

ACTIVITÉ T.3.3.2

Lignes Maritimes Tranfrontalières

Livrable T.3.3.2

Lignes Maritimes Tranfrontalières

Partenaire Responsable: AtmoSud

L'objectif de ce livrable est d'estimer l'impact de technologies de réduction des émissions, non plus au niveau local (phases à quai et manœuvre), mais au niveau de la phase de trajet au large des côtes. Cette phase de navigation constitue l'essentiel du parcours effectué par le navire. Les lignes maritimes sur lesquelles sont estimées ces réductions d'émission sont présentées en **Figure 1**. Les solutions de réduction des émissions sur lesquelles ce livrable se concentre sont l'utilisation du gaz naturel liquéfié (GNL), les filtres à particules (FAP) et les scrubbers.

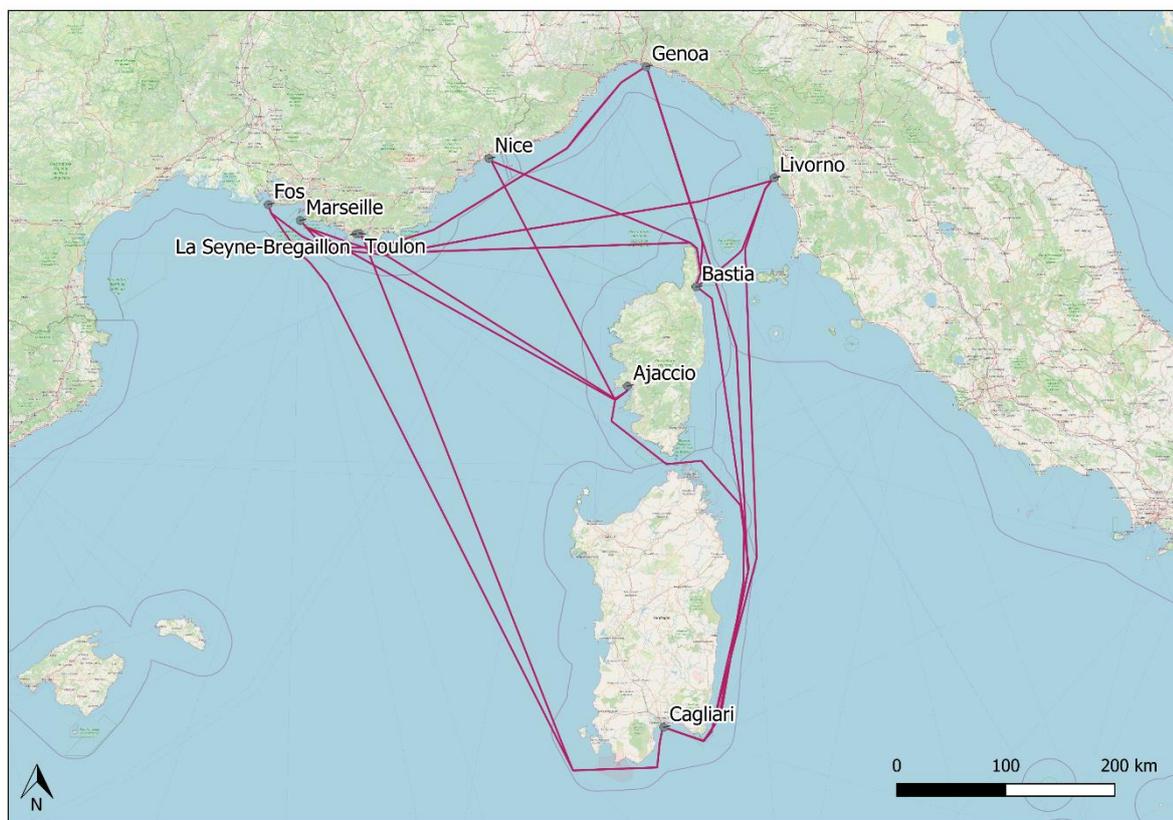


Figure 1 : Cartes des lignes maritimes utilisées pour l'évaluation des technologies de réduction des émissions

1. Calcul des émissions de référence

Pour estimer les réductions engendrées par les différentes technologies de réduction des émissions, il faut d'abord calculer les émissions d'un navire fonctionnant avec du fuel lourd (en anglais *Bunker Fuel Oil* ou BFO), sur un des trajets. L'exemple choisi comme référence est un navire de transport de marchandises et de passagers effectuant le trajet Marseille-Bastia. Les émissions sont données par la formule :

$$E_i = C F_i$$

où

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

La consommation énergétique des navires est calculée selon les préconisations du guide méthodologique pour l'élaboration des inventaires du LCSQA¹ (guide PCIT2²). Elle est donnée par :

$$C = G p$$

où

- G est la consommation de carburant [g de fuel],
- p est le pouvoir calorifique inférieur du carburant utilisé [J/g de fuel].

Pour le BFO, $p = 40.0$ J/g de fuel. La consommation de carburant dépend de plusieurs facteurs, et en particulier de la jauge brute, qui caractérise la dimension du navire. Le navire choisi comme référence, dont la jauge brute s'élève à 42180, consomme environ 44 tonnes de fuel sur le trajet Marseille-Bastia, soit une consommation énergétique C de $2,185 \times 10^9$ J. Cette consommation énergétique est convertie en quantités de polluants à l'aide des facteurs d'émission F_i de la base de données OMINEA du CITEPA³.

Tableau 1 : FE du BFO, liste des lignes maritimes tracées en Figure 1, distances correspondantes et quantités de polluants et de GES émises sur ces trajets par un navire de transport de marchandises et de passagers fonctionnant au BFO.

	NO _x	SO _x	PM10	PM2.5	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq
Facteurs d'émission du BFO	1982,5 [g/GJ]	1360 [g/GJ]	147,2 5 [g/GJ]	139,5 [g/GJ]	78 [kg/GJ]]	7,5 [g/GJ]	2,0 [g/GJ]]	78,74 [kg/GJ]]

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

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

Trajets	Distance [km]	NO _x [kg]	SO _x [kg]	PM10 [kg]	PM2.5 [kg]	CO ₂ [t]	CH ₄ [kg]	N ₂ O [kg]	CO ₂ eq [t]
La Seyne-Cagliari	629	5323	136	97	92	215	20	5	217
La Seyne-Gênes	299	2528	64	46	43	102	10	3	103
La Seyne-Livourne	366	3092	79	56	53	125	12	3	126
Toulon-Ajaccio	280	2371	60	43	41	96	9	2	97
Toulon-Bastia	333	2812	72	51	48	114	11	3	115
Marseille-Ajaccio	332	2810	72	51	48	114	11	3	115
Marseille-Bastia	384	3247	83	59	56	131	12	3	133
Marseille-Livourne	421	3563	91	65	61	144	14	4	145
Fos sur Mer-Cagliari	688	5820	148	106	100	235	22	6	238
Fos sur Mer-Gênes	388	3281	84	60	56	133	13	3	134
Nice-Bastia	229	1940	49	35	33	78	7	2	79
Nice-Ajaccio	252	2133	54	39	37	86	8	2	87
Bastia-Cagliari	120	1011	26	18	17	41	4	1	41
Bastia-Livourne	196	1660	42	30	29	67	6	2	68
Bastia-Gênes	458	3870	99	70	67	156	15	4	158
Cagliari-Livourne	549	4647	119	84	80	188	18	5	190
Cagliari-Gênes	648	5479	140	99	94	222	21	6	224
Ajaccio-Cagliari	437	3698	94	67	64	150	14	4	151

Les quantités de NO_x, SO_x, PM et de gaz à effet de serre (GES) CO₂, CH₄ et N₂O émises par le navire sur le trajet Marseille-Bastia sont indiquées dans le **Tableau 1**. Les quantités que ce même navire émettrait sur les trajets maritimes présentés en **Figure 1** sont déduites en appliquant une règle de proportionnalité par rapport aux distances de ces trajets. Les distances de ces trajets ainsi que les masses de polluants émises sur ces autres trajets sont regroupées dans le même tableau.

L'impact cumulé des GES CO₂, CH₄ et N₂O sur le réchauffement global est estimé en calculant le FE du CO₂ équivalent à ces trois GES.

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

2. Impact de l'utilisation du GNL

Les émissions d'un navire doté des mêmes caractéristiques que le navire de référence utilisé en section précédente, fonctionnant cette fois au GNL, sont calculées en multipliant la consommation énergétique G estimée ci-avant par le pouvoir calorifique inférieur du GNL, qui s'élève à $p = 49.6$ J/g de fuel, et par les facteurs d'émission du GNL issus du rapport *Third IMO GHG Study 2020*⁴. Ce rapport distingue plusieurs types de moteur fonctionnant au GNL :

- GNL-Otto SS : moteur bicarburant à deux temps, à vitesse lente, fonctionnant selon le cycle d'Otto ;
- GNL-Otto MS : moteur bicarburant à quatre temps, à vitesse moyenne, fonctionnant selon le cycle d'Otto ;
- GNL-Diesel : moteur bicarburant à deux temps, à régime lent, fonctionnant selon le cycle Diesel ;
- LBSI : moteur monocarburant à quatre temps, à vitesse moyenne, à injection basse pression, qui allume le mélange air/gaz dans le cylindre à l'aide d'une étincelle.

a. Polluants ayant un impact sanitaire

Pour les moteurs fonctionnant suivant le cycle Diesel, dont fait partie le moteur GNL-Diesel, le FE_{NOx} varie suivant la vitesse du moteur et suivant son année de fabrication (Tier). Le rapport *Third IMO GHG Study 2020* fournit des valeurs pour trois générations de moteurs et trois régimes de vitesse. Ces valeurs sont résumées dans le **Tableau 2**, avec leur pourcentage de variation, noté Δ , par rapport au FE_{NOx} du BFO indiqué dans le **Tableau 1**. Les navires GNL-Diesel les plus anciens émettent d'avantage de NOx que les navires fonctionnant au BFO, mais les générations de moteur GNL-Diesel plus récentes se révèlent plus performantes. Parallèlement, plus le moteur fonctionne lentement, plus son émission en NOx est importante. En considérant le régime de vitesse le plus élevé, représentatif de la phase « trajet », l'abattement atteint 72% pour les moteurs de la génération Tier 3. Pour les autres types de navires GNL, on suppose un FE_{NOx} constant, dont découle un abattement de 82%.

Le **Tableau 3** regroupe les FE en SOx et PM. La valeur du FE_{SOx} dépend uniquement de la teneur en soufre, c'est donc la même quel que soit le type de moteur GNL. La valeur du FE_{PM10} est plus faible pour les moteurs GNL-Diesel que pour les autres types de moteur GNL. Le $FE_{PM2.5}$ est estimé en supposant qu'il équivaut à 92% du FE_{PM10} ⁵. Comme dans le **Tableau 2**, le pourcentage de variation des FE par rapport au cas BFO est indiqué. L'abattement atteint presque 100%, aussi bien pour les SOx que pour les PM.

⁴ International Maritime Organization (IMO), Fourth IMO Greenhouse Gas Study, *Full Report, London, 2020*.

⁵ EPA, 2019. Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories, Final report, Fairfax: ICF ; EPA.

Tableau 2 : FE_{NOx} [g/GJ] des navires fonctionnant au GNL issus du rapport Third IMO GHG Study 2020, et pourcentages de variation par rapport au FE_{NOx} des navires fonctionnant au BFO (Tableau 1). Les FE_{NOx} des navires GNL-Diesel diffèrent selon leur vitesse de fonctionnement et leur année de construction. La variable n désigne la vitesse du moteur en nombre de rotations par minute. Les moteurs diesel classés Tier 1, Tier 2 et Tier 3 ont été construits à partir du 1^{er} janvier 2000, 2011 et 2016 respectivement.

		NOx							
		n < 130		130 ≤ n < 2000		n ≥ 2000		∀ n	
		FE	Δ%	FE	Δ%	FE	Δ%	FE	Δ%
GNL-Diesel	Tier 1 - 2000	4722,22	+138,20	3606,67	+81,93	2722,22	+37,31		
	Tier 2 - 2011	4000,00	+101,77	2926,67	+47,63	2138,89	+7,89		
	Tier 3 - 2016	944,44	-52,36	721,39	-63,61	555,56	-71,98		
Autres navires GNL								361,11	-81,79

Tableau 3 : FE en SOx et PM [g/GJ] des navires fonctionnant au GNL issus du rapport Third IMO GHG Study 2020, et pourcentages de variation par rapport aux FE des navires fonctionnant au BFO (première ligne).

	SOx		PM10		PM2.5	
	FE [g/GJ]	Δ%	FE [g/GJ]	Δ%	FE [g/GJ]	Δ%
Navires BFO	1360	-	147,25	-	139,5	-
GNL-Diesel			2,78	-98,11	2,56	-98,17
Autres navires GNL	32,68	-97,60	5,56	-96,23	5,11	-96,34

Tableau 4 : Gains en NOx, SOx et PM10 sur les trajets présentés en *Figure 1* grâce à l'emploi du GNL.

		NOx		SOx	PM10	
		GNL-Diesel	GNL-autres		GNL-Diesel	GNL-autres
Taux d'abattement (%)		-71,98	-81,79	-97,60	-98,11	-96,23
Trajets	Distance [km]	NOx [kg]		SOx [kg]	PM10 [kg]	
		GNL-Diesel	GNL-autres		GNL-Diesel	GNL-autres
La Seyne-Cagliari	629	-3831	-4354	-133	-95	-93
La Seyne-Gênes	299	-1820	-2068	-63	-45	-44
La Seyne-Livourne	366	-2226	-2529	-77	-55	-54
Toulon-Ajaccio	280	-1707	-1939	-59	-42	-41
Toulon-Bastia	333	-2024	-2300	-70	-50	-49
Marseille-Ajaccio	332	-2023	-2298	-70	-50	-49
Marseille-Bastia	384	-2337	-2656	-81	-58	-57
Marseille-Livourne	421	-2564	-2914	-89	-63	-62
Fos sur Mer-Cagliari	688	-4189	-4760	-145	-104	-102
Fos sur Mer-Gênes	388	-2362	-2684	-82	-58	-57
Nice-Bastia	229	-1396	-1586	-48	-35	-34
Nice-Ajaccio	252	-1535	-1744	-53	-38	-37
Bastia-Cagliari	120	-728	-827	-25	-18	-18
Bastia-Livourne	196	-1195	-1357	-41	-30	-29
Bastia-Gênes	458	-2785	-3165	-96	-69	-68
Cagliari-Livourne	549	-3345	-3801	-116	-83	-81
Cagliari-Gênes	648	-3944	-4482	-136	-98	-96
Ajaccio-Cagliari	437	-2662	-3025	-92	-66	-65

Les quantités de NOx, SOx et PM10 économisées sur les trajets présentés en Figure 1 grâce à l'emploi du GNL sont résumées dans le Tableau 4. Pour les navires GNL-Diesel le taux d'abattement en NOx retenu est celui du régime de vitesse le plus élevée, les autres taux étant plus représentatifs des phases à quai et de manœuvre.

b. Gaz à effet de serre

Les FE des GES que sont le CO₂, le CH₄ et le N₂O sont résumés dans le Tableau 5. Les émissions en CH₄ sont supposées varier suivant la charge moteur, c'est pourquoi les valeurs présentées ici sont des données indicatives.

Tableau 5 : FE en GES des navires fonctionnant au GNL issus du rapport Third IMO GHG Study 2020, FE en CO₂ équivalent, et pourcentage de variation par rapport au FE calculé pour les navires fonctionnant au BFO (voir première ligne).

	CO ₂		CH ₄		N ₂ O		CO ₂ équivalent	
	FE [g/GJ]	Δ%	FE [g/GJ]	Δ%	FE [g/GJ]	Δ%	FE [g/GJ]	Δ%
BFO	78000		7,50		2,00		78740	
GNL-Otto SS	55443	-28,92	694,44	+9159,26	5,56	+117,78	76360	-3,02
GNL-Otto MS			1527,78	+20270,37			99694	+26,61
LBSI			1138,89	+15085,19			88805	+12,78
GNL-Diesel			55,56	+640,74			8,33	+316,67

La comparaison des FE des navires BFO et GNL montre que les navires fonctionnant au GNL émettent davantage de CH₄ et de N₂O que les navires fonctionnant au BFO, mais moins de CO₂. Le surcroît de CH₄ émis varie selon le type de moteur, la valeur du FE en CH₄ allant de 56 g/GJ pour le moteur GNL-Diesel à 1528 g/GJ pour le moteur GNL-Otto MS. L'impact de ces variations sur le réchauffement global est quantifié en comparant le FE en CO₂ équivalent des quatre catégories de moteur à celui calculé pour les navires fonctionnant au BFO. Pour les moteurs de type GNL-Otto MS et LBSI, on observe une hausse des émissions en CO₂ équivalent, le gain en CO₂ ne permettant pas de compenser le surcroît d'émission en CH₄ et N₂O. Le moteur de type GNL-Otto SS présente des performances comparables au BFO tandis que le moteur GNL-Diesel permet une diminution des émissions en CO₂ équivalent de près de 25%.

Pour mesurer l'impact de ces variations, les quantités de CO₂ équivalent économisées ou surajoutées de par l'utilisation du GNL, calculées sur le trajet Marseille-Bastia pour les quatre types de moteur, sont présentées dans le Tableau 6, avec leurs conversions en termes de kilomètres parcourus par une voiture et années de chauffage, électrique ou au fioul, d'une maison ou d'un appartement⁶.

⁶ Source : <https://datagir.ademe.fr/apps/impact-co2/>

Tableau 6 : Gain en CO₂ équivalent calculé sur le trajet Marseille-Bastia pour les quatre types de moteur GNL, exprimé en masse (kg) et équivalences en kilomètres parcourus par une voiture et nombre d'années de chauffage, électrique et fioul, en maison ou appartement.

	GNL-Otto SS	GNL-Otto MS	LBSI	GNL-Diesel
Gain ou surcroît en CO₂ équivalent (kg)	-4006	35270	16941	-32878
Eq km en voiture (moteur thermique)	-18400	162100	77900	-151100
Eq années de chauffage électrique (appart)	-17	151	73	-141
Eq années de chauffage électrique (maison)	-6	52	25	-48
Eq années de chauffage au fioul (appart)	-1,3	11	5	-11
Eq années de chauffage au fioul (maison)	-0,7	6	2,9	-6

3. Impact de l'utilisation des FAP

Une étude sur l'efficacité des FAP a été réalisée par *La Méridionale*⁷, compagnie pionnière dans l'application de cette technologie au domaine naval. Les pourcentages d'abattement mesurés pour les NO_x, SO_x, PM et le CO₂ sont listés dans le Tableau 7, avec les gains en émission calculés pour les différentes lignes maritimes présentées en Figure 1.

Tableau 7 : Taux d'abattement des émissions en NO_x, SO_x, PM et CO₂ mesurés dans l'étude réalisée par La Méridionale et masses de polluants non émises calculées pour chacun des trajets présentés en Figure 1.

		NO _x	SO _x	PM		CO ₂
Taux d'abattement (%)		-10,7	-90,72	-99,9		-0,5
Trajets	Distance [km]	NO _x [kg]	SO _x [kg]	PM10 [kg]	PM2.5 [kg]	CO ₂ [kg]
La Seyne-Cagliari	629	-570	-123	-97	-91	-1076
La Seyne-Gênes	299	-271	-59	-46	-43	-511
La Seyne-Livourne	366	-331	-72	-56	-53	-625
Toulon-Ajaccio	280	-254	-55	-43	-41	-479
Toulon-Bastia	333	-301	-65	-51	-48	-569
Marseille-Ajaccio	332	-301	-65	-51	-48	-568
Marseille-Bastia	384	-347	-75	-59	-56	-657
Marseille-Livourne	421	-381	-82	-65	-61	-720

⁷ Christophe SEGUINOT (La Méridionale). 2020. Projet TEST FAP : Test d'un système de filtre à particules sur les navires de fortes puissances. 50 pages.

Fos sur Mer-Cagliari	688	-623	-135	-106	-100	-1177
Fos sur Mer-Gênes	388	-351	-76	-59	-56	-663
Nice-Bastia	229	-208	-45	-35	-33	-392
Nice-Ajaccio	252	-228	-49	-39	-37	-431
Bastia-Cagliari	120	-108	-23	-18	-17	-204
Bastia-Livourne	196	-178	-38	-30	-29	-336
Bastia-Gênes	458	-414	-90	-70	-66	-782
Cagliari-Livourne	549	-497	-108	-84	-80	-940
Cagliari-Gênes	648	-586	-127	-99	-94	-1108
Ajaccio-Cagliari	437	-396	-86	-67	-64	-748

Tableau 8 : Gain en CO₂ permis par les FAP, calculé sur le trajet Marseille-Bastia, exprimé en masse (kg) et équivalences en kilomètres parcourus par une voiture et nombre d'années de chauffage, électrique et fioul, en maison ou appartement.

	FAP
Gain en CO₂ (kg)	-657
Eq km en voiture (moteur thermique)	3 000
Eq années de chauffage électrique (appartement)	2,8
Eq années de chauffage électrique (maison)	1
Eq années de chauffage au fioul (appartement)	0,2
Eq années de chauffage au fioul (maison)	0,1

Dans cette étude, les FAP présentent un taux de filtration de quasiment 100% sur les PM, et se montrent également efficaces dans la réduction des émissions en SO_x. Leur impact reste modéré sur les NO_x, et négligeable sur le CO₂. Les équivalences présentées dans le Tableau 6 pour le GNL sont calculées pour les FAP dans le Tableau 8 pour comparaison. Considérant le faible abattement en CO₂ mesuré pour les FAP, on suppose que l'abattement en CH₄ et N₂O est négligeable, donc que l'abattement en CO₂ équivalent est assimilable à l'abattement en CO₂ dans le cas des FAP, i.e. que les chiffres des deux tableaux peuvent être comparés.

4. Impact de l'utilisation des scrubbers

Les études réalisées sur l'efficacité des scrubbers montrent qu'il s'agit d'une technologie très performante pour réduire les émissions en SO₂ générées par l'utilisation d'un fuel lourd. Les études de *Winnes et al., 2020* et *Yang et al., 2021* indiquent une efficacité de l'ordre de l'ordre de 97%-99%, quelle que soit la charge du moteur. Dans *Winnes et al., 2020*, les émissions mesurées avec un scrubber et un carburant à 2.77% sont plus faibles que les émissions mesurées avec un carburant à 0.1%, tandis que *Yang et al., 2021* indiquent que leurs émissions résiduelles après traitement par scrubber restent trois fois supérieures aux émissions mesurées avec un carburant à teneur en soufre ultra-réduite (0.038%) (*McCaffery et al., 2021*).

L'estimation de l'impact des scrubbers sur les émissions en PM varie beaucoup selon les études et selon la charge du moteur. Pour évaluer l'efficacité de cette technologie en phase de croisière, on s'intéresse aux charges de moteur élevées. *Yang et al., 2021* mesurent un abattement de 10% en moyenne, 16.3% avec une charge de moteur de 70% et pas de variation à 80%. Ce sont des chiffres plus faibles que ceux d'études antérieures : *Lehtoranta et al., 2019* mesurent un abattement de 21%-45% pour une charge de moteur de 66%-75% ; *Winnes et al., 2020* mesurent un abattement de 34% pour une charge de moteur de 76% ; l'abattement en PM monte même à 76% dans l'étude *Fridell & Salo, 2016*.

La variabilité de l'abattement en PM_{2.5} peut dépendre de plusieurs facteurs, tels que le type de moteur, les conditions d'opération, la composition du carburant, la méthode d'échantillonnage et le modèle de scrubber. La méthode d'échantillonnage peut avoir un très fort impact sur la mesure des émissions en PM, en particulier lorsque les échappements contiennent à la fois des particules solides et des particules condensables, comme c'est le cas avec un scrubber. Le rapport de dilution utilisé pour l'échantillonnage influence la part de particules condensables capturée par le système de mesure. Le fort abattement mesuré par *Fridell & Salo, 2016* peut ainsi s'expliquer par une perte de masse de particules condensables, induite par les conditions de dilution utilisées.

Les PM_{2.5} mesurées par *Yang et al., 2021* sont essentiellement constituées de sulfates, de carbone organique et de carbone élémentaire. La fraction des sulfates est majoritaire, à hauteur de 66.5%-93%. Les niveaux de sulfates avant et après traitement par le scrubber sont comparables, ce qui explique pourquoi l'abattement des PM_{2.5} est faible dans cette étude. Ce constat est cohérent avec l'analyse de *Lehtoranta et al., 2019*, qui retrouve aussi une quantité de sulfates comparable avant et après traitement par le scrubber, contre une masse de carbone organique nettement réduite par le scrubber. S'agissant des carburants à teneur réduite en soufre, c'est le carbone organique qui constitue la fraction majoritaire des PM_{2.5} émis, les sulfates ne contribuant que mineure à la masse totale. Plus la teneur en soufre est importante, plus la quantité de PM émise augmente, par le biais des sulfates, mais la corrélation entre émissions et teneur en soufre devient faible en deçà d'une teneur en soufre de 0.5% (*Winnes et al., 2020*).

Enfin, les variations en NO_x enregistrées dans ces études paraissent attribuables au fonctionnement du moteur, plus qu'à la présence d'un scrubber (*Winnes et al., 2020, Yang et al., 2021*). L'impact des scrubbers sur les émissions en CO et CO₂ semble négligeable (*Yang et al., 2021*).

Le **Tableau 9** récapitule les taux d'abattement en phase de croisière permis par le GNL, les FAP et les scrubbers d'après les données présentées en section 2, l'étude réalisée par *la Méridionale*, et les références présentées dans cette section (*Fridell & Salo, 2016, Lehtoranta et al., 2019, Winnes et al., 2020, Yang et al., 2021*), respectivement.

Tableau 9 : Taux d'augmentation ou de réduction des émissions du GNL, des FAP et des scrubbers en phase de croisière (valeurs indicatives).

	NO _x	SO _x	PM	CO ₂ /CO ₂ eq
GNL	de -82% à +37%	-98 %	-97 %	de -25% à +27%
FAP	-11 %	-91 %	≈ 100 %	-0,5 %
Scrubbers	≈ 0%	-98 %	de -76% à -10%	≈ 0%

5. Conclusion

Dans cette étude, le GNL apparaît comme une solution de réduction des émissions maritimes performante, malgré des différences suivant la catégorie de moteur considérée. Les anciens modèles de type GNL-Diesel peuvent conduire à émettre davantage de NO_x que les navires fonctionnant au BFO, mais ce défaut disparaît pour les moteurs construits plus récemment et sur les autres catégories de moteurs GNL. Les émissions en SO_x et PM diminuent de près de 100%. Les émissions en CO₂ affichent une diminution de presque 30%, mais sont associées à une forte augmentation des émissions en CH₄ et N₂O qui peuvent se traduire, pour certaines catégories de moteurs, par une augmentation des émissions en CO₂ équivalent. Une diminution indicative de 27% est toutefois atteinte par le moteur GNL-Diesel, dont les émissions en CH₄ sont plus faibles que celles des autres moteurs. Parmi les différents types de moteur présentés, le moteur GNL-Diesel de dernière génération semblent se démarquer comme un moyen efficace pour réduire les émissions maritimes, aussi bien en termes de polluants que de GES. Un avantage important du GNL est qu'il n'est pas nécessairement d'origine fossile. Il peut être d'origine biologique, par exemple issu d'une unité de méthanisation, et avoir ainsi une empreinte carbone neutre.

Pour les navires fonctionnant au BFO, les FAP et les scrubbers constituent une bonne solution pour réduire les émissions en polluants seulement, ces deux technologies ayant un faible impact sur les émissions de CO₂, et donc sur les GES. Les FAP ont une efficacité de l'ordre de 90% sur les SO_x et 10% sur les NO_x. Les scrubbers ont une efficacité de presque 100% sur les SO_x, mais pratiquement pas d'impact sur les NO_x. La différence majeure entre les deux technologies réside dans l'abattement des PM, qui est totale pour les FAP, difficile à quantifier pour les scrubbers. L'efficacité des scrubbers sur les PM dépend notamment de la composition des PM émises, et donc du carburant utilisé. Si le pourcentage d'abattement des PM par les FAP varie beaucoup d'une étude à l'autre, les études actuelles s'accordent sur le fait que l'utilisation d'un scrubber avec un fuel chargé en soufre ne permet pas de réduire les émissions en particules à un niveau aussi faible que celui mesuré avec un carburant à teneur réduite en soufre.

A l'échelle du bassin méditerranéen, l'utilisation de ces technologies permet de réduire les émissions en NO_x, SO_x et PM de plusieurs centaines à plusieurs milliers de kg par trajet. Pour un trajet Fos sur Mer-Cagliari, qui est le plus long trajet parmi ceux présentés dans cette étude, le GNL-Diesel permet d'économiser une quantité de CO₂ équivalente correspondant à jusqu'à 19 années de chauffage au fioul d'un appartement, soit 253 années de chauffage électrique de ce même appartement.

Le GNL permet de réduire les émissions en NO_x, SO_x, PM, comparativement au BFO. Selon le type de moteur considéré, le GNL induit une augmentation ou une diminution de la somme des GES. Les FAP et les scrubbers ont un impact négligeable sur les GES mais permettent de réduire les émissions de certains polluants, des SO_x et des PM s'agissant des FAP.

Références :

- Fridell, E., & Salo, K. (2016). Measurements of abatement of particles and exhaust gases in a marine gas scrubber. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(1), 154-162.
- Lehtoranta, K., Aakko-Saksa, P., Murtonen, T., Vesala, H., Ntziachristos, L., Rönkkö, T., ... & Timonen, H. (2019). Particulate mass and nonvolatile particle number emissions from marine engines using low-sulfur fuels, natural gas, or scrubbers. *Environmental science & technology*, 53(6), 3315-3322.
- McCaffery, C., Zhu, H., Karavalakis, G., Durbin, T. D., Miller, J. W., & Johnson, K. C. (2021). Sources of air pollutants from a Tier 2 ocean-going container vessel: Main engine, auxiliary engine, and auxiliary boiler. *Atmospheric Environment*, 245, 118023.
- Winnes, H., Fridell, E., & Moldanová, J. (2020). Effects of marine exhaust gas scrubbers on gas and particle emissions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4), 299.
- Yang, J., Tang, T., Jiang, Y., Karavalakis, G., Durbin, T. D., Miller, J. W., ... & Johnson, K. C. (2021). Controlling emissions from an ocean-going container vessel with a wet scrubber system. *Fuel*, 304, 121323.