



Commission économique pour l'Europe

Organe exécutif de la Convention sur la pollution
atmosphérique transfrontière à longue distance

Quarante-troisième session

Genève, 11-14 décembre 2023

Point 3 b) de l'ordre du jour provisoire

**Examen de l'exécution du plan de travail pour 2022-2023 :
élaboration de politiques**

**Projet de document d'orientation sur les mesures techniques
de réduction des émissions de polluants atmosphériques
provenant des transports maritimes**

Résumé

Le présent document, établi par l'Équipe spéciale des questions technico-économiques conformément à son mandat, a été examiné par le Groupe de travail des stratégies et de l'examen à sa soixante et unième session (Genève, 4-6 septembre 2023) et transmis, tel qu'il a été modifié pendant la session, à l'Organe exécutif afin qu'il l'adopte à sa quarante-troisième session ([ECE/EB.AIR/130](#), à paraître). Il contient des informations à jour sur les moyens efficaces de réduire les émissions provenant des transports maritimes.



I. Introduction

1. Le présent document a été rédigé afin que les Parties à la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance et d'autres acteurs disposent des informations les plus récentes sur les moyens efficaces de réduire les émissions de polluants atmosphériques provenant des transports maritimes et les conséquences de ces derniers sur la santé humaine et l'environnement.

2. L'Équipe spéciale y présente des techniques de lutte contre la pollution qui peuvent s'appliquer aux navires, pendant la navigation comme à quai, et visent à réduire les émissions atmosphériques d'oxydes de soufre (SO_x), d'oxydes d'azote (NO_x), de composés organiques volatils (COV), de particules (PM), de particules totales en suspension, de PM₁₀ et de PM_{2,5}, notamment le carbone noir et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Le document contient également des informations sur les éventuels effets positifs de ces techniques sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre. On trouvera une analyse plus approfondie et des informations complémentaires dans le rapport technique de référence informel correspondant¹.

3. En règle générale, toutes les techniques évaluées permettent d'obtenir des réductions mesurables des émissions par rapport à une technologie de référence, et peuvent être appliquées, en principe, dans des conditions déterminées qui varient selon la méthode en question. Cela étant, la liste des mesures existantes et/ou des futures mesures prometteuses n'est pas exhaustive.

II. Définitions

4. On trouvera ci-après la définition de plusieurs termes employés dans le document :

a) Le terme « particules » désigne ici les particules totales en suspension puisqu'aucune fourchette de granulométrie n'est précisée. Cela étant, les différences entre les particules totales en suspension et les particules peuvent être assez négligeables lors de la combustion de combustible marine. Selon le guide du Programme concerté de surveillance continue et d'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe et de l'Agence européenne pour l'environnement sur les inventaires des émissions de polluants atmosphériques², la granulométrie est de 100 % pour les PM₁₀ (c'est-à-dire que le diamètre aérodynamique de toutes les particules mesurées est inférieur ou égal à 10 µm) et de 90 % à 93 % pour les PM_{2,5}. En outre, les méthodes de mesure utilisées pour les moteurs de navires sont souvent conformes aux critères établis dans la norme 8178 de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), selon lesquels les gaz effluents sont dilués avant les mesures afin que les fractions de particules volatiles ou condensables puissent être prises en compte ;

b) Les techniques de réduction des émissions de polluants sont désignées sous l'appellation « meilleures techniques disponibles » (MTD) et réparties en deux catégories : les techniques primaires, appliquées directement à la source (c'est-à-dire le recours à d'autres combustibles ou la modification ou l'optimisation des techniques et processus de combustion), et les techniques secondaires, qui englobent les méthodes de traitement des gaz effluents ;

¹ Grégoire Bongrand et Nadine Allemand, *Background informal technical document on maritime shipping emissions, reduction techniques and determination of their costs*, disponible en tant que document informel de la cinquante-huitième session du Groupe de travail des stratégies et de l'examen (Genève, 14-17 décembre 2020). Voir https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2020/AIR/WGSR/TFTEI_informal_doc_on_shipping_emissions-final-december2020.pdf.

² Agence européenne pour l'environnement (AEE), *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Technical guidance to prepare national emission inventories*, rapport n° 13/2019 (Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, 2019).

c) Les zones de contrôle des émissions (ECA) sont des zones côtières délimitées géographiquement où les problèmes liés à la qualité de l'air requièrent des précautions particulières et où les navires ont donc des règles strictes à respecter en ce qui concerne les niveaux d'émissions. Il existe actuellement des zones de contrôle des émissions pour le soufre (SECA) et l'azote (NECA) où des valeurs limites d'émission de dioxyde de soufre (SO₂) et de NO_x sont requises pour les navires de mer. Elles se trouvent dans la mer Baltique, la mer du Nord, les eaux côtières d'Amérique du Nord et la mer des Caraïbes. Par ailleurs, la création d'une zone SECA couvrant la mer Méditerranée, qui entrera en vigueur le 1^{er} mai 2025, a été approuvée en décembre 2022, et des discussions sont en cours concernant l'établissement de zones de contrôle des émissions dans l'Atlantique Nord-Est et au Canada. Voir aussi l'étude de l'International Institute for Applied Systems Analysis (2018)³.

III. Contexte général

5. Secteur économique dynamique en pleine croissance, le transport maritime international rassemble environ 80 % des volumes d'échanges mondiaux. La quantité de fret maritime transporté au niveau international, qui augmente sans cesse, a atteint un pic sans précédent en 2019 (11 mégatonnes, soit presque deux fois plus que les 5,9 mégatonnes transportées en 2000) et est presque revenu à son niveau d'avant la crise en 2021⁴. Le nombre de passagers avait aussi progressé avant la pandémie de COVID-19, ce qui signifie que la flotte augmentait d'une année à l'autre et, avec elle, la consommation de combustibles, sauf en cas de crise économique ou sanitaire⁵.

6. Cette activité intensive fait des transports maritimes une source importante d'émission de polluants. Les émissions du secteur proviennent essentiellement de la combustion de combustibles dans les moteurs principaux et auxiliaires qui se produit à vitesse de croisière, mais aussi lorsque les navires sont à quai ou effectuent des manœuvres dans les zones portuaires. Il convient également de prendre en compte les émissions fugitives non négligeables provenant de liquides organiques volatils en vrac (principalement des COV), qui ont lieu lors du chargement et du déchargement, et celles qui sont liées à l'utilisation de réfrigérants ou de systèmes de climatisation (hydrofluorocarbones (HFC)).

7. Bien qu'ils soient considérés comme étant relativement intéressants, par rapport à d'autres types de transport, en raison de leur faible taux d'émission de gaz à effet de serre (GES) par tonne de marchandises transportées, les transports maritimes étaient tout de même à l'origine d'environ 2,9 % de l'ensemble des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) anthropiques en 2018. Malgré une forte diminution de la teneur en soufre du fuel-oil pour moteurs marins en 2020, due à l'application des règles de l'Organisation maritime internationale (OMI), les transports maritimes sont le mode de transport qui génère le plus d'émissions de SO₂ par tonne-kilomètre. Les quantités de NO_x émises par tonne-kilomètre dans le secteur sont légèrement inférieures à celles des grands camions, mais le taux d'émission de PM₁₀ y est plus élevé. On observe en outre un intérêt grandissant pour la lutte contre les émissions de polluants provenant des navires dans les ports en raison de leur proximité avec des zones fortement peuplées et du fait que les taux d'émissions sont potentiellement plus élevés lorsque les navires sont à quai que quand ils naviguent à vitesse de croisière, car les moteurs fonctionnent à faible charge. D'après les estimations, les émissions générées dans les ports peuvent varier entre quelques pour cent et 20 % à 30 % des émissions totales de SO₂, de NO_x et de particules provenant des navires selon le type de navire⁶.

³ Janusz Cofala *et al.*, *Final Report: The potential for cost-effective air emission reduction from international shipping through designation of further Emission Control Areas in EU waters with focus on the Mediterranean Sea* (Laxenbourg, International Institute for Applied Systems Analysis, 2018). Disponible à l'adresse suivante : <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15729/1/RR-18-002.pdf>.

⁴ CNUCED, *Étude sur les transports maritimes 2022 – Naviguer à travers les perturbations des chaînes d'approvisionnement* (publication des Nations Unies, UNCTAD/RMT/2022 et Corr.1).

⁵ Organisation maritime internationale (OMI), *Fourth IMO Greenhouse Gas Study: 2020* (Londres, 2020).

⁶ Ibid.

IV. Dispositif législatif

8. L'adoption par l'OMI de la Convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL) a permis d'établir plusieurs règles assorties de restrictions de plus en plus rigoureuses visant à limiter les effets négatifs des transports maritimes sur la qualité de l'air et la santé humaine. MARPOL porte sur la pollution provenant des transports maritimes dans les océans et certaines zones en particulier, telles que la mer Méditerranée ou la mer Baltique, ainsi que des navires exploités dans les eaux des États-Unis d'Amérique. Plusieurs protocoles ont été adoptés au fil des ans, et l'annexe VI (« Règles relatives à la prévention de la pollution de l'atmosphère par les navires »), adoptée en 1997, est entrée en vigueur en 2005.

9. Le Comité de la protection du milieu marin de l'OMI a adopté des amendements à l'annexe VI de la Convention après son entrée en vigueur. Ainsi, en 2015, la teneur en soufre des combustibles a été limitée à 0,1 % en masse dans les zones SECA et à 0,5 % en masse en dehors de ces zones ; ces restrictions sont appliquées depuis 2020. S'agissant des émissions de NO_x, des valeurs limites d'émission ont été fixées pour les moteurs diesel ayant une puissance nominale supérieure à 130 kW pour les navires construits après le 1^{er} janvier 2000 ou les moteurs ayant subi une modification majeure après cette date. Les valeurs limites d'émission de NO_x sont définies selon une structure à plusieurs niveaux et dépendent du régime nominal du moteur. Les moteurs sont classés dans les niveaux I et II selon la date de conception du navire ou la date à laquelle ils ont subi une modification majeure (avant ou après le 1^{er} janvier 2011), et le niveau III correspond aux navires construits après le 1^{er} janvier 2016 lorsqu'ils naviguent dans des zones NECA.

10. La réglementation est un facteur déterminant de l'atténuation des émissions et de l'amélioration de la qualité de l'air. Environ 70 % des émissions dues aux transports maritimes sont générées à moins de 400 km des côtes, et elles peuvent être transportées à des centaines de kilomètres à l'intérieur des terres. Une étude de 2007 a révélé que les transports maritimes étaient responsables de près de 60 000 décès prématurés par an dans les régions littorales d'Europe et d'Asie de l'Est et du Sud⁷. D'après une autre étude, quelque 4 000 et 8 000 décès prématurés pourraient être évités d'ici à 2030 et à 2050, respectivement, moyennant l'établissement de nouvelles zones NECA et l'application des normes de niveau III correspondantes pour les émissions de NO_x dans l'Union européenne. Les auteurs d'une étude récente⁸ ont examiné les effets de la politique de plafonnement des émissions de soufre à l'échelle mondiale mise en place par l'OMI en 2020 et de l'établissement de zones SECA et NECA en mer Méditerranée. Il en est ressorti que plus de 6 000 décès prématurés dus aux PM_{2,5} pourraient être évités dans la région méditerranéenne et que l'on pourrait économiser au moins 17 milliards d'euros de frais de soins de santé par an en réalisant un investissement supplémentaire qui n'excéderait pas 5 milliards d'euros par an pour appliquer ces mesures en mer Méditerranée. L'étude d'impact réalisée dans la zone de contrôle des émissions d'Amérique du Nord a débouché sur une amélioration notable de la qualité de l'air dans cinq villes portuaires canadiennes (Halifax, Vancouver, Victoria, Montréal et Québec)⁹.

11. La réglementation internationale ne prévoit pas de règles particulières pour les zones portuaires – bien que les règles de l'OMI relatives aux oxydes d'azote et aux oxydes de soufre soient appliquées, lorsqu'il y a lieu –, mais les organismes chargés de la réglementation régionale ou locale peuvent en définir d'autres, plus strictes encore. Dans la région de l'Union européenne, la directive 2012/33/EU fixe à 0,1 % en masse la limite de teneur en soufre des

⁷ James Corbett *et al.*, « Mortality from shipping emissions: a global assessment », *Environmental Science and Technology*, vol. 41, n° 24 (décembre 2007), p. 8512 à 8518.

⁸ Laurence Rouil *et al.*, *ECAMED: étude de faisabilité technique de la mise en œuvre d'une zone de réduction des émissions des navires (ECA) en Méditerranée – Synthèse de l'étude* (Paris, Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2019).

⁹ Angelos T. Anastopoulos *et al.*, « Air quality in Canadian port cities after regulation of low-sulphur marine fuel in the North American Emissions Control Area », *Science of the Total Environment*, vol. 791 (octobre 2021).

combustibles pour les navires à quai¹⁰. En Californie (États-Unis d'Amérique), la réglementation sur les combustibles utilisés dans les navires de mer (*Ocean-going Vessel Fuel Regulation*) fixe depuis 2014 la limite de soufre à 0,1 % en masse pour les moteurs principaux, les moteurs auxiliaires et les chaudières sur les navires qui naviguent à moins de 24 milles marins de la côte californienne. Dans six ports californiens (Los Angeles, Long Beach, Oakland, San Diego, San Francisco et Hueneme), la réglementation prévoit également l'utilisation de systèmes d'alimentation électrique à terre ou d'autres techniques permettant d'obtenir des réductions comparables des émissions (au moins 85 %-90 % pour les particules et les NO_x).

V. Meilleures techniques disponibles pour les navires : techniques primaires

A. Recours à d'autres combustibles

Combustibles à faible teneur en soufre

12. La quantité de SO₂ émise lors de la combustion des combustibles est directement proportionnelle à leur teneur en soufre. De nombreux progrès ont été réalisés depuis 2020 grâce à l'annexe VI de MARPOL, qui a fait passer la teneur en soufre maximale de 3,5 % en masse à 0,5 % en masse. Dans les zones SECA, la limite de teneur en soufre est fixée à 0,1 % en masse. Ces règles limitent donc l'utilisation de fuel-oil lourd (sans traitement aval des gaz d'échappement), dont l'éventuelle interdiction dans l'Arctique est actuellement examinée par l'OMI. En passant d'un combustible à 0,5 % en masse à du diesel à usage maritime ayant une teneur en soufre de 0,1 % en masse, par exemple, on réduirait l'émission de SO₂ de 80 %. Aujourd'hui, la teneur en soufre de certains combustibles marine fortement distillés, tels que les combustibles liquides à très faible teneur en soufre, peut être abaissée à 0,001 % en masse seulement.

13. Outre les émissions de SO₂, passer des combustibles marine résiduaire à des distillats à plus faible teneur en soufre permet de réduire les émissions de particules de 50 % à 90 % car les seconds ont une teneur en cendres moins élevée¹¹. Des réductions des émissions de carbone noir pouvant aller jusqu'à 80 % (la moyenne s'établit à 30 % environ) sont également possibles, selon les caractéristiques du moteur et le combustible utilisé, moyennant le passage à des combustibles marine légers¹².

14. En ce qui concerne les investissements, la transition vers des combustibles liquides à plus faible teneur en soufre n'entraîne que des changements dans les dépenses d'exploitation qui sont liés aux prix des combustibles. À la fin de 2022, depuis la mise en œuvre de la teneur en soufre maximale fixée par l'OMI en 2020, les prix mondiaux du gazole marine moyen et du fuel-oil à très faible teneur en soufre (VLSFO) – mélange de plusieurs combustibles résiduaire et distillés – s'établissaient à environ 1 126 euros par tonne et 754 euros par tonne en moyenne (au taux de change de 0,98 euro pour 1 dollar), respectivement. À titre de comparaison, les prix mondiaux des combustibles à teneur en soufre plus élevée, tels que le fuel-oil intermédiaire 380, s'établissent en moyenne à 532 euros par tonne.

¹⁰ Directive 2012/33/EU du Parlement européen et du Conseil du 21 novembre 2012 modifiant la directive 1999/32/CE en ce qui concerne la teneur en soufre des combustibles marins, *Journal officiel de l'Union européenne*, L 327 (2012), p. 1 à 13.

¹¹ Rouïl, *ECAMED*.

¹² Bryan Comer, « Black carbon and maritime shipping: the long road to regulating a short-lived climate pollutant », *EM: The Magazine for Environmental Managers* (avril 2019) ; et Daniel Lack *et al.*, « Investigation of Appropriate Control Measures (Abatement Technologies) to Reduce Black Carbon Emissions from International Shipping », *Air Pollution and Energy Efficiency Studies 1* (Londres, OMI, 2015).

Gaz naturel liquéfié

15. Le remplacement des combustibles liquides marine par du gaz naturel liquéfié (GNL) dans les moteurs diesel permet de réduire considérablement les émissions de SO₂, de NO_x, de particules et de carbone noir. Par rapport à d'autres produits pétroliers, la combustion du GNL n'émet quasiment pas de SO₂ et son utilisation entraîne des réductions des émissions qui varient entre 90 % et 100 %. Il est également possible de faire baisser les émissions de NO_x et de particules (de 64 % à 90 % environ et de 60 % à 98 %, respectivement, selon les caractéristiques du moteur et les combustibles utilisés) en passant au GNL¹³. Utilisé en remplacement des combustibles marine conventionnels, le GNL permet aussi d'aboutir à des réductions des émissions de carbone noir pouvant aller de 75 % à 90 %. Cela étant, la majorité des moteurs de navires qui fonctionnent au GNL sont des moteurs à bicarburation simultanée (81 % des moteurs installés ou commandés) car, la température d'inflammation du GNL étant élevée, les avantages pour l'environnement du recours aux moteurs GNL sont plus limités puisque des combustibles conventionnels ou des distillats sont également utilisés.

16. Avant même la mise en place des zones SECA et NECA et le plafonnement de la teneur en soufre par l'OMI en 2020, ainsi que la volonté du secteur de se décarboniser, l'intérêt pour les moteurs GNL a progressé et la part des navires fonctionnant au GNL à l'échelle mondiale est passée de 1,4 % à 13,5 % entre 2010 et 2018. Cela étant, la modernisation des moteurs existants passe par des modifications coûteuses, et il faut augmenter le volume des espaces à cargaison d'environ 3 % à 4 % pour que des moteurs GNL puissent être installés¹⁴.

17. L'investissement initial dans les navires neufs fonctionnant au GNL est plus élevé que pour les autres types de navires (10 % à 20 % de plus, soit entre 1 million et 4 millions d'euros), principalement en raison du réservoir de stockage du GNL, du circuit de tuyautages du combustible et des mesures de sécurité supplémentaires¹⁵. En fonction de la taille du moteur et selon qu'il s'agit d'un navire neuf ou d'une modernisation, les dépenses d'investissement nécessaires pour les moteurs GNL varient entre 219 et 1 603 euros par kW de puissance nominale¹⁶. Pour ce qui est des dépenses d'exploitation, le GNL permet d'économiser à peu près 5 % à 10 % de combustible par rapport aux combustibles liquides conventionnels. En outre, le passage du gazole au GNL aurait une influence positive sur les investissements dans les combustibles estimée à environ 8 % pour la même quantité d'énergie générée.

18. Le risque de fuite de méthane, important précurseur de l'ozone, qui entraînerait une hausse des émissions de gaz à effet de serre, peut être un inconvénient majeur du recours au GNL. En ce qui concerne les retombées positives au niveau des émissions de CO₂, le GNL présente des avantages par rapport aux combustibles liquides conventionnels parce qu'il contient 25 % à 28 % de carbone en moins et permet de réaliser quelques économies de combustible.

19. On notera également que les émissions de méthane dues à la combustion de GNL sont comparables à celles que génèrent les combustibles liquides conventionnels. Dans les estimations des émissions de méthane dues à l'utilisation du GNL dans les transports maritimes, il convient néanmoins de prendre en compte, à une plus grande échelle, les émissions générées en amont, pendant la production et le transport du GNL (au point de vue

¹³ Hulda Winnes *et al.*, « Evaluation, control and Mitigation of the EnviRonmental impacts of shippingG Emissions (EMERGE): Deliverable 1.1 – Summary and analysis of available abatement methods for SO_x, NO_x and PM, together with data on emissions, waste streams, costs and applicability » (s. l., 2021). Disponible à l'adresse suivante : <https://cordis.europa.eu/project/id/874990/results>.

¹⁴ OMI, *Studies on the Feasibility and Use of LNG as a Fuel for Shipping*, Air Pollution and Energy Efficiency Studies 3 (Londres, 2016).

¹⁵ Jørgen Jordal-Jørgensen, *Reducing Air Pollution from Ships: A Cost Benefit Analysis and Feasibility Study on Possible Means for Further Reduction of Emissions – Environmental Project No. 1421 (2012)* (Copenhague, Ministère danois de l'environnement – Agence de protection de l'environnement (EPA), 2012).

¹⁶ Stefan Åström *et al.*, « The costs and benefits of a nitrogen emission control area in the Baltic and North Seas », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 59 (mars 2018), p. 223 à 236.

de l'analyse du cycle de vie (ACV)), ainsi que les fuites de méthane évoquées ci-dessus, qui correspondent à la quantité de gaz naturel qui s'échappe du moteur du fait d'une combustion incomplète. Les fuites de méthane seraient relativement modérées pour les moteurs fonctionnant sur des cycles diesel, mais pourraient augmenter de façon notable sur les moteurs à cycle d'Otto, où elles sont estimées en moyenne à environ 2 % à 5 % de la consommation de combustible¹⁷. Les fabricants font des progrès sur ce front grâce à l'utilisation d'un mélange pauvre¹⁸, à une meilleure conception du moteur ou à des systèmes de contrôle perfectionnés.

Biodiesel et biocombustibles

20. Depuis peu, on s'intéresse de plus en plus au passage au biodiesel ou aux biocombustibles en tant que moyen efficace de décarboniser le secteur des transports maritimes. Il permet également des réductions des quantités de particules pouvant aller de 12 % à 70 %, par rapport aux combustibles liquides conventionnels, selon le pourcentage de biocombustible que contient le mélange combustible final¹⁹. L'utilisation de biocombustibles à la place des combustibles liquides conventionnels se traduit aussi par des diminutions des émissions de carbone noir pouvant aller de 38 % à 75 %²⁰ et devrait faire baisser quelque peu les émissions de SO₂, mais elle devrait aussi faire augmenter les émissions de NO_x.

21. On s'attend également à des retombées positives sur le plan de la réduction des émissions de GES mais, pour les évaluer intégralement, il convient de tenir compte de l'analyse du cycle de vie en prenant en considération les activités de production en amont, sachant que l'utilisation des terres et le changement d'affectation des terres liés à la production de biocombustibles pourraient contrebalancer leurs avantages. On peut néanmoins réaliser d'importants progrès sur le front de la décarbonisation et parvenir à des réductions des émissions de gaz à effet de serre pouvant aller de 70 % à 100 %, en fonction de l'analyse du cycle de vie, grâce aux biocombustibles²¹. L'agrogazole (ester méthylique d'acide gras), les huiles végétales hydrotraitées, le diesel issu du procédé Fischer-Tropsch, le diméthyléther (DME) et le biométhanol sont les biocombustibles les plus durables pour ce qui est de l'analyse du cycle de vie.

22. Les biocombustibles ayant une énergie interne plus faible que les combustibles liquides conventionnels, la consommation de combustible devrait en principe être supérieure de 8 % à 11 % pour la même quantité d'énergie fournie, ce qui fait donc augmenter les coûts d'exploitation pour les propriétaires de navires. En outre, les prix des biocombustibles sont globalement plus élevés que ceux des combustibles liquides conventionnels et la différence peut aller de 30 % à près de trois fois plus selon le type de biocombustible et son mode de production. Il peut être nécessaire d'apporter des modifications au moteur pour le rendre compatible avec certains biocombustibles (par exemple, le DME), ce qui accroît l'investissement total nécessaire, alors que d'autres peuvent déjà être utilisés dans les moteurs actuels (notamment les huiles végétales hydrotraitées ou le diesel issu du procédé Fischer-Tropsch). Enfin, l'augmentation possible de la demande pourrait finir par restreindre la capacité de production de biocombustibles.

¹⁷ Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), *A Pathway to Decarbonize the Shipping Sector by 2050* (Abou Dhabi, 2021).

¹⁸ Air dilué par l'air excédentaire par rapport à la quantité stœchiométrique requise pour la combustion d'une unité de masse de combustible.

¹⁹ Francesco Di Natale et Claudia Carotenuto, « Particulate matter in marine diesel engines exhausts: Emissions and control strategies », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 40 (octobre 2015), p. 166 à 191.

²⁰ Lack, *Investigation of Appropriate Control Measures*.

²¹ IRENA, *A Pathway*.

Méthanol et diméthyléther

23. Étant donné qu'ils sont tous les deux très pauvres en soufre, le méthanol et le DME permettent de faire reculer de façon spectaculaire – des baisses de plus de 90 % ont été observées – les émissions de SO₂ et de particules²² par rapport aux combustibles liquides conventionnels, et leur utilisation en remplacement des combustibles conventionnels peut également faire baisser les émissions de NO_x de 30 % à 60 %²³.

24. Lorsque le méthanol ou le DME sont produits à partir de biomasse, par exemple à partir de résidus de biomasse ou par gazéification de la liqueur noire, on peut s'attendre à des retombées positives majeures en ce qui concerne les réductions des émissions de CO₂ (95 % à 100 %). Cependant, comme pour les biocombustibles, il convient de tenir compte de l'analyse du cycle de vie pour évaluer les inconvénients possibles de la production de méthanol à partir de biomasse ainsi que les émissions de CO₂ qu'elle génère. Lorsque le méthanol ou le DME sont issus de combustibles fossiles, la baisse des émissions de CO₂ est modérée par rapport aux combustibles conventionnels pour moteurs marins, mais on observe tout de même des diminutions des émissions de polluants.

25. Le méthanol et le DME ayant une énergie interne plus faible, il faut s'attendre à une augmentation de la consommation de combustible de 9 % par rapport au combustible remplacé. Le prix du méthanol ou du DME produits à partir de biomasse peut être 36 % à plus de trois fois plus élevé que celui du VLSFO et, dans le cas de l'e-méthanol écologique, associé à de la bioénergie avec captage et stockage du carbone, le coût du combustible devrait être 3,4 à 6,8 fois supérieur. Cela étant, le coût de l'e-méthanol renouvelable devrait fortement diminuer d'ici à 2050 pour s'établir à 2,5 à 3,4 fois plus que le prix actuel du VLSFO. En revanche, l'utilisation du méthanol entraîne d'autres charges d'exploitation du fait des exigences en matière de sécurité liées à l'approvisionnement en azote (utilisé comme couverture de gaz inerte dans les réservoirs de méthanol) et du coût de la formation du personnel à la gestion des risques, et les coûts d'entretien sont estimés à environ 3 à 4 euros par MWh produit. Enfin, dans le cas des nouveaux moteurs compatibles avec le méthanol et des moteurs modernisés, les coûts sont plus élevés par rapport aux moteurs conventionnels : l'investissement supplémentaire serait de 150 à 225 euros par kW pour les nouveaux moteurs et de 225 à 450 euros par kW pour les moteurs modernisés²⁴.

Hydrogène

26. L'hydrogène (H₂) peut être utilisé dans les piles à combustible et les moteurs à bicarburation simultanée ou remplacer le fuel-oil lourd dans les moteurs diesel. S'agissant des polluants atmosphériques, la réaction électrochimique entre l'hydrogène et l'oxygène dans les piles à combustible produit de la chaleur et de l'eau, mais aucune émission. La combustion de l'hydrogène ne génère ni SO₂, ni particules, ni carbone noir, mais elle émet des NO_x à des niveaux qui peuvent même être supérieurs à ceux des émissions de NO_x générées par les combustibles conventionnels, étant donné que les températures de combustion sont très élevées. De plus, lorsqu'il est produit par électrolyse de l'eau, avec de l'électricité venant d'une énergie renouvelable ou de centrales nucléaires, l'hydrogène devient un combustible sans émission de CO₂.

27. L'hydrogène présente néanmoins des inconvénients, notamment le besoin d'espace. De fait, l'utilisation de l'hydrogène requiert 5 fois plus de volume sous forme liquide et 10 à 15 fois plus sous forme gazeuse²⁵ que celle du fuel-oil lourd, car des solutions de stockage et des règles de sécurité doivent être mises en place en raison du caractère hautement inflammable de ce gaz. En ce qui concerne la maturité technologique, les piles à combustible à hydrogène pour les transports maritimes sont encore en cours d'élaboration et les

²² Joanne Ellis et Martin Svanberg, « Expected benefits, strategies, and implementation of methanol as a marine fuel for the smaller vessel fleet. SUMMETH – Sustainable Marine Methanol Deliverable D5.1. », Final Report No. D5.1 (s. n., 2018).

²³ DNV GL, « Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility », Report No. 2015-1197, rév. 2 (s. n., 2016).

²⁴ Winnes, *Evaluation, control and Mitigation*.

²⁵ Marketa Pape, *Decarbonizing maritime transport: the EU perspective*, Note d'information (European Parliamentary Research Service, 2020).

applications actuelles conviennent davantage aux navires de petite taille et de taille moyenne, tels que les ferries et les navires à passagers. Enfin, la disponibilité d'hydrogène produit avec de l'électricité renouvelable pourrait être quelque peu limitée, en raison de l'augmentation de la demande dans plusieurs secteurs sachant que, en 2019, la production d'hydrogène dit « vert » ne représentait que 4 % de la production totale²⁶ ; à titre d'exemple, il faudrait multiplier par trois la production d'hydrogène actuelle rien que pour alimenter le secteur des transports maritimes.

28. Enfin, il existe peu d'informations sur l'estimation des investissements supplémentaires qu'il conviendrait de faire. Le coût des équipements nécessaires pour l'électrolyse se situerait entre 650 et 1 000 dollars par kW (606 à 933 euros par kW au taux de change du milieu de l'année 2022). Le coût de production de l'hydrogène vert s'établissait entre 126 et 144 euros par MWh en 2020, alors que le prix de l'électricité était de 60 euros par MWh en moyenne²⁷. Cela dit, portés par l'essor de la production d'énergies renouvelables et la hausse de la demande, les prix de l'hydrogène vert devraient devenir compétitifs d'ici à 2030 par rapport à ceux du GNL et du VLSFO.

Ammoniac

29. Le recours à l'ammoniac (NH₃) comme combustible n'entraîne aucune émission de CO₂, de SO₂ et de particules puisqu'il s'agit d'une substance sans carbone ni soufre. Les émissions de NO_x sont aussi nulles lorsqu'il est utilisé dans des piles à combustible, mais, en association avec l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne, il génère des émissions proches de celles qui proviennent de combustibles conventionnels²⁸. Il peut être très intéressant dans le contexte de la décarbonisation du secteur, mais son mode de production doit être pris en compte.

30. La toxicité de l'ammoniac et le risque de fuite sont les principaux obstacles à son utilisation comme combustible et, malgré de nombreux essais pilotes et projets d'étude, aucun navire fonctionnant à l'ammoniac ne navigue actuellement. L'ammoniac a une température de liquéfaction (-33 °C) et une densité à l'état liquide plus élevées que l'hydrogène, ce qui rend son stockage plus simple et moins coûteux. Le volume de combustible pour un volume donné est donc 1,6 à 2,3 fois plus élevé que pour les combustibles liquides conventionnels. On notera également qu'il existe déjà des infrastructures de stockage et de transport de l'ammoniac un peu partout dans le monde.

31. Le coût de production de l'ammoniac vert est actuellement de 133 à 205 euros par MWh mais il devrait considérablement diminuer d'ici à 2050 pour s'établir entre 62 et 107 euros par MWh seulement, ce qui ferait de l'ammoniac un combustible moins cher que le VLSFO²⁹. Le coût des équipements de soutage devrait aussi être pris en compte puisque les infrastructures existantes ne sont pas compatibles avec le stockage de l'ammoniac.

32. Enfin, il convient de noter que des discussions sont en cours à l'OMI au sujet de l'interdiction de l'utilisation du fuel-oil lourd dans l'Arctique, qui permettrait de réduire considérablement les émissions de carbone noir.

33. On trouvera dans le tableau 1 ci-dessous une estimation des baisses d'émissions, des augmentations de la consommation de carburant et des coûts de mise en œuvre pour certains combustibles de substitution.

²⁶ DNV GL, *Comparison of alternative marine fuels*, rapport n° 2019-0567, rév. 4 (s. n., 2019).

²⁷ IRENA, *A Pathway*.

²⁸ Niels de Vries, « Safe and effective application of ammonia as a marine fuel », thèse, Delft University of Technology, 2019.

²⁹ Ibid.

Tableau 1
Réductions des émissions par combustible de substitution
 (En pourcentage)

<i>Techniques primaires – recours à d'autres combustibles</i>	<i>SO₂</i>	<i>NO_x</i>	<i>Particules</i>	<i>Carbone noir</i>	<i>Augmentation de la consommation de combustible</i>	<i>Coûts d'investissement (en euros/kW)</i>	<i>Coûts d'exploitation et d'entretien (en euros)</i>
Combustibles à faible teneur en soufre	Jusqu'à 99	-	50-90	0-80 (médiane : 30)	-	-	222-594 par tonne de combustible
GNL	90-100	64-90	60-98	75-90	-5-10	219-1 603	-43 par tonne de combustible (+économies de combustible)
Émulsions eau-combustible	-	1-60	20-90	0-85	+0-2	11-44	33 000-271 000 par an
Biodiesel et biocombustibles	-	-	12-70	38-75	+8-11	-	-
Méthanol	100	30-60	90-99	97	+9	150-450	10-15 par MWh pour le combustible et 3-4 par MWh pour les autres coûts d'exploitation et d'entretien

B. Ajustements concernant le combustible

Émulsions eau-combustible

34. L'utilisation d'une solution stable eau-combustible (WiFE) ou l'injection d'eau directement dans la chambre de combustion diminue la température de combustion, ce qui entraîne une réduction de 1 % à 60 % de la formation de NO_x thermiques, selon la teneur en eau³⁰. En outre, les émulsions eau-combustible permettent d'abaisser les émissions de particules de 20 % à 90 % et celles de carbone de près de 85 %³¹.

35. L'utilisation d'une émulsion eau-combustible tend à augmenter la consommation de fuel-oil, même si cette hausse est marginale lorsque la teneur en eau est inférieure ou égale à 30 % et estimée à environ 1 % à 2 % pour des teneurs en eau plus élevées. Pour les émulsions eau-combustible dans les moteurs marins existants, il faut tenir compte de la capacité d'injection au même niveau de puissance. En outre, il convient avant tout de prendre en considération le risque de formation d'acide sulfureux, car celui-ci est susceptible d'entraîner une corrosion indésirable au niveau du moteur.

36. Les dépenses d'investissement liées à l'utilisation d'émulsions eau-combustible sont comprises entre 11 et 44 euros par kW, selon le type de moteur (modernisé ou neuf) et sa taille³². D'après les estimations, les coûts d'exploitation et d'entretien sont d'environ 9 à 9,5 euros par kW et par an³³.

³⁰ Incentive Partners et Litehauz, *Economic Impact Assessment of a NO_x Emission Control Area in the North Sea: Environmental Project No. 142. (2012)* (Copenhague, Ministère danois de l'environnement – EPA, 2012).

³¹ James J. Corbett, James J. Winebrake et Erin H. Green, « An assessment of technologies for reducing regional short-lived climate forcers emitted by ships with implications for Arctic shipping », *Carbon Management*, vol. 1, n° 2 (2010), p. 207 à 225.

³² Lack, *Investigation of Appropriate Control Measures*.

³³ Jordal-Jørgensen, *Reducing Air Pollution from Ships*.

Vannes tiroirs

37. La modification du processus de combustion consistant à remplacer les vannes de combustible conventionnelles par des valves tiroirs permet une combustion plus complète à des températures de flamme maximales plus basses. À des températures de combustion plus basses, la formation de NO_x thermiques diminue et il est possible d'obtenir des réductions d'émissions de près de 20 %. Cette technique a également des retombées positives sur les émissions de particules et de carbone noir, les réductions pouvant être de 10 % à 50 % (25 % en moyenne) pour les particules et de 25 % à 50 % pour le carbone noir³⁴. Cependant, l'utilisation de vannes tiroirs s'accompagne d'une hausse de 2 % de la consommation de combustible, ce qui entraîne des émissions supplémentaires de CO₂ et de SO₂ et des coûts additionnels.

38. Les dépenses d'investissement liées à l'utilisation de valves tiroirs sont relativement modérées, le coût de chaque vanne étant estimé à environ 230 euros et les coûts supplémentaires de production d'électricité étant compris entre 0,33 et 1,43 euro par kW, selon les estimations³⁵. En outre, contrairement à d'autres techniques de réduction des émissions, les valves tiroirs n'entraînent pas de coûts d'exploitation et d'entretien supplémentaires.

39. Les réductions des émissions obtenues en fonction de la technique d'ajustement de la combustion utilisée sont présentées dans le tableau 2 ci-après.

Tableau 2

Réductions des émissions, par technique d'ajustement de la combustion

(En pourcentage)

<i>Technique primaire</i>	<i>SO₂</i>	<i>NO_x</i>	<i>Particules</i>	<i>Carbone noir</i>	<i>Augmentation de la consommation de carburant</i>	<i>Coûts d'investissement (en euros/kW)</i>	<i>Coûts d'exploitation et d'entretien (en euros/kW)</i>
Émulsions eau-combustible	Proportionnelles à l'augmentation de la consommation de carburant	1-60	20-90	0-85	0-2	11-44	9-10
Vannes tiroirs		0-20	10-50	10-50	+2	0,3-1,4	0

C. Ajustement du mode de propulsion*Navigation à vitesse réduite*

40. La navigation à vitesse réduite consiste à réduire la vitesse de croisière afin d'économiser du combustible, sachant que la consommation de combustible est approximativement proportionnelle au cube de la vitesse du navire. Ainsi, à titre d'exemple, le fait de réduire la vitesse de croisière de 23 à 18 nœuds (-21,7 %) pourrait permettre de réduire la consommation de combustible de 50 %, tandis que des réductions de vitesse de 10 % et 20 % entraîneraient des économies de combustible de 15 % à 19 % et de 36 % à 39 %, respectivement. Les émissions de SO₂ et de CO₂ étant directement proportionnelles à la consommation de combustible, il est possible de les réduire considérablement en diminuant la vitesse de croisière. Parallèlement, les économies de combustible permettent de réduire les émissions de NO_x et de particules pendant la navigation de près de 64 % et 69 %, respectivement, pour des réductions de vitesse d'environ 50 %³⁶. En outre, il est possible de réduire les émissions de carbone noir de près de 30 % lorsque le moteur est détaré (c'est-à-dire qu'il est réglé de façon que la puissance de sortie soit inférieure aux conditions normales de fonctionnement). Toutefois, les émissions de carbone noir peuvent augmenter à des charges de valeurs inférieures, et ce, même sans détarage. Par ailleurs, les faibles valeurs de charge du moteur ont une influence négative sur les émissions de monoxyde de carbone (CO).

³⁴ Bryan Comer *et al*, *Black carbon emissions and fuel use in global shipping: 2015* (s. n., International Council on Clean Transportation, 2017).

³⁵ Corbett, « An assessment of technologies ».

³⁶ J. Wayne Miller *et al.*, *In-use Emissions Test Program at VSR Speeds for Oceangoing Container Ship: Report* (s. n., California Air Resources Board, 2012).

41. S'agissant des coûts de la navigation à vitesse réduite, la principale conséquence qui doit être prise en compte par les propriétaires de navires est l'allongement des délais de livraison. La nécessité d'augmenter le nombre de navires pour compenser l'allongement des délais de livraison aurait un effet négatif sur les avantages environnementaux. Selon une étude³⁷, le fait d'imposer la navigation à vitesse réduite dans les eaux territoriales (moins de 12 milles marins des côtes) ou dans la zone économique exclusive (de 12 à 200 milles marins des côtes) de l'Union européenne pourrait permettre d'économiser jusqu'à 410 millions d'euros et 3 447 millions d'euros de combustible en 2030, respectivement (sans entretien supplémentaire ni augmentation de la flotte). Selon une autre étude³⁸, pour une catégorie de navire de 4 000 équivalents vingt pieds³⁹, le fait de réduire la vitesse de 23 à 17 nœuds permet de diminuer de 68 % à 51 % la part du soutage dans les dépenses d'exploitation totales lorsque du fuel-oil (fuel-oil intermédiaire 380) est utilisé et de 77 % à 62 % dans le cas du gazole marine. Enfin, la conversion du moteur en moteur à commande électronique impliquerait des investissements supplémentaires, estimés à environ 71 euros par kW pour un moteur de 9,5 MW.

Navires à batterie (électrique ou hybride)

42. Les navires alimentés par des batteries suscitent un intérêt accru pour ce qui est des transports maritimes sur de courtes distances avec arrêts fréquents. La Norvège, par exemple, électrifie ses transbordeurs depuis 2015. Dans l'optique de la décarbonisation du secteur, les navires hybrides ou électriques sont particulièrement intéressants : il est possible de réduire les émissions de CO₂ de 10 % à 40 % pour les navires hybrides et de les éliminer totalement pour les navires entièrement électriques, à condition que l'électricité provienne de sources renouvelables ou de l'énergie nucléaire. En outre, les émissions de gaz d'échappement ne sont plus produites par les moteurs des navires, mais par les centrales thermiques, qui sont équipées de dispositifs beaucoup plus efficaces permettant de réduire les polluants atmosphériques. Au Canada, plusieurs navires hybrides (batterie-GNL) – en particulier des ferries – sont exploités en Colombie-Britannique.

43. Toutefois, il faut tenir compte du fait que la durée de vie des batteries, qui est d'environ huit à dix ans, fait de cette technique une option nettement plus coûteuse que les moteurs diesel. De plus, en ce qui concerne les émissions de CO₂, il serait utile d'envisager l'analyse du cycle de vie dans une perspective plus large et d'évaluer ces émissions en amont, comme c'est le cas pour la production d'électricité ou de batteries.

Assistance éolienne

44. Les premiers prototypes en phase d'essai sont des rotors, des ailes et des kites (ailes volantes). En fonction de la technologie utilisée, du type de navire et des conditions météorologiques, on peut s'attendre à des économies de combustible de près de 50 %, même si les économies annuelles moyennes réalisées dans le cadre des essais étaient de l'ordre de 8 % à 10 %⁴⁰. Dans un cas précis, il a été affirmé que, s'ils étaient utilisés par l'ensemble de la flotte mondiale de pétroliers, les rotors pourraient permettre une réduction des émissions de CO₂ de plus de 30 millions de tonnes, ce qui représente environ 3 % des émissions totales de gaz à effet de serre provenant des transports maritimes.

45. La propulsion éolienne a néanmoins certaines limites, dont il convient de tenir compte : agencement du pont, processus de chargement et augmentation de la gîte. En outre, les kites et les rotors, qui sont les solutions de propulsion éolienne les plus courantes, sont jugés plus efficaces à des vitesses plus faibles (par exemple, en dessous de 16 nœuds pour les kites)⁴¹.

³⁷ Paul Campling, Liliane Janssen et Kris Vanherle, *Specific Evaluation of Emissions from Shipping Including Assessment for the Establishment of Possible New Emission Control Areas in European Seas*, (s. n., Flemish Institute for Technological Research NV, 2012).

³⁸ C. Chrysopoulos et M. Nijdam, « The effect of the revised 1999/32/EC directive on the liner service design in container shipping market » (s. n., 2012).

³⁹ Unité utilisée pour la capacité de charge des porte-conteneurs.

⁴⁰ Jon Excell, « The rise of the wind ships », *The Engineer*, 19 février 2020. Disponible à l'adresse suivante : www.theengineer.co.uk/content/in-depth/the-rise-of-the-wind-ships/.

⁴¹ Päiva Aakko-Saksa et Kati Lehtoranta, *Ship Emissions in the Future: Review*, Research Report No. VTT-R-00335-19 (s. n., Centre de recherche technique finlandais – VTT, 2019).

46. Les réductions des émissions obtenues en fonction de la technique d'ajustement du mode de propulsion utilisée sont présentées dans le tableau 3 ci-après.

Tableau 3

Réductions des émissions, par technique d'ajustement du mode de propulsion

(En pourcentage)

<i>Technique primaire</i>	<i>SO₂</i>	<i>NO_x</i>	<i>Particules</i>	<i>Carbone noir</i>	<i>Économies de combustible</i>
Navigation à vitesse réduite	Proportionnelles aux économies de combustible pour toutes les techniques	0-64	0-69	0-30 si le moteur est détaré, augmentation possible en cas de faible charge	0-50
Navires à batterie (électrique ou hybride)		Pas d'émission si entièrement électrique			100 si électrique
Assistance éolienne		Aucune information trouvée, mais les économies de combustibles devraient entraîner des réductions			0-50 (8-10 observés dans la pratique)

VI. Meilleures techniques disponibles pour les navires : techniques secondaires

Laveurs de gaz par voie humide

47. Le principe de fonctionnement des laveurs de gaz par voie humide repose sur la canalisation du flux de gaz d'échappement à travers une solution alcaline liquide (par exemple, de l'eau de mer ou une solution chimique), ce qui neutralise les SO_x présents dans les gaz d'échappement grâce à des réactions chimiques. Il existe trois types de laveurs par voie humide :

a) En circuit ouvert : l'eau de mer est pompée et utilisée comme solution alcaline pour neutraliser les composés SO_x et produire de l'acide sulfurique. Le débit d'eau de lavage doit être compris entre 45 et 60 m³/MWh pour un fuel-oil de 3,5 % en masse⁴². Après avoir été traitées de manière adéquate, les eaux usées sont ensuite rejetées à la mer ;

b) En circuit fermé : dans ce système, de l'eau douce mélangée à des produits chimiques alcalins (par ex., hydroxyde de sodium) est utilisée pour réagir avec les SO_x et produire du sulfate de sodium. Les eaux usées passent ensuite à travers un réservoir, où elles sont épurées avant d'être renvoyées dans le laveur de gaz. Le débit nécessaire est plus faible que pour les systèmes en circuit ouvert (environ 20-30 m³/MWh, selon les estimations) et le fonctionnement du circuit d'eau représente environ 0,5 % à 1 % de la puissance du moteur⁴³. Cette configuration est particulièrement utile pour les navires qui naviguent dans des eaux marines peu alcalines ou dans des zones où les rejets d'eau sont interdits ;

c) Système hybride : cette technologie associe des laveurs en circuit ouvert et en circuit fermé et permet aux navires d'être flexibles et de s'adapter aux conditions ou aux restrictions associées aux mers sur lesquelles ils sont exploités.

48. L'installation de laveurs par voie humide permet de réduire les émissions des navires de près de 98 % pour le SO₂, de près de 90 % pour les particules (avec des taux de réduction moyens d'environ 30 %) et de près de 70 % pour le carbone noir (réductions moyennes observées de 16 % à 37 %), en fonction du combustible utilisé, du type de moteur et des conditions d'exploitation, y compris les conditions d'exploitation du laveur (c'est-à-dire, les dimensions du dispositif, le temps de séjour des gaz d'échappement et la consommation de

⁴² Lloyd's Register, *Understanding Exhaust Gas Treatment Systems. Guidance for Shipowners and Operators* (Londres, 2012).

⁴³ Ibid.

réactifs)⁴⁴. L'installation de laveurs entraîne une hausse de 0,5 % à 3 % de la consommation de combustible, selon le niveau d'émission de gaz d'échappement prévu, le combustible utilisé, le type et le modèle de laveur et les caractéristiques du moteur, ce qui, indirectement, augmente légèrement les émissions de CO₂. L'International Council on Clean Transportation a publié un rapport sur le sujet en 2020⁴⁵.

49. Les laveurs ont l'avantage d'être compatibles avec les systèmes de récupération de la chaleur ou d'autres traitements des gaz d'échappement installés en amont, tels que le recyclage des gaz d'échappement (RGE) et la réduction catalytique sélective (SCR), ainsi qu'avec les technologies d'élimination des particules. Néanmoins, l'installation de laveurs présente certaines limites, notamment parce qu'ils requièrent de l'espace : d'environ 65 m³ pour les moteurs de petite taille à plus de 800 m³ pour les dispositifs plus volumineux⁴⁶. En particulier, dans le cas des systèmes en circuit fermé, de l'espace supplémentaire doit être prévu pour les installations de traitement et de stockage des eaux usées, ainsi que pour le réservoir de stockage des réactifs.

50. L'installation de laveurs est coûteuse et s'accompagne de dépenses d'investissement allant de 100 à 433 euros par kW, selon le type de laveur, qu'il s'agisse d'une installation nouvelle ou d'une modernisation. En particulier, les laveurs en circuit ouvert coûtent entre 100 et 216 euros par kW, tandis que ceux en circuit fermé, de 200 à 433 euros par kW, en fonction de la taille du moteur et du modèle de laveur⁴⁷. Les laveurs hybrides sont moins courants dans les projets pilotes mais, dans un des cas étudiés, le coût d'investissement était d'environ 225 euros par kW pour une construction nouvelle et de 338 euros par kW pour une modernisation⁴⁸. En outre, alors que dans le cas des laveurs en circuit ouvert, seules les dépenses d'exploitation liées à l'augmentation de la consommation de combustible sont prises en compte, dans le cas des systèmes en circuit fermé, outre cette augmentation, les coûts de l'hydroxyde de sodium et de l'eau, ainsi que de l'élimination des boues, doivent également être pris en compte dans les calculs, ce qui entraîne des dépenses d'exploitation totales d'environ 6 à 11 euros par MWh⁴⁹. Enfin, selon les estimations, les coûts d'entretien sont d'environ 0,6 à 0,9 € par MWh pour les laveurs en circuit ouvert et de 0,3 à 1,2 € par MWh pour ceux en circuit fermé⁵⁰. Au total, sur l'ensemble de la durée de vie des laveurs, les coûts d'exploitation et d'entretien devraient représenter environ 2 % à 3 % des coûts d'investissement totaux pour les deux types de laveurs.

51. Lors de l'utilisation de laveurs, des substances dangereuses (soufre, HAP, métaux lourds, nitrates, etc.) peuvent être transférées dans les eaux usées, en fonction du combustible utilisé, du type d'épuration de l'eau et des produits chimiques ajoutés⁵¹. En outre, les eaux usées provenant des laveurs sont caractérisées par des valeurs de pH faibles et des températures élevées. Des règles spécifiques sont ainsi appliquées aux rejets d'eaux usées dans les eaux marines afin de prévenir leurs effets négatifs, tels que l'acidification, et d'imposer des limites appropriées concernant la valeur du pH et les concentrations de HAP, de nitrates et de particules. Dans le monde, plusieurs ports et zones ont ainsi restreint ou interdit le rejet d'eaux usées (Chine, Singapour, Belgique, Irlande, Californie, canal de Suez, canal de Panama, tronçon allemand du Rhin et Canada, dans les ports de Vancouver, Prince Rupert et Sept-Îles), soit les systèmes en circuit ouvert, ou imposé l'utilisation du mode circuit fermé sur les systèmes hybrides.

⁴⁴ Winnes, « Evaluation, control and Mitigation » et MAN Diesel and Turbo, *MAN B&W Two-stroke Marine Engines – Emission Project Guide for Marpol Annex VI Regulations* (s. n., 2018).

⁴⁵ Bryan Comer, Elise Georgeff et Liudmila Osipova, *Air Emissions and Water Pollution Discharges from Ships with Scrubbers: ICCT Consulting Report* (Washington, International Council on Clean Transportation, 2020).

⁴⁶ MAN Diesel et Turbo, « MAN B&W ».

⁴⁷ Peter Bosch *et al.*, « Cost Benefit Analysis to support the impact assessment accompanying the revision of Directive 1999/32/EC on the sulfur content of certain liquid fuels », AEA/ED45756/Issue 3 (s. n., AEA, 2009) ; et Åström *et al.*, « The costs and benefits of a nitrogen emission control area ».

⁴⁸ Cofala, *Final Report*.

⁴⁹ Eelco Den Boer et Maarten't Hoen, *Scrubbers: An Economic and Ecological Assessment* (Delft, CE Delft, 2015).

⁵⁰ Winnes, *Evaluation, control and Mitigation*.

⁵¹ Christer Ågren, « Environmental impacts of ship scrubbers », *Acid News*, n° 3 (octobre 2019), p. 17 et 18.

Laveurs de gaz par voie sèche

52. Les laveurs de gaz par voie sèche ont également été adaptés aux moteurs marins et ont répondu aux attentes en matière de réduction des émissions de SO₂. Le principe de fonctionnement est semblable à celui des laveurs par voie humide mais, au lieu d'injecter une solution liquide dans le laveur, du bicarbonate de sodium en poudre ou des granulés d'hydroxyde de calcium peuvent être directement injectés dans le conduit de gaz d'échappement, ce qui entraîne, après réaction avec les composés de SO_x, la production de sulfate ou de carbonate de sodium sous forme de solides. Les flux de gaz d'échappement passent par un dispositif d'élimination des particules, tel qu'un filtre à manches, afin d'éliminer les produits de réaction, ainsi que la suie, le carbone noir et les métaux lourds résultant de la combustion, lesquels sont ensuite évacués dans un conteneur approprié.

53. Les laveurs par voie sèche permettent de réduire les émissions de SO_x de plus de 99 % et d'obtenir le même pourcentage pour les émissions de particules (tant en concentration qu'en masse)⁵². Ils présentent l'avantage, par rapport aux laveurs en circuit ouvert, de ne pas rejeter d'eaux usées dans la mer et, par rapport aux dispositifs en circuit fermé, de produire moins de résidus. En outre, la consommation d'énergie nécessaire à leur fonctionnement est plutôt faible et il n'y a pas de risque de corrosion. Par rapport aux laveurs par voie humide, les filtres à manches avec injection de bicarbonate de sodium présentent certains avantages : faible consommation électrique et augmentation de la consommation de combustible d'environ 0,2 % à 0,3 %, selon les estimations. De plus, par rapport aux filtres à particules diesel, la perte de charge n'augmente pas de manière significative dans les filtres à manches. Comme pour les laveurs en circuit fermé, un espace supplémentaire est nécessaire pour le stockage de l'agent réactif et des résidus. Ces systèmes sont compatibles avec la réduction catalytique sélective ou le recyclage des gaz d'échappement. Aucune information sur les aspects économiques n'a été obtenue pour cette technologie ; elle a été mise à l'essai dans le cadre d'un petit nombre de projets pilotes, mais elle doit encore faire l'objet de développements pour accroître sa robustesse dans les applications maritimes et évaluer les investissements financiers associés.

Recyclage des gaz d'échappement

54. Les systèmes de recyclage des gaz d'échappement (RGE) redirigent les gaz d'échappement du moteur vers la chambre de combustion après les avoir épurés, afin de réduire la température de combustion et la pression et d'empêcher la formation de NO_x thermiques. Les gaz d'échappement passent par un refroidisseur intermédiaire qui abaisse leur température et leur teneur en oxygène, tout en augmentant leur capacité calorifique, puis un filtre à particules diesel (ou épurateur) placé en aval élimine les résidus de combustion et empêche la corrosion ou l'encrassement du moteur. Le système de recyclage des gaz d'échappement doit être équipé d'un système de contrôle électronique pour fonctionner.

55. Le rendement d'épuration des NO_x du système de recyclage dépend des taux de recyclage ; des réductions d'émissions de 25 % à 80 % ont été observées avec des moteurs diesel⁵³. Les limites de NO_x de niveau III fixées dans la Convention MARPOL peuvent être respectées avec un taux de recyclage de 40 % dans certains systèmes récents appliqués aux moteurs à deux temps. Toutefois, pour les moteurs à vitesse moyenne, le respect des limites doit être démontré, puisque les concentrations élevées de SO₂ et de particules dans les gaz de combustion constituent le principal obstacle à surmonter. L'utilisation de dispositifs de recyclage des gaz d'échappement entraîne une réduction de la puissance du moteur, ainsi qu'une augmentation de la consommation de combustible pouvant aller jusqu'à +4 %, ce qui entraîne une hausse des émissions de CO₂. En outre, s'ils ne sont pas utilisés correctement, ces systèmes de recyclage peuvent même donner lieu à une augmentation des émissions de carbone et de particules.

⁵² OMI, « Evaluation and harmonization of rules and guidance on discharge of liquid effluents from EGCS into waters, including conditions and areas », document MEPC 75/INF.13.

⁵³ Giannis Papadimitriou *et al.*, *Best Available Techniques for Mobile Sources in Support of a Guidance Document to the Gothenburg Protocol of the LRTAP Convention* (s. n., Commission européenne, 2015).

56. Pour ce qui est de l'estimation des coûts, les investissements nécessaires pour les systèmes de recyclage sont tout à fait raisonnables et la majeure partie des dépenses d'investissement est liée au coût du matériel de contrôle des flux de recyclage. Au total, selon les estimations, les dépenses d'investissement sont comprises entre 36 et 60 euros par kW, en fonction du taux de recyclage et du niveau de réduction des émissions de NO_x souhaités⁵⁴. Les dépenses d'exploitation sont comprises entre 17 et 25 euros par kW et, compte tenu également des coûts d'entretien, les coûts totaux peuvent être d'environ 1 à 3 euros par MWh⁵⁵. L'utilisation de systèmes de recyclage des gaz d'échappement entraîne une augmentation de 1 % à 2 % de la consommation de combustible, laquelle peut être compensée par des économies de combustible si le moteur est déclassé du niveau II au niveau I.

Réduction catalytique sélective

57. La réduction catalytique sélective (RCS) est une technologie robuste et mature utilisée dans les secteurs industriels et dans les applications maritimes, qui permet de réduire considérablement les émissions de NO_x et de respecter les limites d'émission de niveau III. Le principe de la réduction catalytique sélective consiste à induire une réaction chimique dans un catalyseur : des solvants de l'azote, tels qu'une solution d'ammoniac (NH₃) ou de l'urée, sont introduits dans le conduit de gaz d'échappement et réagissent avec les NO_x présents dans ces gaz, ce qui entraîne la production d'azote (N₂) et d'eau (H₂O). La solution réductrice la plus couramment utilisée est un mélange de 40 % d'urée dans l'eau. L'utilisation de dispositifs de réduction catalytique sélective permet de réduire les émissions de NO_x de 70 % à 95 %, en fonction du régime du moteur⁵⁶. Selon les estimations, lorsqu'un catalyseur à oxydation simple est utilisé pour oxyder le NH₃ restant, il est également possible de réduire les émissions de COV (50 % à 90 %), de carbone (50 % à 90 %) et de particules (10 % à 40 %)⁵⁷.

58. Cependant, le recours à la réduction catalytique sélective entraîne une augmentation d'environ 2 % de la consommation de combustible, ce qui a un effet négatif sur les émissions provenant des navires. En outre, une puissance supplémentaire d'environ 5 kW par MW de puissance du moteur est nécessaire pour fournir l'agent réducteur, l'air comprimé et la chaleur. Pour ce qui est des émissions, l'utilisation de dispositifs de réduction catalytique sélective entraîne un risque de fuite d'ammoniac, lequel augmente avec le temps, à mesure que la réduction catalytique sélective s'affaiblit. Toutefois, des techniques de contrôle, telles que l'optimisation de l'étalonnage, le dimensionnement du catalyseur ou l'introduction d'un catalyseur, peuvent être appliquées pour empêcher autant que possible cette augmentation du risque⁵⁸. En dehors des NECA, les moteurs de niveau I équipés de dispositifs de réduction catalytique sélective ont un rendement supérieur de 4 % à celui des moteurs de niveau II et peuvent être utilisés pour respecter les limites d'émission de niveau II et économiser du combustible⁵⁹.

59. Certaines contraintes spécifiques peuvent apparaître lorsque des dispositifs de réduction catalytique sélective sont utilisés à bord des navires. La réduction catalytique sélective peut être utilisée avec n'importe quel fuel-oil marin, mais plus les niveaux de SO₂ des gaz d'échappement sont faibles et la température élevée, plus la réaction catalytique est efficace. En revanche, elle ne permet pas de réduire les NO_x aux niveaux souhaités à de faibles températures (moins de 250 °C)⁶⁰. En outre, il convient tout particulièrement de veiller à éviter la formation de bisulfate d'ammonium ou d'acide sulfurique ; or celle-ci a plus de probabilité de se produire lorsque des combustibles à teneur en soufre plus élevée sont utilisés à basse température. Inversement, la température des gaz d'échappement doit être suffisamment basse pour éviter la dégradation du catalyseur, l'oxydation du NH₃ et la formation de SO₃. Il est donc essentiel de disposer d'une installation de contrôle de la

⁵⁴ Rasmus Parsmo *et al.*, *NO_x Abatement in the Baltic Sea: An Evaluation of Different Policy Instruments*, No. C 247 (Stockholm, Institutet för Vatten-och Luftvardsforskning, 2017).

⁵⁵ Ibid.

⁵⁶ Winnes, « Evaluation, control and Mitigation ».

⁵⁷ Ibid.

⁵⁸ Incentive Partners et Litehauz, *Economic Impact Assessment*.

⁵⁹ Lloyd's Register, *Understanding Exhaust Gas Treatment Systems*.

⁶⁰ OMI, « Assessment of Low-load Performance of IMO NOX Tier III Technologies », document MEPC 80/5/1.

température des gaz d'échappement, laquelle est souvent intégrée au dispositif de réduction catalytique sélective. La taille du dispositif de réduction catalytique sélective dépend de la puissance du moteur, du débit de gaz, de l'agent réducteur utilisé (par exemple, pour les solutions d'ammoniac, le mélangeur doit être plus petit que pour l'urée, mais le stockage de ces solutions est plus complexe et plus dangereux), ainsi que de la durée de vie du catalyseur (celle des catalyseurs de plus grande taille est plus longue). Un entretien régulier et le contrôle des opérations sont nécessaires pour garantir l'efficacité et la durabilité de la réduction catalytique sélective.

60. La réduction catalytique sélective peut être facilement associée à des technologies d'élimination des particules, telles que les filtres à particules diesel, et/ou à des laveurs, placés en aval de la réduction catalytique sélective pour une efficacité optimale du transfert de chaleur.

61. Les dépenses d'investissement associées à l'installation de dispositifs de réduction catalytique sélective oscillent entre 19 et 100 euros par kW⁶¹ selon la taille du moteur (les moteurs plus petits peuvent avoir un coût plus élevé par kW), la catégorie de moteur (neuf ou modernisé) et le type de moteur (à deux ou quatre temps). Les dépenses d'exploitation et les coûts d'entretien de la réduction catalytique sélective varient de 3 à 10 euros par MWh. Les coûts moyens sont plus élevés pour les moteurs à deux temps que pour les moteurs à quatre temps⁶². Les dépenses d'exploitation sont principalement liées au remplacement du catalyseur, à la consommation d'urée ou d'ammoniac et aux coûts de main-d'œuvre associés. La majeure partie des coûts sont dus à la consommation de réactifs azotés. Par exemple, selon les estimations, les coûts liés à la consommation d'urée sont de 1 à 5 euros par MWh⁶³. Enfin, les coûts d'entretien représentent environ 1,2 % des investissements annualisés.

Filtre à particules diesel

62. Les filtres à particules diesel sont constitués d'un substrat céramique poreux qui retient les particules solides des gaz d'échappement, les gaz étant ainsi épurés lorsqu'ils passent à travers le filtre. Dans les moteurs diesel à allumage par compression, l'utilisation de filtres à particules diesel permet de réduire les émissions de particules de 45 % à 92 % et les émissions de carbone noir de 70 % à 90 %⁶⁴. En outre, lorsqu'un catalyseur à oxydation pour moteur diesel ou un revêtement catalytique, dans un filtre fermé, est utilisé, il est possible d'obtenir des réductions de 60 % à 90 % des émissions de CO et de COV. Toutefois, l'utilisation des catalyseurs à oxydation pour moteur diesel est limitée lorsque la teneur en soufre du combustible est supérieure à 50 parties par million. De plus, après un certain temps, les particules piégées s'accumulent sur le filtre et augmentent la perte de charge ; il faut donc installer un système de combustion ou d'oxydation, ce qui a des effets négatifs sur les émissions de NO_x et de CO₂. Enfin, l'utilisation de catalyseurs à oxydation pour moteur diesel entraîne une augmentation de 1 % à 4 % de la consommation de combustible, ce qui aggrave également l'empreinte environnementale des navires, comme la plupart des technologies de traitement des gaz de combustion.

63. Pour que les filtres à particules diesel fonctionnent correctement, la teneur en soufre des combustibles utilisés doit être relativement faible (inférieure à 0,5 %/masse, ce qui ne pose pas de problème depuis l'entrée en vigueur de la limite maximale de soufre fixée par l'OMI en 2020) et la température des gaz d'échappement doit être contrôlée. En raison de leurs grandes dimensions, l'espace additionnel nécessaire pour l'installation de ces filtres peut constituer une contrainte supplémentaire, en particulier puisqu'il faut installer des brûleurs de suie pour la régénération. Enfin, les filtres à particules diesel sont encore relativement rares à bord des navires de mer par rapport au secteur automobile ; de plus, des études récentes ont montré que seuls des essais à court terme avaient été réalisés et que les applications maritimes de cette technologie étaient donc encore en phase expérimentale.

⁶¹ Hulda Winnes *et al.*, NO_x controls for shipping in EU Seas. Transport and Environment, Report No. U5552 (Stockholm, Institutet för Vatten-och Luftvardsforskning, 2016).

⁶² Incentive Partners et Litehauz, *Economic Impact Assessment*.

⁶³ Rouil, ECAMED.

⁶⁴ Papadimitriou, *Best available techniques*.

Filtres à manches

64. Les filtres à manches sont des filtres très efficaces qui sont utilisés depuis peu dans le cadre d'un petit nombre de projets pilotes dans le secteur des transports maritimes. L'utilisation de filtres à manches a permis d'obtenir d'importantes réductions (supérieures à 99 %) des émissions de particules et de carbone noir⁶⁵. En général, pour garantir l'efficacité et la longévité du filtre à manches, les gaz d'échappement doivent être désulfurés avant de pénétrer dans le filtre. Par conséquent, les émissions de SO_x peuvent également être considérablement réduites lorsqu'un agent réactif, tel que le bicarbonate de sodium, est injecté dans le filtre à manches. Enfin, il est également possible de réduire les émissions de NO_x en utilisant des manches filtrantes catalytiques, avec injection d'urée en amont, ce qui pourrait toutefois augmenter les émissions de NH₃ par glissement.

65. Les principaux avantages de cette technologie sont sa compatibilité avec les techniques DeSO_x et DeNO_x, aux fins de la conformité avec les annexes MARPOL, les faibles niveaux de consommation d'énergie supplémentaire nécessaire, la perte de charge (10-20 millibars) et les besoins en matière d'entretien plutôt faibles.

VII. Meilleures techniques disponibles au port

A. Techniques génériques de réduction des émissions

66. L'utilisation de techniques de réduction pour les navires à quai dans les zones portuaires s'est avérée efficace ; ainsi, les ports de Los Angeles et de Long Beach ont réduit leurs émissions de particules, de NO_x et de SO₂ de 81 %, 55 % et 89 %, respectivement, entre 2005 et 2013, grâce à la stratégie de réduction adoptée⁶⁶. Les meilleures techniques disponibles présentées ci-dessus pour les moteurs de propulsion permettent également de réduire les émissions dans les ports et seules quelques-unes des techniques de lavage des gaz d'échappement (c'est-à-dire des mesures secondaires) peuvent ne pas être utilisables pour des charges-moteur très faibles. En outre, les moteurs auxiliaires contribuent autant que les moteurs de propulsion principaux, voire plus, aux émissions provenant des navires à quai, et doivent donc également être équipés de systèmes de lavage des gaz d'échappement.

67. Pour limiter efficacement la dégradation de la qualité de l'air dans les zones portuaires, il est également possible d'optimiser le temps passé à quai et de mettre en place des systèmes d'amarrage automatisés et des pompes à terre pour les opérations de déchargement de liquides en vrac. L'utilisation de systèmes d'amarrage automatisés a entraîné des réductions des émissions annuelles de NO_x équivalentes à celles de 5 000 voitures à moteur diesel à Helsinki⁶⁷ et permis d'économiser du combustible et de faire baisser les émissions de CO₂ grâce à une diminution du temps passé à quai. Une autre étude faisait état de réductions des émissions annuelles de 3,6 %, de 11,2 %, de 3,5 % et de 3,6 % pour les NO_x, les particules, le SO₂ et le CO₂, respectivement, grâce aux systèmes d'amarrage automatisés installés dans le port d'Izmit⁶⁸. Pour le chargement et le déchargement de liquides volatils en vrac, les systèmes de récupération des vapeurs permettent de réduire les émissions fugitives de COV de près de 99 %⁶⁹.

⁶⁵ LAB, DeepBlueLAB – Bag particle filters. Communication individuelle (2020).

⁶⁶ OMI, « Study of emission control and energy efficiency measures for ships in the port area », document MEPC 68/INF.16.

⁶⁷ Cavotec, « Automated mooring substantially reduces harmful emissions in Helsinki city centre » (19 juillet 2021). Disponible à l'adresse suivante : www.mynewsdesk.com/cavotec/pressreleases/automated-mooring-substantially-reduces-harmful-emissions-in-helsinki-city-centre-3116249.

⁶⁸ Alper Seyhan, Cenk Ay et Cengiz Deniz, « Evaluating the emission reduction efficiency of automatic mooring system and cold ironing: the case of a port in Izmit Bay », *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, vol. 15, n° 2 (2023), p. 227 à 245.

⁶⁹ Winnes, « NO_x controls for shipping in EU Seas ».

B. Systèmes d'alimentation électrique à terre et flottants

68. L'alimentation électrique à quai consiste à raccorder les navires au réseau électrique terrestre⁷⁰, de façon que leurs moteurs principaux et auxiliaires puissent être arrêtés. Par conséquent, comme pour la plupart des techniques d'électrification, cette technique est efficace lorsque la production d'électricité est plus propre que la combustion de combustibles dans les moteurs de navires. En outre, lorsque l'électricité est produite à partir d'énergies renouvelables ou d'une centrale nucléaire, cette technique fournit une énergie pratiquement sans émissions de gaz d'échappement (même si cette affirmation est fautive si l'on considère l'ensemble de l'analyse du cycle de vie), ce qui est d'un grand intérêt pour le secteur, qui est en cours de décarbonisation. Cette technique est particulièrement intéressante et importante pour les aspects relatifs à la santé, les quais étant souvent proches de zones fortement peuplées.

69. Dans les régions où la production d'électricité à partir de centrales électriques est dûment réglementée, la mise en place d'une alimentation électrique à quai a permis de réduire les émissions de NO_x, de SO₂, de particules et de COV de près de 95 %⁷¹. Ainsi, la Chine a décidé, pour tous les navires à quai dans les terminaux chinois, de remplacer les combustibles par du diesel marin dont la teneur en soufre est de 0,5 % en masse et qui est brûlé dans les moteurs auxiliaires, et de recourir à l'alimentation électrique à quai : 65,5 % de l'électricité est produite par des centrales électriques équipées de technologies de réduction et brûlant du charbon désulfuré, l'électricité restante étant produite grâce aux énergies renouvelables ou à l'énergie nucléaire. Cette expérience a entraîné des réductions d'émissions de 81 % pour le SO₂, de 97 % pour les NO_x, de 77 % pour les particules et de 22 % pour le CO₂⁷². Pour ce qui est de la neutralité carbone, selon les estimations, la mise en œuvre de l'alimentation à quai en Europe (l'Union européenne travaille à l'établissement d'un système de réglementation qui rendra l'alimentation électrique à quai obligatoire) réduit les émissions de CO₂ dues aux transports maritimes de 39 %, tandis qu'au niveau local, on observe des réductions d'émissions allant de 54 % à 99 % (99 % à Oslo, probablement en raison de la très faible empreinte carbone de l'électricité)⁷³.

70. Plusieurs problèmes peuvent entraver l'installation de systèmes d'alimentation électrique à quai : fréquence du réseau, tension utilisée à bord, charge dynamique ou statique de l'alimentation, mise à la terre, nombre de points de connexion, configuration du poste d'amarrage, potentiel de modernisation des navires existants et coût de l'électricité. Toutefois, il faut tenir compte du fait que l'alimentation électrique à quai présente également l'avantage de réduire le bruit et les vibrations des navires dans les ports et, ainsi, d'encourager le passage à des batteries électriques ou hybrides. Les porte-conteneurs, les navires frigorifiques, les navires de croisière et les ferries sont les meilleurs candidats pour l'alimentation électrique à quai, car ils assurent des services réguliers de type navires de ligne et ont besoin de quantités importantes d'électricité lorsqu'ils sont à quai.

71. Les systèmes d'alimentation électrique à quai devraient comprendre une connexion au réseau électrique, des chambres d'appareillage électrique souterraines, un convertisseur de puissance, ainsi qu'un espace approprié pour le dispositif, des prises de courant, des équipements de câblage et de synchronisation, ainsi que des infrastructures de quai. Toutes ces infrastructures nécessitent des investissements qui, selon les estimations, sont compris entre 1 et 15 millions de dollars par poste d'amarrage (entre 0,9 et 14 millions d'euros au taux de change du milieu de l'année 2022), selon plusieurs études réalisées dans des ports des États-Unis

⁷⁰ Agence européenne pour la sécurité maritime, *Shore-Side Electricity (SSE): Guidance to Port Authorities and Administration* (s. l., 2022). Disponible à l'adresse suivante : www.emsa.europa.eu/electrification/sse.html.

⁷¹ LAB, DeepBlueLAB – Bag particle filters.

⁷² Cheng Jiuling et Li Haibo, « Analysis of Environmental Benefits of Shore Power for Preventing and Controlling Air Pollution Caused by Vessels at Berth », *E3S Web of Conferences*, vol. 53, art. n° 04036 (2018).

⁷³ OMI, « Reduction of GHG emissions from ships. Vessel shore power installation worldwide », document MEPC 73/INF.29/Rev.1.

d'Amérique et du Canada⁷⁴. La planification et la conception de l'alimentation électrique à quai, avant même la construction du port, permettent de réduire ces investissements. Pour le propriétaire, les coûts d'une modernisation des navires visant à leur permettre d'être connectés à un réseau électrique à quai sont compris entre 0,4 million et 2 millions de dollars (entre 0,37 et 1,87 million d'euros au taux de change de mi-2022), selon la conception du navire. Ces coûts devraient diminuer au fur et à mesure de l'adoption de cette technologie⁷⁵. En outre, de nos jours, la plupart des navires neufs ont déjà été conçus pour être raccordés à quai. Voir également l'étude de la Commission européenne sur l'alimentation électrique à quai⁷⁶.

72. Les systèmes flottants d'alimentation électrique consistent à fournir de l'énergie électrique à l'aide d'un moteur externe au navire, qui satisfait à des normes d'émission plus rigoureuses que les moteurs de navire. En général, le GNL ou d'autres combustibles de substitution, tels que les biocarburants, sont utilisés dans les moteurs des barges d'alimentation électrique. En outre, cette technique est avantageuse de par sa facilité d'utilisation et sa grande mobilité d'un quai à l'autre, et parce qu'elle nécessite moins d'investissements dans les infrastructures que l'alimentation électrique à quai. Pour les navires, les contraintes sont les mêmes que dans le cas des systèmes d'alimentation à quai. Il est possible d'obtenir différents types de réductions d'émissions, en fonction de la barge d'alimentation électrique et des conditions de fonctionnement. Dans le cas des moteurs à cycle Otto alimentés au GNL, les réductions d'émissions pourraient être de près de 80 % pour les NO_x, de 98 % pour les particules, de près de 100 % pour le SO₂ et de 30 % pour le CO₂⁷⁷. Le coût de cette technologie a été estimé à environ 0,2 million de dollars (0,19 million d'euros au taux de change de mi-2022) pour la modernisation du navire et à environ 1 000 dollars par heure (c'est-à-dire 933 euros au taux de change de mi-2022) pour les opérations du système flottant d'alimentation électrique.

C. Techniques d'épuration des gaz d'échappement à terre ou à partir de barges

73. Une autre façon de réduire les émissions provenant des navires au port consiste à épurer les gaz d'échappement à la sortie du mât de dégazage, en reliant directement ce dernier aux systèmes d'épuration à quai. Ces systèmes ont besoin d'une alimentation électrique pour fonctionner et génèrent eux-mêmes des gaz d'échappement qui peuvent être épurés en même temps que les gaz d'échappement du navire. Ils comprennent généralement un laveur par voie humide associé à une réduction catalytique sélective et visent à atteindre des niveaux d'émission semblables à ceux des systèmes d'alimentation électrique à quai. Cette technique permet de réduire les émissions de particules de 98 % et celles de NO_x de 95 %⁷⁸.

74. Le principal avantage de cette technique est qu'elle ne nécessite aucune modification du navire ; de plus, le système d'épuration peut fonctionner soit à l'ancre, soit sur une barge, soit à quai. Cependant, cette technique fait face à certaines contraintes, telles que la configuration des ports et des quais, l'espace nécessaire aux bornes et les interférences possibles avec les opérations de chargement et de déchargement. Il est estimé qu'elle n'a pas encore atteint le stade de la maturité et qu'elle doit être développée davantage afin de prouver son efficacité pour différentes charges d'échappement. Actuellement, il existe peu d'informations relatives à ses coûts. Dans un cas, le fabricant a estimé que le coût d'une unité serait d'environ 8 millions de dollars (7,5 millions d'euros au taux de change de mi-2022) lorsqu'un grand nombre de systèmes étaient installés⁷⁹.

⁷⁴ Projet GloMEEP du Fonds pour l'environnement mondial (FEM), du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) et de l'OMI et Association internationale des ports (AIPH), *Port Emissions Toolkit, Guide No.2 – Development of Port Emissions Reduction Strategies* (s. n., 2018).

⁷⁵ Thalís Zis, « Prospects of cold ironing as an emissions reduction option », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 119 (janvier 2019), p. 82 à 95.

⁷⁶ Observatoire européen des carburants alternatifs (ports et infrastructures), « Ports maritimes ». Disponible à l'adresse suivante : <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/maritime-sea/ports-and-infrastructure>.

⁷⁷ OMI, « Study of emission control ».

⁷⁸ G. Tan Weiwei *et al.*, « Application of the DOC-DPF integrated exhaust particle treatment device for new diesel marine engines », *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*, vol. 358, n° 4 (2019).

⁷⁹ GEF, *Port Emissions Toolkit*.

VIII. Conclusions et recommandations

75. Dans les paragraphes ci-dessus, plusieurs techniques de réduction des émissions provenant des navires, tant pendant la navigation qu'à quai, ont été décrites, en tenant compte des contraintes d'application, des avantages et des inconvénients, de l'efficacité des réductions d'émissions, ainsi que de l'estimation des dépenses d'investissement et d'exploitation. Certaines de ces techniques sont au point, tandis que d'autres doivent continuer d'être développées. De plus, il est évident que toutes ces techniques ne sont pas adaptées et applicables à tous les types de navire et à tous les tonnages.

76. Il convient d'établir une réglementation à l'échelle internationale, principalement dans le cadre de la Convention MARPOL. Certains aspects peuvent aussi être abordés aux niveaux local, national ou régional. Dans certaines zones de la région de la Commission économique pour l'Europe (par exemple, la sous-région de l'Union européenne), des réglementations visant à contrôler la qualité des combustibles pour moteurs marins ont été adoptées et, à l'échelle locale, des projets d'alimentation électrique à quai sont exécutés dans certains ports. Les mesures mises en œuvre à l'échelle locale, notamment en ce qui concerne la qualité et le type de combustibles et les infrastructures portuaires, sont d'une importance capitale pour l'amélioration de la qualité de l'air dans les villes concernées.

77. Les techniques innovantes en cours de développement sont susceptibles de contribuer à réduire davantage les émissions une fois qu'elles seront passées de la phase expérimentale à la phase d'application à grande échelle.

78. Il est recommandé aux experts des Parties de prendre dûment en considération les techniques décrites dans le présent document d'orientation lors de leur participation à de nouvelles discussions et à l'élaboration de règles internationales (par exemple dans le cadre de la Convention MARPOL et de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer) et de l'établissement des plans nationaux de réduction des émissions et des processus de décarbonisation, et d'envisager également des synergies pour faire face simultanément à la pollution atmosphérique, aux changements climatiques et au défi que représente la décarbonisation.
