Livourne, l'énergie totale absorbée par les navires étudiés pendant la phase de stationnement dépassait les 87 GWh. En supposant que toute cette énergie soit prélevée sur le réseau électrique national, on peut calculer les émissions indirectes des différents polluants résultant de la production d'électricité à partir du réseau électrique national. Au niveau national, l'électricité est produite à partir de différentes sources et types d'installations (centrales hydroélectriques, thermoélectriques, biomasse photovoltaïque, éoliennes ...) il est donc particulièrement difficile d'identifier avec exactitude les différents polluants et leurs coefficients d'émission. Pour le calcul, ont été utilisés les coefficients indiqués dans l'inventaire d'ISPRA (Institut supérieur italien pour la protection et la recherche environnementale) relatifs aux sources de combustion dans des installations fixes (11). En particulier, les coefficients d'émission du CO₂ se rapportent à l'année 2018, tandis que les coefficients d'émission des NO_x, SO_x, CO et PM₁₀ se rapportent à l'année 2017. Le tableau ci-dessous compare les émissions produites par les générateurs des navires avec celles du parc électrique national.

Vecteur	électrique	Carburant
NO _x (TONNES)	20	967
PM ₁₀ (TONNES)	0.47	126
CO (TONNES)	8.57	87
SO _x (TONNES)	5.58	1 051
CO ₂ (TONNES)	26 168	61 890

Tableau 11 : Comparaison des émissions carburant-électrique

On constate immédiatement que les émissions du parc électrique sont nettement inférieures aux émissions produites par les carburants traditionnels, à la fois parce que les centrales électriques présentent en moyenne un rendement énergétique supérieur à celui des générateurs des navires, et parce qu'une part croissante de l'énergie nationale est produite à partir de sources renouvelables à émission nulle. De manière plus détaillée, les calculs montrent que l'alimentation via le réseau électrique national de tous les navires stationnés dans le port de Livourne entraînerait une réduction des émissions de CO₂ égale à 57 %, tandis que les réductions des NO_x, SO_x et PM₁₀ seraient d'environ 99 %.

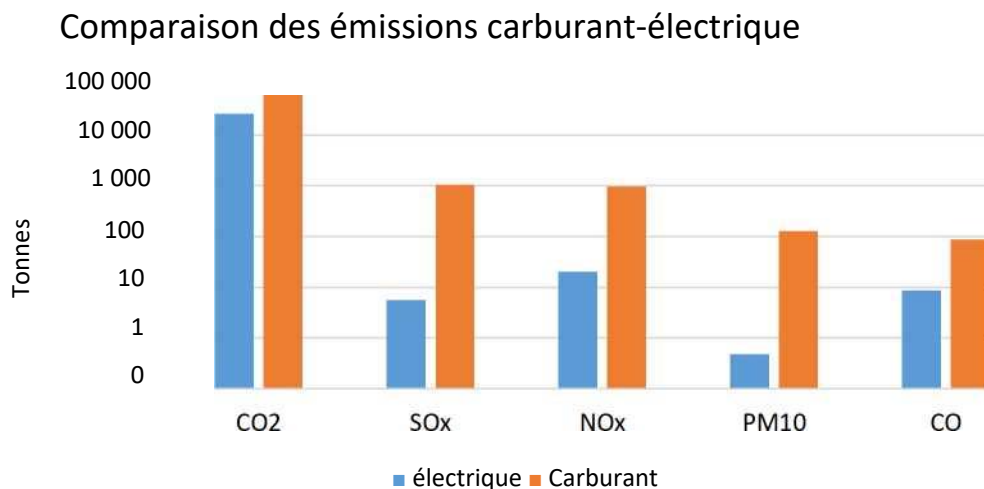


Figure 24 : Comparaison des émissions en utilisant des carburants ou de l'électricité pour alimenter les navires stationnés

Il convient de souligner que ces émissions peuvent être davantage réduites en installant dans les zones portuaires ou limitrophes des installations de production d'électricité à partir de sources renouvelables, telles que :

- systèmes photovoltaïques ;
- installations éoliennes de taille moyenne ou petite ;
- installations pour l'exploitation des vagues et des courants marins.

6.2 Utilisation de carburants alternatifs (GNL)

Une autre méthode suivie pour réduire les émissions de polluants et promouvoir la décarbonisation est l'utilisation de carburants alternatifs à moindre impact environnemental tels que les biocarburants, le gaz naturel et l'hydrogène. À l'heure actuelle, l'utilisation du gaz naturel sous forme liquide (GNL) à bord des navires est à même de garantir une réduction significative des émissions de polluants. Le carburant marin actuel présente une teneur en soufre très élevée par rapport aux carburants routiers et le GNL promet d'être un carburant beaucoup plus propre

du point de vue des polluants locaux. C'est l'une des principales raisons pour lesquelles on encourage l'utilisation du GNL à bord des navires pour répondre aux exigences des zones de contrôle des émissions (ECA) et à la limite mondiale de 0,5 % pour le soufre qui entrera en vigueur en 2020. Les réductions des polluants locaux associées à l'utilisation du GNL dans les navires sont bien documentées (12), (13), et estiment les réductions de NO_x, SO_x et PM à 85-100 %, par rapport aux navires propulsés au fioul lourd.

Fuel	Grams of pollutant per gram of fuel consumed			kg of pollutant per GJ of fuel consumed		
	NO _x	SO ₂	PM	NO _x	SO ₂	PM
HFO (0.5% sulphur content)	0.0825	0.005	0.00385	2.027	0.123	0.095
MGO (0.1% sulphur content)	0.0877	0.001	0.00097	2.060	0.023	0.023
LNG	0.0140	0	0.00018	0.292	0.000	0.004
LNG: change versus HFO (%)				-85.6%	-100%	-96.0%
LNG: change versus MGO (%)				-85.8%	-100%	-83.5%

Tableau 12 : Coefficients d'émission des NO_x, SO_x et PM en utilisant un carburant traditionnel ou du GNL

En utilisant les coefficients d'émission du *tableau 12*, il est possible de calculer quelles seraient les émissions produites par les navires s'ils utilisaient du GNL au lieu du carburant traditionnel.

Pour réaliser les estimations, il a fallu calculer les quantités de GNL consommées pour produire l'énergie absorbée par les navires. Le calcul a été effectué en supposant que tous les moteurs principaux et générateurs des navires ont le même rendement dans toutes les conditions de fonctionnement, et que celui-ci est égal à 40 % (14), tandis que le pouvoir calorifique inférieur (PCI) a été supposé être égal à celui du méthane, car il représente environ 99 % du mélange de GNL. À partir de ces hypothèses, les émissions provenant de l'utilisation du GNL ont été calculées. Les résultats sont présentés au *tableau 13*.

Polluant	CO ₂	SO _x	NO _x	PM
Carburant traditionnel	82 635	1 404	1 301	169
GNL	66 108	0	309	4

Tableau 13 : Tonnes de CO₂, NO_x, SO_x et PM émises en utilisant un carburant traditionnel ou du GNL

L'utilisation du GNL au lieu des carburants traditionnels présente des avantages en termes d'émissions. Pour ce qui est des émissions de CO₂, on observe une diminution de 20 % des émissions, tandis qu'on enregistre des réductions encore plus significatives pour les oxydes d'azote (76 %), les particules (97 %) et les oxydes de soufre, qui en raison de la composition

chimique du GNL sont presque totalement absents.

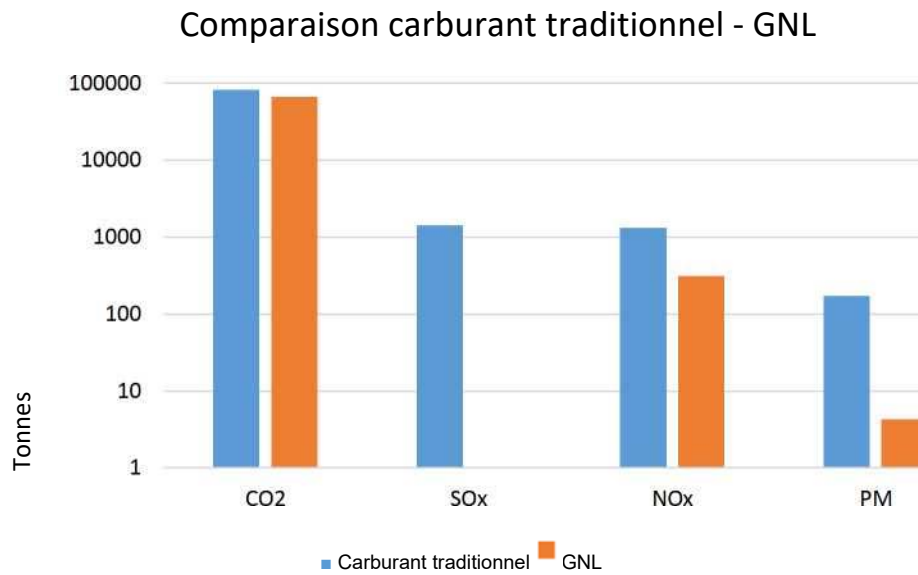


Figure 25 : Comparaison émissions de CO₂, NO_x, SO_x et PM en utilisant du carburant traditionnel ou du GNL

7. Méthodologie de calcul des émissions côté terre

Le calcul des émissions côté terre est beaucoup plus simple que celui côté mer, tant pour l'hétérogénéité réduite des sources que pour leur nombre limité par rapport aux sources du côté mer. La méthodologie adoptée consiste à diviser toutes les sources en deux groupes :

- Sources émises par des sujets qui ont une relation contractuelle avec AdSP-MTS ;
- Sources émises par des sujets présents dans les zones portuaires ou limitrophes, mais qui n'ont pas de relation contractuelle avec AdSP-MTS ;

Il a été décidé de surveiller également les industries présentes dans les zones limitrophes des zones portuaires car même si elles ne sont pas directement rattachées au port, elles contribuent au total des émissions mesurées au sein des ports et doivent donc être prises en compte lors de la phase de surveillance via des capteurs.

L'étape suivante a consisté à distinguer les différents types d'émissions :

- Émissions directes : produites par la combustion de carburants utilisés pour les véhicules, le chauffage des bâtiments et la production d'électricité ;
- Émissions indirectes : provenant de l'achat d'électricité, de chaleur ou de vapeur à partir de sources externes non présentes dans les zones limitrophes.

Toutes les sources possibles côté terre ont ainsi été classées, et un algorithme de calcul spécial a été développé pour chacune d'entre elles. À ce stade, tous les sujets ont été contactés et des informations spécifiques leur ont été demandées à propos des éléments suivants :

- nombre de véhicules possédés ;
- type et quantité de carburants consommés,
- type et quantité de carburants consommés pour le chauffage des bâtiments ;
- consommation d'électricité.

L'Autorisation intégrée environnementale (AIA) a également été demandée aux entreprises qui en disposaient afin de quantifier plus précisément les émissions dans l'atmosphère.

Les émissions ont été estimées en appliquant, selon les cas, les facteurs d'émission spécifiques pour les différents procédés, les formules chimiques d'oxydoréduction des carburants et les valeurs présentes dans les AIA.

7.1 Émissions de sources rattachées à AdSP-MTS

Cette catégorie comprend tous les sujets présents dans les ports et dont les activités sont directement rattachées au transport maritime et qui ont une relation contractuelle avec AdSP-MTS. Les sujets pour les ports de Livourne et de Piombino sont présentés dans le tableau suivant.

La méthodologie adoptée pour calculer les émissions des différents polluants prévoit ce qui suit :

- identification et caractérisation de la source ;
- estimation des quantités de carburant consommées au cours de l'année de référence
- estimation des émissions à l'aide de coefficients appropriés.

Les données ont été collectées en contactant directement tous les sujets en leur demandant des informations spécifiques relatives aux différentes consommations énergétiques de leurs activités.

7.1.1 Livourne

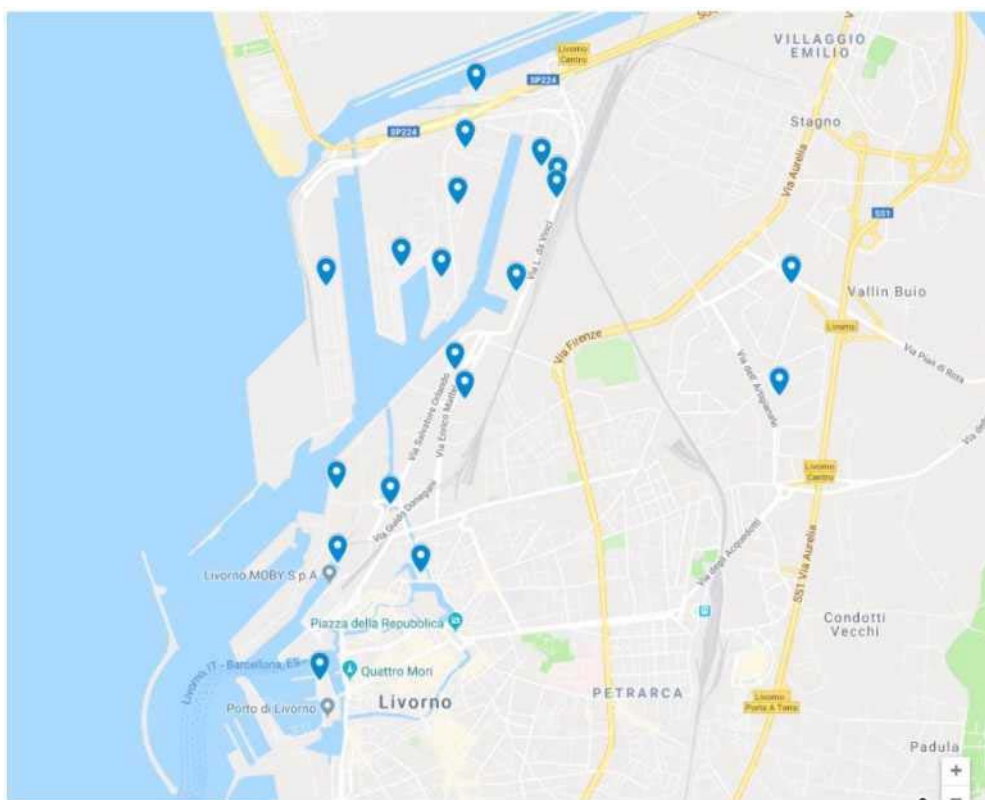


Figure 26 : Carte des sujets étudiés dans le port de Livourne et dans les zones limitrophes

Pour le port de Livourne, 17 entreprises ont été identifiées comme appartenant à cette catégorie. Les personnes interrogées ont indiqué leur consommation annuelle de carburant et d'électricité. Pour l'année 2017, la consommation de carburants traditionnels a dépassé les 42 000 mètres cubes, tandis que la consommation d'électricité a été d'environ 34 000 MWh.

La consommation de carburant est à attribuer aux engins à quai appartenant aux différents exploitants de terminaux, aux véhicules, au chauffage des bâtiments et aux différents processus de production, compte tenu de l'énorme hétérogénéité des sources, l'utilisation de coefficients

pour estimer les émissions de polluants ne s'avère pas optimale, le CO₂ a donc été calculé en utilisant les formules chimiques des différents carburants et en calculant mathématiquement le CO₂ qui se forme lors du processus d'oxydoréduction. Les carburants utilisés sont les suivants :

- Essence = 2,1 m³ ;
- Gasoil = 2 200 m³ ;
- GPL = 2 066 m³ ;
- Gaz naturel = 38 150 m³.

En ce qui concerne la consommation d'électricité, celle-ci fait partie des émissions indirectes, les quotas autoproduits à partir de sources renouvelables ont été exclus du calcul. Pour calculer les émissions de CO₂, CO, SO_x, NO_x et PM, ont été utilisés les coefficients relatifs au parc thermoélectrique national fournis par l'ISPRA pour l'année 2018. Les résultats sont présentés dans la figure suivante qui indique que les émissions indirectes produites par l'utilisation de l'électricité sont nettement inférieures à celles produites par les carburants, ceci est dû à la fois à la plus grande efficacité du parc national thermoélectrique et à la part de plus en plus importante de sources renouvelables utilisées.

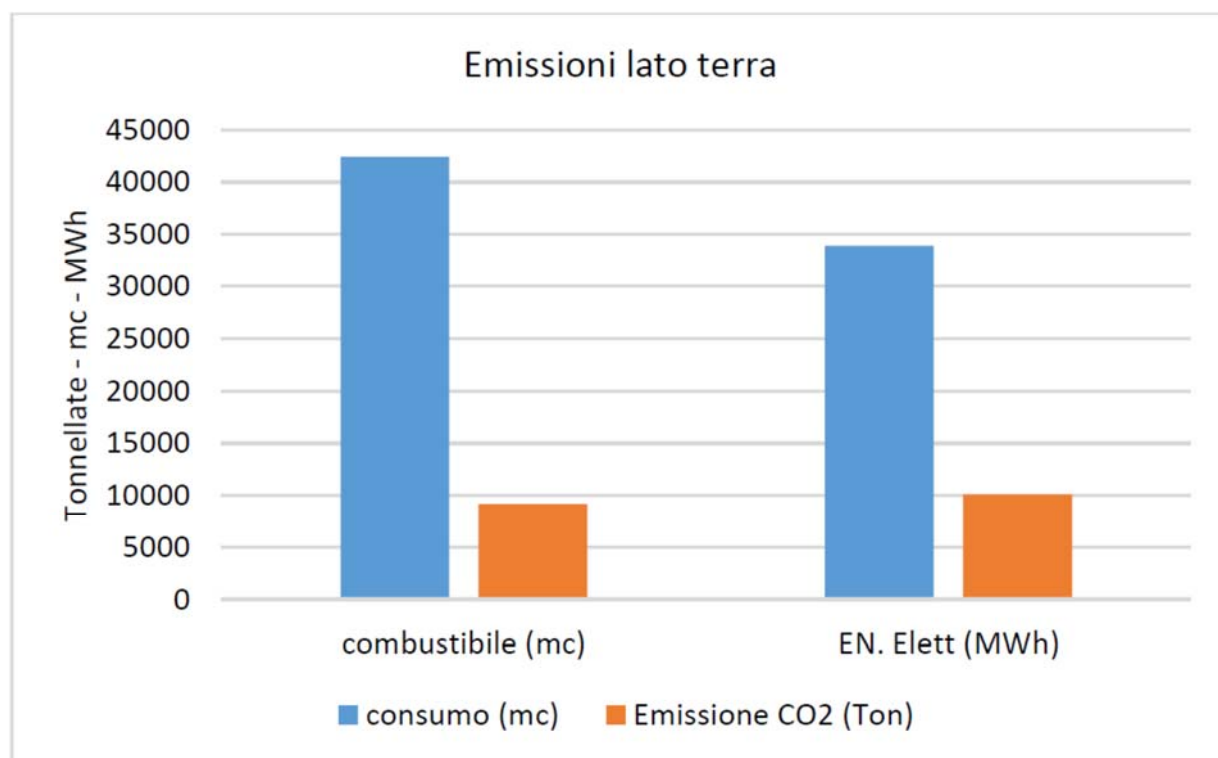


Figure 27 : Comparaison entre la consommation de carburant et d'électricité et les émissions de CO₂ associées (Livourne)

En ce qui concerne les émissions de CO₂, la part produite directement par la combustion de carburants s'élève à environ 9 000 tonnes par an, tandis que celle produite indirectement par l'utilisation de l'électricité est d'environ 10 000 tonnes.

Pour la consommation d'électricité, les émissions des autres principaux polluants tels que NOx, SOx, CO et PM ont également été calculées, dont les résultats sont présentés dans la figure ci-dessous.

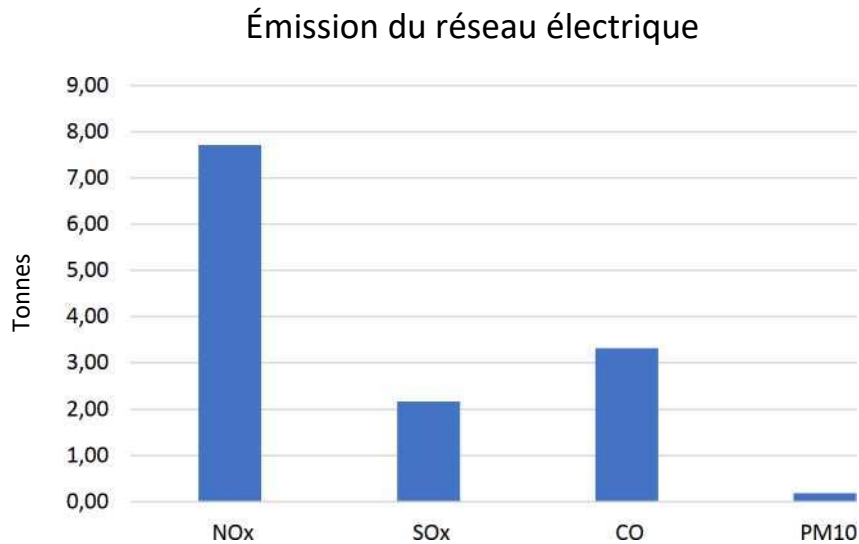


Figure 28 : Émissions de NOx, SOx, CO et PM produites indirectement par la consommation d'électricité

La *figure 28* montre que 57 % des émissions sont composées d'oxydes d'azote (7,7 tonnes), le monoxyde de carbone représente quant à lui 25 % des émissions (3,3 tonnes), on observe des chiffres beaucoup plus faibles pour les émissions d'oxyde de soufre (2 tonnes) et de particules (0,2 tonnes).

7.1.2 Piombino

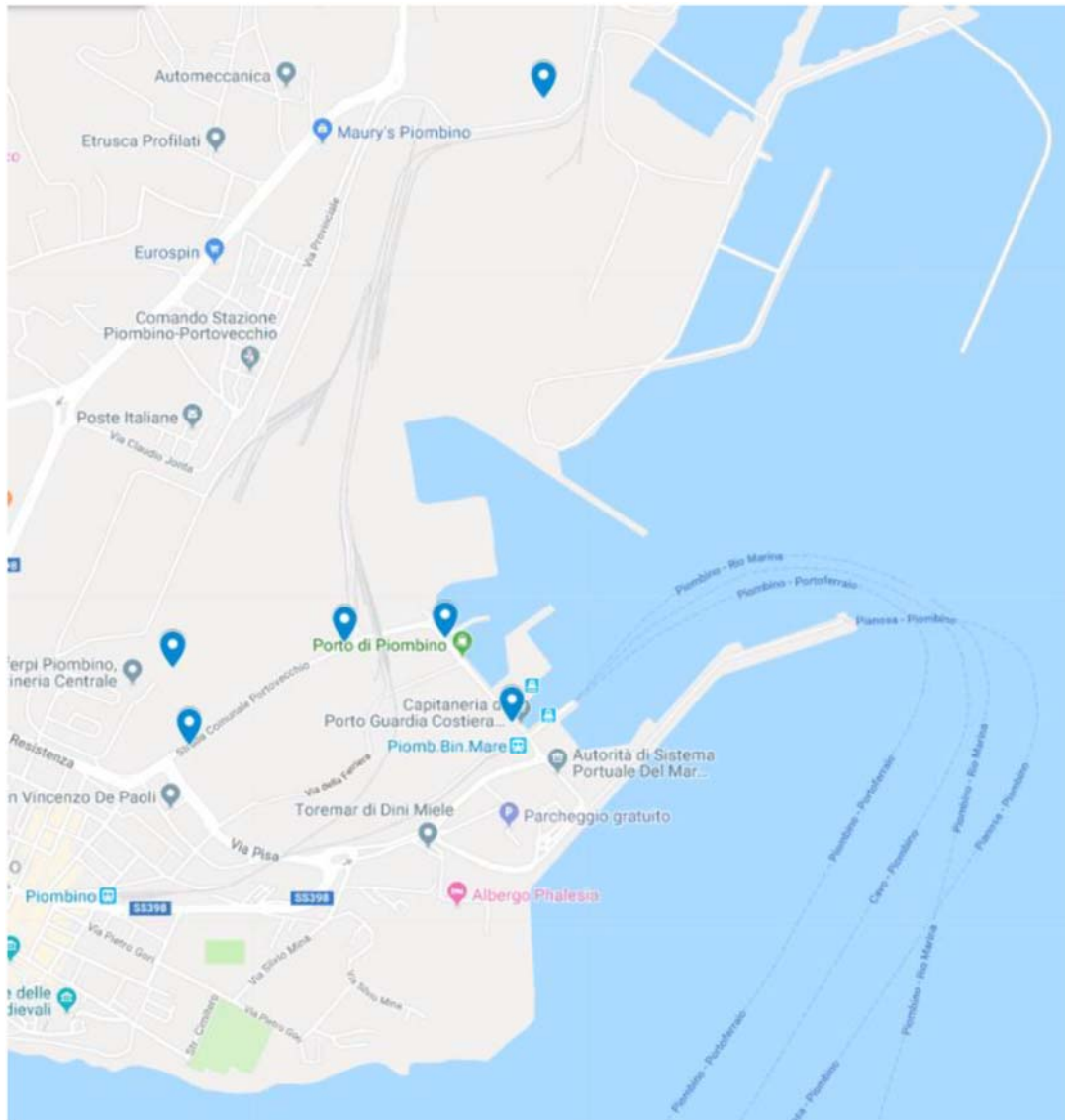


Figure 29 : Carte des sujets étudiés dans le port de Piombino et dans les zones limitrophes

Pour le port de Piombino, 4 entreprises ont été identifiées comme appartenant à cette catégorie. Les personnes interrogées ont indiqué leur consommation annuelle de carburant et d'électricité. Pour l'année 2017, la consommation de carburants traditionnels s'élève à environ 5 000 mètres cubes, tandis que la consommation d'électricité a été d'environ 68 MWh.

Les carburants consommés sont les suivants :

- Essence = 2 m³ ;
- Gasoil = 695 m³
- Gaz naturel 9 831 nm³.

Le tableau ci-dessous montre la consommation de carburant et d'électricité et leurs émissions de CO₂.

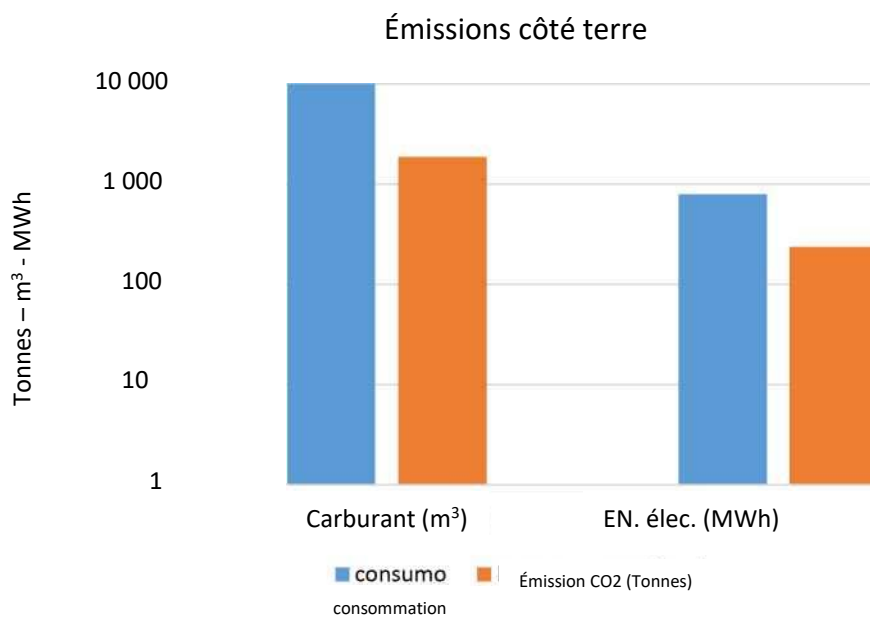


Figure 30 : Comparaison entre la consommation de carburant et d'électricité et les émissions de CO2 associées (Piombino)

En ce qui concerne les émissions de CO2, la part produite directement par la combustion de carburants s'élève à environ 1800 tonnes par an, tandis que celle produite indirectement par l'utilisation de l'électricité est d'environ 200 tonnes.

Pour les émissions provenant de l'utilisation de l'électricité, les émissions de NOx, SOx, CO et PM ont également été calculées, dont les résultats sont présentés dans la figure ci-dessous.

Émissions du réseau électrique

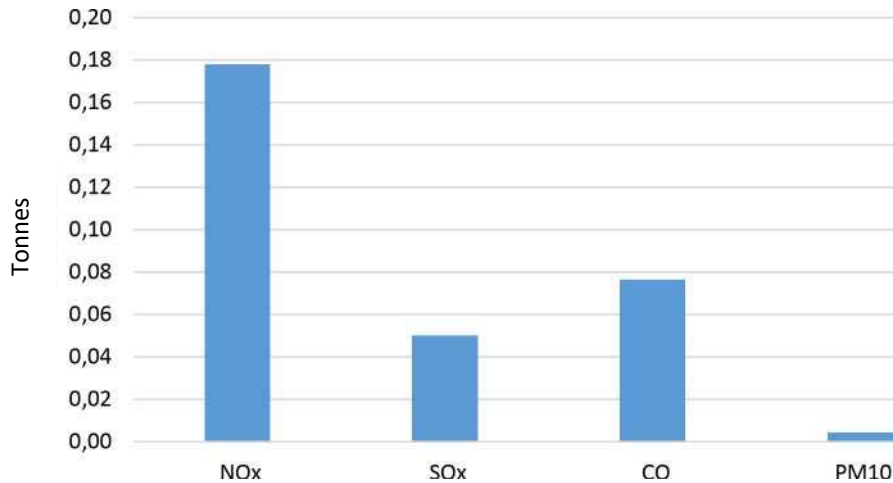


Figure 31 : Émissions de NOx, SOx, CO et PM produites indirectement par la consommation d'électricité (Piombino)

7.2 Émissions de sources non rattachées à AdSP-MTS

Pour le calcul de l'empreinte carbone, il a été tenu compte de l'impact environnemental des industries présentes aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de la zone portuaire dont les émissions ne dépendent pas d'AdSP-MTS mais ont un impact significatif sur les émissions enregistrées à l'intérieur des zones portuaires. À cette fin, toutes les industries à l'origine d'émissions de polluants dans l'atmosphère dans les zones portuaires de Livourne et de Piombino ont été identifiées. Les entreprises en question ont été identifiées avec divers outils (15), (16), (17). Par la suite, il a été vérifié que les sociétés étaient toujours en activité en 2018 (18). Une fois identifiées, les AIA (Autorisation intégrée environnementale) ont été demandées, à partir desquelles ont été calculées les émissions de polluants dans l'atmosphère.

L'Autorisation environnementale intégrée (AIA) est l'autorisation dont ont besoin certaines entreprises pour se conformer aux principes imposés par la communauté européenne et visant à prévenir et à réduire la pollution. Pour déterminer les conditions de délivrance de l'AIA, l'autorité compétente prend en compte les principes généraux suivants :

- les mesures appropriées de prévention de la pollution doivent être adoptées, en utilisant notamment les meilleures techniques disponibles ;
- il ne doit pas y avoir de phénomène de pollution significatif ;
- la production de déchets doit être évitée ; sinon, les déchets doivent être valorisés ou, si cela s'avère impossible sur le plan économique et technique, ils doivent être éliminés en évitant et réduisant leur impact sur l'environnement ;
- l'énergie doit être utilisée de manière efficace ;

- les mesures nécessaires doivent être prises pour prévenir les accidents et limiter leurs conséquences ;

7.2.1 Livourne

Pour le port de Livourne, deux entreprises ont été identifiées comme appartenant à cette catégorie. La collecte des données a été effectuée en contactant les entreprises et, en plus de leur demander de remplir des questionnaires spécifiques, elles ont dû fournir les AIA relatives aux sites gérés. La collecte des données est toujours en cours, les carburants consommés sont

- méthane = 324 000 m³ ;
- gasoil = 763 m³ ;
- essence = 34 m³.

À partir de l'analyse des consommations, les émissions ont été estimées, dont les résultats sont présentés dans la figure suivante.

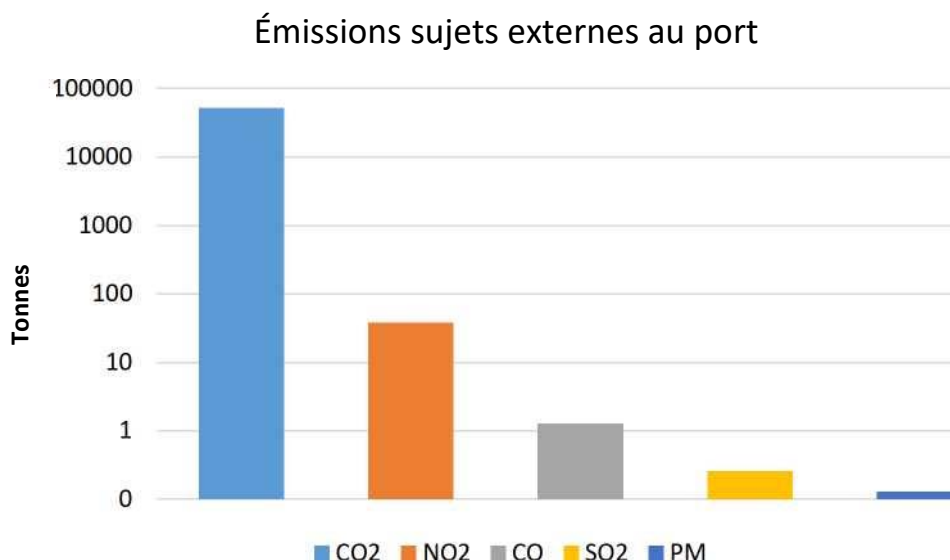


Figure 32 : Émissions de CO₂, NO_x, SO_x, CO et PM produites par des sujets externes au port de Livourne

Comme indiqué précédemment, ces émissions ne sont pas du ressort de l'AdSP-MTS, mais doivent quand même être quantifiées car les sources sont situées dans des zones limitrophes des zones relevant de la compétence de l'AdSP-MTS et peuvent donc interférer avec les mesures des émissions qui seront ensuite réalisées au moyen de capteurs environnementaux pour valider les modèles mathématiques.

7.2.2 Piombino

Pour le port de Piombino, 2 entreprises ont été identifiées. La méthodologie adoptée est la même que celle décrite précédemment. Dans ce cas également, la collecte des données est toujours en cours, après examen des AIA, les carburants consommés sont actuellement les suivants :

- Gaz naturel = 111 millions de m³/an ;
- gaz sidérurgiques = 232 millions de m³/an.

En utilisant les données contenues dans l'AIA et celles fournies par l'ISPRA pour les émissions des centrales électriques (19), les émissions de CO₂, NO_x, SO_x, PM et CO ont été calculées, dont les résultats sont présentés dans la figure suivante.

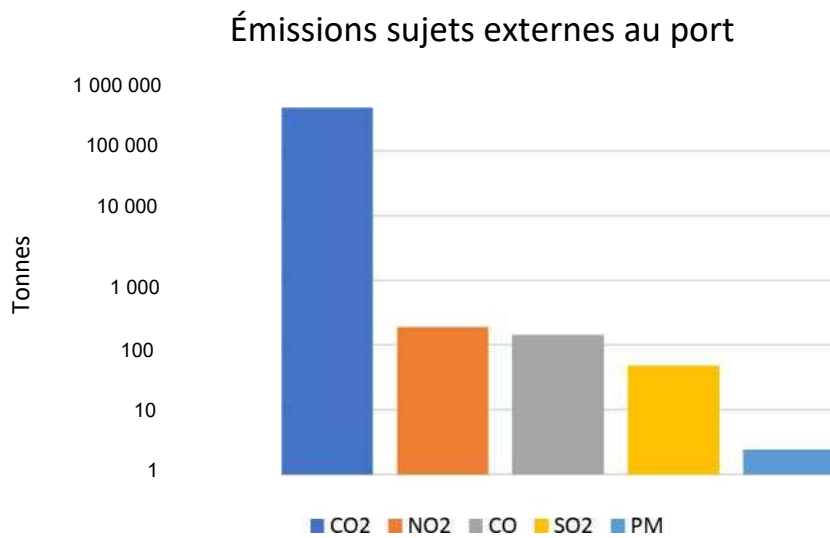


Figure 33 : Émissions de CO₂, NO_x, SO_x, CO et PM produites par des sujets externes au port de Piombino

8. Conclusions

On estime que du 01/05/2018 au 02/05/2019 dans le port de Livourne, les émissions totales produites par les activités liées au transport maritime relevant de la compétence de l'AdSP-MTS à l'étude ont été d'environ 150 000 tonnes. La figure ci-dessous montre la répartition des différentes émissions.

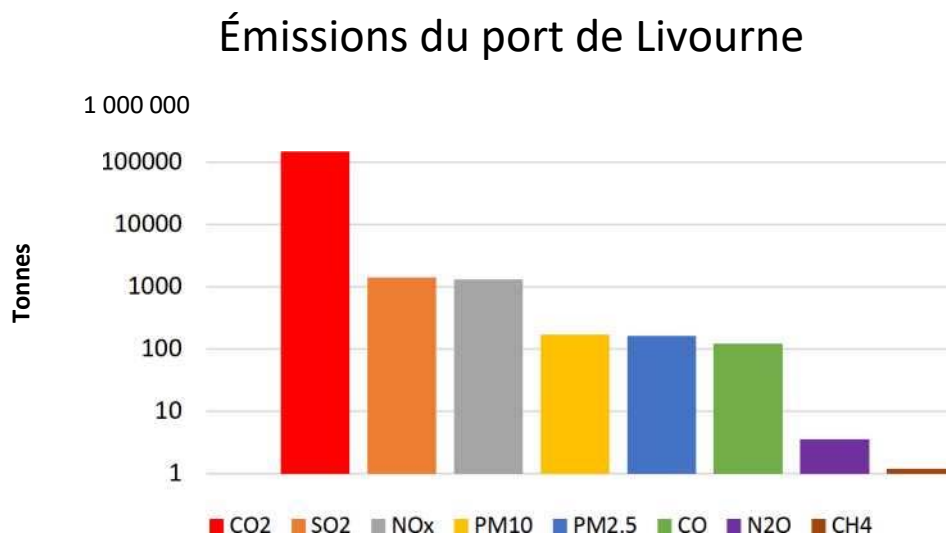


Figure 34 : Émissions totales produites par le port de Livourne

Comme on peut le constater, le dioxyde de carbone représente plus de 97 % de toutes les émissions produites. Plus précisément, environ 58 % du CO₂ provient directement des navires lors des mouvements portuaires, 35 % provient des activités industrielles exercées dans les zones portuaires, tandis que les 7 % restants sont composés d'émissions indirectes provenant de la consommation d'électricité produite à partir de zones extérieures aux zones portuaires.

Émissions de CO2

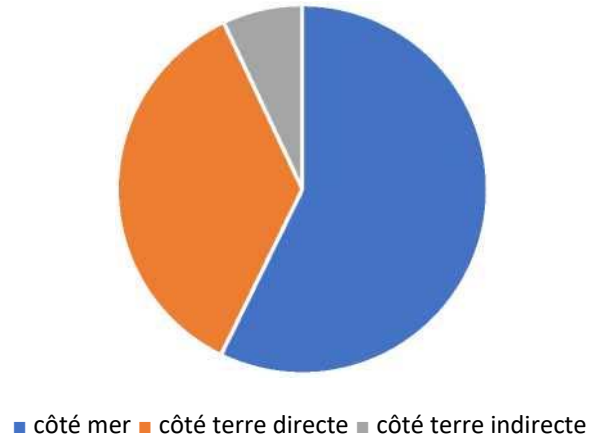


Figure 35 : Répartition des émissions de CO₂ produites par le port de Livourne

En ce qui concerne le port de Piombino, les émissions produites pendant la période de référence par les activités liées au transport maritime relevant de la compétence de l'AdSP-MTS à l'étude ont été d'environ 10 000 tonnes. La figure ci-dessous montre la répartition des différentes émissions.

Émissions du port de Piombino

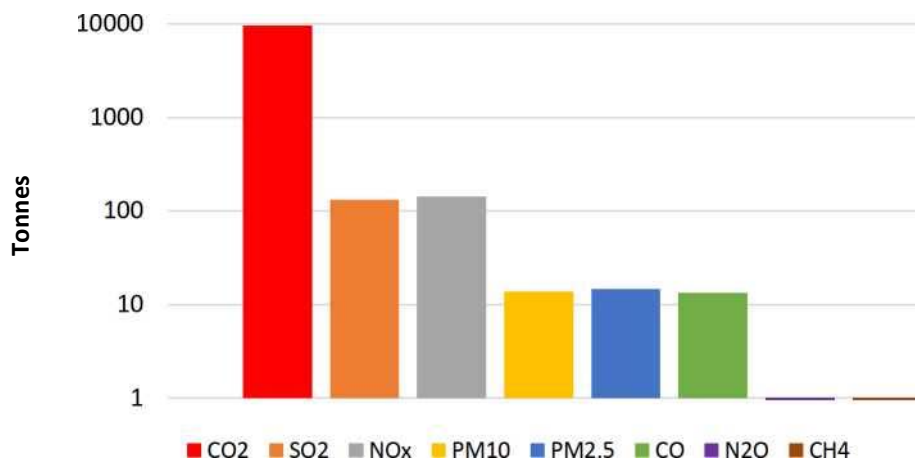


Figure 36 : Émissions totales produites par le port de Piombino



Comme on peut le constater, le dioxyde de carbone représente plus de 96 % de toutes les émissions produites. Plus précisément, environ 78 % de tout le CO2 provient directement des navires lors des mouvements portuaires, 20 % provient des activités industrielles exercées dans les zones portuaires, tandis que les 2 % restants sont composés d'émissions indirectes provenant de la consommation d'électricité produite à partir de zones extérieures aux zones portuaires.

Émissions de CO2

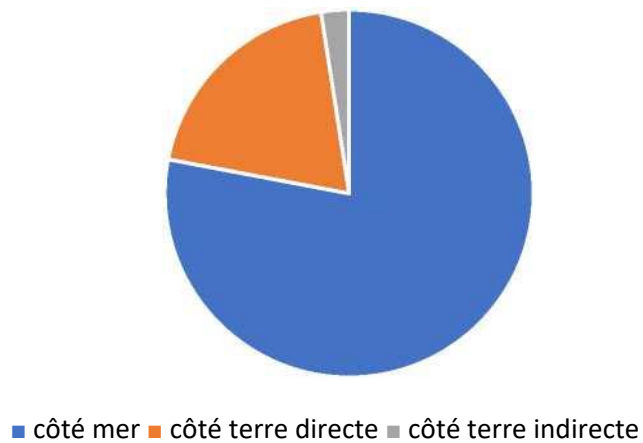


Figure 37 : Émissions totales produites par le port de Piombino

9. Représentation SIG

À la fin du calcul des émissions de chaque voyage, on a tenté de représenter graphiquement les valeurs des polluants trouvés. La plateforme la mieux adaptée pour ce type de représentation, et qui permet ensuite d'analyser les valeurs identifiées, est basée sur un système SIG. En effet, ce type de système permet d'associer une représentation graphique à des attributs, à la fois littéraux et numériques. Les SIG sont des systèmes informatiques géographiques conçus pour la gestion du territoire, afin de fournir des outils adéquats pour les processus de gestion et de planification. Les SIG permettent d'effectuer des analyses et des représentations de l'espace et des événements qui s'y produisent.

Nous avons tout d'abord commencé par analyser les itinéraires possibles depuis l'entrée au port jusqu'à chaque quai de destination. Le port de Livourne possède une seule entrée navale située au sud entre le barrage Curvilinea et le barrage de la Vegliaia, ce qui facilite grandement le calcul de chaque itinéraire possible pour atteindre les quais du port. Pour créer les itinéraires, le fond marin du port a été analysé et le meilleur itinéraire pour les navires en transit a été calculé en fonction des différentes profondeurs.



Figure 38 : représentation de l'évolution des fonds marins du port de Livourne

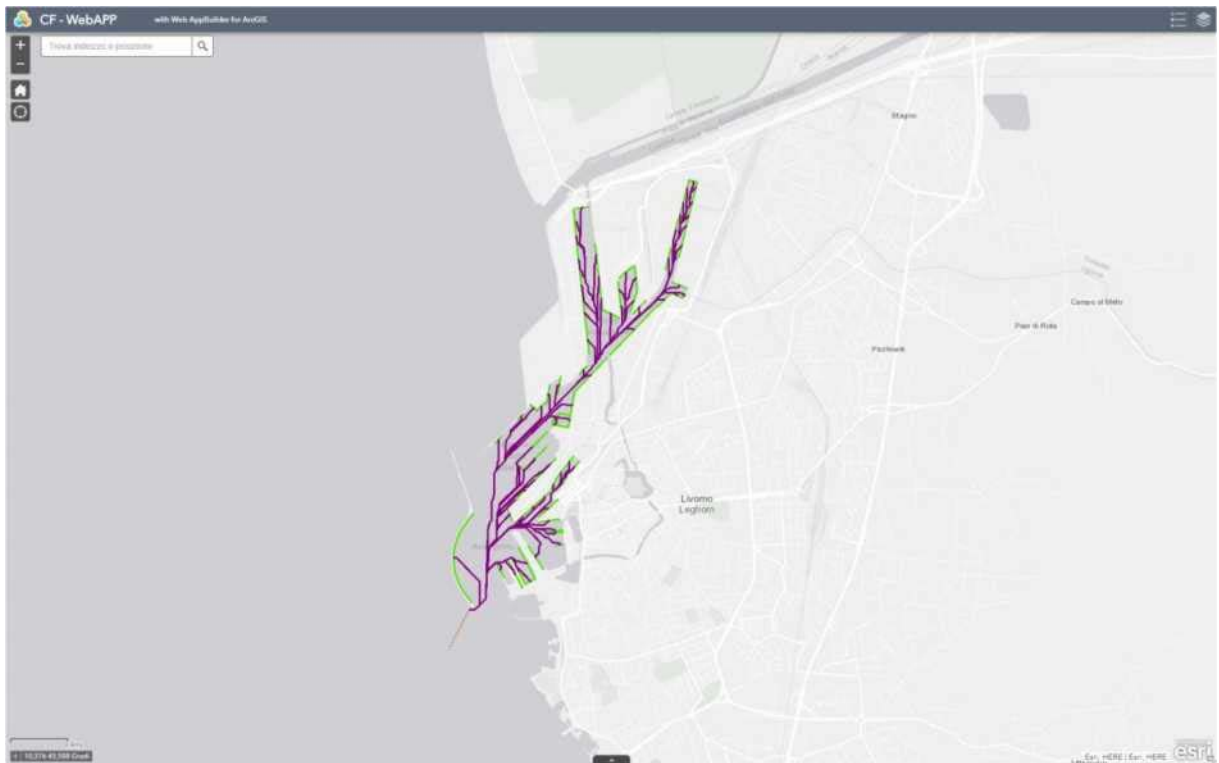


Figure 39 : identification des itinéraires navals

Ensuite, en prenant comme informations initiales celles fournies par la plateforme Monica en ce qui concerne les données de transit des navires dans le port de Livourne, on a tenté de représenter chaque voyage des navires sur la carte et les données relatives aux polluants émis pour un seul voyage.

Grâce aux calculs précédemment indiqués, les données sur les émissions ont été associées à chaque voyage puis, les données globales ont été associées au trajet relatif au quai de destination.

Pour donner un exemple concret, en sélectionnant un quai souhaité, il est possible d'obtenir les données relatives aux émissions de tous les voyages effectués au cours de la dernière année vers ce quai spécifique.

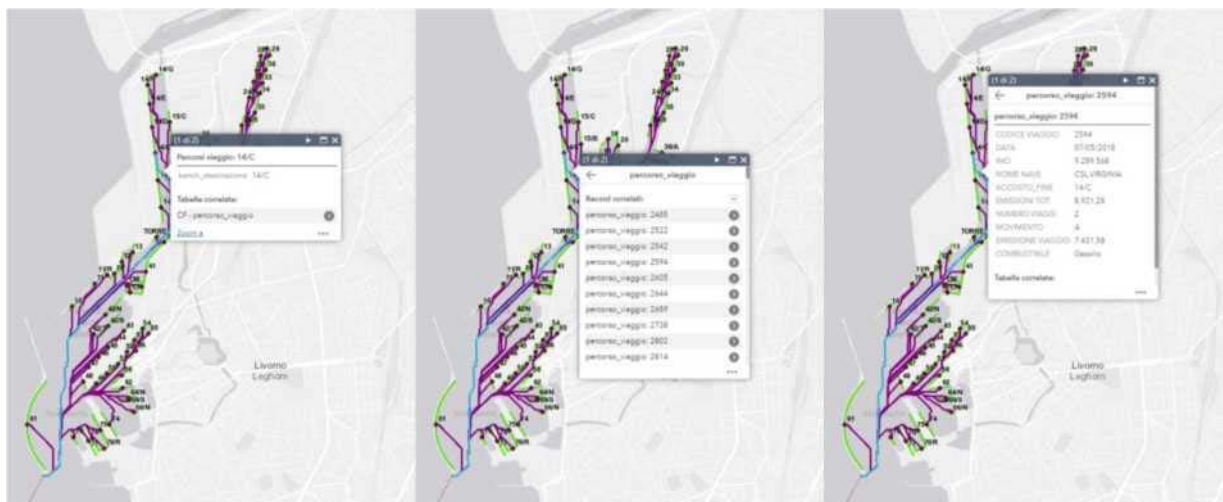


Figure 40 : représentation des données associées à un voyage spécifique

Sur la *figure 40*, il est possible d'observer la manière dont sont représentées les données associées à un seul voyage : l'itinéraire 14/C a été sélectionné, à partir de ce moment, tous les voyages effectués l'année dernière en direction du quai 14/C sont indiqués. Une fois le voyage sélectionné, par exemple le numéro 2594, toutes les données associées sont représentées, à savoir : date, omi du navire, nom du navire, émissions totales du navire sur les itinéraires menant à ce quai, nombre de voyages effectués, type de voyage, émissions de CO₂ associées au trajet sélectionné.

Après avoir représenté les valeurs relatives à chaque voyage, il a été choisi de représenter les émissions relatives aux navires effectuant les trajets individuels.

En effet, les données de chaque navire concernant les postes d'amarrage sur les quais individuels ont été agrégées afin d'obtenir une quantification spécifique des émissions d'un navire rattaché à un poste d'amarrage. Pour rapporter les données calculées aux différents navires, il est nécessaire de les rattacher à un seul itinéraire et non à l'ensemble du port, à la fois pour des problèmes de représentation et parce que chaque trajet comporte des temps et des distances parcourus différents.

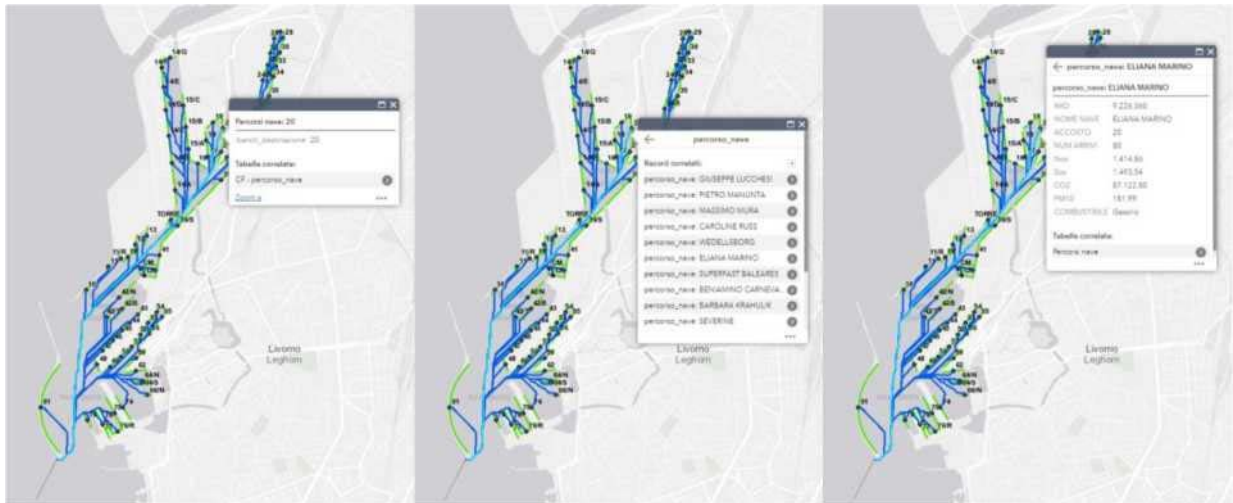


Figure 41 : représentation des données associées à un navire spécifique

Sur la figure 41, il est possible de voir la manière dont sont représentées les données rattachées à un navire : l'itinéraire vers le quai 20 a été sélectionné, à partir de ce moment, tous les navires qui ont accosté au quai 20 au cours de la dernière année sont indiqués. Une fois qu'un navire a été choisi, par exemple le navire Eliana Marino, toutes les données associées sont représentées, à savoir : omi du navire, nom du navire, poste d'amarrage, nombre d'arrivées au poste choisi par le navire en question au cours de la période de référence, émissions de NOx, émissions de SOx, émissions de CO₂ et PM₁₀.

Les valeurs de chaque tableau sont celles utilisées pour calculer les émissions des paragraphes précédents et n'ont subi aucune modification.

Bibliographie

1. **Ministère italien de l'Environnement et de la Protection du Territoire et de la Mer.** *Linee Guida per la redazione dei Documenti di Pianificazione Energetico Ambientale dei Sistemi Portuali.* 2018.
 2. **Ente Italiano di Normazione.** *Norme UNI EN ISO 14064.*
 3. **AAB s.p.a.** *Quaderni di applicazione tecnica N.12 Generalità sui sistemi navali e sulle installazioni di bordo.*
 4. **International Maritime Organization.** *Port Emissions Toolkit Guide No.1: Assessment of port emissions.* 2018.
 5. **ATTAR AMIR.** *Chemistry, Thennodynamics, and Kinetics of Sulfur in Coal Gas Reactions:A Review.* 1978.
 6. **Intergovernmental Panel on Climate Change.** *Climate Change 2013: The Physical Science Basis.* 2013.
 7. **Facile.it.** Assicurazioni. *Site web Facile.it.* [En ligne] 2016. <https://www.facile.it/assicurazioni/news/analisi-di-facile-it-sull-uso-dell-auto-in-italia.html>.
 8. **Transport & Environment.** *One Corporation to Pollute Them All.* 2019.
 9. **Autopromotec.** Blog. *Site web Autopromotec.* [En ligne] 2018. <https://www.autopromotec.com/it/auto-emissioni/a314>.
 10. **Automobile Club d'Italia.** Autorisé 2018. *Site web ACI.* [En ligne] 2018. <http://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/autoritratto/autoritratto-2018.html>.
 11. **ISPRA.** *Rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale.* [En ligne] 2018. <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-le-sorgenti-di-combustione-stazionarie-in-italia/view>.
 12. **ICCT.** *Assessment of the fuel cycle impact of liquefied natural gas as used in international shipping.* 2013.
 13. **Ricardo.** *The role of natural gas and biomethane in the transport sector.* 2016.
 14. **Giorgio Trincas.** *Fondamenti ed applicazioni di propulsione navale.* 2010.
 15. **Ministère italien de l'Environnement et de la Protection du Territoire et de la Mer.** *va.minambiente.* [En ligne] <http://www.va.minambiente.it>.
 16. **Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente.** *Rapporto controlli ambientali SNPA AIA/Seveso Edizione2017.* 2018.
 17. **Province de Livourne.** Environnement. *province.livourne.* [En ligne] <http://www.provincia.livorno.it/new/spawdocs/ambiente/>.
-

18. **Chambre de commerce.** *Telemaco.* [En ligne]
<https://login.infocamere.it/eacologin/login.action>.

19. **ISPRA.** Rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale. *SINA* . [En ligne] 2018.
<http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-la-produzione-ed-il-consumo-di-energia-elettrica-in-italia/view>.
