

Qualité de l'air

PROVENCE - ALPES - CÔTE D'AZUR



# Impact des émissions du transport maritime sur la qualité de l'air des zones portuaires

État de l'art

[www.airpaca.org](http://www.airpaca.org)

**AirPACA**  
QUALITÉ DE L'AIR

## **SOMMAIRE**

<b>1. Qualité de l'air et activité maritime</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Réglementation</b> .....	<b>4</b>
2.1 Les oxydes de soufre .....	4
2.2 Les oxydes d'azote.....	5
<b>3. Inventaires d'émissions</b> .....	<b>6</b>
3.1 Dans le monde et en Europe .....	6
3.2 En France .....	11
3.3 En région PACA.....	11
3.4 Scénarios futurs des émissions du transport maritime .....	13
<b>4. Modélisation</b> .....	<b>15</b>
<b>5. Mesures</b> .....	<b>19</b>
5.1 Caractéristiques chimiques des émissions liées au trafic maritime .....	19
5.2 Effet du type de navigation sur les émissions .....	20
5.3 Niveaux de concentrations .....	21
<b>6. Conclusion</b> .....	<b>24</b>

## **ANNEXE**

ANNEXE 1 : Bibliographie.....	27
-------------------------------	----

### **Contact**

Florie Chevrier  
florie.chevrier@airpaca.org

### **Date de parution**

décembre 2017

## 1. Qualité de l'air et activité maritime

Depuis plusieurs années, la qualité de l'air en proximité des zones portuaires est au cœur des préoccupations. En effet, les émissions par le transport maritime ont un impact environnemental avec des effets potentiels sur la santé humaine et le climat. De plus, près de 70 % des émissions portuaires se retrouvent dans un rayon de 400 km des côtes (Eyring et al., 2005b).

Les échappements par le transport maritime représentent environ 3,3 % des émissions globales de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et environ 2 % des émissions globales de Black Carbon (BC) (Lack and Corbett, 2012). Ce type de transport est également à l'origine des émissions annuelles de 5-7 Tg d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>), de 4,7-6,5 Tg d'oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>) et de 1,2-1,6 Tg de particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm (PM<sub>10</sub>) (Corbett et al., 2007; Healy et al., 2009). De plus, des études ont montré la présence d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et de métaux dans la composition des particules émises par le transport maritime (Fridell et al., 2008; Murphy et al., 2009).

La mauvaise qualité des carburants utilisés est à l'origine de l'émission de ces divers polluants. En effet, les moteurs des navires, fonctionnant en régime lent, permettent l'utilisation des produits résiduels du raffinage du pétrole brut. En 2010, les principaux carburants du transport maritime international étaient le fioul lourd (HFO), contenant une forte teneur en soufre, à 87 % et l'essence marine/diesel marin (MGO/MDO) à 13 %. Le transport maritime national utilise, quant à lui, une plus grande variété de carburants dont les principaux sont le MGO/MDO (60 %), le HFO (31 %) et l'essence automobile (9 %) (EEA, 2013a).

Ce rapport fait un état de l'art d'un grand nombre d'études à travers le monde et la France qui se sont intéressées à la qualité de l'air des zones portuaires. Ces études concernent trois grands axes : les inventaires d'émissions, la modélisation et les mesures.

Ce rapport a été réalisé par Air PACA dans le cadre de la « Journée Méditerranéenne de l'Air - les Ports : informer pour agir ».

## 2. Réglementation

Afin de réduire les émissions du transport maritime dans les zones portuaires et dans les zones spécifiques plus problématiques du fait de la proximité des zones côtières et de la fréquence de passage des bateaux (zones de contrôle des émissions de soufre - SECA), une réglementation a été mise en place par l'Organisation Maritime Internationale (IMO). Une des actions mise en place par l'IMO est la Convention Internationale pour la Prévention de la Pollution par les Navires (MARPOL) dont l'Annexe VI traitant de la prévention de la pollution atmosphérique a été adoptée en 1997 (IMO, 2017). Cette annexe limite les émissions des principaux polluants présents dans les gaz d'échappement des navires : les oxydes de soufre ( $SO_x$ ), les oxydes d'azote ( $NO_x$ ), les substances qui appauvrissent la couche d'ozone et les Composés Organiques Volatils (COV).

Ce n'est qu'en 2012 que cette réglementation arrive en Europe. L'Annexe VI a été publiée en France par le décret n° 2010-550 du 26 mai 2010<sup>1</sup>.

### 2.1 Les oxydes de soufre

Depuis 2015, les navires circulant dans les SECA ne peuvent pas utiliser de carburant contenant une teneur en soufre supérieure à 0,1 %. Actuellement, il existe quatre zones de contrôle d'émission (ECA) : la mer Baltique (pour les  $SO_x$ ), la mer du Nord (pour les  $SO_x$ ), l'Amérique du Nord (pour les  $SO_x$ ,  $NO_x$  et PM) et la mer des Caraïbes (pour les  $SO_x$ ,  $NO_x$  et PM) (IMO, 2017). Dans les autres zones de circulation, depuis 2012, les navires ont dû réduire à 3,5 % la teneur maximale en soufre de leur carburant et doivent atteindre 0,5 % d'ici 2020 (Figure 1).

En Union Européenne, la réglementation établie en 2005 fixe une limite à 1,5 % de la teneur en soufre des carburants des navires transportant des passagers en dehors des SECA (Figure 1). Cette limite sera abaissée à 0,5 % en 2020. De plus, l'Union Européenne a introduit des réglementations supplémentaires dans les espaces de circulation hors SECA : une teneur maximale en soufre de 0,1 % pour les navires à quai plus de 2h dans les ports européens et l'introduction d'une possibilité de tester et d'utiliser les technologies de réduction des émissions.

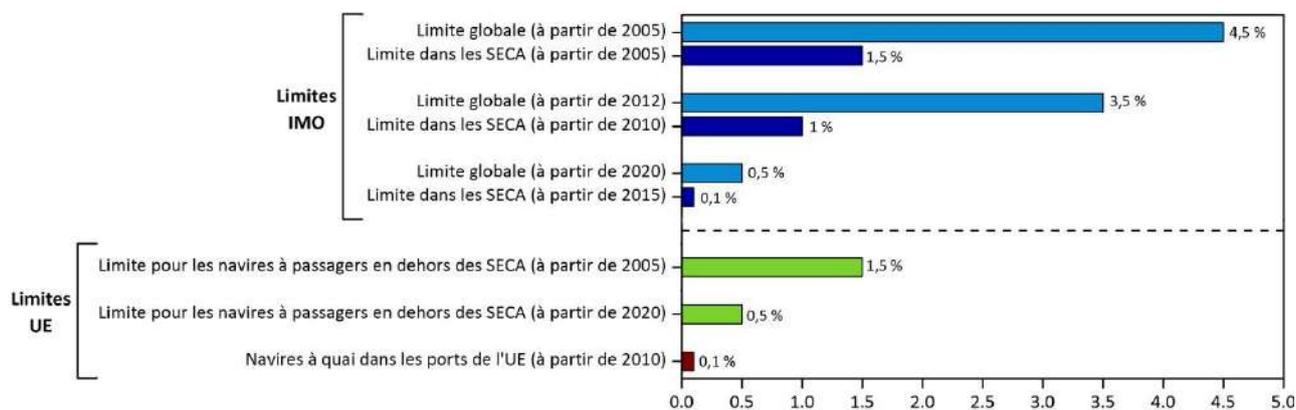


Figure 1 : Limites fixées par l'IMO et l'Union Européenne de la teneur en soufre des carburants des navires (% en masse) (EEA, 2013a; IMO, 2017)

Des études ont évalué l'impact de ces changements dans la composition des carburants sur les concentrations observées. Mestl et al. (2013) a montré que cette mesure a permis d'abaisser les concentrations maximales en  $SO_2$  mais n'a pas influencé la concentration moyenne globale. Ces mesures ont également permis de réduire la contribution du transport maritime sur les émissions primaires de  $PM_{2,5}$  (particules de diamètre aérodynamique inférieur à  $2,5 \mu m$ ) (Contini et al., 2015) mais ne semble pas avoir d'impact sur les concentrations en métaux et HAP (Gregoris et al., 2016).

<sup>1</sup> Décret n° 2010-550 du 26 mai 2010 portant publication du protocole de 1997 modifiant la convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution par les navires, telle que modifiée par le protocole de 1978 relatif (ensemble une annexe et cinq appendices), adopté à Londres le 26 septembre 1977

## 2.2 Les oxydes d'azote

Les oxydes de d'azote sont également réglementés par l'IMO dans le cadre de l'Annexe VI de MARPOL. Cependant, les limites des émissions des NO<sub>x</sub> ne concernent que les navires récents en fonction de leur date de construction et de la vitesse nominale du moteur.

Il existe trois niveaux de limite (EEA, 2013a; IMO, 2017):

- niveau I : les navires construits entre 2000 et 2011 doivent être conformes aux émissions de NO<sub>x</sub> à une vitesse maximale du moteur d'environ 9,8 - 17 g/kWh
- niveau II : ceux construits après 2011 doivent être conformes à 7,7 - 14,4 g/kWh
- niveau III : les navires opérant après 2016 dans les zones de contrôle des émissions de NO<sub>x</sub> (NECA) doivent être conformes aux émissions de 2,0 - 3,4 g/kWh.

À l'heure actuelle, aucune NECA n'existe en Europe. Du fait d'un manque de NECA et de limites d'émissions des NO<sub>x</sub>, se référant uniquement à de nouveaux navires, l'impact de la réglementation de l'IMO sur les NO<sub>x</sub> semble être limité.

### 3. Inventaires d'émissions

Les inventaires d'émissions sont utilisés pour la détermination des sources principales des polluants atmosphériques permettant d'établir des tendances pour les années à venir.

L'US EPA a mis au point des méthodologies d'inventaire d'émissions maritimes proches des techniques utilisées pour les sources mobiles (US EPA, 2008, 2009a, 2009b). Ces techniques s'appuient sur les facteurs d'émission, les estimations de la population et les caractéristiques d'utilisation.

En Europe, les émissions maritimes sont calculées suivant les méthodologies de l'EEA (2013b) avec comme plan de conception : objectif principal, polluants et types de navires à étudier, résolution géographique, résolution temporelle et méthodologie pour compiler l'inventaire des émissions ainsi que les résultats escomptés.

Il existe deux méthodologies principales pour effectuer les inventaires des émissions maritimes :

- approche basée sur le carburant : combinaison des données de vente de carburants marins (quantités et types) et des facteurs d'émission liés au carburant (approche descendante),
- approche basée sur l'activité : combinaison des informations détaillées sur les spécifications du navire (numéro IMO, type et dimensions du navire, caractéristiques des moteurs et type de carburant) et des données d'inspection et opérationnelles (distances de voyage, vitesse maximale, escales, opérations estimées des navires, routes suivies par les navires et manœuvres en temps réel) (approche ascendante).

Dans toutes les villes portuaires, les émissions de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), PM et CO sont calculées en tenant compte séparément des phases d'escale et de manœuvre (Merico et al., 2017). Les navires émettant essentiellement des particules fines, les concentrations en PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> sont supposées équivalentes. De plus, les contributions dépendent fortement du périmètre retenu pour les émissions du transport maritime : phase à quai uniquement ou jusqu'à une certaine distance des côtes.

#### 3.1 Dans le monde et en Europe

Nunes et al. (2017) ont fait un bilan des études de l'évaluation des émissions des navires basée sur l'activité (approche ascendante) réalisées dans le monde entier depuis 2010 (Figure 2). Le but de ces études et leurs principales conclusions sont résumés dans le Tableau 1.

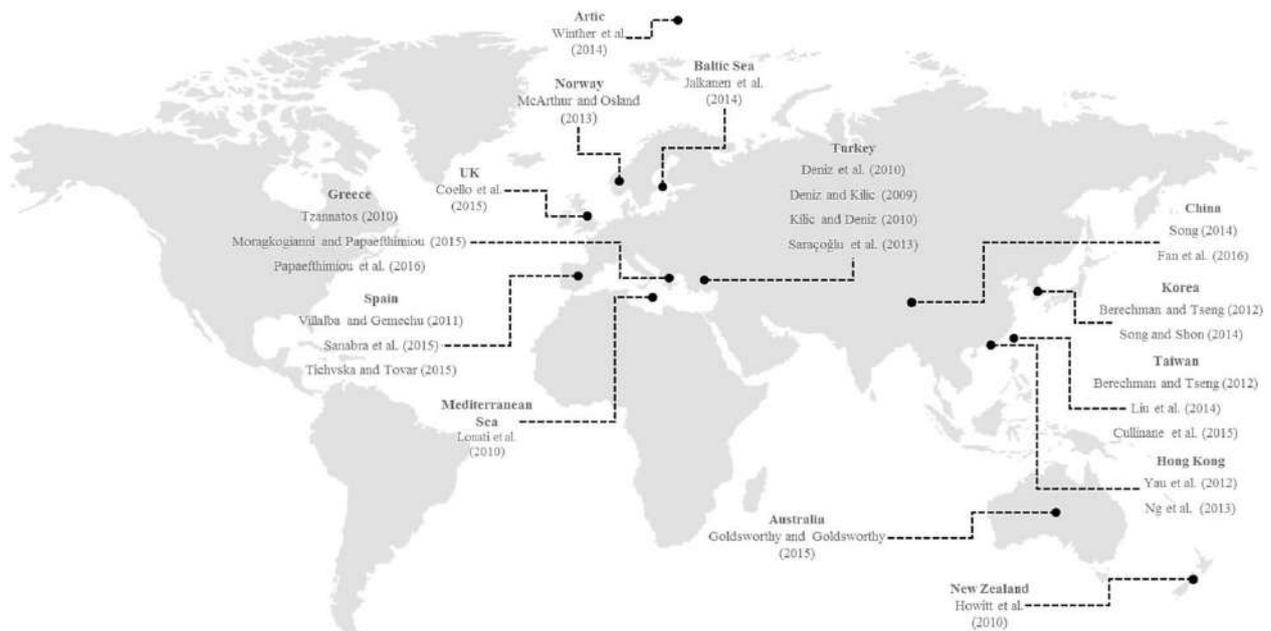


Figure 2 : Localisation géographique des études analysées par Nunes et al. (2017)

Tableau 1 : Objectif et principales conclusions des études analysées par Nunes et al. (2017)

Référence	Objectif	Principales conclusions
Deniz et al. (2010)	Estimer les émissions de NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , HC, PM de 7520 navires	<ul style="list-style-type: none"> <li>la majorité des émissions sont libérées pendant le stationnement à quai</li> <li>recommandation : utiliser l'électricité à quai pendant ce mode de fonctionnement</li> </ul>
Deniz and Kilic (2009)	Calculer les émissions des gaz d'échappement des navires dans le port d'Ambarli (basée sur les données obtenues en 2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>émissions des navires dans un rayon de 2 km autour du port : 100 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>x</sub> et 55 µg/m<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub></li> <li>60 000 personnes vivent autour de cette zone portuaire d'Ambarli</li> <li>recommandation : estimer les concentrations en polluants afin de proposer des mesures pour réduire les émissions à proximité des ports</li> </ul>
Howitt et al. (2010)	Calculer les émissions de CO <sub>2</sub> des trajets internationaux des navires de croisière à destination et en provenance de la Nouvelle-Zélande	<ul style="list-style-type: none"> <li>consommation d'énergie moyenne pondérée par passager de nuit pour la fonction «hôtel» des navires de croisière : 12 fois plus importante qu'un hôtel terrestre</li> <li>analyse de l'impact de la tarification du carbone : les navires de croisière internationaux à des fins de transport présentent une diminution relative plus importante que les voyages en avion</li> </ul>
Kilic and Deniz (2010)	Estimer les émissions de NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , HC, PM de 11 645 navires	<ul style="list-style-type: none"> <li>les navires dans le golfe d'Izmit ont contribué de manière significative à la pollution urbaine par le SO<sub>2</sub></li> <li>émissions lors du stationnement à quai : environ 30 % des émissions totales des navires</li> <li>recommandation : utiliser l'électricité à quai pendant ce mode de fonctionnement</li> </ul>
Lonati et al. (2010)	Évaluer l'impact sur la qualité de l'air local des émissions atmosphériques des activités en zone portuaire pour un nouveau port en projet dans la mer Méditerranée	<ul style="list-style-type: none"> <li>émissions de NO<sub>x</sub> : émissions les plus constantes des navires</li> <li>modèle de dispersion : les sites les plus exposés étaient en mer</li> <li>recommandation : approvisionnement en électricité à terre pour les navires à long-accostage pour limiter la plupart des émissions lors du stationnement à quai</li> </ul>
Tzannatos (2010)	Estimer les émissions des principaux polluants d'échappement des navires (basé sur une période de 12 mois en 2008 - 2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>émissions des navires dans le port de passagers du Pirée : 2600 tonnes par an</li> <li>estimation de leurs externalités : environ 51 millions € / an</li> </ul>
Shin and Cheong, (2011)	Effectuer un inventaire des émissions de GES dans le port de Busan, en tenant compte des navires, des engins de manutention, des camions lourds et des locomotives de chemin de fer	<ul style="list-style-type: none"> <li>environ 64 % des émissions totales de GES étaient attribuables aux navires dans le port de Busan</li> <li>la quantité de marchandises manutentionnées dans le port de Busan peut être systématiquement associée à une augmentation des émissions de GES</li> </ul>
Villalba and Gemechu (2011)	Estimer les émissions des navires dans le but de les inclure dans les inventaires d'émissions des villes ou pour être utilisé par le port lui-même pour surveiller leur politique et technologie d'amélioration en vue d'atténuer les changements climatiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>un total de 33 1390 tonnes d'émissions de GES (équivalent CO<sub>2</sub>) pour l'année 2008 a été calculé et 50 % a été attribué aux navires</li> <li>les transporteurs d'automobiles étaient les plus gros pollueurs par tonne de marchandises manutentionnées</li> </ul>
Berechman and Tseng (2012)	Estimer les émissions côtières des navires et des camions dans le port de Kaohsiung	<ul style="list-style-type: none"> <li>les plus fortes émissions de polluants sont dues aux pétroliers, suivis des porte-conteneurs et des vraquiers</li> <li>bien que les émissions de CO<sub>2</sub> soient les plus importantes de toutes les émissions, le top 3 des coûts environnementaux pour les polluants individuels sont les PM<sub>2,5</sub>, les PM<sub>10</sub> et les COV</li> </ul>
Yau et al. (2012)	Développer un inventaire d'émissions détaillé pour les navires de haute mer dans Hong Kong	<ul style="list-style-type: none"> <li>les porte-conteneurs contribuent à plus de 70 % des émissions totales de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> et PM<sub>10</sub></li> <li>70 % des émissions totales sont émises dans la zone de vitesse réduite et en stationnement à quai</li> </ul>
McArthur and Osland (2013)	Examiner les émissions des navires et estimer les coûts externes de la pollution	<ul style="list-style-type: none"> <li>coût des émissions des navires : de 10 à 21,5 million € par an</li> </ul>
Ng et al. (2013)	Étudier les émissions des navires dans la région de Hong Kong à l'aide des données AIS afin de calculer des facteurs de charge moyens de moteur principal et la durée dans chaque mode de fonctionnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>porte-conteneurs : principaux émetteurs de polluants responsables de 80 - 82 % des émissions totales</li> <li>les cartes d'émissions suggèrent qu'une part significative des émissions vient du poste d'amarrage</li> </ul>
Saraçoğlu et al. (2013)	Calculer les gaz d'échappement des navires	<ul style="list-style-type: none"> <li>les plus hauts niveaux d'émissions dans le port d'Izmir : générés par les porte-conteneurs</li> <li>émissions es plus importantes : pendant la croisière et le stationnement à quai</li> <li>recommandation : méthode « cold ironing » pour les demandes d'énergie électrique pour réduire les émissions lors du stationnement à quai</li> </ul>

Référence	Objectif	Principales conclusions
Jalkanen et al. (2014)	Évaluer les émissions d'échappement de CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , CO et PM <sub>2,5</sub> provenant du transport maritime de la mer Baltique	<ul style="list-style-type: none"> <li>émissions de NO<sub>x</sub> en 2009 : supérieures d'environ 7 % à celles de 2006, malgré la régression économique</li> <li>émissions de SO<sub>x</sub> en 2009 : inférieures d'environ 14 % à celles de 2006, principalement en raison des réglementations de la SECA</li> </ul>
Liu et al. (2014)	Utiliser deux méthodes basées sur l'intensité de l'activité pour estimer la quantité des émissions de SO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>émissions de SO<sub>2</sub> dans le port de Kaohsiung : 3,7 - 4,5 % des émissions totales de SO<sub>2</sub> de la ville de Kaohsiung</li> <li>recommandation : approvisionnement en électricité à quai pour transformer le port de Kaohsiung en « port vert »</li> </ul>
Song (2014)	Étudier à la fois les émissions des navires dans les ports et les coûts sociaux associés aux émissions	<ul style="list-style-type: none"> <li>méthodologie basée sur les données AIS : peut être utilisée pour développer les inventaires complets des émissions et les estimations de coûts sociaux pour les grandes zones portuaires</li> <li>les résultats peuvent également être utilisés comme données d'entrée pour la modélisation de la dispersion de la qualité de l'air dans le port et ses environs</li> </ul>
Song and Shon (2014)	Calculer sur trois années différentes et estimer les émissions futures des navires traversant le port de Busan	<ul style="list-style-type: none"> <li>les émissions les plus importantes ont été observées en mode "in port"</li> <li>porte-conteneurs : principaux émetteurs de polluants, responsables de 45 à 67 % des émissions totales</li> <li>les émissions futures des navires (à l'exception du SO<sub>2</sub> et des PM) devraient augmenter progressivement</li> </ul>
Winther et al. (2014)	Effectuer un inventaire des émissions des navires dans l'Arctique en 2012 (basé sur les données AIS de satellites, des fonctions de puissance du moteur des navires et des facteurs d'émission)	<ul style="list-style-type: none"> <li>autour de l'Islande : les contributions supplémentaires de Black Carbon atteignent 20 %</li> <li>dans certaines régions : des contributions supplémentaires élevées ont été calculées (100 -300 %) pour le SO<sub>2</sub></li> </ul>
Coello et al. (2015)	Démontrer une méthodologie basée sur les activités pour développer des inventaires d'émissions résolus temporellement et spatialement en utilisant des données AIS.	<ul style="list-style-type: none"> <li>la comparaison entre les méthodologies basées sur l'activité et sur les carburants a montré un bon accord</li> <li>les données de vitesse acquises directement via les données AIS sont plus précises que celles obtenues à partir de la distance et de l'intervalle de temps entre les points AIS consécutifs</li> </ul>
Cullinane et al. (2016)	Estimer les émissions atmosphériques rejetées par les porte-conteneurs à quai en 2012 dans les trois plus grands ports de conteneurs taïwanais	<ul style="list-style-type: none"> <li>porte-conteneurs : principaux émetteurs de polluants à Kaohsiung</li> <li>approches proposées pour réduire les émissions des navires à Taïwan : adopter le MGO ou le MDO pour remplacer le HFO et améliorer l'efficacité opérationnelle des terminaux</li> </ul>
Goldsworthy and Goldsworthy (2015)	Élaborer un modèle pour estimer et répartir spatialement les émissions d'échappement des moteurs des navires dans les ports et les vastes eaux côtières (basé sur les données AIS pour les mouvements des navires et les modes de fonctionnement)	<ul style="list-style-type: none"> <li>comparaisons entre émissions calculées, inventaires conventionnels et données de séjour des navires doivent être effectuées</li> <li>régions situées dans un rayon de 300 km des principales capitales : un pourcentage peut provenir des navires</li> </ul>
Maragkogianni and Papaefthimiou, (2015)	Estimer les émissions des navires de croisière dans les cinq ports grecs les plus fréquentés	<ul style="list-style-type: none"> <li>émissions pendant le stationnement à quai : 88,5 % du total</li> <li>saisonnalité considérée comme un grand contributeur</li> <li>incidences sur la santé des émissions des navires : 24,3 millions d'euros, ce qui prouve la nécessité d'un contrôle des émissions</li> </ul>
Sanabra et al. (2014)	Évaluer l'impact des navires sur la pollution locale dans les zones portuaires densément peuplées afin de décider si d'autres mesures d'approvisionnement en électricité sont réalisables	<ul style="list-style-type: none"> <li>principal polluant relatif à la quantité émise : NO<sub>x</sub>, représentant 86 % des émissions totales</li> <li>PM<sub>2,5</sub> et NO<sub>x</sub> : polluants présentant des externalités plus élevées</li> <li>recommandation : méthode « cold ironing » peut améliorer la performance environnementale des navires au port</li> </ul>
Tichavska and Tovar, (2015)	Estimer, pour la première fois, les polluants d'échappement liés aux navires de croisière et traversiers dans un contexte d'île	<ul style="list-style-type: none"> <li>navires à passagers, porte-conteneurs et pétroliers : principaux émetteurs de polluants</li> <li>les cartes des émissions ont confirmé l'emplacement des points chauds sur les quais attribués aux opérations de croisière et de traversier</li> </ul>
Fan et al. (2016)	Élaborer un modèle pour estimer les émissions des navires dans le Delta du Yangzi Jiang et la mer de Chine orientale dans un rayon de 400 km du littoral (basé sur des données AIS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>plus de 60 % et 85 % des émissions des navires se trouvent respectivement dans un rayon de 100 km et 200 km de la côte</li> <li>émissions de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> par les navires : beaucoup plus élevées que les émissions terrestres</li> </ul>
Papaefthimiou et al. (2016)	Calculer les quantités de polluants d'échappement pendant les opérations de manœuvres et de stationnement à quai pour les navires de croisière internationaux à destination et en provenance de 18 ports de Grèce en 2013	<ul style="list-style-type: none"> <li>les émissions de NO<sub>x</sub> étaient dominantes, suivies par le SO<sub>2</sub> et les PM<sub>2,5</sub></li> <li>environ 89,2 % des émissions totales ont été émises pendant le stationnement à quai</li> <li>la saisonnalité joue un rôle majeur en raison des émissions potentialisées pendant l'été par les navires de croisière dans le port</li> </ul>

Cette synthèse a montré que la majorité des émissions du transport maritime étaient émises lors du stationnement à quai. De forts niveaux d'émissions sont également émis en mode de navigation « croisière » et dans la zone de vitesse réduite (RSZ). À travers le monde, les porte-conteneurs sont les navires les plus émetteurs et peuvent être responsables de plus de 60 % des émissions totales. Les pétroliers et les navires transportant des passagers (paquebots et ferries) sont également parmi les plus émetteurs.

Pour réaliser ces inventaires d'émissions, ces études sont basées sur différentes informations techniques concernant les navires (données d'identification, propriétés physiques et propriétés des moteurs principaux et auxiliaires), les informations sur l'activité et les mouvements des navires, la demande en énergie (puissance des moteurs principaux et auxiliaires ou consommations de carburant et facteurs de charge des moteurs provenant de différentes conditions de fonctionnement) et les facteurs d'émissions (dépendant du type et de la spécification du carburant et du mode de fonctionnement). De plus, les études sélectionnées par Nunes et al. (2017) ont utilisé une grande variété de polluants : composés gazeux et particules. Cependant, dans toutes les études analysées, les composés étudiés n'ont pas été les mêmes. Les principaux polluants analysés étaient les  $\text{NO}_x$ , le  $\text{SO}_2$ , le  $\text{CO}_2$ , les  $\text{PM}_{2,5}$  et le CO. Des études ont, en plus, estimé les émissions de COV, d'hydrocarbures (HC), de méthane ( $\text{CH}_4$ ), de protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ), d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), de carbone organique (OC), de Black Carbon (BC) (ou carbon suie), de vanadium (V) et de nickel (Ni) (Figure 3).

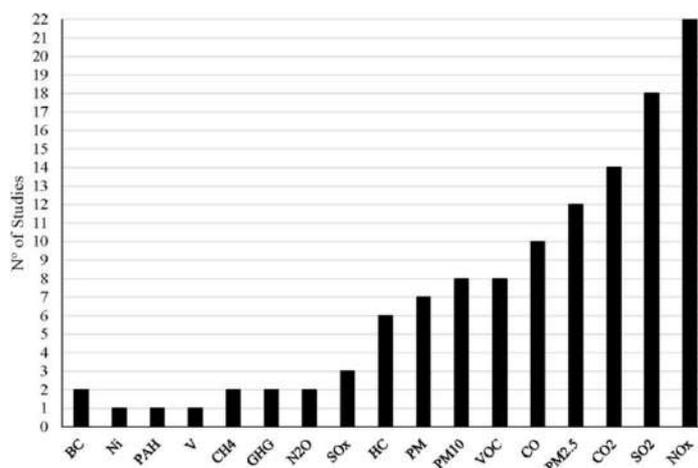


Figure 3 : Nombre d'études qui ont considéré chaque polluant (Nunes et al., 2017)

Une synthèse des inventaires d'émissions a également été réalisée en Europe par l'EEA (2013a). La plupart des études se sont intéressées aux émissions de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  et  $\text{SO}_2$ , mais quelques-unes ont étudié les émissions de  $\text{PM}_{2,5}$ , COVNM et CO (Figure 4). De grandes différences peuvent exister entre les estimations d'émissions des études dues au fait que les estimations ont été réalisées sur des années et des zones géographiques différentes. De plus, la méthode appliquée et la source des émissions (navigation nationale ou internationale) contribuent à la variabilité des résultats. En effet, alors que le  $\text{CO}_2$  peut être directement lié à la consommation de carburant, d'autres informations sont nécessaires pour calculer les émissions de polluants atmosphériques car dépendent de différents paramètres (types de moteurs, qualité du carburant, mesures de réduction).

Ces études ont estimé les émissions annuelles de  $\text{CO}_2$  entre 61 et 311 Tg, de  $\text{NO}_x$  entre 1 660 et 3 700 Gg, de  $\text{SO}_2$  entre 1 015 et 2 621 Gg, de  $\text{PM}_{2,5}$  entre 180 et 290 Gg, de COVNM entre 52 et 142 Gg et de CO entre 246 et 388 Gg.

La contribution aux émissions de  $\text{CO}_2$  du transport maritime international et national dans les eaux européennes arrivant ou partant des ports est estimée à 31 % des émissions maritimes mondiales (Faber et al., 2009). Les contributions aux émissions mondiales de  $\text{NO}_x$ , de  $\text{SO}_2$  et de  $\text{PM}_{2,5}$  provenant des navires internationaux sont d'environ : 10-20 % pour les  $\text{NO}_x$ , 10-25 % pour le  $\text{SO}_2$  et 15-25 % pour les  $\text{PM}_{2,5}$ .

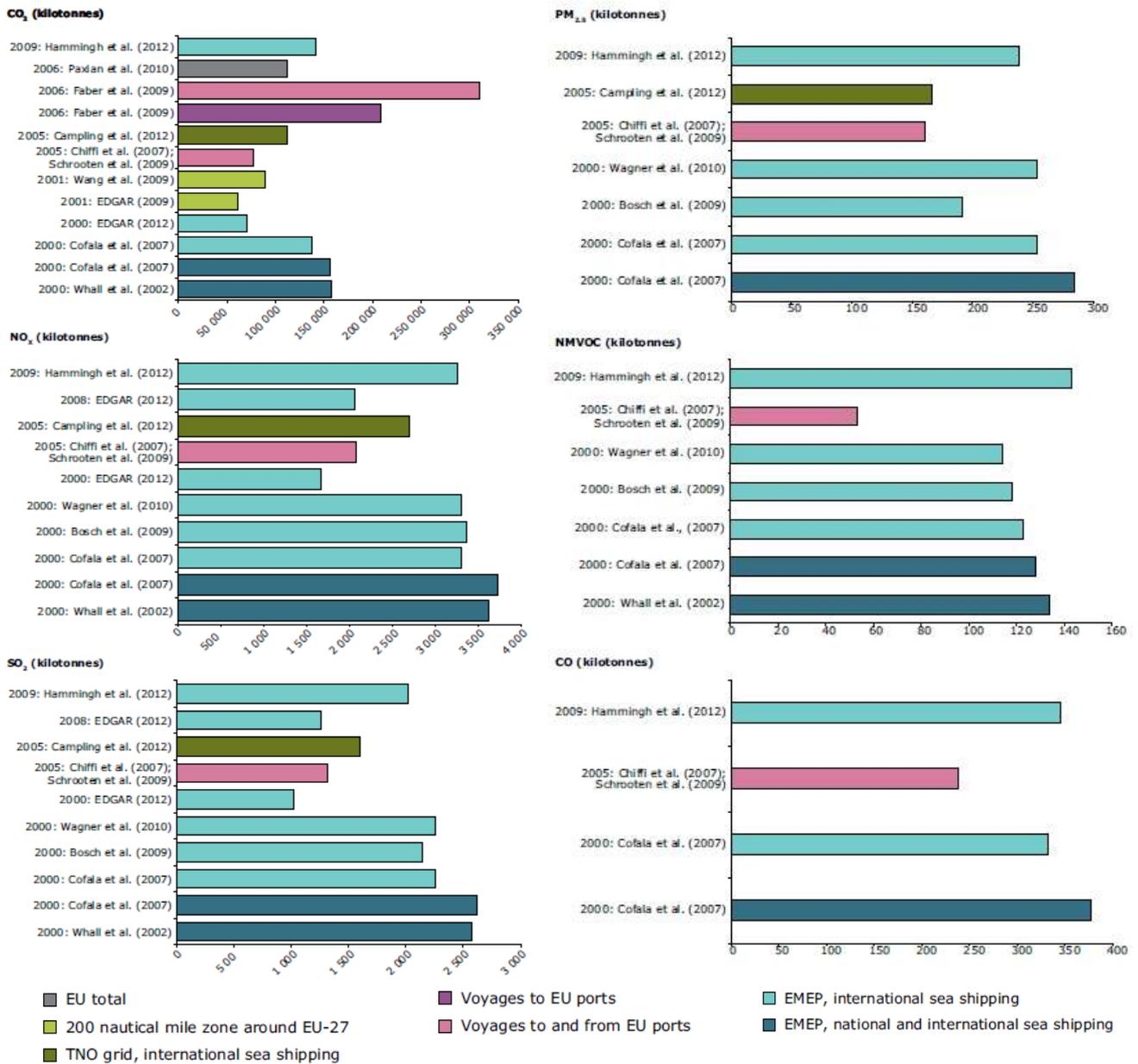


Figure 4 : Inventaires d'émissions des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques réalisés en Europe (EEA, 2013a)

Par exemple, Merico al al. (2016) ont utilisé l'approche basée sur l'activité pour estimer les émissions des navires dans le port de Brindisi (Italie). Les calculs ont été effectués à partir de la base des données des mouvements des navires de 2010. Les émissions ont été calculées séparément pour chaque navire, en utilisant six catégories : les cargos (16,7 %), les paquebots, les ferries et les rouliers (50 %), les bateaux de pêche (6,8 %), les pétroliers (20,4 %), les bateaux de croisière (1,7 %), et les autres (4,4 %). Les facteurs d'émission (kg/tonne) utilisés pour les NO<sub>x</sub>, COVNM, PM et CO sont ceux proposés par l'EMEP/EEA (EEA, 2013b). Les facteurs d'émission pour le SO<sub>2</sub> ont été calculés comme  $EF = 20 \times S$ , où S est le pourcentage de soufre dans le carburant.

Les émissions annuelles de transport maritime à Brindisi ont été comparées aux émissions de la circulation routière (Figure 5). En 2010, le transport maritime (phases de stationnement à quai et manœuvre) représentait 23 % des émissions totales de PM<sub>2.5</sub> à Brindisi, 9 % de NO<sub>x</sub> et 1 % de SO<sub>2</sub>. Les émissions maritimes étaient comparables à celles du transport routier, en particulier pour les particules et les NO<sub>x</sub>. De plus, la phase de stationnement à quai représentait plus de 90 % des émissions estimées, sauf pour le SO<sub>2</sub> pour lequel l'utilisation de combustible à faible teneur en soufre réduit l'impact des émissions à quai.

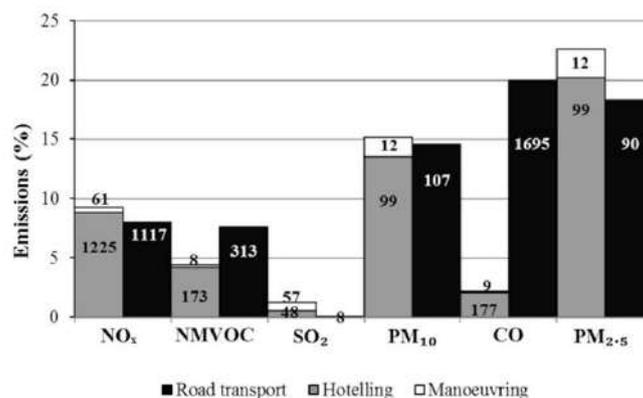


Figure 5 : Comparaison des émissions du transport maritime avec celles du transport routier en 2010 à Brindisi (Les émissions absolues en tonnes/an sont reportées comme chiffres dans le graphique) (Merico et al., 2016)

### 3.2 En France

En 2017, le CITEPA a réalisé un rapport SECTEN (SECTeurs Économiques et éNergie), rapport national d'inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France métropolitaine. Les résultats couvrent la période 1990 - 2015 et des estimations pour l'année 2016 sont parfois fournies pour différents secteurs dont le transport maritime national. Les données sont rapportées pour plus de 30 composés différents : SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, COVNM, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn, dioxines/furannes (PCDD-F), HAP (benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène et indéno(1,2,3-cd)pyrène), PCB, HCB, particules totales en suspension (TSP), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1,0</sub> et BC. Le CITEPA applique une méthode basée sur les ventes de carburants (approche descendante).

À l'échelle régionale, les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) réalisent des inventaires d'émissions pour les différents secteurs au sein de leur région. Le transport maritime fait partie du secteur « autres transports » ou « transport non routier », tout comme les transports aérien, fluvial, ferroviaire, les tramways et métros. Les AASQA appliquent une approche ascendante basée sur l'activité réelle des ports.

Air Normand (2008) a réalisé l'inventaire des émissions par le trafic maritime de 2005 au niveau du port du Havre. La méthodologie utilisée est la méthode dérivée de l'US-EPA permettant d'individualiser les navires et de calculer les émissions de chacun suivant les modes de navigation et les marchandises transportées. La comparaison des données de 2000 et 2005 pour le SO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub>, le CO, les particules totales en suspension (TSP), les PM<sub>10</sub>, les PM<sub>2,5</sub>, les COVNM et le CO<sub>2</sub> a montré que les calculs des émissions suivant le type de navire (pétroliers, vraquiers, porte-conteneurs, cargos et paquebots) et leurs mouvement (croisière, croisière lente, manœuvre, stationnement à quai et navire en attente) améliore l'évaluation de la contribution du trafic maritime aux émissions globales, notamment du Havre. Au port du Havre, le mode croisière représente 8 à 35 % des émissions globales maritimes, le stationnement à quai 20 % des émissions globales maritimes et lorsque le navire est en attente, 37 % des COVNM. Ainsi, il a été montré que les manœuvres et le stationnement à quai représentaient les émissions du transport maritime ayant l'impact le plus important sur la qualité de l'air de l'agglomération du Havre.

Dans le cadre du projet ECUME (Évaluation de la Contribution des soUrces MaritimEs à la teneur en PM10 sur le littoral de la région Nord-Pas-de-Calais) (Atmo Nord-Pas-de-Calais, 2015a), les émissions du secteur maritime ont été estimées. Les estimations ont été faites pour les années 2005, 2008 et 2010 et sont basées sur le nombre et le type de bateaux ayant transité dans chaque port pour une année choisie, leur trajectoire, et le type et la durée des phases de navigation. En 2010, dans la région, le secteur maritime représentait 0,4 % des consommations énergétiques régionales, 0,3 % des émissions de CO<sub>2</sub> directes totales, 1,2 % des émissions totales de PM<sub>10</sub>, 1,9 % des émissions de SO<sub>2</sub>, 4,1 % des émissions de NO<sub>x</sub> et 0,3 % des émissions de COVNM. Par exemple, à Calais en 2010, le secteur maritime représentait 4,2 % des consommations énergétiques totales sur les 24,1 % que représentait le transport, 16,5 % des émissions totales de PM<sub>10</sub>, 28,8 % des émissions totales de NO<sub>x</sub>, 20,6 % des émissions de SO<sub>2</sub> et 2,8 % des émissions de COVNM.

### 3.3 En région PACA

En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, les inventaires d'émissions sont calculés régulièrement. L'inventaire des émissions du transport maritime est basé sur la consommation de carburant des navires selon le guide

méthodologique PCIT<sup>2</sup> qui permet de recalculer une consommation à partir des données fournies par le port (heures de départ et d'arrivée et dimension du bateau).

Les inventaires d'émissions de 2015 montrent que pour certains polluants tels que les NO<sub>x</sub>, le secteur des transports non routier représentent plus de 10 % des émissions globales régionales (Figure 6).

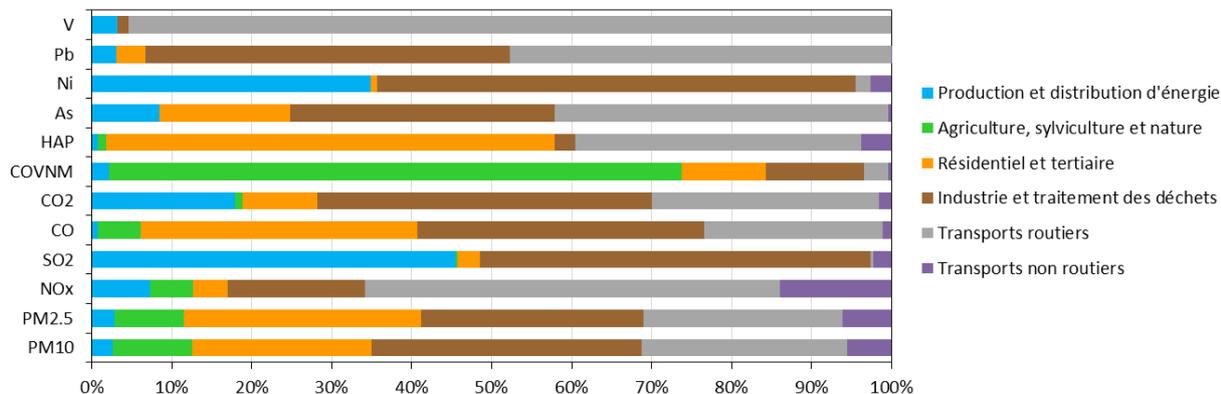


Figure 6 : Inventaires des émissions 2015 dans la région PACA

En région PACA, quatre ports sont présents : Nice, Toulon, Marseille et Fos-sur-Mer. Il est à noter que les activités militaires, non négligeables sur Toulon, ne sont pas intégrées à l'inventaire des émissions. Cependant, tous les navires militaires sont branchés au réseau électrique lors de leur stationnement à quai. Le port de Fos-sur-Mer est le plus émetteur de NO<sub>x</sub> avec plus de 8 000 tonnes/an, suivi du port de Marseille (1 705 tonnes/an), Nice (288 tonnes/an) et Toulon (213 tonnes/an). Les caractéristiques des émissions varient suivant les ports et le mode de navigation. En effet, dans le port de Marseille, les rouliers et ferries sont les plus émetteurs de SO<sub>x</sub> quel que soit le mode de navigation, tandis que dans le port de Fos-sur-Mer, les pétroliers sont les plus émetteurs en phase de stationnement à quai et les porte-conteneurs sont les plus émetteurs lors des manœuvres (Figure 7).

<sup>2</sup> Guide méthodologique pour l'élaboration des inventaires territoriaux des émissions atmosphériques (polluants de l'air et gaz à effet de serre) - Pôle National de Coordination des Inventaires Territoriaux (2017)

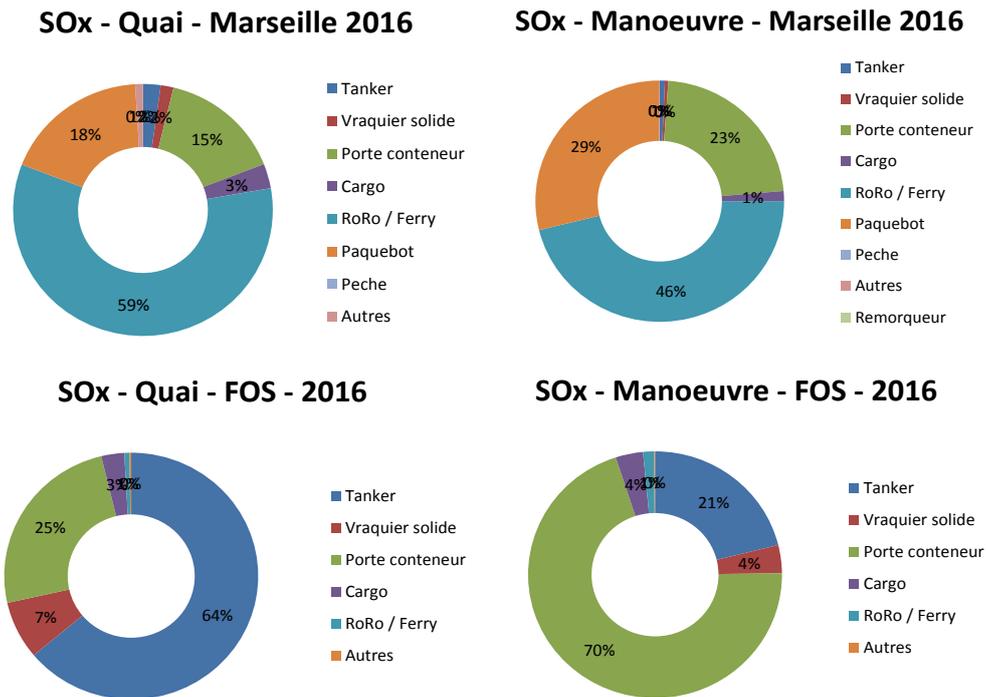


Figure 7 : Répartition des émissions de SO<sub>x</sub> par port, mode de navigation et type de navires

De plus, l'étude des émissions depuis 2007 en région PACA permet d'observer des tendances au niveau des émissions des ports. En effet, la mise en place de la réglementation sur la teneur en soufre des carburants a fait diminuer les émissions de SO<sub>x</sub> de plus de 80 % entre 2011 et 2012 à Marseille. Les émissions de PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> et CO<sub>2</sub> ont également diminué à partir de 2011 du fait de la réglementation, respectivement d'environ 35 %, 19 % et 17 % à Marseille, puis augmenté en 2016 en raison de l'activité portuaire. Les mêmes tendances ont été observées au port de Fos-sur-Mer.

### 3.4 Scénarios futurs des émissions du transport maritime

Les scénarios proposés par les différentes études réalisées suggèrent que différentes technologies et pratiques sont actuellement appliquées ou seront appliquées dans un avenir proche (2020) et lointain (après 2030). Trois types de mesures peuvent être envisagés dans une étude de scénario (EEA, 2013a) :

- la qualité du carburant / le changement de combustible : les modèles d'émissions supposent que les navires passeront à des combustibles à faible teneur en soufre lors de leur entrée dans tous les ports. Le gaz naturel liquéfié (LNG), actuellement utilisé comme carburant de remplacement dans les SECA, pourrait être utilisé car n'émet pas de SO<sub>2</sub> et environ 90 % de NO<sub>x</sub> en moins par rapport au HFO (Buhaug et al., 2009).
- les technologies de réduction des émissions : il existe plusieurs technologies :
  - le lavage à l'eau de mer est une technologie établie pour réduire les concentrations de soufre et de particules dans les gaz d'échappement (Cofala et al., 2007)
  - l'installation de la technologie de réduction catalytique sélective (SCR) qui pourrait réduire les émissions de NO<sub>x</sub> de 80% (Campling et al., 2013)
  - l'utilisation de robinets-vannes à la place des vannes à essence conventionnelles réduisant les NO<sub>x</sub> et PM (Corbett et al., 2010)
- les mesures prises pour le fonctionnement des navires :
  - certaines compagnies ont commencé la pratique du « slow steaming » (navigation à vitesse réduite). Faber et al. (2012) ont estimé qu'une réduction de la vitesse de 10 % entraînerait une réduction de la consommation d'énergie d'environ 19 % et, par conséquent, une diminution des émissions
  - faire fonctionner le navire par rapport à l'EEIO, un outil développé par l'IMO en relation avec l'EEDI (ralentissement économique et normes d'efficacité énergétique internationalement reconnues)
  - utilisation de l'énergie de quai : pratique consistant à éteindre les moteurs principaux et auxiliaires d'un navire à quai et à se connecter au réseau électrique.

Beaucoup d'études ont fait des projections des émissions du transport maritime jusqu'en 2020 ou 2030. Campling et al. (2013) et Eyring et al. (2005a) ont présenté des projections jusqu'en 2050. La plupart des projections sur les émissions maritimes ne font que des hypothèses sur la croissance du cargo transporté, des activités de transport maritime et de l'utilisation de carburant marin au cours des prochaines décennies. Peu d'études ont fait des hypothèses sur l'amélioration de l'efficacité du carburant, la navigation à vitesse réduite ou une augmentation de l'utilisation du GNL (Buhaug et al., 2009; Hammingh et al., 2012). La Figure 8 présente les évolutions des émissions de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> et PM<sub>2,5</sub> depuis 2000 jusqu'à 2050 pour une étude.

Les différents scénarios présentent une augmentation des émissions en CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>.

Les scénarios d'émissions pour le SO<sub>2</sub> sont fortement déterminés par la teneur en soufre des carburants marins et le taux de croissance supposé du secteur. Les scénarios publiés avant 2008, date à laquelle l'IMO a adopté les exigences en matière de faible teneur en soufre pour 2020, présentent une augmentation des émissions en SO<sub>2</sub>. Les scénarios de Campling et al. (2013) et Hammingh et al. (2012) montrent que les émissions de SO<sub>2</sub> devraient diminuer considérablement après 2015 et 2020 puis pourraient augmenter de nouveau en raison de la croissance supposée de l'utilisation de carburant et de l'absence de nouvelles politiques.

Les projections des émissions de PM<sub>2,5</sub> sont fortement influencées par la qualité du carburant et sa teneur en soufre.

Finalement, à l'exception des émissions de SO<sub>2</sub>, les politiques d'émissions et d'énergie actuellement mises en place et prévues dans le transport maritime international ne permettraient pas de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et des autres polluants en Europe.

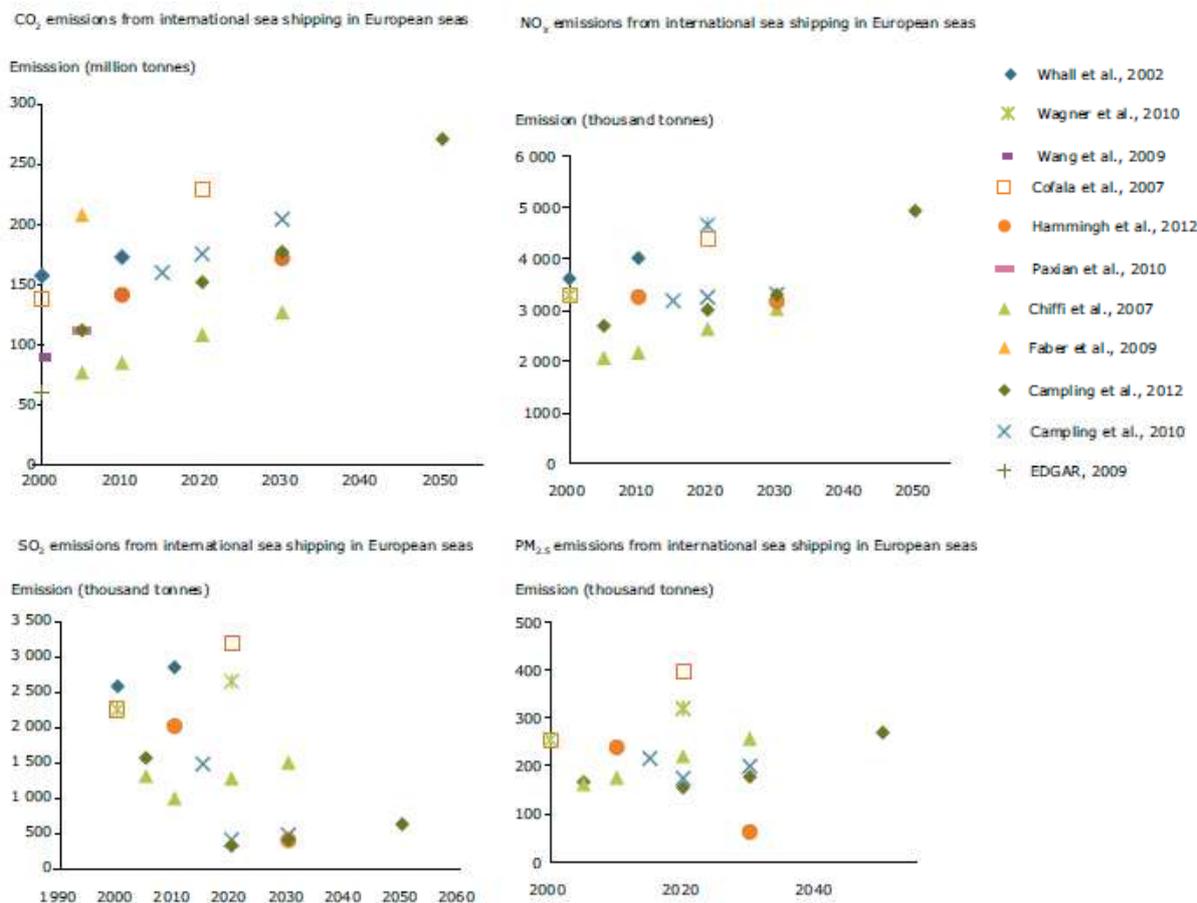


Figure 8 : Projections des émissions de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> et PM<sub>2,5</sub> du transport maritime international dans les mers européennes (EEA, 2013a)

## 4. Modélisation

Des études de dispersion atmosphérique ont été menées afin de cartographier les concentrations de différents polluants issues des rejets du transport maritime.

Une étude menée dans le bassin de la côte sud de la Californie, englobant les ports de Los Angeles et de Long Beach et une partie de l'océan Pacifique traversée par les navires pour aller à ces ports, a quantifié les concentrations en  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , en sulfates et nitrates grâce au modèle UCI-CIT (Vutukuru and Dabdub, 2008). La Figure 9 montre l'impact géographique des émissions de divers polluants par le transport maritime sur la zone côtière. Les résultats montrent que chaque site est affecté à différents niveaux suivant les émissions locales. En effet, la présence de deux grands ports, associée à des caractéristiques topographiques et météorologiques caractéristiques, entraîne une augmentation de l'ozone, des sulfates et des nitrates dans la région. Au cours de l'année 2002, les navires ont émis 38,4 et 22,8 tonnes/jour de  $\text{NO}_x$  et de  $\text{SO}_x$ , respectivement.

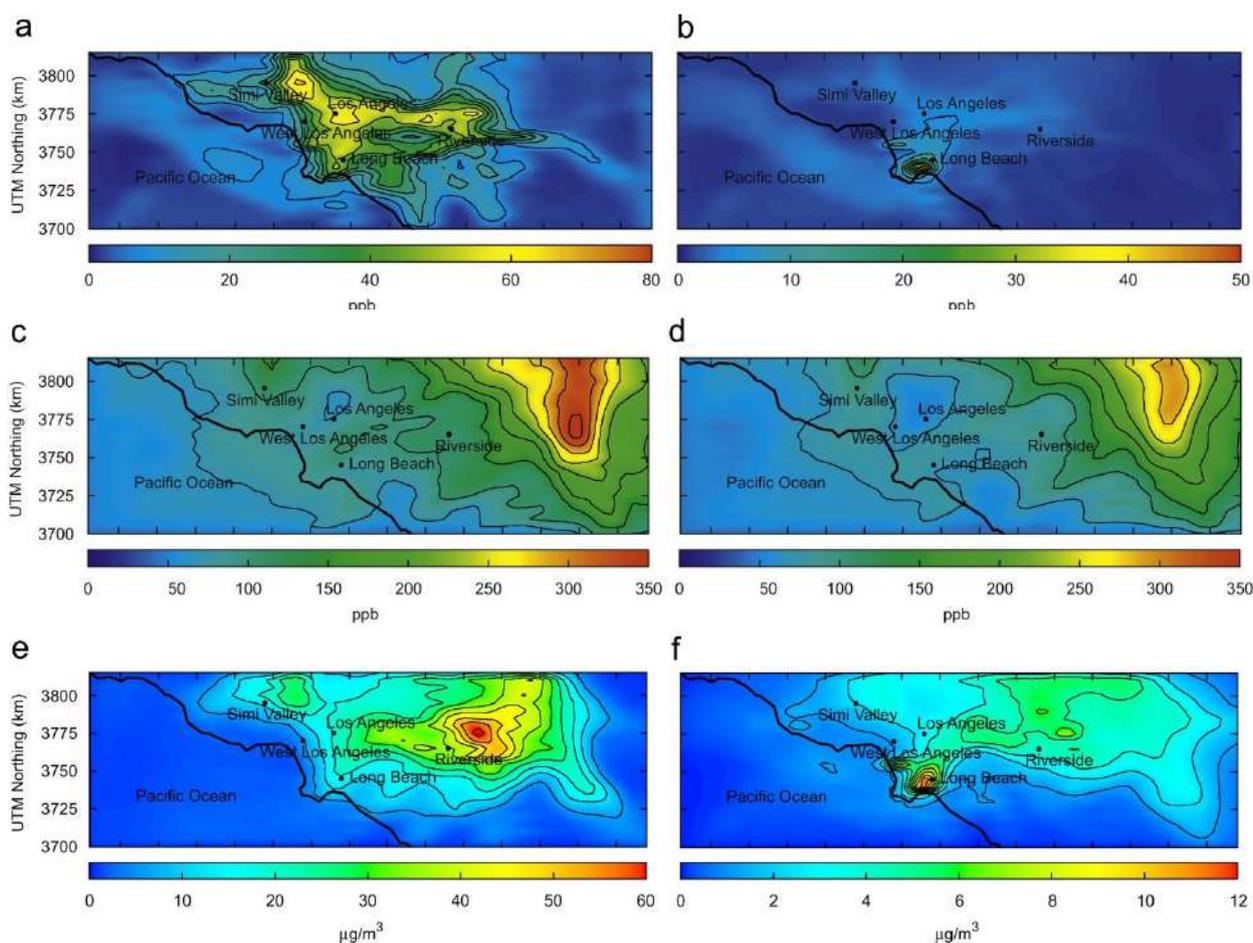


Figure 9 : Impact des émissions du transport maritime, en 2002, sur les concentrations moyennes journalières (a) en  $\text{NO}_2$  et (b) en  $\text{SO}_2$ , des concentrations en ozone (a) d'un pic horaire et (b) en moyenne sur 8 heures, et des concentrations moyennes journalières (e) en nitrates et (f) en sulfates dans les PM (Vutukuru and Dabdub, 2008)

Merico et al. (2017) ont étudié les émissions liées au transport maritime dans des ports de la mer Adriatique/Ionienne (non ECA) : Brindisi (Italie) et Rijeka (Croatie) qui sont des ports essentiellement commerciaux et Venise (Italie) et Patras (Grèce) qui sont d'importants ports de croisière. Cette étude compare les résultats de la modélisation aux résultats des mesures. La modélisation régionale a été effectuée grâce au couplage des modèles WRF et CAMx (Weather Research and Forecast - Advanced Research Weather model (WRF) et Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx)). Cette étude a montré que le secteur maritime était la 2<sup>nde</sup> source de  $\text{NO}_x$  et de  $\text{PM}_{2,5}$  dans la zone en période estivale où les émissions du trafic maritime étaient maximales au cours de cette période. De plus, sur l'année, les contributions aux émissions anthropiques étaient d'environ 2,6 % pour le CO, 28 % pour les  $\text{NO}_x$ , 16,5 % pour les  $\text{SO}_x$ , 9,75 % pour les  $\text{PM}_{10}$  et environ 13 % pour les  $\text{PM}_{2,5}$ .

En 2014/2015, le projet européen CAIMANs (Cruise and passenger ship Air quality Impact Mitigation ActionNs) (MED Maritime integrated projects, 2015) a étudié l'impact du trafic maritime de passagers sur la qualité de l'air dans cinq grandes villes portuaires du nord de la Méditerranée : Barcelone, Marseille, Gênes, Venise et Thessalonique. Des cartographies de la pollution atmosphérique ont été réalisées à l'aide de simulations de panaches de polluants à haute résolution émis par le secteur touristique des navires de croisière et de passagers dans le bassin méditerranéen. Toutes les phases de navigation ont été étudiées (mode croisière, manœuvre et stationnement à quai). La dispersion atmosphérique des macro-polluants ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  et  $\text{PM}_{2,5}$ ) et des micro-polluants (Ni, Pb, As, Cd et BaP) a été calculée à l'aide des dernières techniques de modélisation (CALPUFF v6.4 couplé à CALMET à Barcelone, Thessalonique et Venise, ADMS v4.2 à Gênes et ADMS Urban v3.1 à Marseille).

De façon globale, ces modélisations montrent un impact significatif des émissions des navires sur la qualité de l'air au sein des zones portuaires. La Figure 10 montre un exemple de dispersion atmosphérique du  $\text{SO}_2$  au niveau des cinq villes portuaires étudiées.

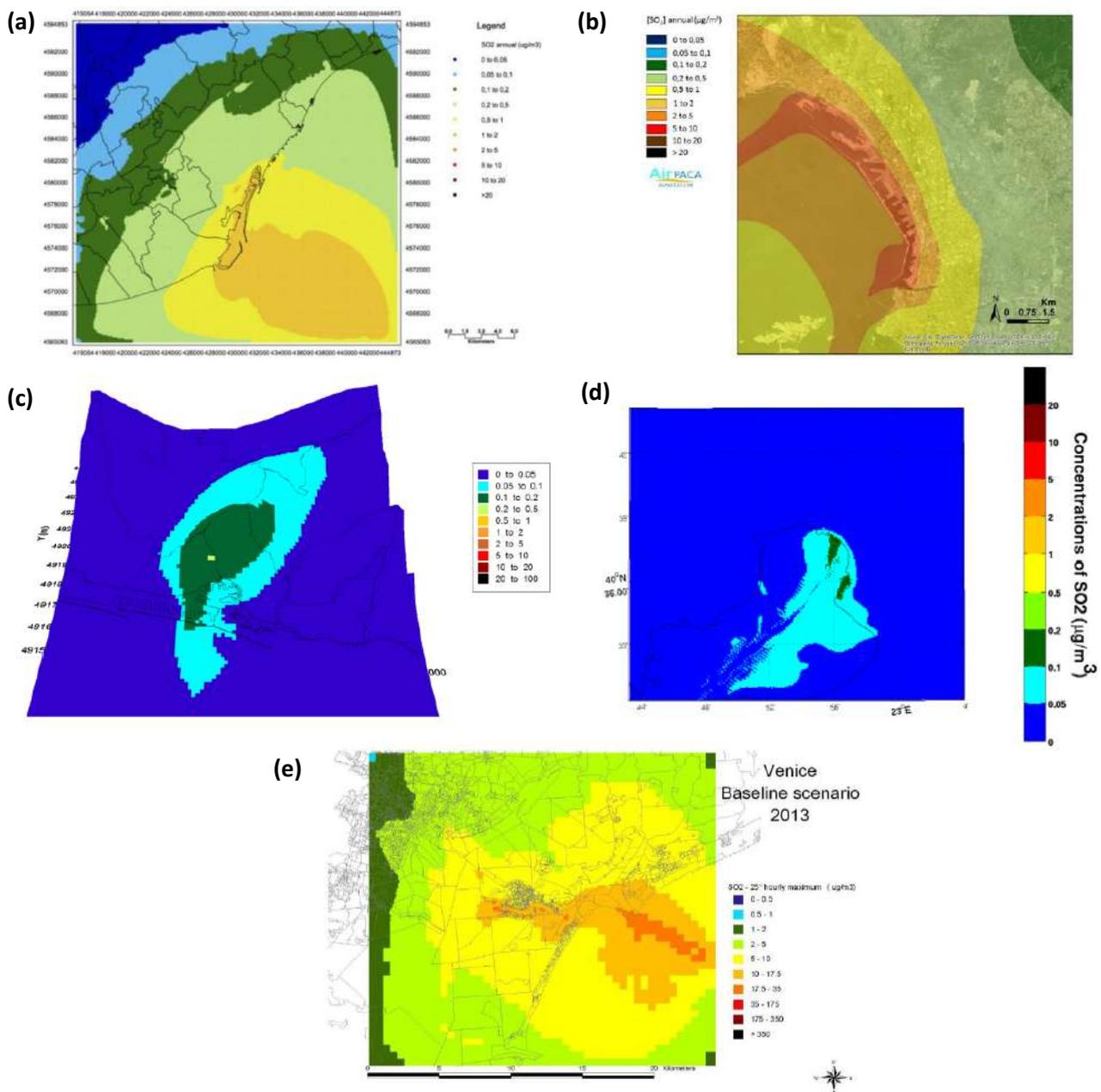


Figure 10 : Concentrations moyennes annuelle de 2013 en  $\text{SO}_2$  à (a) Barcelone, (b) Marseille, (c) Gênes, (d) Thessalonique et (e) concentrations maximales horaires en  $\text{SO}_2$  à Venise (MED Maritime integrated projects, 2015)

Le projet CAIMANS faisait suite au projet européen APICE (Common Mediterranean strategy and local practical Actions for the mitigation of Port, Industries and Cities Emissions) qui regroupait des partenaires scientifiques et institutionnels des cinq villes portuaires citées précédemment. Ce projet intégrait les trois aspects d'études détaillés dans ce rapport : émissions, modélisation et mesures.

Sur le volet modélisation, les travaux ont permis de mettre en évidence les contributions des différents secteurs d'émissions sur les concentrations en particules grâce à l'utilisation de plusieurs modèles (CHIMERE et CAMx) et de différentes approches (traceurs réactifs et « zéro-out » approche). Un exemple des contributions journalières de chacun des secteurs d'activité sur les concentrations en PM<sub>10</sub> extraites sur un site de fond urbain de Marseille est donné dans la Figure 11. Un bilan des contributions suivant la saison est également fourni dans cette figure.

Ces travaux montrent que le secteur maritime n'est pas le principal contributeur aux concentrations en particules sur une ville portuaire telle que Marseille mais que sa contribution est tout de même significative. Le Tableau 2 présente ainsi les trois premiers contributeurs aux concentrations en particules PM<sub>2,5</sub> suivant la saison sur la base des travaux de modélisation menés. Ainsi, dans les cinq grandes villes portuaires étudiées, les conclusions sont équivalentes sur la contribution des émissions du maritime.

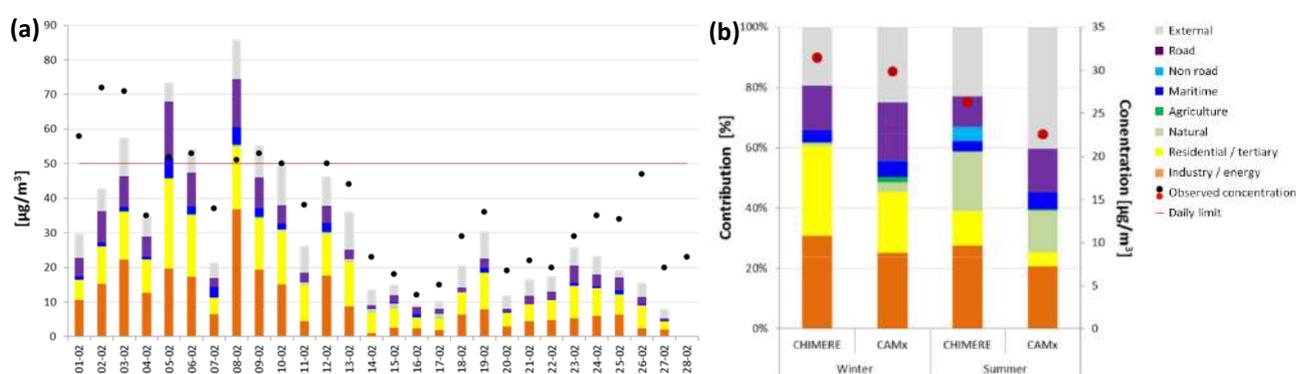


Figure 11 : (a) Contribution journalière sur les PM<sub>10</sub> à Marseille des différents secteurs d'activité au cours du mois de février 2011 (modèle CHIMERE). – (b) Contribution saisonnière sur les PM<sub>10</sub> à Marseille des différents secteurs d'activité (modèle CHIMERE et CAMx) (APICE project, 2013)

Tableau 2 : Principaux contributeurs aux concentrations en PM<sub>2,5</sub> (\*sans considérer les conditions limites, c'est-à-dire les PM provenant de l'extérieur du domaine de modélisation principal) (APICE project, 2013)

		1 <sup>er</sup> contributeur	2 <sup>nd</sup> contributeur	3 <sup>ème</sup> contributeur
Barcelone	Hiver	autres (56 %)	conditions limites (14 %)	industries (9 %)
	Été	autres (35 %)	routier (21 %)	non-routier (17 %)
Gênes	Hiver	routier (35 %)	autres (33 %)	industries (20 %)
	Été	routier (47 %)	autres (26 %)	industries (21 %)
Marseille	Hiver	conditions limites (25 %)	résidentiel (21 %)	industries (21 %)
	Été	conditions limites (37 %)	routier (17 %)	industries (17 %)
Thessalonique*	Hiver	résidentiel (45 %)	routier (25 %)	autres (17 %)
	Été	routier (45 %)	autres (31 %)	industries (20 %)
Venise	Hiver	résidentiel (33 %)	routier (20 %)	conditions limites (18 %)
	Été	sources biogéniques (28 %)	conditions limites (27 %)	routier (17 %)

En France, Atmo Nord-Pas-de-Calais (2015b) a utilisé le modèle ADMS Urban afin de cartographier avec une résolution spatiale élevée les concentrations moyennes annuelles issues de la dispersion des rejets de l'activité portuaire, qu'elle soit maritime ou automobile, dans une zone centrée sur le port de Calais. Les rejets du transport maritime ont été modélisés sous forme de sources volumiques situées à une hauteur de 30 mètres. Ainsi leur dispersion est bien plus importante que celle des rejets du trafic routier dont les rejets sont au niveau du sol. La Figure

12, représentant les cartographies des concentrations moyennes annuelles de 2011 en  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  et  $\text{SO}_2$ , montre une influence du trafic routier bien plus marquée que le trafic maritime sur les concentrations en  $\text{NO}_2$  et en  $\text{PM}_{10}$ . Les navires semblent alors avoir une influence limitée en proximité, mais peuvent engendrer une augmentation des concentrations à plusieurs centaines de mètres autour des points d'émissions. La cartographie des concentrations en  $\text{SO}_2$  permet de montrer, qu'en moyenne, les sources les plus influentes de ce gaz sont les navires mais également, de manière moins importante, une source industrielle.

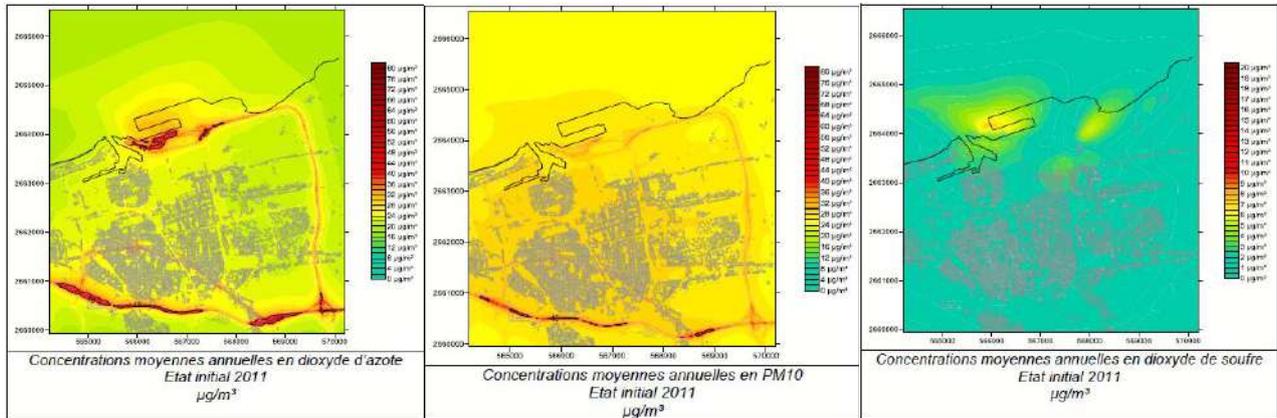


Figure 12 : Carte des concentrations moyennes annuelles de 2011 en  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  et  $\text{SO}_2$  autour du port de Calais (Atmo Nord-Pas-de-Calais, 2015b)

## 5. Mesures

De nombreuses études ont été réalisées à travers le monde afin de quantifier les émissions portuaires et leur impact sur la pollution urbaine des villes côtières. De nombreux polluants gazeux et particulaires sont émis par les navires (Figure 13). Leur impact est variable et dépend de nombreux paramètres tels que la vocation des ports.

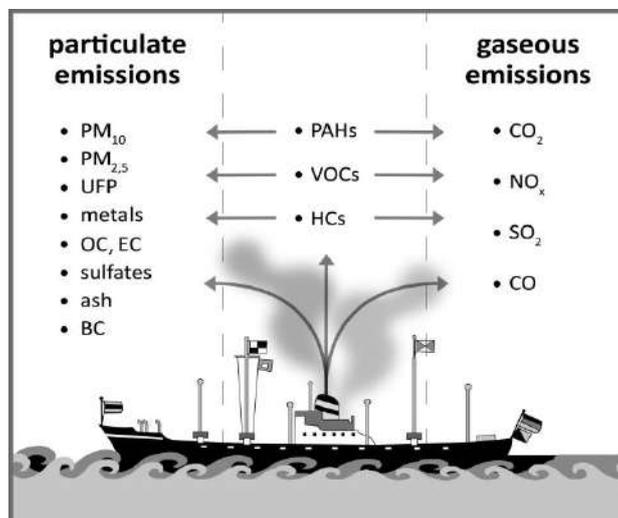


Figure 13 : Schéma représentant les composés émis par les navires (Mueller et al., 2011)

### 5.1 Caractéristiques chimiques des émissions liées au trafic maritime

Le trafic maritime se caractérise par des émissions de gaz précurseurs de polluants secondaires (formés dans l'atmosphère par des processus de transformation et de condensation de composés gazeux), dont les NO<sub>x</sub> et les SO<sub>x</sub>, et de particules primaires (émises directement dans l'atmosphère).

Les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 0,3 µm dominent les émissions du transport maritime (Healy et al., 2009; Petzold et al., 2008). La variabilité observée dans la taille des particules peut être liée à la température des échappements ou au vieillissement du panache de fumée, mais également à la teneur en soufre des carburants utilisés (particules plus grosses pour le HFO) (Fridell et al., 2008). Ainsi, ces émissions n'influencent pas de manière significative la masse des PM<sub>10</sub>.

Healy et al. (2009) ont étudié la composition des particules d'échappement récemment émises par les navires dans le port de Cork (Irlande). Ces particules sont constituées de carbone organique (OC), carbone élémentaire (EC), sodium (Na), calcium (Ca), vanadium (V), nickel (Ni), fer (Fe) et des sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Les sulfates sont connus pour être formés rapidement dans les cheminées des navires par la conversion gaz-particules du SO<sub>2</sub>.

Plusieurs études ont identifiées des traceurs spécifiques, présents dans la composition chimique des particules, permettant d'identifier et de quantifier les émissions du transport maritime notamment grâce à l'utilisation de modèles récepteurs. Le vanadium (V) et le nickel (Ni) sont généralement utilisés comme des marqueurs des émissions de ce type de transport car ils sont émis par des processus de combustion basés sur le HFO. D'autres métaux ont également été identifiés comme traceurs des émissions des navires mais ne sont pas exclusivement émis par cette source : le thorium (Th) (Querol et al., 1997), le plomb (Pb) (Hellebust et al., 2010; Isakson et al., 2001), le zinc (Zn) (Isakson et al., 2001), le lanthane (La), le cérium (Ce) (Pandolfi et al., 2011) et les sulfates (Viana et al., 2008). Les rapports de concentrations permettent de donner une indication qualitative de la source majoritaire. Un ratio V/Ni d'environ 3 est caractéristique des émissions du transport maritime (Hellebust et al., 2010; Mazzei et al., 2008; Pandolfi et al., 2011; Salameh et al., 2015) tandis qu'un ratio plus faible est, par exemple, lié aux usines d'acier inoxydable (0,9 - 1,9). Un ratio La/Ce compris entre 0,6 et 0,8 caractérise également les émissions des navires (Pandolfi et al., 2011).

Dans plusieurs études, ces traceurs particulaires ont montré des corrélations avec des traceurs gazeux. Isakson et al. (2001) ont montré qu'une corrélation positive existait entre Ni, Pb, V, Zn et les émissions de monoxyde d'azote (NO) provenant des navires.

## 5.2 Effet du type de navigation sur les émissions

La qualité de l'air dans les ports est directement liée au type de navire en présence mais également à leur type de navigation. Merico et al. (2016) ont mis en évidence des liens existants entre les concentrations en polluants et le type de navigation (Figure 14). À haute résolution temporelle, il est possible de voir distinctement l'impact du panache de fumée des navires. En effet, lors des manœuvres d'arrivée et de départ, de fortes teneurs en  $\text{SO}_2$  ont été émises par les navires, mais la phase de stationnement n'a, quant à elle, eu aucun effet sur les concentrations en  $\text{SO}_2$  en raison de l'utilisation de combustibles à faible teneur en soufre dans le port. Ces phases de manœuvre sont également visibles dans les concentrations en  $\text{NO}$  et  $\text{NO}_2$ . La concentration de ces polluants reste également élevée tout au long du stationnement à quai et lors du chargement et du déchargement du navire. Une diminution des concentrations en ozone ( $\text{O}_3$ ) en correspondance avec des pics de  $\text{NO}$  a été observée à la fois dans les phases de manœuvre et de stationnement à quai. Cet effet se produit sur des sites proches des émissions des navires, à l'échelle locale. À plus grande distance des émissions, en heures diurnes, l'excès de  $\text{NO}_2$  dû aux navires pourrait augmenter la formation d' $\text{O}_3$ , surtout pendant l'été.

De plus, la Figure 14 montre que la taille de particules primaires est fortement dépendante des émissions : la taille est différente pour les phases de manœuvre et de stationnement à quai. Les particules de diamètre inférieur à  $0,25 \mu\text{m}$ , corrélées au  $\text{NO}$  et  $\text{NO}_2$ , sont émises par les deux phases de navigation. Les particules de diamètre compris entre  $0,25$  et  $1 \mu\text{m}$  sont principalement émises lors des manœuvres. Les particules les plus grosses, de diamètre supérieur à  $1 \mu\text{m}$ , présentent une faible augmentation en nombre lors du stationnement à quai.

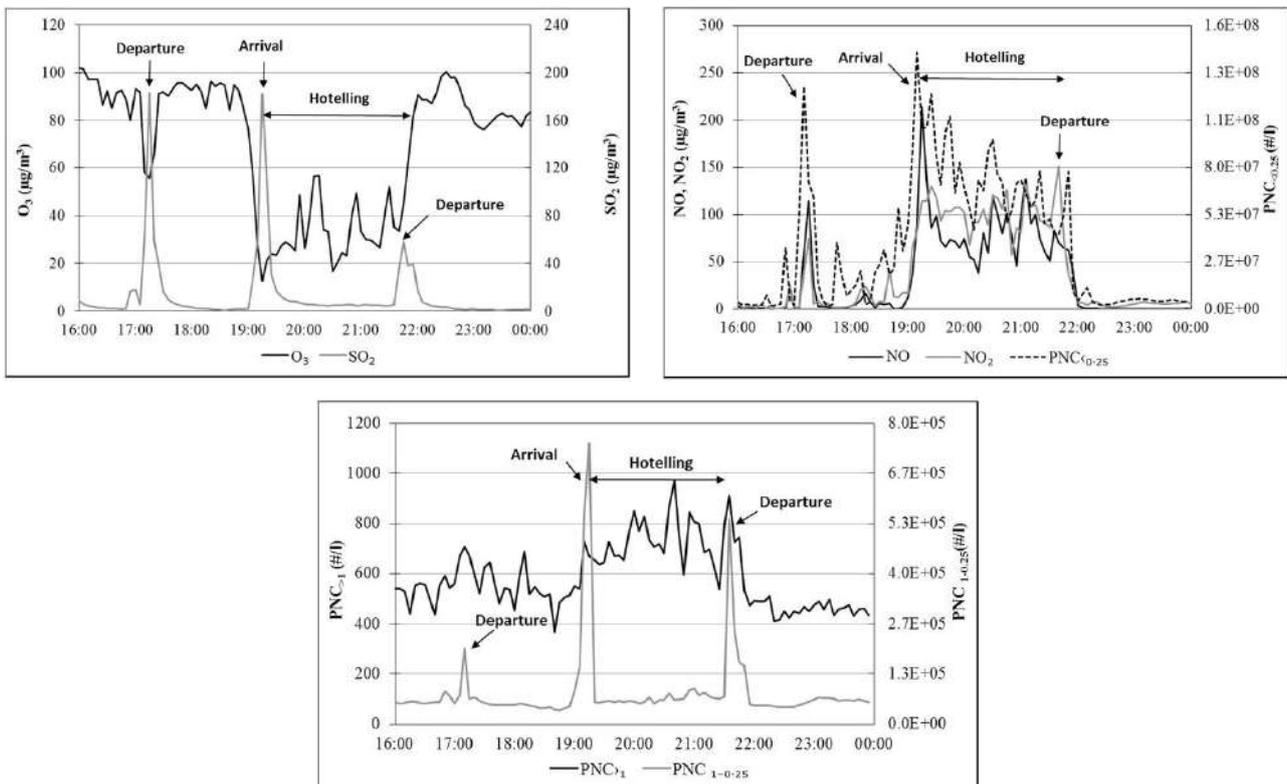


Figure 14 : Évolution des concentrations en polluants gazeux et en nombre de particules, dans différentes gammes de tailles, associées aux phases de manœuvre et de stationnement à quai (résolution : 5 min) (Merico et al., 2016)

Dans le cadre du programme européen APICE (Common Mediterranean strategy and local practical Actions for the mitigation of Port, Industries and Cities Emissions), Pey et al. (2013) ont été mis en évidence un lien entre la variabilité hebdomadaire des sources liées aux émissions des navires et le nombre de navires entrant dans la zone portuaire (Figure 15). Le facteur issu d'une analyse PMF (Positive Matrix Factorization) identifié comme source de combustion de fioul présente un maximum du mardi au jeudi et une diminution significative le week-end, tandis que les émissions primaires du transport maritime augmentent du mercredi au jeudi et augmente légèrement le dimanche.

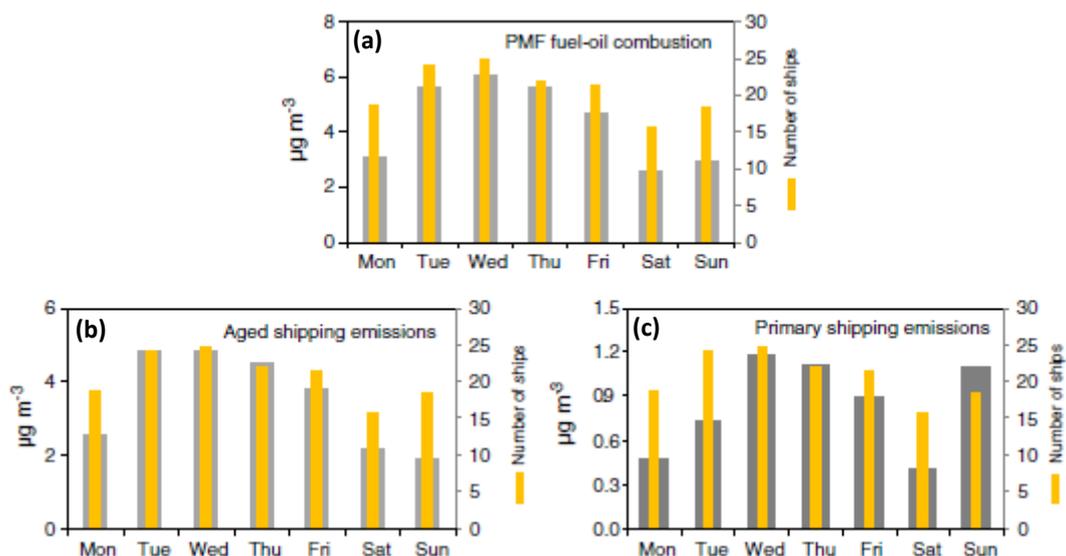


Figure 15 : Tendances hebdomadaires (a) du facteur PMF combustion de fioul, (b) des émissions primaires et (c) des émissions secondaires du trafic maritime

### 5.3 Niveaux de concentrations

Chaque étude réalisée sur les émissions portuaires est différente : certaines se basent sur la mesure de composés gazeux et des particules, tandis que d'autres étudient la composition chimique fine des particules, notamment pour effectuer des analyses statistiques de quantification des sources en zone portuaire. Le Tableau 3 regroupe, pour quelques études, les concentrations moyennes mesurées des polluants étudiés.

Tableau 3 : Concentrations moyennes mesurées des polluants étudiés pour différentes études

Référence	Atmo PACA (2007)	Pey et al. (2013)	Air PACA (2014)	Air PACA (2014)	Atmo Nord-Pas-de-Calais (2015a) ; Roche (2016)	Merico et al. (2016)	
Localisation	port de Toulon (France)	port de Barcelone (Espagne)	port de Nice (France)	port de Nice (France)	port de Calais (France)	port de Brindisi (Italie)	
Période de mesure	08/08/2006 - 05/09/2006	07/11/2011 - 05/01/2012	01/08/2013 - 07/01/2014	11/07/2014 - 08/08/2014	29/01/2014 - 21/04/2014	27/06/2014 - 13/10/2014	
Concentration moyenne (polluants principaux) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO				8,2	11,4	
	NO <sub>2</sub>	22,1		27	45	22	
	SO <sub>2</sub>	2,4		4	2,4	2,6	
	O <sub>3</sub>					76,8	
	PM <sub>10</sub>	29	30,6	25		25,3	
	PM <sub>2,5</sub>						12,6
	PM <sub>1</sub>						11,0
	OC		5,4			3,1	
	EC		2,3			0,8	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,67				
	Ca		0,83				
	K		0,46				
	Na		1,2				
	Mg		0,20				
	Fe		0,57			0,21	
	Al					0,12	
	Ti					0,03	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		2,0			1,86		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		1,7			5,4		

Référence	Atmo PACA (2007)	Pey et al. (2013)	Air PACA (2014)	Air PACA (2014)	Atmo Nord-Pas-de-Calais (2015a) ; Roche (2016)	Merico et al. (2016)
		1,9			2,25	
		0,71			1,68	
					0,46	
					0,13	
					0,19	
					1,64	
	0,8			0,9		
	3,9			6,0		
	5,0			40,6		
<b>Contribution des PM<sub>10</sub> issues du trafic maritime</b>		15 %			5 %	

### 5.3.1 En Europe

En Europe, une étude conduite dans le cadre du projet APICE a permis d'évaluer la variabilité spatiotemporelle des concentrations en PM<sub>2,5</sub> et de caractériser leurs compositions chimiques dans cinq villes portuaires du pourtour du bassin méditerranéen (Barcelone, Marseille, Gênes, Venise et Thessalonique) (APICE project, 2013; Salameh et al., 2015). Les mesures des espèces gazeuses (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) et des particules (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) ont été réalisées sur une longue période (environ une année en 2011/2012). De plus, l'analyse de la composition chimique des particules (OC, EC, éléments traces métalliques, ions) sur cette même période a permis d'identifier et de quantifier les sources à l'origine de la pollution dans ces villes grâce à deux méthodes : la méthode PMF (Barcelone, Gênes, Thessalonique et Venise) et la méthode CMB (Chemical Mass Balance) (Marseille). La Figure 16 présente les résultats de l'intercomparaison réalisée par tous les partenaires du projet à Marseille. Cette figure montre une grande variabilité des estimations des différentes sources de particules. En effet, la contribution du transport maritime, mélangée avec la source industrielle, représente au maximum 32 % d'après l'UOWM (Thessalonique) et au minimum 2 % pour Aix Marseille Université (Marseille).

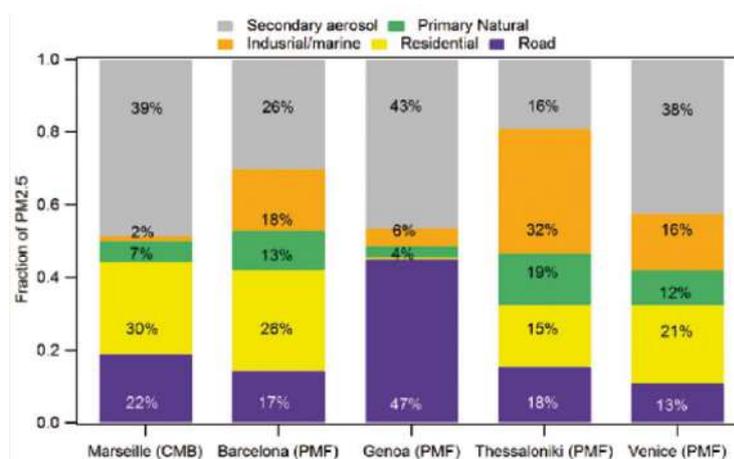


Figure 16 : Contribution moyenne des sources de PM<sub>2,5</sub> (APICE project, 2013)

Une synthèse européenne de l'impact des émissions du transport maritime sur les émissions de particules et de polluants gazeux a été réalisée par Viana et al. (2014).

L'impact de ces émissions sur les concentrations en particules a été principalement calculé grâce à l'application des outils de quantification des sources tels que les modèles récepteurs basés sur l'utilisation de traceurs. Cependant, il apparaît régulièrement que ce type de modèle mélange les émissions du trafic maritime avec d'autres sources de combustion. Ainsi, la recherche de nouveaux traceurs permettant de séparer cette source apparaît indispensable. La Figure 17a permet de noter que les émissions du trafic maritime impactent davantage les particules fines (particules

de diamètre inférieur à 2,5 µm) : environ 10 % pour les PM<sub>1</sub>, entre 4 et 20 % pour les PM<sub>2,5</sub> et entre 2 et 7 % pour les PM<sub>10</sub>. Contini et al. (2011) a également montré que la contribution des émissions directes du trafic maritime représentait 10 % des concentrations en Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) gazeux.

L'impact des émissions de transport maritime sur les concentrations en polluants gazeux est principalement réalisé par des outils de modélisation de la dispersion. La Figure 17b montre que les contributions du trafic maritime aux niveaux ambiants de NO<sub>2</sub> se situent entre 7 et 24 %. De plus, des augmentations horaires des concentrations en SO<sub>2</sub> dues aux émissions des navires ont été enregistrées en Suède et en Espagne.

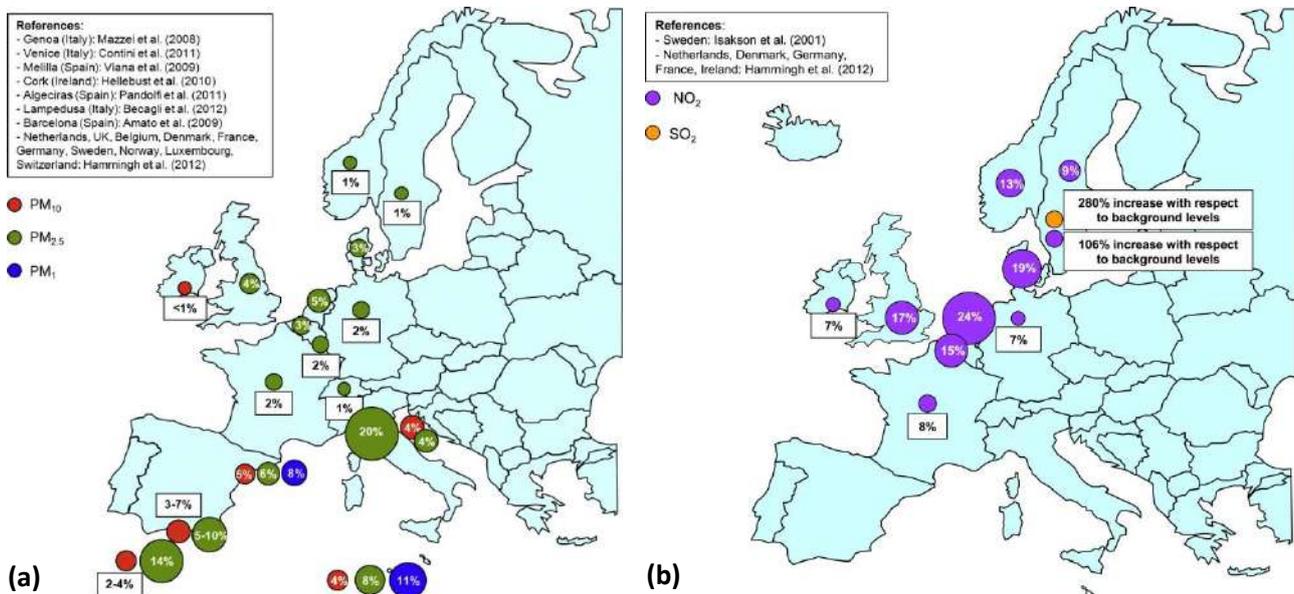


Figure 17 : Contribution du trafic maritime aux concentrations (a) en particules et (b) en polluants gazeux en Europe (Viana et al., 2014) (contributions de NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub> en Suède : augmentations relatives par rapport aux niveaux de fond)

### 5.3.2 En France

En France, divers projets ont eu pour objectif d'étudier les émissions du transport maritime.

Le projet ECUME (Évaluation de la Contribution des sources Maritimes à la teneur en PM<sub>10</sub> sur le littoral de la région Nord-Pas-de-Calais) (Atmo Nord-Pas-de-Calais, 2015a; Roche, 2016) a étudié les niveaux de concentration, la composition chimique et l'origine des PM<sub>10</sub> sur le littoral de la Région Nord-Pas-de-Calais. Le site du port de Calais fait apparaître des concentrations importantes de la plupart des espèces chimiques analysées, notamment comparé au site du Cap Gris-Nez (site rural côtier). Des espèces métalliques telles que Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti, V, d'origine anthropique, et les espèces carbonées OC et EC sont présentes en concentration plus grande à Calais en comparaison au Cap Gris-Nez. L'étude des vents dans la zone portuaire de Calais a permis d'identifier les espèces SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, V, Ni, Co et très probablement La comme caractéristiques des émissions des navires. L'utilisation du modèle PMF a permis d'identifier dix sources de particules et d'en estimer les contributions. En moyenne, en 2013, au Cap Gris-Nez, 5 % des PM<sub>10</sub> étaient issues du trafic maritime.

La qualité de l'air a également été étudiée dans le port de Bastia (Qualitair Corse, 2017) où des mesures de particules, NO<sub>2</sub> et benzène ont été effectuées dans l'environnement proche du port. Deux phases ont pu être clairement distinguées, les phases d'approche ou de départ pendant lesquelles les moteurs sont fortement sollicités (panaches très chargées en particules) et les phases de stationnement à quai.

En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, deux études supplémentaires au projet APICE (Marseille) ont été menées :

- le projet SYMPIC (Atmo PACA, 2007) : l'étude a porté sur les ports de commerce de l'agglomération toulonnaise et les zones urbaines qui les entourent, à l'exclusion du port militaire. Des mesures de NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, BTEX et PM<sub>10</sub> ont été réalisées par des tubes à diffusion passives, complétées par des mesures issues d'analyseurs en continu.
- l'étude d'Air PACA (2014) a évalué la qualité de l'air dans le quartier du Port de Nice. Le SO<sub>2</sub>, le NO<sub>2</sub>, les PM<sub>10</sub> et les BTEX ont été suivis. Deux phases de mesure ont eu lieu, l'une de cinq mois en 2013 pour suivre l'évolution temporelle et l'autre au cours de l'été 2014 pour l'évolution spatiale.

## 6. Conclusion

Finalement, ce rapport « état de l'art », se fondant sur les résultats d'un grand nombre d'études, principalement en Europe et en France, qui se sont intéressées à la qualité de l'air des zones portuaires, permet :

- de rassembler les connaissances actuelles sur le sujet,
- de pointer les perspectives d'améliorations des connaissances.

En effet, les inventaires d'émissions ont pu mettre en évidence l'influence prédominante des navires tels que les pétroliers et les porte-conteneurs, ces derniers étant responsables de plus de 60 % des émissions totales du transport maritime, mais également des modes de navigation : lors du stationnement à quai, les émissions des navires sont les plus importantes. Des mesures permettant une diminution des émissions dans les zones portuaires commencent à être mises en place telles que

- la qualité du carburant / le changement de combustible,
- les technologies de réduction des émissions,
- les mesures prises pour le fonctionnement des navires.

Divers scénarios des émissions futures du transport maritime prenant en compte ou non ces améliorations possibles ont montré que les émissions en  $SO_x$  ont diminué depuis 2008 (année de la mise en place de la réglementation sur les teneurs en soufre dans les carburants) et se maintiendront à cette valeur tandis qu'aucune diminution des autres polluants ( $CO_2$ ,  $NO_x$  et PM) n'est à prévoir dans les décennies à venir notamment du fait d'un taux de croissance supposé du secteur.

Les études de mesure des différents polluants sont comparables aux inventaires des émissions du transport maritime, montrant ainsi l'importance du stationnement à quai des navires. La plupart des études se sont attachées à mesurer les concentrations en  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$  et PM mais d'autres, en quantité non négligeable, ont également étudié la composition chimique des particules permettant alors d'effectuer une quantification des sources et notamment la source anthropique maritime en zone ou ville portuaire qui explique 2 à plus de 30 % de la masse des  $PM_{2,5}$ . Cependant, cette quantification est basée essentiellement sur des traceurs pouvant être émis par d'autres sources telles que les activités industrielles, induisant alors des erreurs dans la quantification de la source anthropique maritime. Il apparaît alors important d'identifier un profil chimique caractéristique des émissions du transport maritime comprenant des traceurs univoques de cette source.

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Objectif et principales conclusions des études analysées par Nunes et al. (2017) .....	7
Tableau 2 : Principaux contributeurs aux concentrations en PM <sub>2,5</sub> (*sans considérer les conditions limites, c'est-à-dire les PM provenant de l'extérieur du domaine de modélisation principal) (APICE project, 2013) .....	17
Tableau 3 : Concentrations moyennes mesurées des polluants étudiés pour différentes études .....	21

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Limites fixées par l'IMO et l'Union Européenne de la teneur en soufre des carburants des navires (% en masse) (EEA, 2013a; IMO, 2017).....	4
Figure 2 : Localisation géographique des études analysées par Nunes et al. (2017) .....	6
Figure 3 : Nombre d'études qui ont considéré chaque polluant (Nunes et al., 2017).....	9
Figure 4 : Inventaires d'émissions des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques réalisés en Europe (EEA, 2013a) .....	10
Figure 5 : Comparaison des émissions du transport maritime avec celles du transport routier en 2010 à Brindisi (Les émissions absolues en tonnes/an sont reportées comme chiffres dans le graphique) (Merico et al., 2016) .....	11
Figure 6 : Inventaires des émissions 2015 dans la région PACA .....	12
Figure 7 : Répartition des émissions de SO <sub>x</sub> par port, mode de navigation et type de navires.....	13
Figure 8 : Projections des émissions de CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> et PM <sub>2,5</sub> du transport maritime international dans les mers européennes (EEA, 2013a).....	14
Figure 9 : Impact des émissions du transport maritime, en 2002, sur les concentrations moyennes journalières (a) en NO <sub>2</sub> et (b) en SO <sub>2</sub> , des concentrations en ozone (a) d'un pic horaire et (b) en moyenne sur 8 heures, et des concentrations moyennes journalières (e) en nitrates et (f) en sulfates dans les PM (Vutukuru and Dabdub, 2008) .....	15
Figure 10 : Concentrations moyennes annuelle de 2013 en SO <sub>2</sub> à (a) Barcelone, (b) Marseille, (c) Gênes, (d) Thessalonique et (e) concentrations maximales horaires en SO <sub>2</sub> à Venise (MED Maritime integrated projects, 2015).....	16
Figure 11 : (a) Contribution journalière sur les PM <sub>10</sub> à Marseille des différents secteurs d'activité au cours du mois de février 2011 (modèle CHIMERE). – (b) Contribution saisonnière sur les PM <sub>10</sub> à Marseille des différents secteurs d'activité (modèle CHIMERE et CAMx) (APICE project, 2013) .....	17
Figure 12 : Carte des concentrations moyennes annuelles de 2011 en NO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> et SO <sub>2</sub> autour du port de Calais (Atmo Nord-Pas-de-Calais, 2015b) .....	18
Figure 13 : Schéma représentant les composés émis par les navires (Mueller et al., 2011) .....	19
Figure 14 : Évolution des concentrations en polluants gazeux et en nombre de particules, dans différentes gammes de tailles, associées aux phases de manœuvre et de stationnement à quai (résolution : 5 min) (Merico et al., 2016) .....	20
Figure 15 : Tendances hebdomadaires (a) du facteur PMF combustion de fioul, (b) des émissions primaires et (c) des émissions secondaires du trafic maritime .....	21
Figure 16 : Contribution moyenne des sources de PM <sub>2,5</sub> (APICE project, 2013) .....	22
Figure 17 : Contribution du trafic maritime aux concentrations (a) en particules et (b) en polluants gazeux en Europe (Viana et al., 2014) (contributions de NO <sub>2</sub> et SO <sub>2</sub> en Suède : augmentations relatives par rapport aux niveaux de fond) .....	23

# ANNEXE

## ANNEXE 1 : Bibliographie

- Air Normand, 2008. Inventaire des émissions en Haute-Normandie - Actualisation des émissions par le trafic maritime.
- Amato, F., Pandolfi, M., Escrig, A., Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., Perez, N., Hopke, P.K., 2009. Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2. *Atmos. Environ.* 43, 2770–2780. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.039>
- APICE project, 2013. Reducing atmospheric pollution in the Mediterranean port cities - The results of APICE project.
- Atmo Nord-Pas-de-Calais, 2015a. Projet ECUME - Evaluation de la Contribution des sources Maritimes à la teneur en PM10 sur le littoral de la région Nord-Pas-de-Calais.
- Atmo Nord-Pas-de-Calais, 2015b. Calais Port 2015 - Etat initial 2011, et simulations 2021 et 2030 de la qualité de l'air par modélisation.
- Atmo PACA, 2007. Projet SIMPYC - Qualité de l'air comparée entre les villes de Toulon et de la Seyne-sur-Mer et leurs ports.
- Becagli, S., Sferlazzo, D.M., Pace, G., di Sarra, A., Bommarito, C., Calzolari, G., Ghedini, C., Lucarelli, F., Meloni, D., Monteleone, F., 2011. Evidence for ships emissions in the Central Mediterranean Sea from aerosol chemical analyses at the island of Lampedusa. *Atmospheric Chem. Phys. Discuss.* 11.
- Berechman, J., Tseng, P.-H., 2012. Estimating the environmental costs of port related emissions: The case of Kaohsiung. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 17, 35–38. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.09.009>
- Bosch, P., Coenen, P., Fridell, E., Åström, S., Palmer, T., Holland, M., 2009. Cost benefit analysis to support the impact assessment accompanying the revision of directive 1999/32/EC on the sulphur content of certain liquid fuels. *AEA Rep. Eur. Comm. Didcot.*
- Buhaug, Ø., Corbett, J.J., Endresen, Ø., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., Lee, D.S., Lee, D., Lindstad, H., Markowska, A.Z., 2009. Second imo ghg study 2009. *Int. Marit. Organ.*
- Campling, P., Janssen, L., Vanherle, K., Cofala, J., Heyes, C., Sander, R., 2013. Specific evaluation of emissions from shipping including assessment for the establishment of possible new emission control areas in European Seas (Final Report). VITO, Belgium.
- Chiffi, C., Fiorello, D., Schrooten, L., De Vlieger, I., 2007. EXploring non road TRAnsport EMISsions in Europe Development of a Reference System on Emissions Factors for Rail, Maritime and Air Transport (Final Report). Spain.
- Coello, J., Williams, I., Hudson, D.A., Kemp, S., 2015. An AIS-based approach to calculate atmospheric emissions from the UK fishing fleet. *Atmos. Environ.* 114, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.011>
- Cofala, J., Amann, M., Heyes, C., Wagner, F., Klimont, Z., Posch, M., Schöpp, W., Tarasson, L., Whall, C., Stavrakaki, A., 2007. Analysis of policy measures to reduce ship emissions in the context of the revision of the national emissions ceilings directive (Final Report).
- Contini, D., Gambaro, A., Belosi, F., Pieri, S.D., Cairns, W.R.L., Donato, A., Zanotto, E., Citron, M., 2011. The direct influence of ship traffic on atmospheric PM2.5, PM10 and PAH in Venice. *J. Environ. Manage.* 92, 2119–2129. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.016>
- Contini, D., Gambaro, A., Donato, A., Cescon, P., Cesari, D., Merico, E., Belosi, F., Citron, M., 2015. Inter-annual trend of the primary contribution of ship emissions to PM2.5 concentrations in Venice (Italy): Efficiency of emissions mitigation strategies. *Atmos. Environ.* 102, 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.065>
- Corbett, J., Winebrake, J., Green, E., 2010. An assessment of technologies for reducing regional short-lived climate forcers emitted by ships with implications for Arctic shipping. *Carbon Manag.* 1, 207–225. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.27>
- Corbett, J.J., Winebrake, J.J., Green, E.H., Kasibhatla, P., Eyring, V., Lauer, A., 2007. Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment. *Environ. Sci. Technol.* 41, 8512–8518. <https://doi.org/10.1021/es071686z>
- Cullinane, K., Tseng, P.-H., Wilmsmeier, G., 2016. Estimation of container ship emissions at berth in Taiwan. *Int. J. Sustain. Transp.* 10, 466–474.

- Deniz, C., Kilic, A., 2009. Estimation and assessment of shipping emissions in the region of Ambarlı Port, Turkey. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 29, 107–115. <https://doi.org/10.1002/ep.10373>
- Deniz, C., Kilic, A., Civkaroglu, G., 2010. Estimation of shipping emissions in Candarli Gulf, Turkey. *Environ. Monit. Assess.* 171, 219–228.
- EDGAR, 2012. Data taken from European Commission, Joint Research Centre (JRC)/ Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR),.
- EDGAR, 2009. Data taken from Miola et al., 2011, original data from the European Commission, Joint Research Centre (JRC)/Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR).
- EEA, 2013a. The impact of international shipping on European air quality and climate forcing (Technical report No. 4/2013). European Environmental Agency.
- EEA, 2013b. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013 - Technical guidance to prepare national emission inventories (Technical report No. 12/2013).
- Eyring, V., Köhler, H.W., Lauer, A., Lemper, B., 2005a. Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 110. <https://doi.org/10.1029/2004JD005620>
- Eyring, V., Köhler, H.W., van Aardenne, J., Lauer, A., 2005b. Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 110. <https://doi.org/10.1029/2004JD005619>
- Faber, J., Markowska, A., Nelissen, D., Davidson, M., Eyring, V., Cionni, I., Selstad, E., Kageson, P., Lee, D., Buhaug, O., Lindtsad, H., Roche, P., Humpries, E., Graichen, J., Cames, M., Schwarz, W., 2009. Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport. CE Delft, Netherlands.
- Fan, Q., Zhang, Y., Ma, W., Ma, H., Feng, J., Yu, Q., Yang, X., Ng, S.K.W., Fu, Q., Chen, L., 2016. Spatial and Seasonal Dynamics of Ship Emissions over the Yangtze River Delta and East China Sea and Their Potential Environmental Influence. *Environ. Sci. Technol.* 50, 1322–1329. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03965>
- Fridell, E., Steen, E., Peterson, K., 2008. Primary particles in ship emissions. *Atmos. Environ.* 42, 1160–1168. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.042>
- Goldsworthy, L., Goldsworthy, B., 2015. Modelling of ship engine exhaust emissions in ports and extensive coastal waters based on terrestrial AIS data – An Australian case study. *Environ. Model. Softw.* 63, 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.009>
- Gregoris, E., Barbaro, E., Morabito, E., Toscano, G., Donateo, A., Cesari, D., Contini, D., Gambaro, A., 2016. Impact of maritime traffic on polycyclic aromatic hydrocarbons, metals and particulate matter in Venice air. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 6951–6959. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5811-x>
- Hammingh, P., Holland, M.R., Geilenkirchen, G.P., Jonson, J., Maas, R., 2012. Assessment of the environmental impacts and health benefits of a nitrogen emission control area in the North Sea. PBL Neth. Environ. Assess. Agency HagueBilthoven.
- Healy, R.M., O'Connor, I.P., Hellebust, S., Allanic, A., Sodeau, J.R., Wenger, J.C., 2009. Characterisation of single particles from in-port ship emissions. *Atmos. Environ.* 43, 6408–6414. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.039>
- Hellebust, S., Allanic, A., O'Connor, I.P., Jourdan, C., Healy, D., Sodeau, J.R., 2010. Sources of ambient concentrations and chemical composition of PM<sub>2.5-0.1</sub> in Cork Harbour, Ireland. *Atmospheric Res.* 95, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.09.006>
- Howitt, O.J.A., Revol, V.G.N., Smith, I.J., Rodger, C.J., 2010. Carbon emissions from international cruise ship passengers' travel to and from New Zealand. *Gt. China Energy Spec. Sect. Regul. Pap.* 38, 2552–2560. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.050>
- IMO, 2017. MARPOL Annex VI - Prevention of Air Pollution from Ships [WWW Document]. Int. Marit. Organ. URL <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx> (accessed 9.25.17).

- Isakson, J., Persson, T.A., Lindgren, E.S., 2001. Identification and assessment of ship emissions and their effects in the harbour of Göteborg, Sweden. *Atmos. Environ.* 35, 3659–3666. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00528-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00528-8)
- Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Kukkonen, J., 2014. A comprehensive inventory of the ship traffic exhaust emissions in the Baltic Sea from 2006 to 2009. *Ambio* 43, 311–324.
- Kiliç, A., Deniz, C., 2010. Inventory of shipping emissions in Izmit Gulf, Turkey. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 29, 221–232.
- Lack, D.A., Corbett, J.J., 2012. Black carbon from ships: a review of the effects of ship speed, fuel quality and exhaust gas scrubbing. *Atmospheric Chem. Phys.* 12, 3985–4000.
- Liu, T.-K., Sheu, H.-Y., Tsai, J.-Y., 2014. Sulfur dioxide emission estimates from merchant vessels in a port area and related control strategies. *Aerosol Air Qual. Res.* 14, 413–421.
- Lonati, G., Cernuschi, S., Sidi, S., 2010. Air quality impact assessment of at-berth ship emissions: Case-study for the project of a new freight port. *Sci. Total Environ.* 409, 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.029>
- Maragkogianni, A., Papaefthimiou, S., 2015. Evaluating the social cost of cruise ships air emissions in major ports of Greece. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 36, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.014>
- Mazzei, F., D'Alessandro, A., Lucarelli, F., Nava, S., Prati, P., Valli, G., Vecchi, R., 2008. Characterization of particulate matter sources in an urban environment. *Sci. Total Environ.* 401, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.008>
- McArthur, D.P., Osland, L., 2013. Ships in a city harbour: An economic valuation of atmospheric emissions. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 21, 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.02.004>
- MED Maritime integrated projects, 2015. Cruise and passenger ship Air quality Impact Mitigation ActioNs (CAIMANs) - Air quality impact and green house gases assessment for cruise and passenger ships. ARPAV, CSIC-IDAEA, Air PACA, LabFisA, Laboratory of Atmospheric Physics.
- Merico, E., Donato, A., Gambaro, A., Cesari, D., Gregoris, E., Barbaro, E., Dinoi, A., Giovanelli, G., Masieri, S., Contini, D., 2016. Influence of in-port ships emissions to gaseous atmospheric pollutants and to particulate matter of different sizes in a Mediterranean harbour in Italy. *Atmos. Environ.* 139, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.024>
- Merico, E., Gambaro, A., Argiriou, A., Alebic-Juretic, A., Barbaro, E., Cesari, D., Chasapidis, L., Dimopoulos, S., Dinoi, A., Donato, A., Giannaros, C., Gregoris, E., Karagiannidis, A., Konstandopoulos, A.G., Ivošević, T., Liora, N., Melas, D., Mifka, B., Orlić, I., Poupkou, A., Sarovic, K., Tsakis, A., Giua, R., Pastore, T., Nocioni, A., Contini, D., 2017. Atmospheric impact of ship traffic in four Adriatic-Ionian port-cities: Comparison and harmonization of different approaches. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 50, 431–445. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.016>
- Mestl, T., Løvoll, G., Stensrud, E., Le Breton, A., 2013. The Doubtful Environmental Benefit of Reduced Maximum Sulfur Limit in International Shipping Fuel. *Environ. Sci. Technol.* 47, 6098–6101. <https://doi.org/10.1021/es4009954>
- Miola, A., Ciuffo, B., 2011. Estimating air emissions from ships: Meta-analysis of modelling approaches and available data sources. *Atmos. Environ.* 45, 2242–2251.
- Mueller, D., Uibel, S., Takemura, M., Klingelhoefer, D., Groneberg, D.A., 2011. Ships, ports and particulate air pollution-an analysis of recent studies. *J. Occup. Med. Toxicol.* 6, 31.
- Murphy, S.M., Agrawal, H., Sorooshian, A., Padró, L.T., Gates, H., Hersey, S., Welch, W.A., Jung, H., Miller, J.W., Cocker, D.R., Nenes, A., Jonsson, H.H., Flagan, R.C., Seinfeld, J.H., 2009. Comprehensive Simultaneous Shipboard and Airborne Characterization of Exhaust from a Modern Container Ship at Sea. *Environ. Sci. Technol.* 43, 4626–4640. <https://doi.org/10.1021/es802413j>
- Ng, S.K.W., Loh, C., Lin, C., Booth, V., Chan, J.W.M., Yip, A.C.K., Li, Y., Lau, A.K.H., 2013. Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta. *Improv. Reg. Air Qual. Pearl River Delta Hong Kong Sci. Policy* 76, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.070>
- Nunes, R.A.O., Alvim-Ferraz, M.C.M., Martins, F.G., Sousa, S.I.V., 2017. The activity-based methodology to assess ship emissions - A review. *Environ. Pollut.* 231, 87–103. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.099>

- Pandolfi, M., Gonzalez-Castanedo, Y., Alastuey, A., de la Rosa, J.D., Mantilla, E., de la Campa, A.S., Querol, X., Pey, J., Amato, F., Moreno, T., 2011. Source apportionment of PM10 and PM2.5 at multiple sites in the strait of Gibraltar by PMF: impact of shipping emissions. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 18, 260–269. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0373-4>
- Papaefthimiou, S., Maragkogianni, A., Andriosopoulos, K., 2016. Evaluation of cruise ships emissions in the Mediterranean basin: The case of Greek ports. *Int. J. Sustain. Transp.* 10, 985–994. <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1185484>
- Paxian, A., Eyring, V., Beer, W., Sausen, R., Wright, C., 2010. Present-day and future global bottom-up ship emission inventories including polar routes. *Env. Sci Technol* 44, 1333–1339.
- Petzold, A., Hasselbach, J., Lauer, P., Baumann, R., Franke, K., Gurk, C., Schlager, H., Weingartner, E., 2008. Experimental studies on particle emissions from cruising ship, their characteristic properties, transformation and atmospheric lifetime in the marine boundary layer. *Atmos Chem Phys* 8, 2387–2403. <https://doi.org/10.5194/acp-8-2387-2008>
- Pey, J., Pérez, N., Cortés, J., Alastuey, A., Querol, X., 2013. Chemical fingerprint and impact of shipping emissions over a western Mediterranean metropolis: Primary and aged contributions. *Sci. Total Environ.* 463, 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.061>
- Qualitair Corse, 2017. Estimation de l'impact des émissions portuaires sur le centre-ville de Bastia.
- Querol, X., Alastuey, A., López-Soler, A., Boix, A., Sanfeliu, T., Martynov, V.V., Piven, P.I., Kabina, L.P., Souschov, P.A., 1997. Trace element contents in atmospheric suspended particles: inferences from instrumental neutron activation analysis. *Fresenius J. Anal. Chem.* 357, 934–940. <https://doi.org/10.1007/s002160050277>
- Roche, C., 2016. Etude des concentrations et de la composition des PM10 sur le littoral du nord de la France - Evaluation des contributions maritimes de l'espace Manche-Mer du Nord. Université du Littoral Côte d'Opale.
- Salameh, D., Detournay, A., Pey, J., Pérez, N., Liguori, F., Saraga, D., Bove, M.C., Brotto, P., Cassola, F., Massabò, D., Latella, A., Pillon, S., Formenton, G., Patti, S., Armengaud, A., Piga, D., Jaffrezo, J.L., Bartzis, J., Tolis, E., Prati, P., Querol, X., Wortham, H., Marchand, N., 2015. PM2.5 chemical composition in five European Mediterranean cities: A 1-year study. *Atmospheric Res.* 155, 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.12.001>
- Sanabra, M.C., Usabiaga Santamaría, J.J., Martínez De Osés, F.X., 2014. Manoeuvring and hotelling external costs: enough for alternative energy sources? *Marit. Policy Manag.* 41, 42–60.
- Saraçoğlu, H., Deniz, C., Kiliç, A., 2013. An investigation on the effects of ship sourced emissions in Izmir Port, Turkey. *Sci. World J.* 2013.
- Schrooten, L., De Vlieger, I., Panis, L.I., Chiffi, C., Pastori, E., 2009. Emissions of maritime transport: A European reference system. *Sci. Total Environ.* 408, 318–323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.07.037>
- Shin, K.-W., Cheong, J.-P., 2011. Estimating transportation-related Greenhouse gas emissions in the port of Busan, S. Korea. *Asian J. Atmospheric Environ.* 5, 41–46.
- Song, S., 2014. Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port. *Atmos. Environ.* 82, 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.006>
- Song, S.-K., Shon, Z.-H., 2014. Current and future emission estimates of exhaust gases and particles from shipping at the largest port in Korea. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 21, 6612–6622.
- Tichavska, M., Tovar, B., 2015. Port-city exhaust emission model: An application to cruise and ferry operations in Las Palmas Port. *Transp. Res. Part Policy Pract.* 78, 347–360. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.05.021>
- Tzannatos, E., 2010. Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus – Greece. *Atmos. Environ.* 44, 400–407. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.024>
- US EPA, 2009a. Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories - Final Report.
- US EPA, 2009b. Regulatory Impact Analysis: Control of Emissions of Air Pollution from Category 3 Marine Diesel Engines.
- US EPA, 2008. Regulatory Impact Analysis: Control of Emissions of Air Pollution from Locomotive Engines and Marine Compression Ignition Engines Less than 30 Liters Per Cylinder.

- Viana, M., Amato, F., Alastuey, A., Querol, X., Moreno, T., García Dos Santos, S., Herce, M.D., Fernández-Patier, R., 2009. Chemical Tracers of Particulate Emissions from Commercial Shipping. *Environ. Sci. Technol.* 43, 7472–7477. <https://doi.org/10.1021/es901558t>
- Viana, M., Hammingh, P., Colette, A., Querol, X., Degraeuwe, B., Vlieger, I. de, Aardenne, J. van, 2014. Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe. *Atmos. Environ.* 90, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.046>
- Viana, M., Kuhlbusch, T.A.J., Querol, X., Alastuey, A., Harrison, R.M., Hopke, P.K., Winiwarter, W., Vallius, M., Szidat, S., Prévôt, A.S.H., Hueglin, C., Bloemen, H., Wåhlin, P., Vecchi, R., Miranda, A.I., Kasper-Giebl, A., Maenhaut, W., Hitzengerger, R., 2008. Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results. *J. Aerosol Sci.* 39, 827–849. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.05.007>
- Villalba, G., Gemechu, E.D., 2011. Estimating GHG emissions of marine ports—the case of Barcelona. *Energy Policy* 39, 1363–1368. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.008>
- Vutukuru, S., Dabdub, D., 2008. Modeling the effects of ship emissions on coastal air quality: A case study of southern California. *Atmos. Environ.* 42, 3751–3764. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.12.073>
- Wagner, F., Amann, M., Bertok, I., Cofala, J., Heyes, C., Klimont, Z., Rafaj, P., Schöpp, W., 2010. Baseline emission projections and further cost-effective reductions of air pollution impacts in Europe—A 2010 perspective. IIASA Austria.
- Whall, C., Cooper, D., Archer, K., Twigger, L., Thurston, N., Ockwell, D., McIntyre, A., Ritchie, A., 2002. Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community (Final Report for the European Commission). UK.
- Winther, M., Christensen, J.H., Plejdrup, M.S., Ravn, E.S., Eriksson, Ó.F., Kristensen, H.O., 2014. Emission inventories for ships in the arctic based on satellite sampled AIS data. *Atmos. Environ.* 91, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.006>
- Yau, P.S., Lee, S.C., Corbett, J.J., Wang, C., Cheng, Y., Ho, K.F., 2012. Estimation of exhaust emission from ocean-going vessels in Hong Kong. *Sci. Total Environ.* 431, 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.092>



## Impact des émissions du transport maritime sur la qualité de l'air des zones portuaires

Dans une problématique actuelle forte de l'influence des émissions du trafic maritime sur la qualité de l'air des zones portuaires, ce rapport fait un état de l'art d'un grand nombre d'études, principalement en Europe et en France qui se sont intéressées à la qualité de l'air de ces zones portuaires. Ces études concernent trois grands axes : les inventaires d'émissions, la modélisation et les mesures.

Les inventaires d'émissions ainsi que les mesures de divers polluants ont mis en évidence la prédominance du stationnement à quai dans les émissions des polluants étudiés. Des mesures permettant une diminution des émissions dans les zones portuaires commencent à être mises en place telles que la qualité du carburant / le changement de combustible, les technologies de réduction des émissions et les mesures prises pour le fonctionnement des navires.

Divers scénarios des émissions futures du transport maritime ont montré que les émissions en  $SO_x$  ont diminué depuis 2008 (année de la mise en place de la réglementation sur les teneurs en soufre dans les carburants) et se maintiendront à cette valeur tandis qu'aucune diminution des autres polluants ( $CO_2$ ,  $NO_x$  et PM) n'est à prévoir dans les décennies à venir.

De plus, beaucoup d'études se sont attachées à mesurer les concentrations en  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$  et PM tandis que d'autres ont également étudié la composition chimique des particules permettant alors d'effectuer une quantification des sources et notamment la source anthropique maritime en zone ou ville portuaire.



**AirPACA**  
QUALITÉ DE L'AIR  
[www.airpaca.org](http://www.airpaca.org)

### Siège social

146, rue Paradis  
« Le Noilly Paradis »  
13294 Marseille Cedex 06  
Tél. 04 91 32 38 00  
Télécopie 04 91 32 38 29

### Établissement de Martigues

Route de la Vierge  
13500 Martigues  
Tél. 04 42 13 01 20  
Télécopie 04 42 13 01 29

### Établissement de Nice

333, Promenade des Anglais  
06200 Nice  
Tél. 04 93 18 88 00  
Télécopie 04 93 18 83 06

