

ACTIVITÉ T.3.3.3

Comparaison des scénarios de transport maritime et routier

Livrable T.3.3.2

Comparaison des scénarios de transport maritime et routier

Partenaire Responsable: AtmoSud

L'objectif de ce livrable est d'effectuer une comparaison entre le bilan des émissions d'un navire de transport de marchandises effectuant un trajet Toulon-Istanbul et le bilan des émissions de camions transportant la même quantité de marchandises sur le même trajet, aussi bien en termes de polluants que de gaz à effet de serre (GES) émis.

1. Calcul des émissions maritimes

L'équivalence de quantité de marchandises transportée se mesure en quantité de conteneurs. La quantité de conteneurs transportée par un camion est donnée par l'EVP (Equivalent Vingt Pieds), qui donne le volume de marchandises en nombre de conteneurs de 20 pieds (6.1 m). On suppose qu'un conteneur transporté équivaut à un camion. Le calcul est effectué pour plusieurs navires, de capacités de transport différentes, ayant fait escale dans la rade de Toulon-la Seyne Brégaillon en 2021. Ces navires sont listés dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Liste des navires utilisés pour la comparaison maritime vs. routier avec leur classification, le nombre de conteneurs qu'ils peuvent transporter (EVP) et leur jauge brute (GT).

Navire	Type de navire	EVP	GT
Navire n°1	Cargo polyvalent	133	6668
Navire n°2	Cargo frigorifique	436	14022
Navire n°3	Porte-conteneurs	809	7713
Navire n°4	Porte-conteneurs	1550	15988
Navire n°5	Porte-conteneurs	4255	41331

La constitution d'une base de données d'émissions maritimes a été présentée dans le livrable T2.2 - *Préparation des données d'émission pour les modèles de simulation*. Les émissions sont calculées pour plusieurs polluants et pour les différentes phases de circulation des navires, à savoir la phase « trajet » (navire loin du port), la phase « manœuvre » (navire dans le port) et la phase à quai (navire en stationnement). Les phases considérées pour ce travail sont la phase de manœuvre et la phase de trajet.

Les émissions des navires dépendent de leur consommation énergétique, selon la formule :

$$E_i = C F_i$$

où

- E_i est l'émission [kg] du polluant i ,
- C est la consommation énergétique [J],
- F_i est le facteur d'émission propre au polluant i [kg/J].

La consommation de carburant des navires est calculée selon les préconisations du guide méthodologique pour l'élaboration des inventaires du LCSQA¹ (guide PCIT²). Elle dépend en particulier de la jauge brute (en anglais *gross tonnage* ou GT), qui est liée, comme l'EVP, à la capacité de transport du navire. On voit cependant, d'après la **Tableau 1**, qu'il n'y a pas de relation directe entre l'EVP et la jauge brute. Un navire peut ainsi émettre moins de polluants qu'un navire transportant une quantité de conteneurs moindre, si sa

¹ Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

² Guide méthodologique pour l'élaboration des inventaires territoriaux des émissions atmosphériques (polluants de l'air et gaz à effet de serre), Ministère de la Transition écologique et solidaire, Direction générale de l'Énergie et du climat, Bureau de la Qualité de l'air, version n°2, juin 2018

jauge brute est plus faible. Dans cet exemple, le navire n°2 est un navire frigorifique, doté d'un dispositif permettant de maintenir la marchandise à basse température, d'où une quantité de conteneurs transportée plus faible que le navire n°3, malgré une jauge brute plus importante.

Les émissions en CH₄, CO₂, NO_x, SO_x, PM10 et PM2.5 par kilomètre, calculées pour les navires listés dans le Tableau 1, en phase de manœuvre et en phase de trajet sont présentés dans le **Tableau 2** et le **Tableau 3** respectivement.

Tableau 2 : Emissions kilométriques des navires en phase de croisière [g/km].

Polluant	Emissions kilométriques en phase « trajet » [g/km]				
	Navire 1 133 EVP	Navire 2 436 EVP frigorifique	Navire 3 809 EVP	Navire 4 1550 EVP	Navire 5 4255 EVP
NO _x	2029	8703	3060	4844	11884
SO _x	52	222	78	648	303
PM10	37	158	56	360	216
PM2.5	35	150	53	341	204
CO ₂	82048	351956	123727	190598	480604
CH ₄	8	33	12	18	45
N ₂ O	2	9	3	5	12

Tableau 3 : Emissions kilométriques des navires en phase de manœuvre [g/km].

Polluant	Emissions kilométriques en phase « manœuvre » [g/km]				
	Navire 1 133 EVP	Navire 2 436 EVP frigorifique	Navire 3 809 EVP	Navire 4 1550 EVP	Navire 5 4255 EVP
NO _x	6081	30156	5246	7655	9857
SO _x	155	769	134	1023	251
PM10	110	547	95	569	179
PM2.5	105	519	90	539	170
CO ₂	245903	1219520	212146	301194	398623
CH ₄	23	115	20	29	38
N ₂ O	6	31	5	8	10

Pour calculer les masses de polluants émises sur le trajet Toulon-Istanbul, on applique la formule :

$$E_i = 2 \times E_i^{\text{manœuvre}} + E_i^{\text{croisière}}$$

pour considérer deux fois la phase de manœuvre, au départ et à l'arrivée. Les émissions de chaque phase p sont obtenues avec :

$$E_i^p = e_i^p \times d^p$$

où e_i^p est l'émission kilométrique calculée pour le polluant i pour la phase p et où d^p est la distance parcourue lors de la phase p. Pour la phase de manœuvre, on considère une distance $d^{\text{manœuvre}}$ de 1 km. Pour la phase de croisière, on utilise la distance $d^{\text{croisière}} = 2708$ km calculée pour la ligne maritime Toulon-Istanbul tracée en **Figure 1**. Les émissions maritimes ainsi calculées sont présentées dans le **Tableau 4**. Dans ce tableau, est

également calculé le CO₂ équivalent aux trois GES CO₂, CH₄ et N₂O, de manière à évaluer leur impact groupé sur le réchauffement global. Ce CO₂ équivalent est obtenu selon la formule

$$F_{CO_2eq} = \alpha_{CO_2} F_{CO_2} + \alpha_{CH_4} F_{CH_4} + \alpha_{N_2O} F_{N_2O}$$

où α_i est le pouvoir de réchauffement global du gaz i , rapporté au pouvoir réchauffant de la même masse de CO₂ sur une période de 100 ans. Par définition, $\alpha_{CO_2} = 1$; les valeurs utilisées pour les autres gaz, $\alpha_{CH_4} = 28$ $\alpha_{N_2O} = 265$, sont issues du cinquième rapport du GIEC.

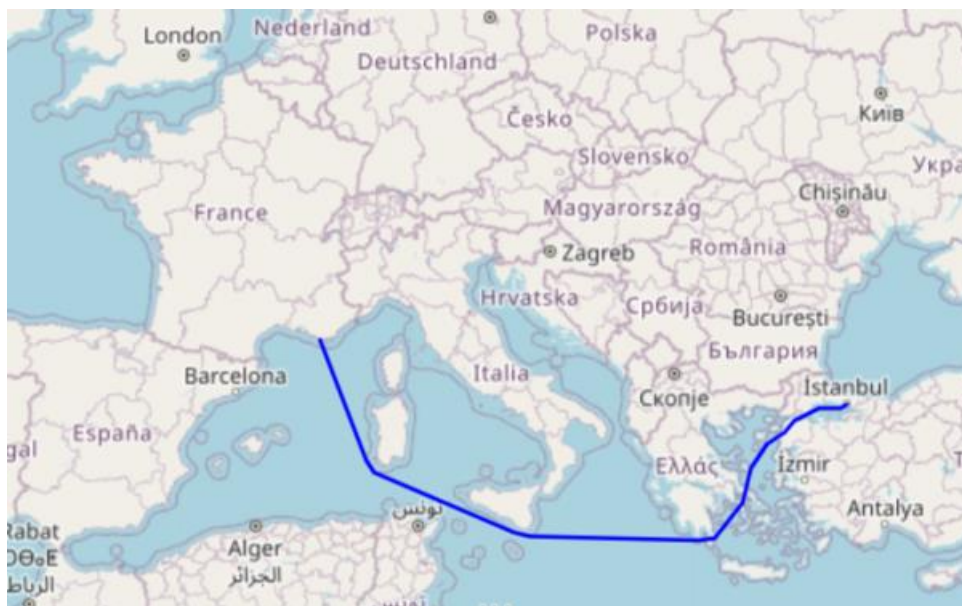


Figure 1 : Ligne maritime reliant Toulon et Istanbul (trait bleu).

Tableau 4 : Emissions des navires [kg] sur le trajet maritime Toulon-Istanbul.

Polluant	Emissions maritimes [kg]				
	Navire 1 133 EVP	Navire 2 436 EVP frigorifique	Navire 3 809 EVP	Navire 4 1550 EVP	Navire 5 4255 EVP
NOx	5507	23630	8296	13135	32204
SOx	140	603	212	1756	821
PM10	100	429	151	976	585
PM2.5	95	406	143	924	554
CO ₂	222691	955585	335494	516769	1302341
CH ₄	21	90	32	50	123
N ₂ O	6	24	8	13	33
CO ₂ eq	224767	964495	338622	521672	1314485

2. Calcul des émissions routières

Les facteurs d'émission des camions sont estimés sur le parc de véhicules lourds empruntant l'autoroute Toulon-Italie. La répartition des véhicules lourds par catégorie est présentée dans le **Tableau 5**. Les deux principaux types de poids lourds (PL) circulant sur cet axe sont les camions articulés de catégorie 40 t – 50 t et les camions rigides de catégorie 14 t – 20 t.

Tableau 5 : Composition du parc de véhicules lourds effectuant le trajet Toulon-Italie (source : CITEPA³ version 2021).

Type de camion	Part du parc automobile
Articulé 14 t – 20 t	0,04%
Articulé 20 t – 28 t	0,02%
Articulé 28 t – 34 t	0,02%
Articulé 34 t – 40 t	0,25%
Articulé 40 t – 50 t	50,34%
Articulé 50 t – 60 t	0,07%
Rigide 12 t – 14 t	2,15%
Rigide 14 t – 20 t	17,48%
Rigide 20 t – 26 t	9,37%
Rigide 26 t – 28 t	0,45%
Rigide 28 t – 32 t	4,89%
Rigide > 32 t	1,07%
Rigide 3,5 t – 7,5 t	6,21%
Rigide 7,5 t – 12 t	7,65%
PL – N/A	0,01%

Tableau 6 : Emissions kilométriques des camions [g/km] et quantités de polluants émises [g] sur le trajet routier Toulon-Istanbul pour un PL et pour le nombre de PL correspondant aux EVP des navires.

	Emissions kilométriques [g/km]	Emissions routières [kg]					
		1 PL	133 PL	436 PL frigorifique +20%	809 PL	1550 PL	4255 PL
NOx	1,65091845	4	531	2087	3227	6183	16973
SOx	0,00779987	0,02	3	10	15	29	80
PM10	0,20346895	0,49	65	257	398	762	2092
PM2.5	0,12067615	0,29	39	153	236	452	1241
CO ₂	1062,34161	2567	341388	1342965	2076565	3978586	10921861
CH ₄	0,00444634	0,01	1	6	9	17	46
N ₂ O	0,03818215	0,09	12	48	75	143	393
CO ₂ eq	1072,58437	2592	344680	1355914	2096587	4016946	11027166

Les émissions kilométriques moyennes calculées sur ce parc de véhicules sont présentées dans le **Tableau 6**. Pour obtenir les émissions des véhicules sur le trajet reliant Toulon à Istanbul par la route, ces facteurs sont multipliés par la distance du trajet, estimée à 2416km⁽⁴⁾. Les masses de polluants émises sur ce trajet pour

³ Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique : <https://www.citepa.org/fr/>

⁴ Source : rome2rio.com

un seul camion et pour le nombre de camions correspondant à l'EVP des navires listés dans le **Tableau 1** sont regroupées dans le **Tableau 6**. Il est à noter que pour la comparaison avec le navire n°2, il faut considérer des PL frigorifiques, à l'intérieur desquels la présence d'un groupe frigorifique entraîne une surconsommation du carburant, de l'ordre de 10% à 30% selon les spécificités du PL et les conditions du trajet. Pour en tenir compte, les émissions kilométriques des poids lourds frigorifiques sont augmentées de 20% par rapport aux émissions des PL standards.

3. Comparaison maritime vs. routier

La différence entre la quantité de polluants émise par le transport maritime et celle émise par le transport routier est présentée dans le **Tableau 7** et visualisable en **Figure 2**. Pour les GES, on constate que le transport maritime émet plus de CH₄ que le transport routier, mais moins de N₂O et beaucoup moins de CO₂ que le routier, ce qui se traduit par une diminution significative du CO₂ équivalent émis, quel que soit le nombre de camions considéré. En termes d'émissions de polluants, le maritime émet plus de NO_x et de SO_x que le routier. Les résultats sont moins tranchés du côté des particules PM2.5 et PM10, pour lesquelles les deux résultats sont observés.

Tableau 7 : Différence des émissions du routier et du maritime.

Différence [kg] maritime-routier	Nombre de conteneurs (EVP) ou de camions				
	133	436 frigorifique +20% pour routier	809	1550	4255
NO _x	4976	21543	5069	6952	15231
SO _x	138	593	196	1726	741
PM10	35	172	-247	214	-1507
PM2.5	56	254	-93	472	-687
CO ₂	-118698	-387380	-1741071	-3461817	-9619519
CH ₄	20	85	23	33	77
N ₂ O	-7	-24	-66	-130	-360
CO ₂ eq	-119913	-391419	-1757965	-3495275	-9712681

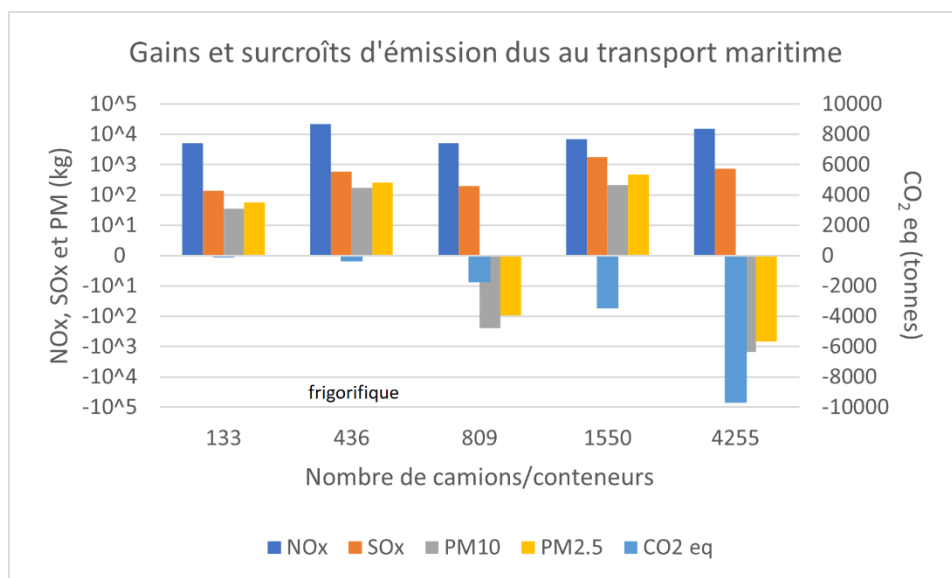


Figure 2 : Différence des émissions maritimes et des émissions routières en fonction du nombre de camions/conteneurs.

4. Comparaison avec des navires fonctionnant au GNL

Dans cette section la comparaison entre transport maritime et transport routier est effectuée en considérant des navires fonctionnant au GNL. Dans le livrable T3.3.2 – *Lignes maritimes transfrontalières*, des taux d'abattement ont été calculés pour les navires fonctionnant au GNL, sur la base des facteurs d'émission extraits du rapport *Third IMO GHG Study 2020*⁵. Malgré une réduction des émissions en CO₂, les navires GNL émettent un surcroît de CH₄ et de N₂O par rapport aux navires fonctionnant au BFO, qui dépend du type de moteur GNL utilisé. Ce surcroît d'émission n'est pas forcément compensé par la diminution des émissions en CO₂, et se traduit pour certains moteurs par une augmentation des émissions en CO₂ équivalent. Seul le moteur GNL-Diesel permet une réduction significative des émissions en CO₂ équivalent, de l'ordre de 25%. Toutefois, le moteur GNL-Diesel se montre moins performant que les autres types de moteurs, s'agissant de la réduction des émissions en NOx. C'est donc un moteur autre que le moteur GNL-Diesel qui est choisi pour cette comparaison. Le choix se porte sur le moteur LBSI, qui induit une augmentation des émissions en CO₂ équivalent de l'ordre de 13%, mais permet une réduction efficace des émissions en polluants.

Les émissions maritimes des navires GNL LBSI sont calculées en appliquant les taux de variation listées dans le [Tableau 8](#) aux émissions présentées dans le [Tableau 4](#). Elles se trouvent résumées dans le [Tableau 9](#), en sont visualisables en [Figure 3](#).

⁵ International Maritime Organization (IMO), Fourth IMO Greenhouse Gas Study, *Full Report*, London, 2020

Tableau 8 : Variations (%) des émissions des navires GNL LBSI par rapport aux navires fonctionnant au BFO, d'après le rapport Aer Nostrum T3.3.2 – Lignes maritimes transfrontalières.

	NOx	SOx	PM10	PM2.5	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Variations des émissions (%)	-81,79	-97,60	-96,23	-96,34	-28,92	+15085	+118

Tableau 9 : Différence des émissions du routier et du maritime avec un navire fonctionnant au GNL.

Différence [kg] maritime-routier	Nombre de conteneurs (EVP) ou de camions				
	133	436 frigorifique +20% pour routier	809	1550	4255
NOx	473	2217	-1716	-3790	-11107
SOx	1	5	-10	13	-60
PM10	-62	-241	-392	-725	-2070
PM2.5	-35	-138	-231	-418	-1220
CO ₂	-183097	-663721	-1838091	-3611259	-9996137
CH ₄	3194	13707	4806	7529	18643
N ₂ O	3	19	-51	-106	-301
CO ₂ eq	-92779	-274983	-1717086	-3428594	-9553994

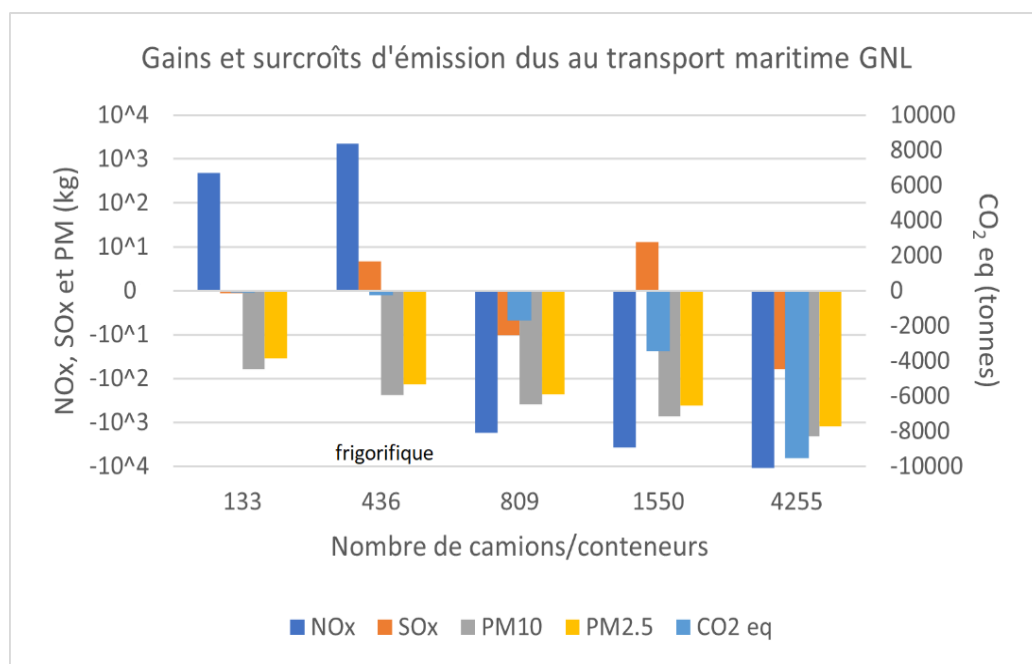


Figure 3 : Différence des émissions maritimes et des émissions routières, en fonction du nombre de camions/conteneurs, dans le cas d'un navire fonctionnant au GNL.

Bien que le navire GNL génère davantage de CH₄ et de N₂O qu'un navire fonctionnant au BFO, on constate que le bilan du CO₂ équivalent reste largement en faveur du maritime. L'abattement en PM associé au GNL permet au maritime d'émettre moins que le routier, quel que soit le nombre de camion/conteneurs considéré. Toutefois, malgré une nette diminution des émissions en NO_x et SO_x, celles-ci restent encore supérieures à celles du transport routier dans certains cas, en particulier à faible nombre de camions/conteneurs dans le cas des NO_x.

5. Influence de la taille du navire

Pour évaluer l'influence de la taille du navire sur le bilan d'émissions, les chiffres du **Tableau 7** sont rapportés au nombre de camions/conteneurs transportés en **Figure 4**. Sur cette figure, le bilan de GES du transport maritime paraît d'autant plus vertueux que la quantité de conteneurs transportés, et donc la taille du navire, est importante. Les petits navires permettent de gagner de l'ordre d'une tonne de CO₂ par unité de marchandise, contre deux tonnes pour les navires les plus imposants. Parallèlement, on constate que le surplus d'émissions en NO_x par conteneur est d'autant plus faible que la capacité de transport du navire est grande. Une tendance similaire se dessine pour les SO_x et les PM.

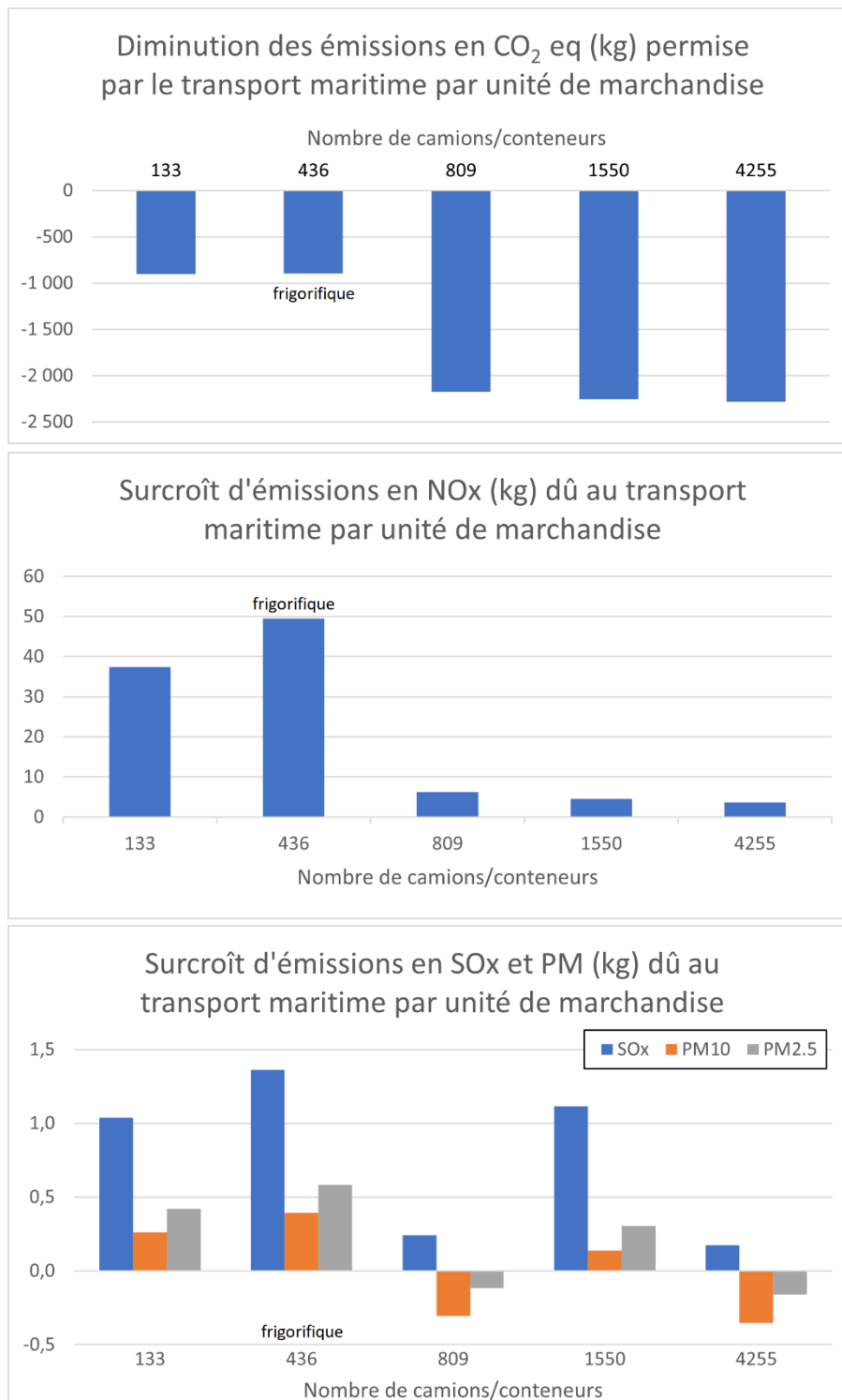


Figure 4 : Différences entre les émissions du transport maritime et celles du transport routier divisées par le nombre de camions/conteneurs, en fonction du nombre de camions/conteneurs.

6. Conclusion

Les résultats de cette comparaison entre transport maritime et transport routier sont cohérents avec les évolutions technologiques récentes du secteur automobile, dont les émissions de polluants (NOx, PM et SOx) ont diminué significativement ces dix dernières années grâce notamment aux systèmes de filtres à particules, réduction catalytique sélective (SCR), catalyseur d'oxydation ou encore systèmes de recirculation des gaz d'échappement (EGR). A contrario, la réduction des émissions en GES stagne pour le secteur des transports routiers.

Si le transport maritime apparaît comme plus polluant que le transport routier rapporté au container, au travers notamment des NOx et des SOx, il faut rappeler que ces deux modes de transport n'ont pas le même type d'impact en termes de qualité de l'air. Le secteur maritime alimente les concentrations de fond en particules secondaires et en particules fines secondaires du pourtour méditerranéen, avec une contribution accentuée au niveau des zones portuaires. L'estimation de l'exposition des populations à la pollution maritime dans les villes-ports et de l'impact des mesures visant à la réduire sont investigués au travers d'autres livrables du projet Aer Nostrum. Le transport routier, quant à lui, émet des polluants sur les axes routiers qui quadrillent le territoire, et contribue significativement aux concentrations élevées relevées sur ces axes autour desquels une part importante de la population réside, et pour lesquelles les lignes directrices de l'OMS restent loin d'être atteintes.

Dans ce cas d'étude entre Toulon et Istanbul, le bilan des émissions rapportées à l'unité de transport de marchandise, camion ou conteneur, montre que le gain en CO₂ permis par le maritime est d'autant plus important que le nombre de conteneurs transportés est grand. Réciproquement, le surplus d'émissions en NOx, SOx et PM rapporté au nombre de conteneurs diminue avec la quantité transportée. Ces calculs confirment qu'au regard des enjeux climatiques, il est préférable de transporter autant de marchandises que possible avec un seul et même navire, plutôt que de répartir le transport sur plusieurs embarcations de moindre capacité⁶.

Enfin, la distance parcourue par chacun des deux modes de transport est un autre élément à considérer pour ce type de comparaison : dans le cas du trajet Toulon-Istanbul, la distance de parcours estimée est plus faible par la route, ce qui contribue à des émissions en NOx, SOx et PM moindres en transitant par la terre.

⁶ Amélioration de l'indicateur « intensité carbone » : https://www.citepa.org/fr/2020_08_a02/

7. Références

- Guide méthodologique pour l'élaboration des inventaires territoriaux des émissions atmosphériques (polluants de l'air et gaz à effet de serre), Ministère de la Transition écologique et solidaire, Direction générale de l'Energie et du climat, Bureau de la Qualité de l'air, version n°2, juin 2018, <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/guide-methodologique-pour-lelaboration-des-inventaires-territoriaux-des-emissions>
- Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique : <https://www.citepa.org/fr/>
- rome2rio.com
- International Maritime Organization (IMO), Fourth IMO Greenhouse Gas Study, *Full Report, London, 2020*
- Amélioration de l'indicateur « intensité carbone » : https://www.citepa.org/fr/2020_08_a02/