

ACTIVITÉ T.3.3.

Scénarios d'atténuations

Livrable T.3.3.1

Rapport sur les scénarios locaux

Partenaire Responsable: AtmoSud

Sommaire

1. PORTS DE TOULON ET DE NICE (ATMOSUD).....	3
1.1. Méthodologie	3
1.1.1. Présentation des scenarii	3
1.1.2. Description des émissions	6
1.2. Résultats des scenarii.....	9
1.2.1. Cartes de concentrations moyennes.....	10
1.2.2. Box-plots des concentrations en zone terrestre	20
1.2.3. Bilan statistique	24
1.3. Conclusion	26
2. PORTS D’AJACCIO ET BASTIA (QUALIT’AIR CORSE).....	28
2.1. Méthodologie	28
2.1.1. Présentation des scénarios de base des ports d’Ajaccio et Bastia.....	28
2.1.2. Emissions des scenarii.....	34
2.2. Résultats des scenarii - Modélisation	47
2.2.1. Cartes de modélisation de la pollution pour les différents scenarii	50
2.2.2. Box-plots des concentrations en zone terrestre	66
2.2.3. Bilan statistique	70
2.3. Conclusion	71
3. PORT DE GÊNES (ARPA LIGURIA).....	74
3.1. Présentation des scénarios.....	74
3.1.1. Facteurs d’émission.....	76
3.2. Résultats.....	78
3.2.1. Cartes des concentrations moyennes	78
3.2.2. Statistiques descriptives	85
3.3. Conclusion	94
4. PORT DE LIVOURNE (ARPA TOSCANA).....	96
4.1. Présentation des scénarios de calcul.....	96
4.1.1. Scénarios hypothétiques	98
4.1.2. Scenarios calculés	101
4.2. Calcul	102
4.2.1. Scénario de Base	105
4.2.2. Scénario 1- Cold Ironing	112
4.2.3. Scénario 2- GNL	117
4.2.4. Scénario 3- Hydrogène.....	121
4.2.5. Scénario 4- SECA	125
4.3. Conclusion	129

1. PORTS DE TOULON ET DE NICE (ATMOSUD)

Afin de réduire les niveaux de pollution dans les villes-ports de Toulon, la Seyne-Brégaillon et Nice, des solutions de réduction des émissions maritimes ont été identifiées en lien avec les autorités locales. L'objectif de ce livrable est d'estimer l'efficacité de ces mesures de réduction des émissions, par le biais de la modélisation. Des simulations sont effectuées en faisant varier les émissions, de manière à reproduire l'effet des différents scénarii. Le modèle utilisé pour ce travail est le modèle PMSS (Parallel Micro-SWIFT-SPRAY) développé par Aria Technologies. Le fonctionnement de ce modèle, ses performances dans le cadre de cette application, et les scénarii de base qui servent de référence par rapport aux scénarii d'atténuation investigués dans ce rapport ont été présentés dans le livrable T2.3.1 – *Rapport sur les résultats des simulations de modélisation du projet*.

Dans un premier temps, les différents scénarii investigués sont présentés. Les scénarii étant implémentés en faisant varier les émissions maritimes fournies au modèle en données d'entrée, ces émissions sont décrites pour les différents scénarii. Les résultats des scénarii de réduction sont ensuite investigués par comparaison aux scénarii de référence, à l'appui de cartes, mais aussi de l'analyse des concentrations en zone terrestre, là où se situent les populations riveraines.

1.1. Méthodologie

1.1.1. Présentation des scénarii

Les solutions de réduction des émissions investiguées dans ce rapport sont principalement le scénario CENAQ (Connection Electrique des Navires à Quai) et les mesures de réduction de la teneur en soufre des carburants utilisés par les navires. Aucun scénario de fonctionnement au GNL n'est implémenté, aucune compagnie maritime cliente des ports de Toulon et Nice n'étant prête à passer au GNL. Les concentrations modélisées sont les concentrations en NO_x, SO_x et PM_{2.5}. Les simulations sont des simulations mensuelles, dont les dates sont rappelées dans le **Tableau 1**. Les résultats des scénarii sont comparés aux simulations de référence, présentés dans le livrable T2.3.1 – *Rapport sur les résultats des simulations de modélisation du projet*.

Tableau 1 : Périodes de simulation pour les ports de Nice et Toulon-la Seyne.

Port	Périodes modélisées
Nice	- Été : du 02/08/2019 au 02/09/2019 - Hiver : du 01/12/2019 au 31/12/2019
Toulon – la Seyne	- Hiver : du 15/02/2021 au 15/03/2021 - Été : du 02/08/2021 au 02/09/2021

1.1.1.1. Scénario CENAQ

1.1.1.1.1. Contexte de mise en place

Les navires raccordés ne produisent aucune émission durant la période où ils sont branchés. Dans la rade de Toulon-la Seyne, cette solution est en cours de mise en œuvre pour les ferries au niveau des trois quais du terminal croisière, à savoir le quai de la Corse, le quai Fournel et le quai Minerve. Le raccordement électrique d'un ferry nécessitant une heure pour la mise en route du branchement puis une heure pour le débranchement, seules les escales de durée supérieure à 2h30 y sont éligibles. A ce jour, la compagnie maritime qui dessert le port de Toulon a équipé quatre de ses huit navires pour le CENAQ. Dans cette étude, on choisit d'évaluer l'efficacité d'un scénario où la totalité des ferries peut se raccorder à quai. Seul le

port de Toulon est concerné, aucune électrification des quais n'étant actuellement envisagée au port de la Seyne-Brégaillon.

A Nice, il n'est pas prévu de mettre en place un raccordement électrique pour les ferries, 99% des escales de ferries étant de durée inférieure à 2h30. Les autorités portuaires de Nice ont opté depuis 2018 pour une mise en place progressive du CENAQ à destination de tous les navires sauf les ferries. Les navires concernés sont essentiellement les navires de transport de marchandises, les petits navires de croisière ainsi que les navires de grande plaisance (yacht >25m).

Dans la méthodologie de calcul actuelle de l'inventaire, les émissions des navires de plaisance sont considérées comme négligeables, et il n'est pas possible de calculer ces émissions sans avoir recours à de fortes hypothèses. En particulier, les horaires de départ et arrivée des yachts n'étant pas comprises dans les données fournies par les autorités portuaires, il n'est pas possible de déterminer la durée de présence effective des yachts. Quand bien même cette durée serait connue, il faudrait encore connaître le taux de fonctionnement des moteurs auxiliaires à quai, qui varie beaucoup selon l'usage du yacht. En hiver, un yacht en hibernage coupera ses moteurs durant la quasi-totalité de l'escale, tandis qu'en été, il pourra laisser tourner ses moteurs s'il ne s'arrête que pour une courte durée. Le choix réalisé dans cette étude est de conserver l'hypothèse habituelle, qui consiste à considérer les émissions des yachts comme négligeables par rapport aux reste des émissions maritimes. Le scénario CENAQ est donc appliqué aux émissions de tous les navires, à l'exception des ferries et des yachts. Comme pour les ferries à Toulon, on suppose des temps de mise en route du branchement et de débranchement d'une heure pour chaque type de navire.

1.1.1.1.2. Analyse des escales éligibles au CENAQ

Les durées d'escale calculées à partir des données fournies par les capitaineries de Nice et Toulon-la Seyne sont présentées en **Figure 1** sous forme d'histogrammes, en distinguant les ferries des autres types de navire, sans tenir compte des navires de plaisance pour lesquels on ne dispose pas de données suffisamment précises. Chaque colonne de ces histogrammes représente une tranche de temps de 2h30. A Toulon, on observe en été que 81% des escales sont de durée inférieure à 2h30, la majorité de ces escales étant des escales de ferries. Au total, 81% des escales de ferries en été sont de durée inférieure à 2h30, ce qui signifie que seulement 15% du total des escales sont éligibles au CENAQ à Toulon en été.

A contrario, on constate en hiver que les escales des ferries sont moins nombreuses, et plus prolongées. La durée d'escale moyenne des ferries sur la période considérée est de 14h. La somme de ces durées d'escale s'élève à 758 heures, contre 388 heures en été. A l'exception d'une seule escale, dont la durée est inférieure à 2h30, la totalité des escales de ferries en hiver est éligible au CENAQ.

A Nice, où il est prévu, à l'inverse de Toulon, d'aller vers une électrification de tous les navires autres que les ferries, on constate qu'aucune escale de ces navires n'est de durée inférieure à 2h30. Toutes les escales des navires autres que les ferries et navires de plaisance sont de durée supérieure à 2h30, donc éligibles au CENAQ. Toutefois, la part du trafic représentée par ces escales est très variable selon la saison considérée. En été, 88% des escales sont des escales de ferries, contre 42% en hiver. La durée d'escale moyenne des ferries est de 1h30 en été et 7h en hiver, contre 22h en été et 142h en hiver pour les autres types de navires. En été, la somme des durées d'escale des ferries représente 33% de la somme des durées de toutes les escales, contre seulement 3% en hiver.

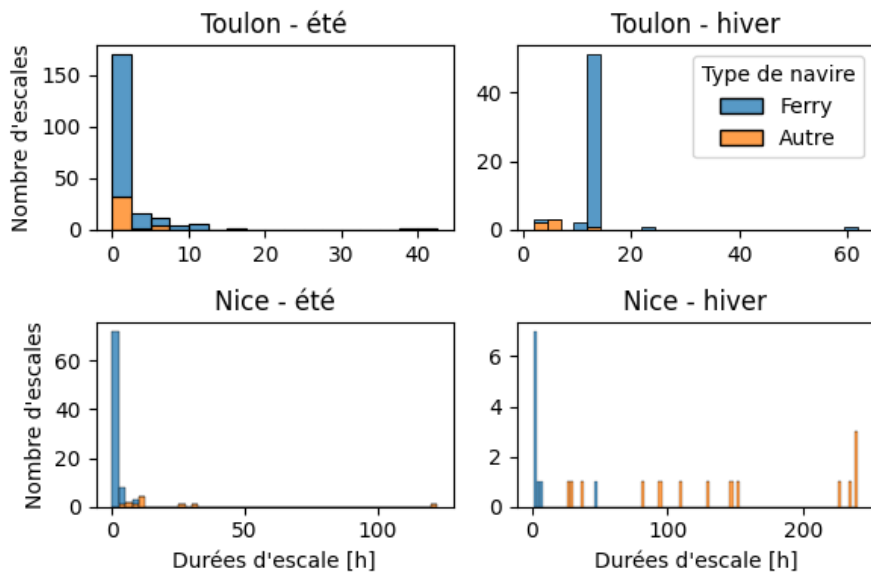


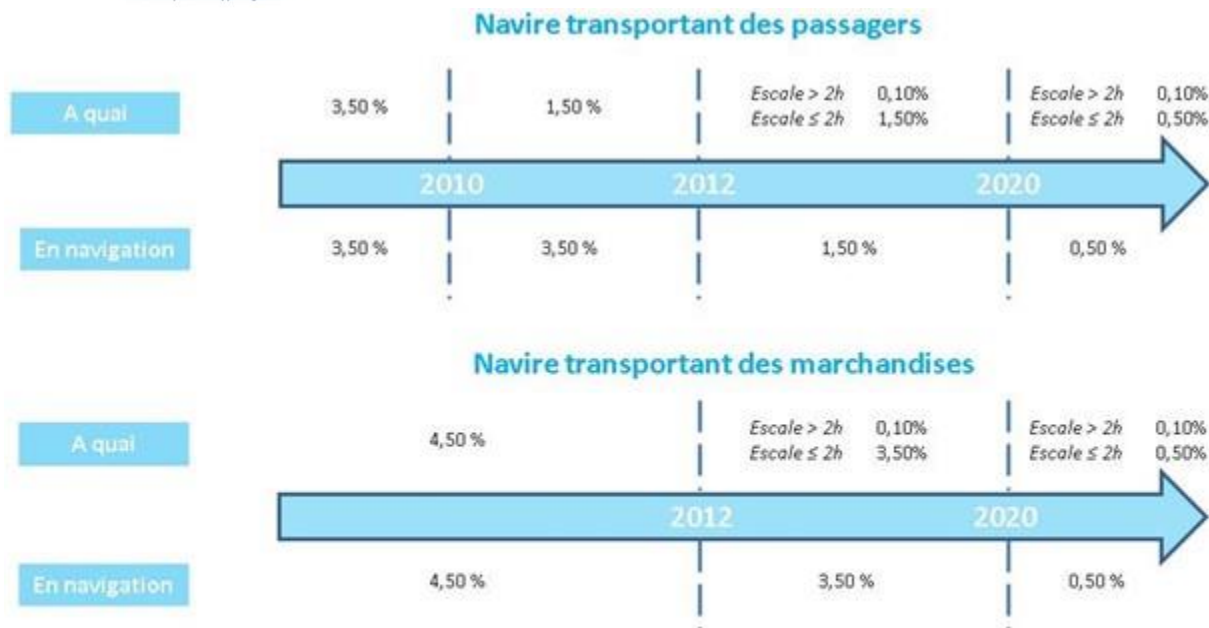
Figure 1 : Histogrammes des durées d'escales dans les ports de Toulon et Nice par tranche de 2h30 durant les deux saisons modélisées.

1.1.1.2. Scenarii « législation »

La législation sur la teneur en soufre des carburants a évolué ces dernières années. Comme présenté dans le diagramme de la Figure 2, cette réglementation diffère selon l'affectation du navire (transport de marchandises ou de passagers) et la durée de l'escale. En phase à quai, depuis 2012, tous les navires faisant escale plus de deux heures doivent utiliser un carburant dont la teneur en soufre ne dépasse pas 0.1%. Jusqu'en 2020, les navires faisant escale moins de deux heures pouvaient utiliser un carburant dont la teneur en soufre pouvait s'élever jusqu'à 1.5% pour les navires transportant des passagers, et 3.5% pour les navires transportant des marchandises. Après 2020, cette teneur en soufre maximale autorisée pour les navires faisant escale moins de deux heures a été abaissée à 0.5%, quel que soit le type de navire.

Dans le cadre de la convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (convention MARPOL), cette réglementation va de nouveau évoluer avec la mise en place d'une zone SECA (*Sulphur Emission Control Area*) en Méditerranée. Dans cette zone, les navires auront l'obligation d'utiliser un carburant dont la teneur en soufre n'excède pas 0.1%, quelle que soit leur localisation. Cette zone SECA entrera en vigueur à partir de 2024, pour une mise en œuvre effective en 2025, selon un délai légal incompressible prévu par la convention.

Les simulations effectuées dans cette étude visent à évaluer l'impact de ces différents changements de législation. D'après les données de durée d'escale présentées en Figure 1, on constate que ces changements concernent essentiellement la saison estivale. A Toulon, il n'y a, sur la période hivernale, qu'une seule escale de durée inférieure ou égale à deux heures, donc seulement une escale concernée. A Nice, la somme des durées des escales de durée inférieure à deux heures s'élève à 7h sur la période hivernale, soit à peine 0.34% de la somme des durées de toutes les escales sur ladite période. Les scenarii portant sur la teneur en soufre des carburants sont donc exclusivement étudiés sur la saison estivale dans les ports de Toulon et Nice. De même, aucun scenario de ce type n'est modélisé dans le port de la Seyne-Brégaillon, où la quasi-totalité des escales sont de durée supérieure à deux heures.



Exception pour les bassins Est du GPMM:

Depuis 2010, les navires à passagers ont l'obligation d'utiliser un carburant à la teneur en soufre inférieure à 0,1% à quai, et inférieure à 1,5% en navigation.

Figure 2 : Règlementation sur la teneur en soufre des fuels.

1.1.2. Description des émissions

1.1.2.1. Facteurs d'émission

Les émissions des navires sont calculées selon les préconisations du guide méthodologique pour l'élaboration des inventaires du LCSQA¹ (guide PCIT2²). Ces émissions dépendent de la consommation énergétique des navires, selon la formule :

$$E_i = C F_i$$

où E_i est l'émission [kg] du polluant i , C est la consommation énergétique [J] et F_i est le facteur d'émission propre au polluant i [kg/J]. La consommation énergétique est donnée par la relation :

$$C = G p$$

où G est la consommation de carburant [g de fuel] et p est le pouvoir calorifique inférieur du carburant utilisé [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. Elle varie suivant la charge du moteur et donc suivant la phase de circulation considérée, qui peut être une phase « trajet » (navire loin du port), une phase « manœuvre » (navire dans le port) ou phase à quai (navire en stationnement). La phase à quai est la phase qui consomme le moins de carburant par unité de temps, mais elle représente une durée d'émission bien plus importante que la phase de manœuvre, c'est pourquoi seules les émissions à quai sont prises en compte dans cette modélisation. Les émissions des phases de manœuvre sont plus intenses, mais concentrées sur

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'Energie et du climat, Bureau de la Qualité de l'air, version n°2, juin 2018

des périodes de temps très courtes, de l'ordre de quelques minutes. Ainsi elles peuvent constituer une gêne ponctuelle pour les riverains, mais à l'échelle du mois, leur impact en terme de qualité de l'air reste faible par rapport aux émissions de la phase à quai, qui s'étendent sur plusieurs heures.

Les facteurs d'émission en NO_x, SO_x et PM_{2.5}, pour les différents carburants utilisés dans ce travail sont résumés dans le **Tableau 2**. Les fuels lourds, dont la teneur en soufre s'élève à 3.5%, 1.5% et 0.5% sont regroupés dans la catégorie *Bunker Fuel Oil* (BFO). Pour un carburant dont la teneur en soufre s'élève à 0.1%, on parlera plutôt de diesel marin, ou *Marine Diesel Oil* (MDO). Le BFO et le MDO sont des carburants de viscosité et de composition différentes, c'est pourquoi ils diffèrent non seulement par leurs émissions en SO_x, mais également en NO_x et PM.

Tableau 2 : Facteurs d'émission en NO_x, SO_x et PM_{2.5} [g/GJ] extraits de la base de données OMINEA du CITEPA³.

FE	NO _x	SO _x	PM _{2.5}
BFO 3.5%	1982.50	1360.0	147.25
BFO 1.5%		470.0	
BFO 0.5%		265.0	
MDO	1842.72	47.0	33.45

1.1.2.2. Emissions des scenarii

Les différents scenarii investigués dans ce travail sont regroupés dans le **Tableau 3**. Comme indiqué dans la section précédente, aucun scenario n'est modélisé pour le port de la Seyne-Brégaillon, qui n'entre dans le champ d'aucune des mesures de réduction des émissions présentées. Les scenarios sont définis de la manière suivante :

- BFO 1.5% : scenario correspondant à la législation avant 2020, avec pour les escales de durée inférieure à deux heures, une teneur en soufre de 1.5% pour les navires transportant des passagers, 3.5% pour les navires transportant des marchandises.
- BFO 0.5% : scenario correspondant à la législation après 2020, avec pour les escales de durée inférieure à deux heures, une teneur en soufre de 0.5%, pour tous les navires.
- MDO : scenario correspondant à la mise en place de la zone SECA, c'est-à-dire à l'utilisation généralisée d'un carburant dont la teneur en soufre est réduite à 0.1%.

Tableau 3 : Liste des scenarii modélisés. Le scenario de référence est le scenario "MDO" pour le port de Toulon, le scenario "BFO 1.5%" pour le port de Nice, (cases en orange clair)

	BFO 1.5%	BFO 0.5%	MDO	CENAQ	MDO + CENAQ
Toulon été	X	X	X		X
Toulon hiver			X		X
Nice été	X	X	X	X	X
Nice hiver	X			X	

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

Les scénarii sont comparés aux simulations de référence, en orange dans le **Tableau 3**. Ces simulations ont été évaluées par comparaison à des données mesurées dans le livrable T2.3.1 – *Rapport sur les résultats des simulations de modélisation du projet*. Les simulations de référence du port de Nice se déroulant en 2019, le scénario de référence pour Nice est le scénario BFO 1.5%. Les simulations de référence du port de Toulon se déroulent en 2021, mais le port de Toulon est avancé sur le calendrier réglementaire, puisqu’une charte spécifique à la rade de Toulon impose aux navires d’utiliser un carburant dont la teneur en soufre n’excède pas 0.1% depuis la saison estivale 2020⁴. Ce n’est donc pas le scénario BFO 0.5% mais le scénario MDO qui est le scénario de référence pour le port de Toulon. Les scénarii BFO 1.5% et BFO 0.5% permettent de quantifier ce que la mise en place de cette charte a permis de gagner.

1.1.2.3. Emissions par port

Les scénarii BFO 1.5%, BFO 0.5% et MDO sont implémentés en calculant les émissions à l’aide des facteurs d’émission listés dans le **Tableau 2**. Le scénario CENAQ est implémenté en calculant les émissions d’après les facteurs d’émission du scénario de référence, puis en neutralisant totalement les émissions des navires qui se connectent une heure après leur arrivée, jusqu’à une heure avant leur départ.

Les émissions annuelles calculées pour les différents scénarii dans les ports de Toulon et Nice sont présentés en **Figure 3** et en **Figure 4** respectivement. Les scénarii portant sur la nature du carburant utilisé pour les escales durée inférieure à 2 heures, i.e. les scénarii BFO 1.5%, BFO 0.5% et MDO, ont un impact nul à faible sur les émissions en NO_x, donc pas ou peu d’effet sur le total des émissions, qui sont constituées de NO_x essentiellement. L’impact de ces scénarii s’observe sur les émissions en SO_x, mais également sur les émissions en PM, dans le cas du passage du BFO au MDO. Le scénario CENAQ permet de réduire drastiquement les émissions annuelles dans le port de Toulon. A Nice, on peut noter que le scénario CENAQ a autant

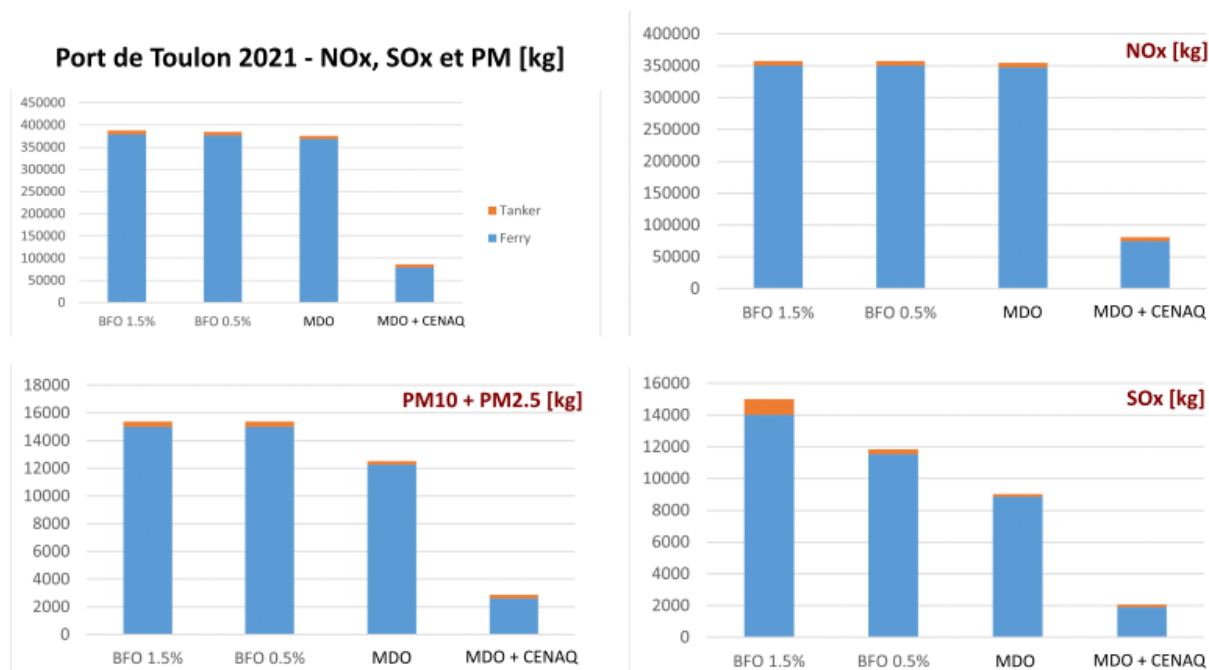


Figure 3 : Somme des émissions en NO_x, SO_x et PM et émissions par espèce calculées pour le port de Toulon pour les différents scénarii en 2021.

⁴ <https://metropolepm.fr/actualites/toulon-nouvelle-escale-zero-fumee>

d'impact sur les émissions en PM et moins d'impact sur les émissions en SO_x que le scénario MDO, du fait des émissions des ferries qui représentent une large part des émissions totales, mais ne sont pas concernées par le CENAQ. Les remorqueurs contribuent également de manière importante au bilan des émissions, en raison d'un surcroît d'activité en 2019 dû à des travaux.

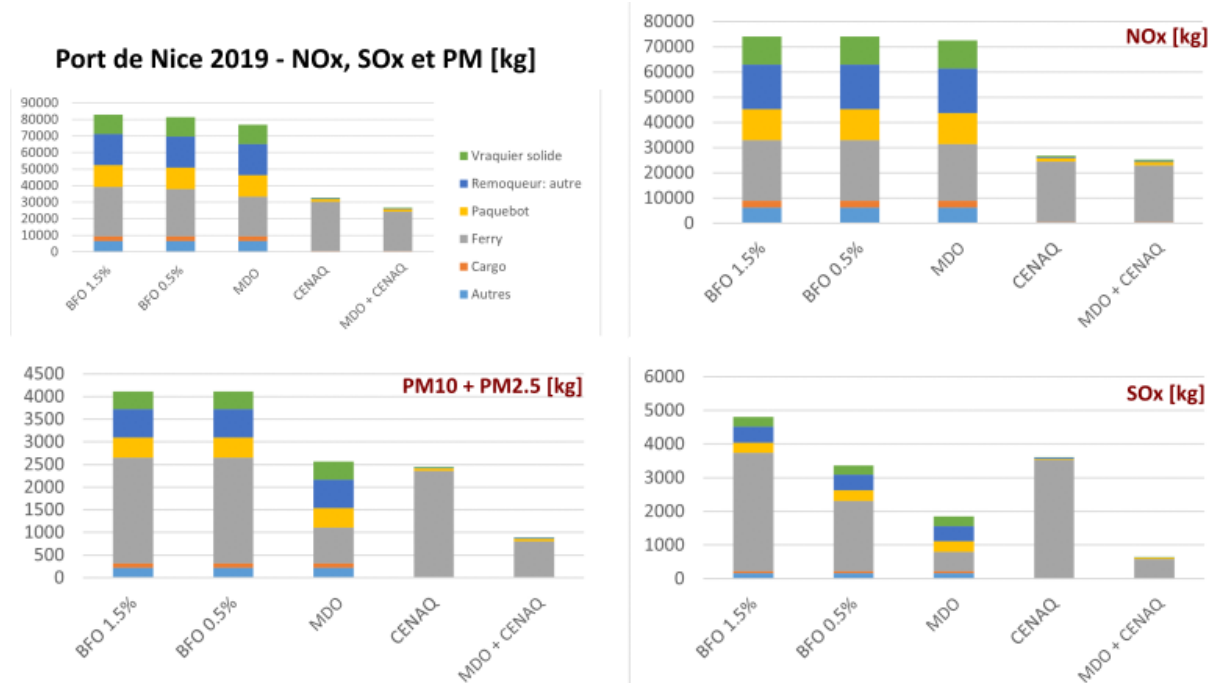


Figure 4 : Somme des émissions en NO_x, SO_x et PM et émissions par espèce calculées pour le port de Nice pour les différents scenarii en 2019.

1.2. Résultats des scenarii

Le modèle utilisé pour ces simulations mensuelles est le modèle PMSS développé par Aria Technologies, qui a été décrit dans le livrable T2.3.1 – *Rapport sur les résultats des simulations de modélisation du projet*. Ce modèle permet de simuler l'évolution temporelle du champ de concentration dû aux panaches des navires. Pour les NO_x et les PM_{2.5}, il est nécessaire d'estimer en plus une concentration de fond. Cette estimation est réalisée par le biais de la station de mesures la plus proche présente sur le domaine de simulation. La concentration de fond C_i^{fond} , est ici définie comme :

$$C_i^{\text{fond}}(t) = C_i^{\text{station}}(t) - C_i^{\text{sim}}(t)$$

où t est le temps, où C_i^{station} est la concentration de l'espèce i mesurée par la station de mesures, et où C_i^{sim} est la concentration du panache simulé de l'espèce i extraite à l'emplacement de la station. Lorsque la modélisation donne $C_i^{\text{sim}} > C_i^{\text{station}}$, on fixe $C_i^{\text{fond}} = 0$.

Les simulations sont réalisées avec un pas de temps de une heure. Les concentrations de fond ont été estimées dans le livrable T2.3.1 à l'aide des mesures des stations Toulon Claret pour le domaine toulonnais et Nice Arson pour le domaine niçois. Ces concentrations correspondent au fond estimé pour les scenarii de référence, qui reproduisent la situation dans les ports de Toulon et Nice en 2021 et 2019 respectivement. Dans ce travail, la réactivité chimique étant négligée, on ne quantifie pas l'impact des variations des concentrations des panaches des

navires dans les différents scénarii sur la concentration de fond. C'est donc la même concentration de fond qui sera considérée pour tous les scénarii, celle du scénario de référence. Les moyennes des concentrations de fond estimées pour les deux saisons simulées dans les ports de Toulon et Nice sont résumées dans le **Tableau 4**.

La moyenne des champs de concentrations horaires exportés sur toute la durée des simulations permet d'obtenir un champ de concentration moyen mensuel. Ces valeurs moyennes sont analysées sous forme de cartes et sous forme de box-plots (ou « boîtes à moustaches ») des concentrations au-dessus de la terre ferme, où sont les populations exposées. Les espèces modélisées sont les NO_x, SO_x et les PM_{2.5}, mais les espèces analysées, au regard de la réglementation nationale et internationale (lignes directrices de l'OMS) sont NO₂, SO₂ et les PM_{2.5}. Comme dans le livrable T2.3.1, on suppose que le ratio SO₃/SO₂ est suffisamment faible pour faire l'approximation SO₂ ≈ SO_x. Les concentrations en NO₂ sont déduites des concentrations en NO_x en appliquant un facteur correctif, correspondant au ratio des concentrations en NO₂ et NO_x. La valeur moyenne de ce ratio, estimée au niveau des stations Toulon Claret et Nice Arson sur plusieurs mois, s'élève à 0.8.

*Tableau 4 : Concentrations de fond moyennes en μg.m⁻³ estimées aux stations Toulon Claret et Nice Arson pour les périodes de simulations indiquées dans le **Tableau 1**.*

	Toulon		Nice	
	Eté	Hiver	Eté	Hiver
PM_{2.5}	6.9	11.6	11.0	10.6
NO₂	18.6	18.9	21.4	31.3

1.2.1. Cartes de concentrations moyennes

1.2.1.1. Saison estivale

Les cartes des concentrations moyennes modélisées à Toulon pour les différents scénarii de la saison estivale sont présentées en **Figure 5**, **Figure 6** et **Figure 7** pour SO₂, NO₂ et les PM_{2.5} respectivement. Les cartes de concentration en NO₂ et PM_{2.5} présentées pour les scénarii BFO 1.5% et BFO 0.5% sont communes (scenario BFO) puisque ce sont les mêmes facteurs d'émission dans les deux cas (voir **Tableau 2**). Les cartes des différences de concentration par rapport au scénario de référence permettent de visualiser les progrès qui ont été effectués par rapport aux situations antérieures, ou les gains qui seraient permis grâce aux scénarii de réduction des émissions. La situation de référence correspond au scénario MDO, en raison de la charte en vigueur dans le port de Toulon depuis 2020. On observe que les évolutions de la réglementation sur la teneur en soufre des carburants a déjà permis de réduire significativement les concentrations en SO₂, qui se trouvent déjà aujourd'hui à un niveau faible en été. Le CENAQ permet de réduire encore ces concentrations en SO₂. Le passage du BFO au MDO et le CENAQ ont tous deux un impact modéré sur les concentrations en PM_{2.5}, la contribution des navires à ces concentrations ayant été estimé à seulement 8% dans le livrable T2.3.1, au niveau de la cabine située près du terminal ferry (voir **Tableau 5**). L'impact de ces scénarii est plus visible sur les concentrations en NO₂, pour lesquelles la contribution des navires a été estimée à 77% au niveau de la cabine. Le passage du BFO au MDO n'a que peu d'impact sur les concentrations en NO₂, les facteurs d'émission en NO₂ étant très proches pour les deux types de carburant,

mais le CENAQ permet de diminuer les concentrations en NO₂ de près de 10 µg.m⁻³ au niveau des zones les plus impactées, à l’endroit des quais du terminal ferry.

Les scenarii modélisés pour le port de Nice durant la saison estivale sont présentés en **Figure 8**, **Figure 9** et **Figure 10**. La situation de référence est le scenario BFO 1.5%. Comme dans le port de Toulon, le passage à des carburants moins chargés en soufre doit permettre de réduire les concentrations en SO₂ à des niveaux très bas. L’impact du scenario CENAQ est faible, en comparaison. Les différences de concentration en NO₂ et PM_{2.5} estimées pour ces scenarii sont au plus de 3 µg.m⁻³ et 1 µg.m⁻³ respectivement, ce qui est faible par rapport concentrations maximales modélisées, de l’ordre de 7% de ces valeurs.

Tableau 5 : Moyennes en µg.m⁻³ des concentrations mesurées par les cabines situées sur les ports de Toulon et Nice et des concentrations simulées dans le cadre des simulations de référence, extraites aux emplacements des cabines, aux temps tels que C_i^{sim} ≠ 0. Les ratios des deux moyennes donnés en pourcentages donnent la contribution des navires. Les ratios sur fond orange sont ceux pour lesquels la corrélation mesure/modèle est satisfaisante (voir livrable T2.3.1 – Rapport sur les résultats des simulations de modélisation du projet, pour plus de détails).

	Toulon		Nice	
PM _{2.5}	Eté	Hiver	Eté	Hiver
Mesures	9.44	10.18	-	-
Simulation	1.66	1.95	1.75	0.31
% Sim/Mes	8.0 %	19.1 %	-	-
NO ₂	Eté	Hiver	Eté	Hiver
Mesures	45.29	32.19	32.92	24.11
Simulation	35.37	95.95	41.43	14.67
% Sim/Mes	77.1 %	298.1 %	125.9 %	60.9 %
SO ₂	Eté	Hiver	Eté	Hiver
Mesures	2.84	1.78	4.53	0.31
Simulation	1.10	3.05	5.26	0.47
% Sim/Mes	38.6 %	171.6 %	116.0 %	150.9 %

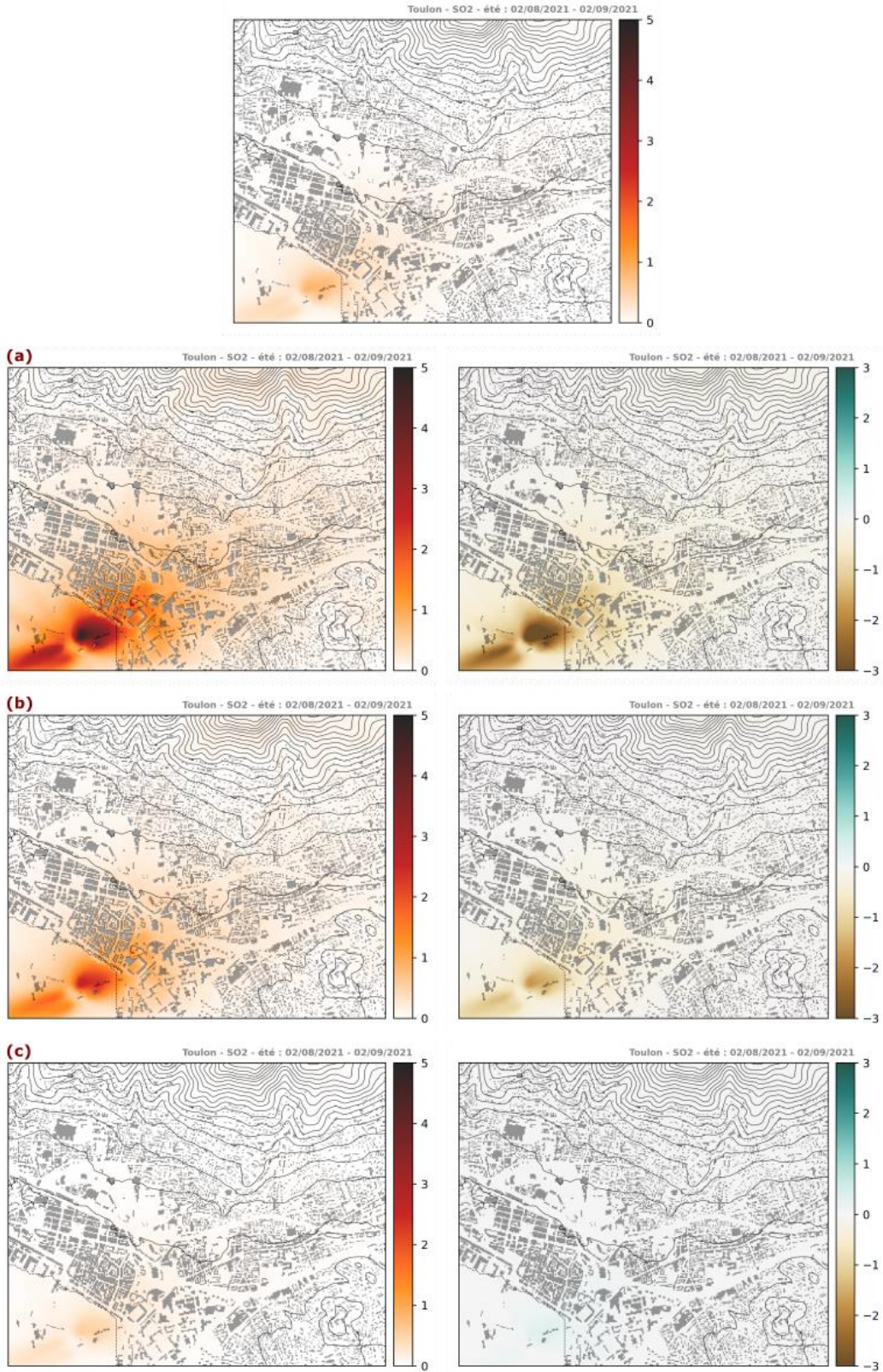


Figure 5 : Cartes des concentrations moyennes en SO_2 à Toulon en été pour le scenario de référence (première ligne) et pour les scenarii (a) BFO 1.5%, (b) BFO 0.5%, (c) MDO + CENAQ. Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence. Les concentrations sont en $\mu\text{g.m}^{-3}$.

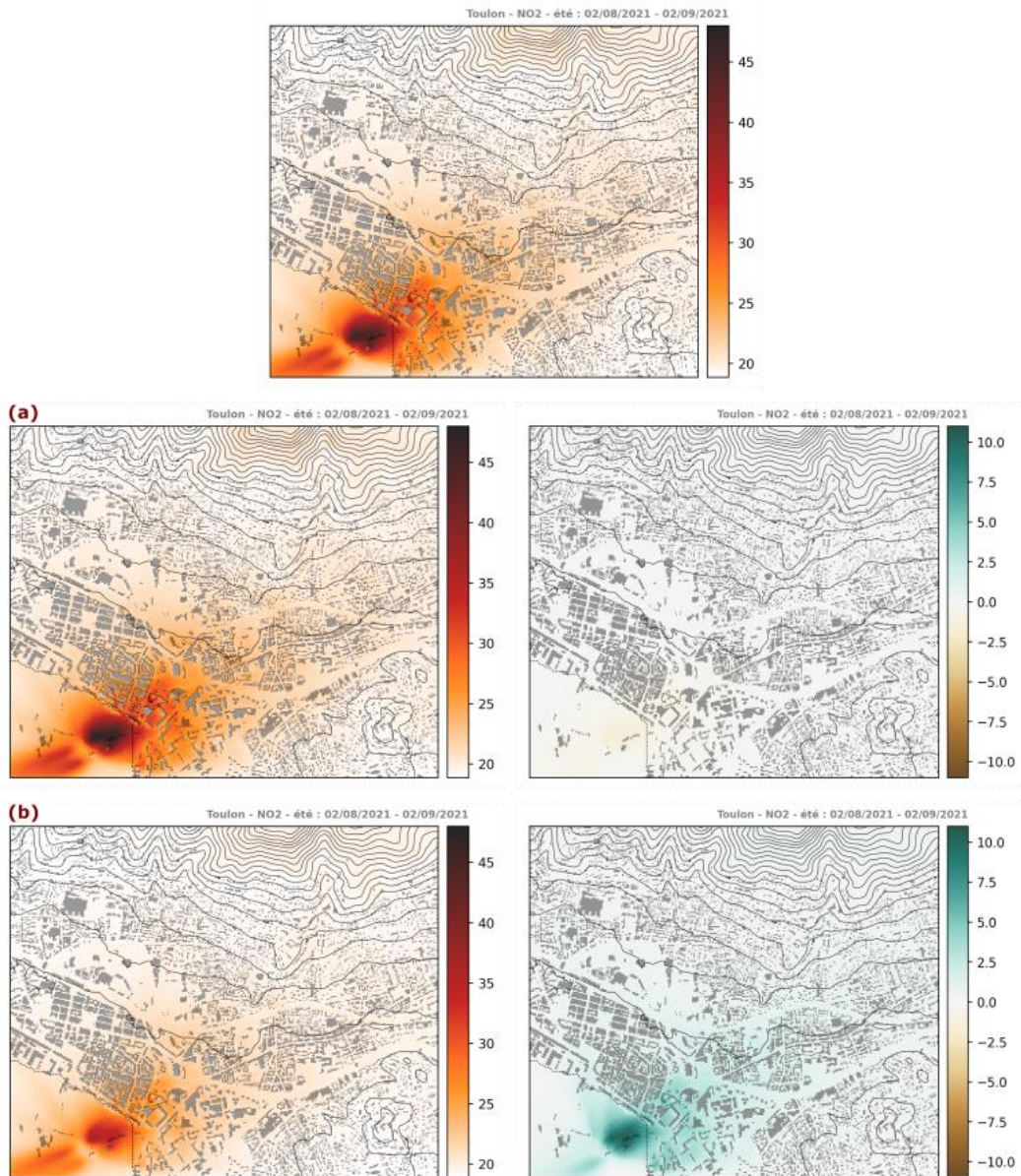


Figure 6 : Cartes des concentrations moyennes en NO₂ à Toulon en été pour le scénario de référence (première ligne) et pour les scénarii (a) BFO, (b) MDO + CENAQ. Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre les scénarii et la référence. Les concentrations sont en $\mu\text{g.m}^{-3}$.

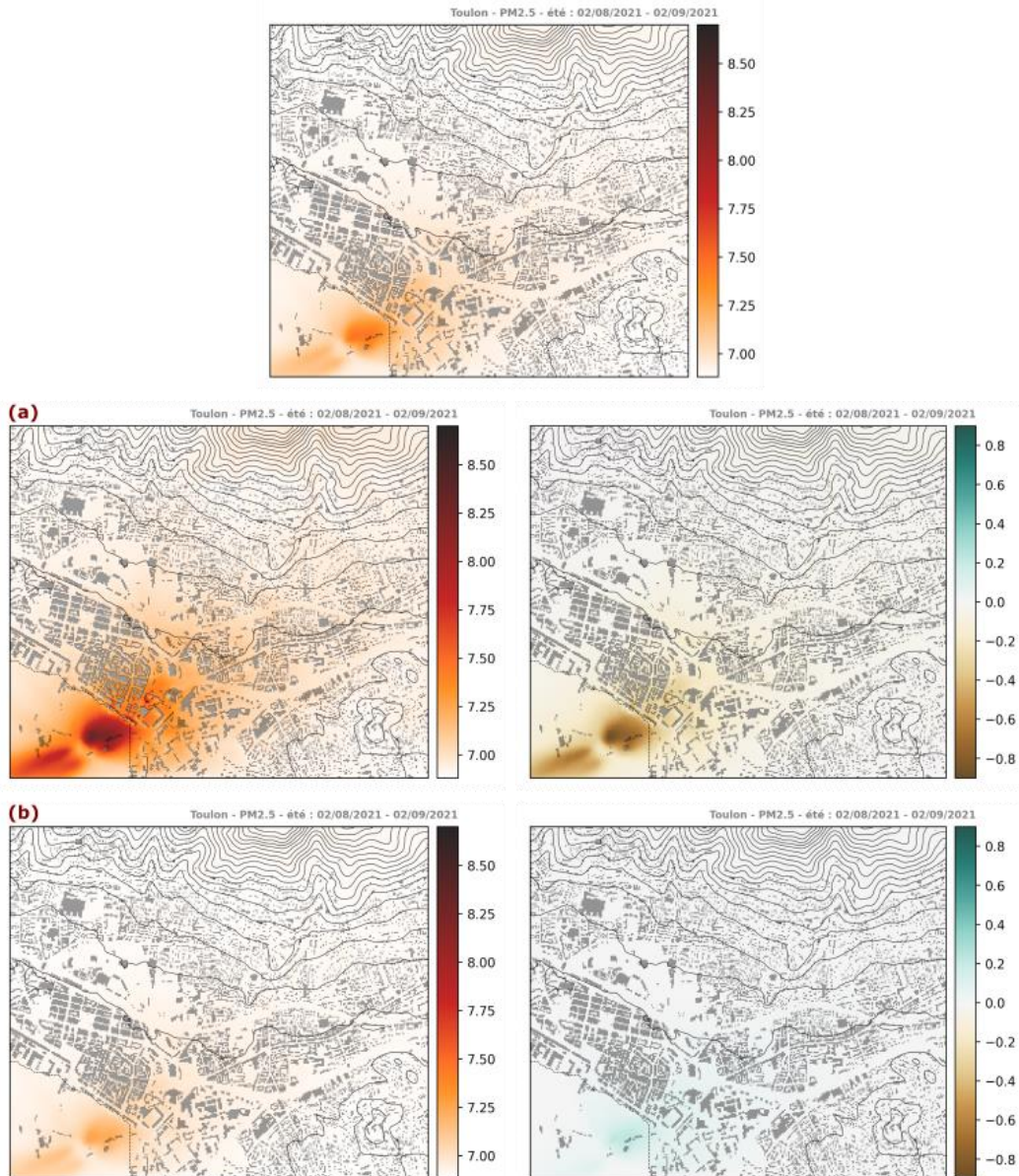


Figure 7 : Cartes des concentrations moyennes en PM2.5 à Toulon en été pour le scénario de référence (première ligne) et pour les scénarii (a) BFO, (b) MDO + CENAQ. Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre les scénarii et la référence. Les concentrations sont en $\mu\text{g.m}^{-3}$

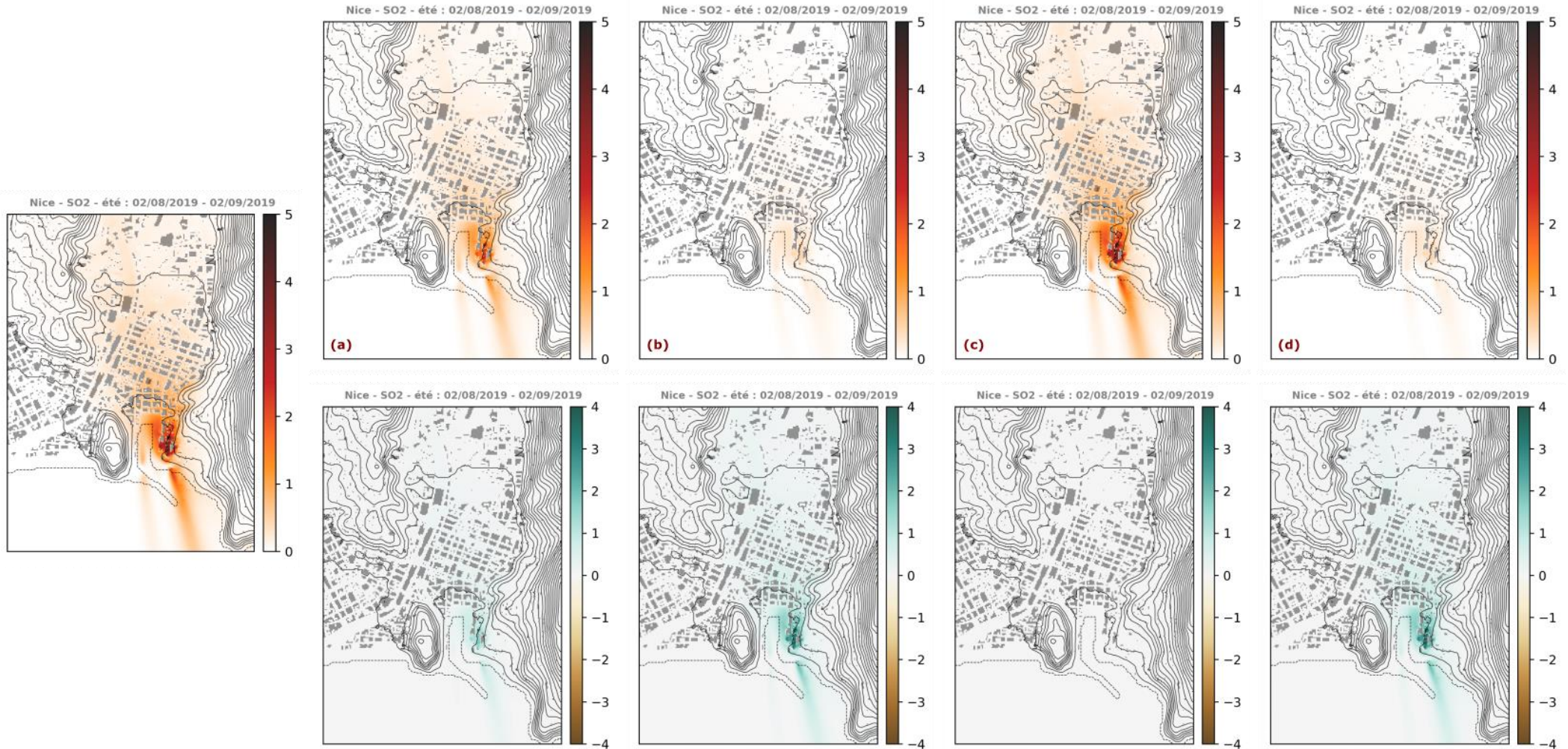


Figure 8 : Cartes des concentrations moyennes en SO_2 à Nice en été pour le scenario de référence (première colonne) et pour les scenarii (a) BFO 0.5%, (b) MDO, (c) CENAQ, (d) MDO + CENAQ.

Les cartes situées sur la seconde ligne montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence. Les concentrations sont en $\mu\text{g.m}^{-3}$.

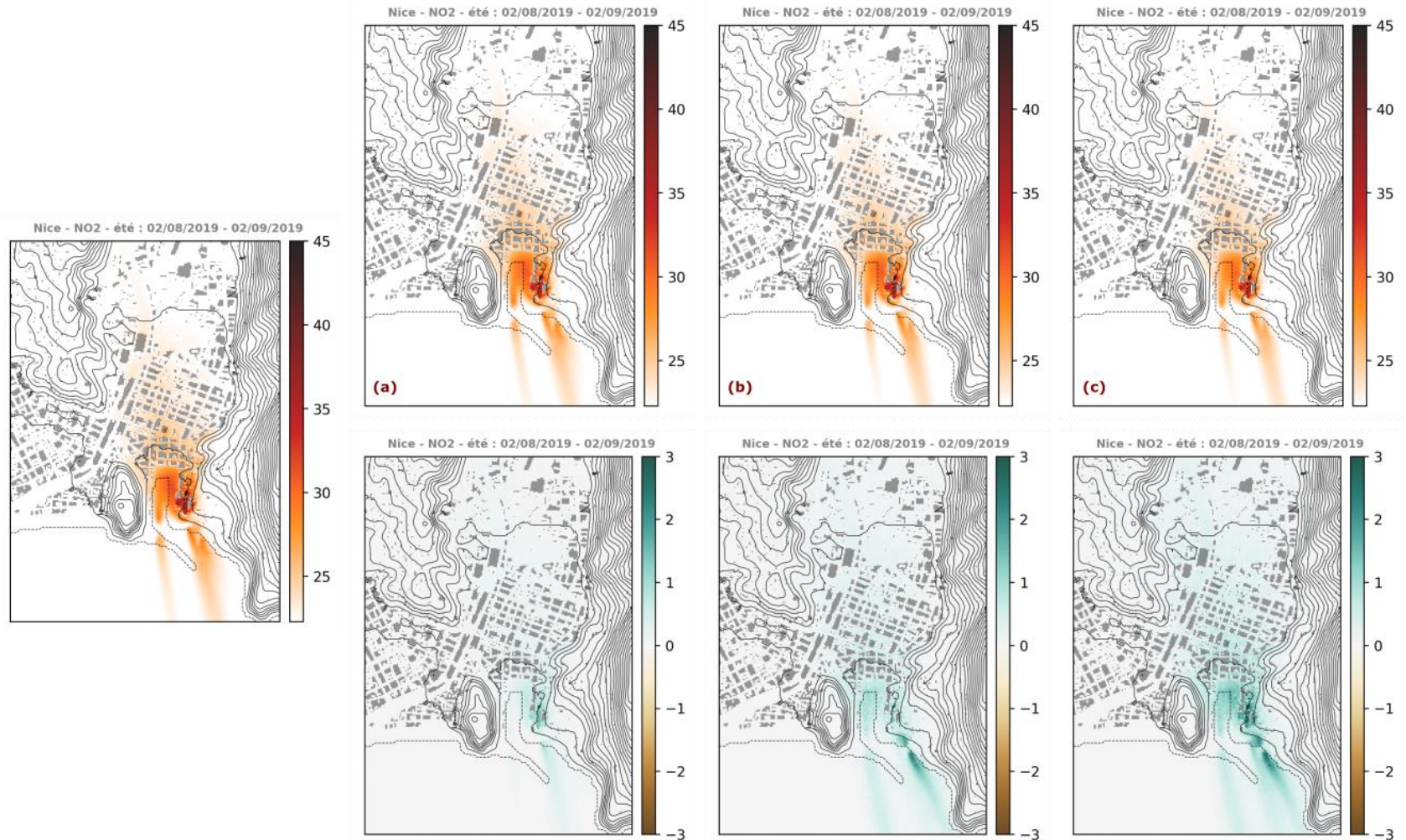


Figure 9 : Cartes des concentrations moyennes en NO₂ à Nice en été pour le scénario de référence (première colonne) et pour les scénarii (a) MDO, (b) CENAQ, (c) MDO + CENAQ.
 Les cartes situées sur la seconde ligne montrent les différences de concentration entre les scénarii et la référence. Les concentrations sont en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

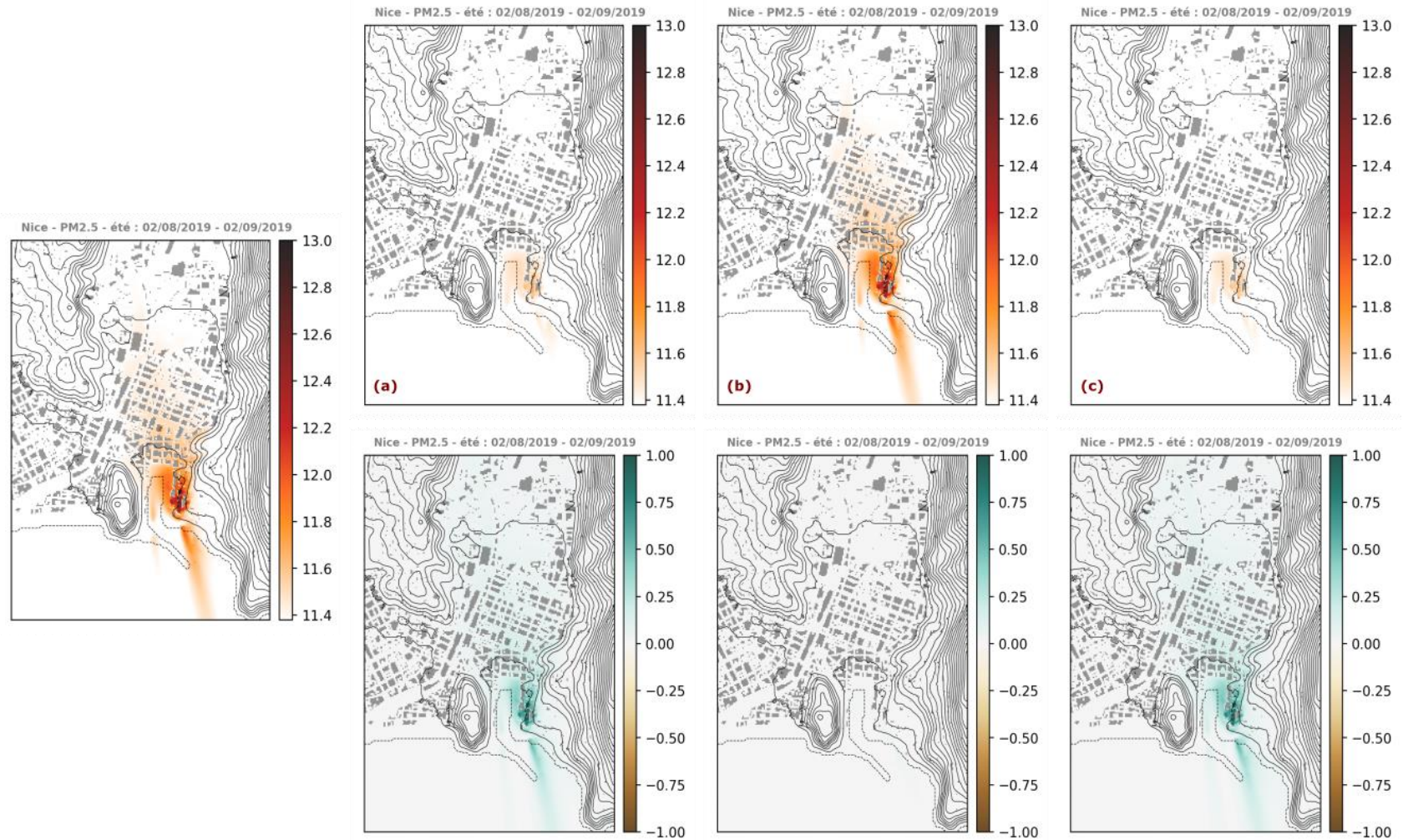


Figure 10 : Cartes des concentrations moyennes en PM2.5 à Nice en été pour le scénario de référence (première colonne) et pour les scénarii (a) MDO, (b) CENAQ, (c) MDO + CENAQ.
 Les cartes situées sur la seconde ligne montrent les différences de concentration entre les scénarii et la référence. Les concentrations sont en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

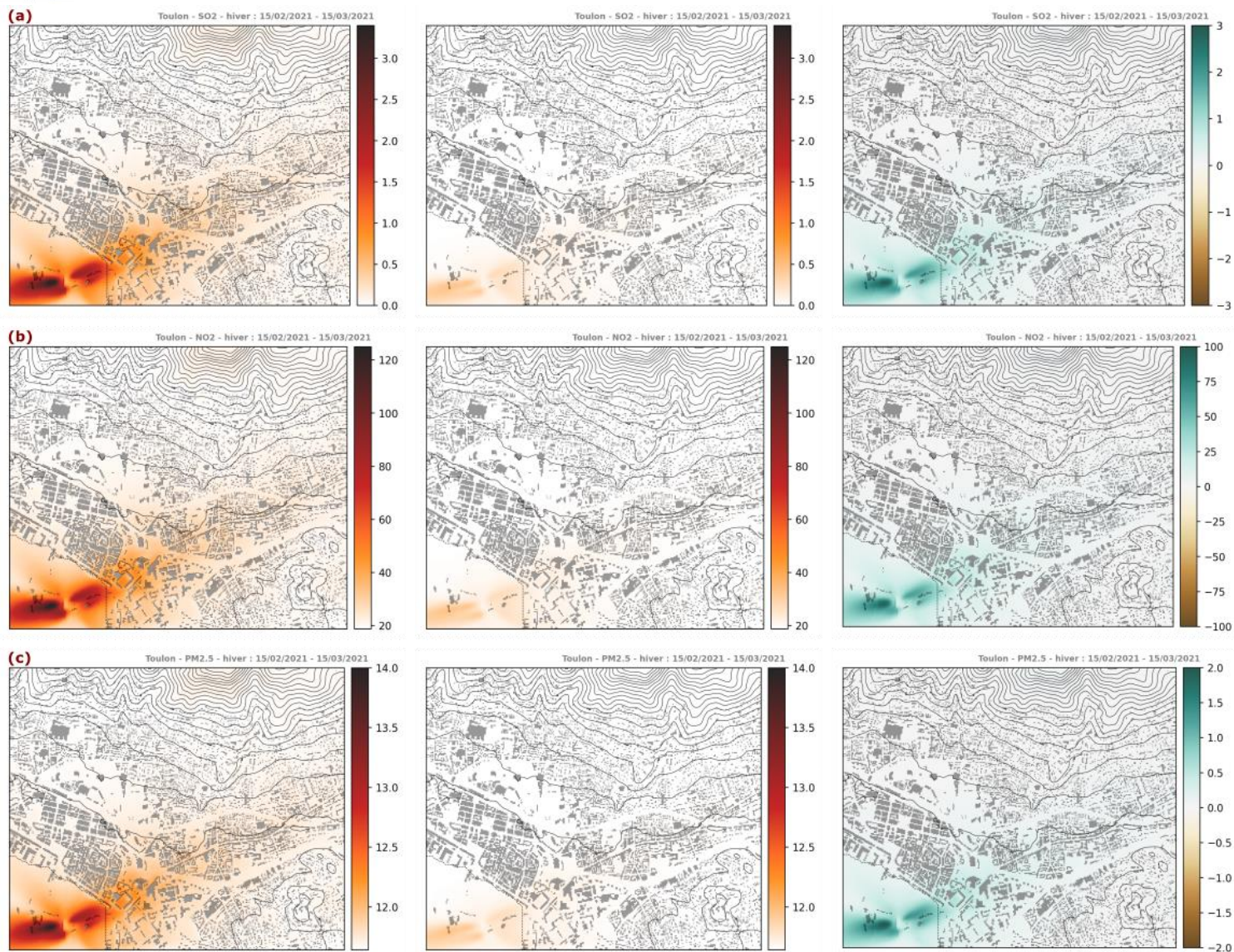


Figure 11 : Cartes des concentrations moyennes en (a) SO_2 , (b) NO_2 , (c) $PM_{2.5}$ à Toulon en hiver pour le scenario de référence (première colonne) et pour le scenario MDO + CENAQ (seconde colonne). Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre le scenario et la

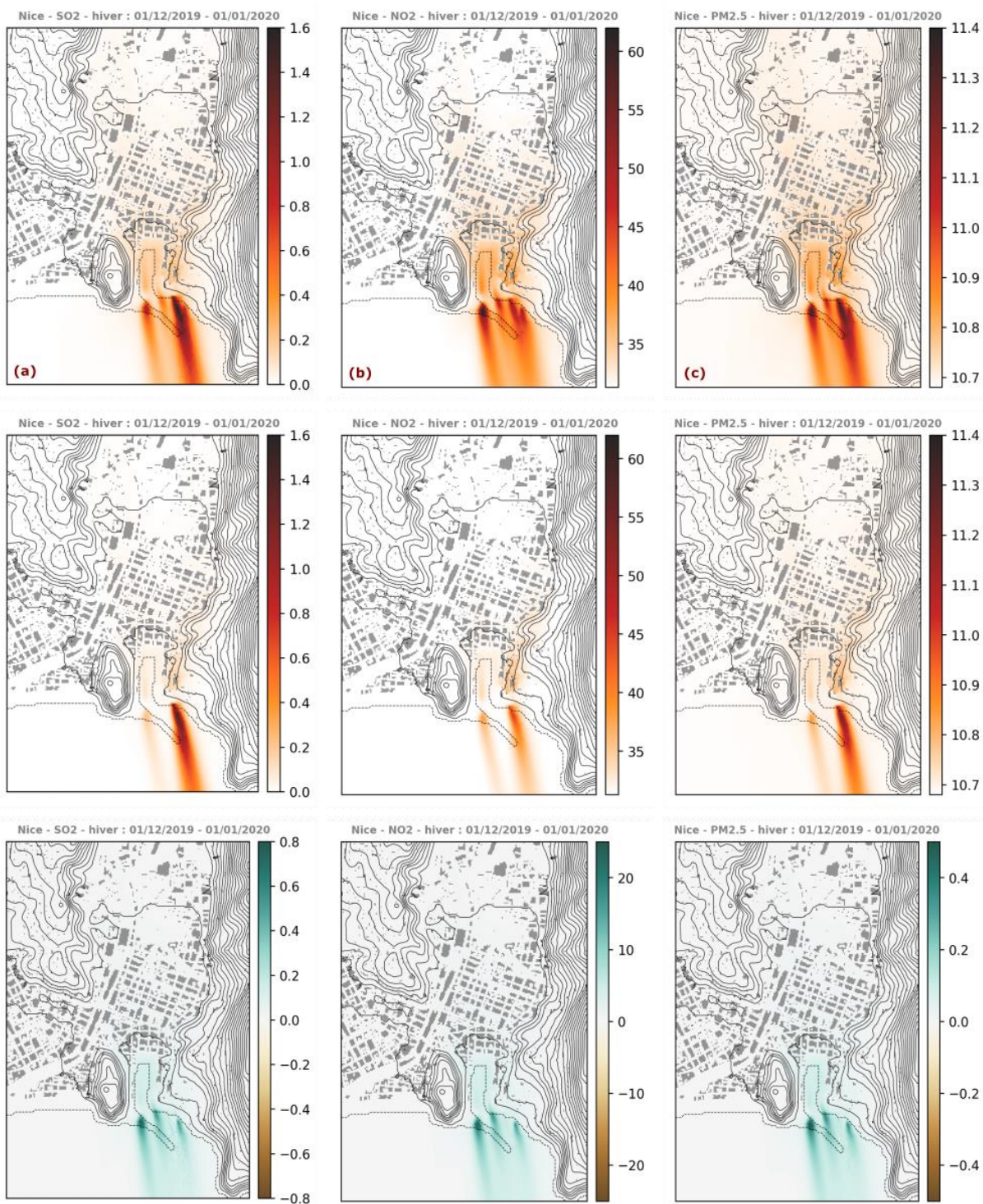


Figure 12 : Cartes des concentrations moyennes en (a) SO₂, (b) NO₂, (c) PM_{2.5} à Nice en hiver pour le scénario de référence (première ligne) et pour le scénario CENAQ (seconde colonne). Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre le scénario et la référence. Les concentrations sont en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

1.2.1.2. Saison hivernale

Les concentrations en SO₂, NO₂ et PM_{2.5} modélisées à Toulon sur la période hivernale sont présentées en Figure 11. Aucune escale n'étant de durée inférieure à 2 heures sur cette période, seul le scénario CENAQ est modélisé. On constate cette fois que le CENAQ a un impact très significatif sur les concentrations en SO₂ et NO₂. Les différences de concentration en PM_{2.5} sont également plus importantes qu'en été, mais restent modérées par rapport à la concentration de fond. La contribution des navires à la concentration de fond en PM_{2.5} au niveau de la cabine en hiver a été estimée, dans le livrable T2.3.1, à seulement 19%, tandis que les navires sont les seuls contributeurs à la concentration en SO₂, dans ce domaine où il n'y a pas d'activité industrielle. Toujours d'après le travail effectué dans le livrable T2.3.1, les navires apparaissent comme les contributeurs majoritaires aux concentrations en NO_x autour du terminal ferry, le contributeur secondaire étant le trafic automobile.

La différence d'impact sur les concentrations en SO_x et NO_x entre l'été et l'hiver s'explique par la saisonnalité du trafic maritime. L'été les escales sont plus nombreuses, mais seulement 19% des escales sont de durée supérieure à 2h30, donc éligibles au CENAQ. L'hiver, les escales durent plus longtemps, si bien que la quasi-totalité des escales de ferries est éligible au CENAQ. En outre, la somme des temps d'escale des ferries est supérieure en hiver. Il faut toutefois rappeler que la contribution des navires modélisée dans le scénario de référence en hiver dépasse de beaucoup les concentrations en NO₂ et SO₂ mesurées par la cabine située sur le port (voir Tableau 5 et livrable T2.3.1). Cette surestimation de la contribution des navires aux concentrations totales mène à surestimer la valeur du gain de concentration permis par le CENAQ en hiver. Ce gain est plus important qu'en été, mais pas autant que ce qui apparaît sur ces cartes.

A Nice, en hiver, la somme des durées des escales de durée inférieure à deux heures est négligeable par rapport à la somme des durées de toutes les escales. Comme dans le cas de Toulon, seul le scénario CENAQ est investigué. Les cartes des concentrations moyennes en SO₂, NO₂ et PM_{2.5} et les différences de concentration par rapport au scénario de référence sont présentées en Figure 12. Comme pour Toulon, on constate que l'impact du CENAQ est plus fort en hiver qu'en été. A Nice, le CENAQ est destiné à tous les navires autres que les ferries, dont la somme des temps d'escale représente un tiers de la somme des durées de toutes les escales en été, contre seulement 3% en hiver. 97% du temps de navire à quai est donc éligible au CENAQ à Nice en hiver. L'impact du CENAQ est toutefois moins spectaculaire que dans le cas de Toulon, la contribution des navires à la concentration totale en hiver étant moins importante que ce qui est estimé pour Toulon : toujours d'après le livrable T2.3.1, les concentrations modélisées en SO₂ sont surestimées de manière équivalente à Nice et Toulon en hiver (voir chiffres du Tableau 5), mais alors que la contribution des navires à la concentration en NO₂ dépasse largement la concentration mesurée sur les quais à Toulon, elle s'élève à 61% de la concentration mesurée à Nice au niveau de la cabine. L'action du CENAQ sur cette contribution navale induit une baisse pouvant aller jusqu'à 25 µg.m⁻³.

En termes de localisation de la réduction des concentrations, on remarque que les panaches en provenance du quai du Commerce ne semblent peu ou pas modifiés par le CENAQ, ce quai étant celui où viennent s'amarrer les ferries sur la période considérée.

1.2.2. Box-plots des concentrations en zone terrestre

Après avoir observé l'impact des scénarii sur le champ de concentration dans sa globalité, l'analyse de ce champ est maintenant resserrée sur la zone terrestre. Il s'agit de la zone délimitée par le trait

pointillé sur les cartes. Ces concentrations sont présentées sous forme de box-plots des concentrations avec le fond, et de box-plots des rapports des concentrations du scénario et de la référence, sans le fond. Les ratios des scénarii de réduction sont inférieurs à 1, les ratios des scénarii correspondant à des situations antérieures à la référence (cas de Toulon) sont supérieurs à 1. Sur ces figures, les valeurs situées au-dessus du trait horizontal supérieur sont filtrées. La valeur de ce trait, notée v_{ceil} , est donnée par la formule :

$$v_{\text{ceil}} = Q3 + 1.5 (Q3 - Q1)$$

où Q1 et Q3 correspondent aux premier et troisième quartiles du jeu de données respectivement. Selon le scénario modélisé, les valeurs situées au-dessus de v_{ceil} représentent environ 8% à 10% du jeu de données pour les concentrations, 1% à 10% du jeu de données pour les ratios de concentration.

Les box-plots réalisés avec les simulations des ports de Toulon et Nice sont présentés en [Figure 13](#) et [Figure 14](#) respectivement. Ils mettent en lumière les différences relatives entre les scénarii. Comme sur les cartes, on constate que l'impact des différentes mesures est faible en ce qui concerne les PM2.5, la contribution estimée des navires étant mineure dans le cas de Toulon. La même conclusion semble s'appliquer à Nice, où il n'a pas été possible d'estimer la contribution des navires aux concentrations en PM2.5, faute de mesures en 2019. Les concentrations en soufre sont très impactées par les scénarii portant sur la législation. Dans le cas de Nice, il est possible de comparer l'impact de ces scénarii à celui du scénario CENAQ, la situation de référence étant antérieure à la mise en place de ces différentes solutions de mitigation. On note que le scénario CENAQ a moins d'impact sur les concentrations en SO₂ que tout autre scénario de législation sur la teneur en soufre. Ceci provient du fait que les ferries représentent une part significative des émissions en été, qui ne sont pas concernées par cette mesure dans le cas de Nice. Plus globalement, on remarque qu'en été, le CENAQ n'a pas le même impact sur les trois espèces NO₂, SO₂ et PM2.5, alors qu'en hiver le facteur d'abaissement de ces espèces est équivalent. Là encore, ceci est dû au fait que l'hiver, la quantité d'escale qui n'est pas éligible au CENAQ est négligeable. Les émissions sont donc toutes réduites d'un même facteur de proportionnalité. Les escales de ferries sont plus nombreuses en été, et plus brèves, ce qui accroît la part d'émission ne pouvant pas être annihilée par le CENAQ. Cette part d'émissions fixe des escales courtes, notée E^C brise la relation linéaire qui existe entre les émissions totales E^{Tot} et les émissions des escales longues E^L :

$$E^{\text{Tot}} = E^C + \alpha E^L$$

où α est le facteur d'abattement des émissions des escales longues dû au CENAQ, fonction de la durée des escales longues. Suivant l'importance du terme E^C , qui n'est pas la même suivant l'espèce considérée, les émissions totales seront plus ou moins affectées par le CENAQ, comme on peut le voir sur ces graphes.

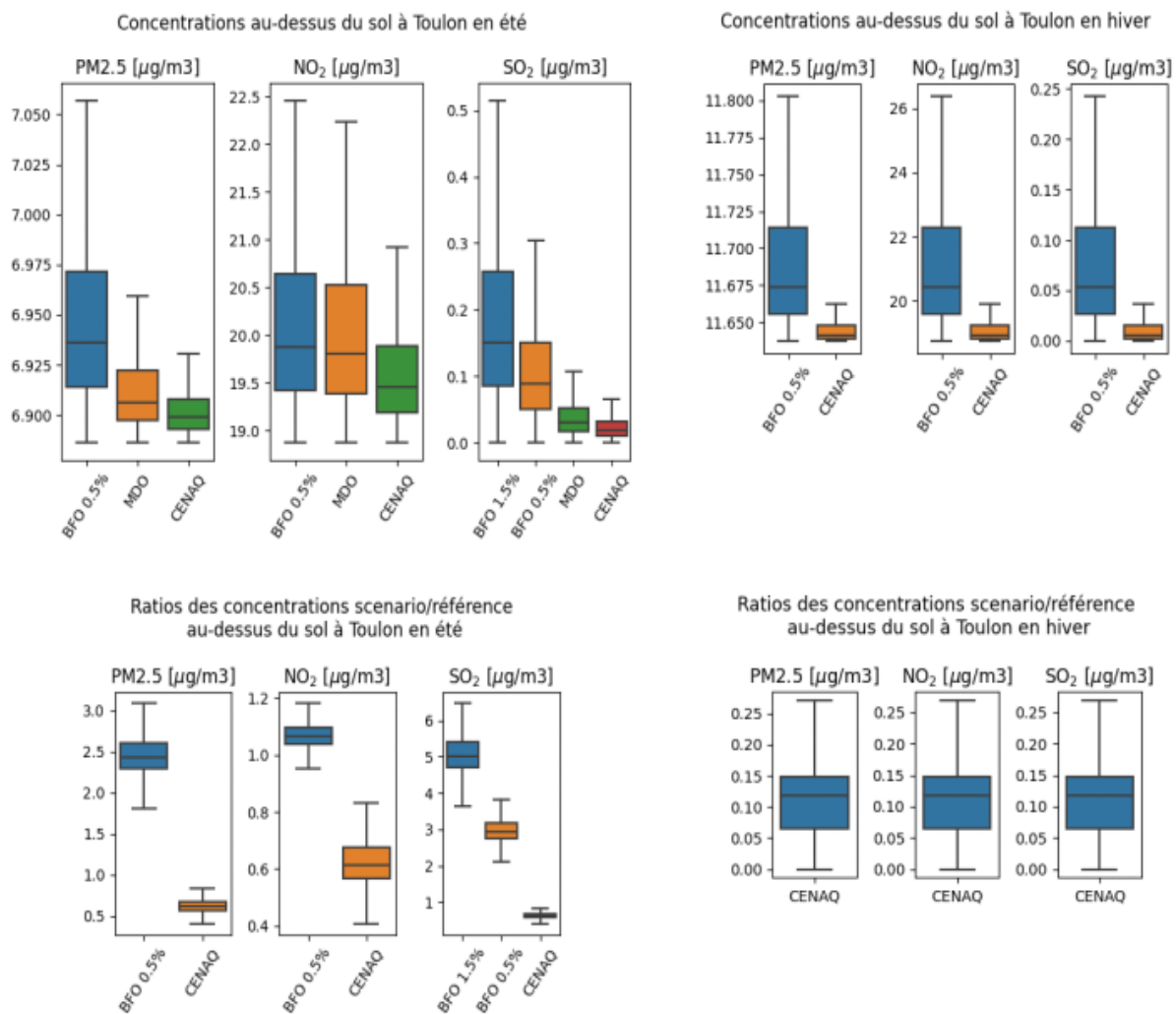


Figure 13 : Box-plots des concentrations au-dessus du sol (première ligne) et box-plots des ratios des concentrations scénario/référence (seconde ligne) à Toulon pour la période estivale (gauche) et la période hivernale (droite).

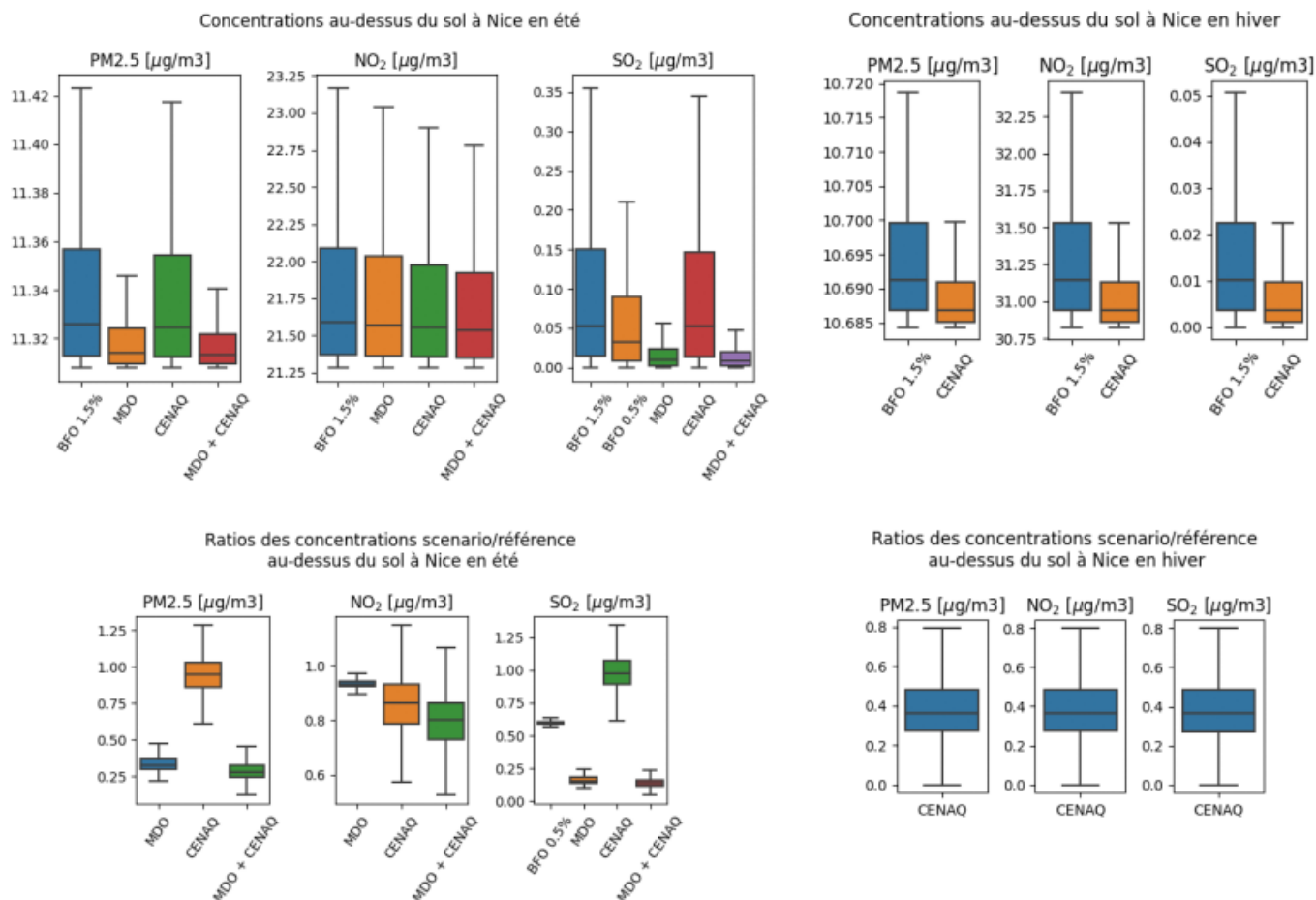


Figure 14 : Box-plots des concentrations au-dessus du sol (première ligne) et box-plots des ratios des concentrations scénario/référence (seconde ligne) à Nice pour la période estivale (gauche) et la période hivernale (droite). Le scénario de référence est le scénario BFO 1.5%.

De manière générale, les concentrations moyennes modélisées sur la terre sont peu impactées par les différents scénarii de réduction des émissions. La diminution la plus importante s'observe pour les concentrations en NO₂ à Toulon en hiver, elle est de l'ordre de $1.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ seulement. Ceci contraste avec les diminutions estimées au niveau des maxima de concentrations, qui s'élèvent à $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à Toulon en été autour des quais, et à $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à Nice en hiver, près du quai Infernet Sud. Les mesures de mitigation ont un impact fort localement, sur les zones où les panaches contribuent de manière significative aux niveaux de concentration, mais ont une influence limitée sur les concentrations de fond.

1.2.3. Bilan statistique

Pour quantifier la réduction des concentrations induite dans chacun des scenarii, on définit le pourcentage de réduction R comme :

$$R = \frac{p_{ref} - p_{scn}}{p_{ref}} \cdot 100 \%$$

où p_{ref} est le 90^{ème} percentile des concentrations moyennes du scenario de référence sans le fond, et p_{scn} est le 90^{ème} percentile des concentrations moyennes du scenario de variation des émissions sans le fond. Avec cette statistique, on choisit de quantifier les variations des concentrations des panaches uniquement, pour deux raisons : (i) parce que l'impact dû à la réactivité chimique de ces variations sur les concentrations de fond n'est pas évalué ; (ii) pour éviter que cette évaluation ne soit biaisée par une surestimation ou une sous-estimation des concentrations des panaches, par rapport à la concentration de fond, comme c'est le cas dans certaines simulations (voir livrable T2.3.1 et [Tableau 5](#)). Le jeu de données utilisé comprend les concentrations du domaine complet, sur terre comme sur mer, qui affectent les populations riveraines mais également les personnes qui se trouvent sur les navires.

Les statistiques correspondant aux résultats présentés ci-avant pour les ports de Toulon et Nice sont présentés dans le [Tableau 6](#) et le [Tableau 8](#) respectivement. Le [Tableau 7](#) présente les réductions calculées pour le port de Toulon en prenant comme référence le scenario BFO 0.5%, qui correspond à la situation en 2021 s'il n'y avait pas eu de charte.

Tableau 6 : Evolution des concentrations des panaches à Toulon pour les différents scenarii, avec comme référence le scenario MDO (situation en 2021).

TOULON MDO	Été			Hiver CENAQ
	BFO 1.5%	BFO 0.5%	CENAQ	
PM2.5	-142 %		39 %	85 %
NO2	-7 %		39 %	85 %
SO2	-393 %	-192 %	39 %	85 %

Tableau 7 : Evolution des concentrations des panaches à Toulon pour les différents scenarii, avec comme référence le scenario BFO 0.5% (situation s'il n'y avait pas eu de charte).

TOULON BFO 0.5%	Été			Hiver CENAQ
	BFO 1.5%	MDO 0.1%	CENAQ	
PM2.5	0 %	59 %	16 %	85 %
NO2	0 %	6 %	37 %	85 %
SO2	-69 %	66 %	14 %	85 %

Tableau 8 : Evolution des concentrations des panaches à Nice pour les différents scenarii, avec comme référence le scenario BFO 1.5% (situation en 2019).

NICE BFO 1.5%	Été			Hiver CENAQ
	BFO 1.5%	BFO 0.5%	CENAQ	
PM2.5	0 %	67 %	5 %	57 %
NO2	0 %	7 %	14 %	57 %
SO2	40 %	84 %	3 %	57 %

On voit sur ces tableaux que les scenarii portant sur la teneur en soufre des carburants impactent bien sûr les concentrations en soufre, mais également les concentrations en PM2.5. Toutefois, il est apparu que sur les deux domaines considérés, la contribution des navires aux concentrations totales en PM2.5 est faible. Les mesures portant sur le changement de carburant agissent donc essentiellement sur les niveaux de concentration en SO₂.

Concernant le CENAQ, les chiffres montrent très clairement la saisonnalité de l'efficacité de cette mesure. Les variations quantifiées à Toulon en prenant comme référence le scenario MDO (situation en 2021) montrent que le CENAQ permet un abattement des concentrations des panaches de 85% l'hiver, contre 39% l'été, en raison des ferries faisant escale trop brièvement pour être raccordés à quai. Si on choisit comme référence le scenario BFO 0.5%, qui correspond à la situation telle qu'aurait été s'il n'y avait pas eu la charte obligeant les navires à utiliser du MDO, cette diminution est même moindre pour SO₂ et les PM2.5, le carburant BFO 0.5% utilisé pour les escales courtes étant davantage émetteur pour ces deux espèces. A Nice, en été, on constate comme à Toulon que le CENAQ n'a qu'un faible impact, les escales étant majoritairement des escales de ferries, qu'il n'est pas prévu de raccorder électriquement à Nice. L'hiver, le temps d'escale des ferries ne représentent plus qu'une fraction mineure du total du temps d'escale, si bien que l'efficacité de réduction du CENAQ monte à 57%. L'été, l'action combinée du CENAQ et de l'utilisation d'un carburant à teneur réduite en soufre permet de maximiser la réduction.

1.3. Conclusion

Dans ce rapport, des scénarii de réduction des émissions ont été modélisés dans les ports de Toulon et Nice. Ces deux ports ont des activités et des stratégies de réduction des émissions très différentes. Le port de Toulon reçoit essentiellement des navires de transport de passagers, des ferries, pour lesquels le raccordement électrique à quai est en cours de mise en œuvre. Le port de Nice reçoit des navires de transport de marchandises, des navires de plaisance et des ferries. Les escales des ferries dans le port de Nice étant courtes, le CENAQ y est en cours de déploiement à destination de tous les navires autres que les ferries.

Les scénarii de réduction des émissions ont été évalués sur les concentrations de trois espèces, SO₂, NO₂ et PM_{2.5}. La contribution des navires aux concentrations en PM_{2.5} ayant été évaluée comme faible, les mesures de réduction, aussi efficaces soient-elles sur ces émissions, ont un faible impact sur les concentrations totales en PM_{2.5}, qui sont dominées par la concentration de fond. En hiver à Toulon, les concentrations en PM_{2.5} sont diminuées d'au maximum 2 µg.m⁻³, pour une concentration de fond estimée à 11.6 µg.m⁻³. A l'inverse, les concentrations en SO₂, pour lesquelles on considère une concentration de fond négligeable, sont réduites aussi bien par l'utilisation d'un carburant à teneur réduite en soufre que par le CENAQ, la première mesure étant efficace pour les escales courtes, de durée inférieure à deux heures, la seconde étant efficace pour les escales suffisamment longues pour permettre le raccordement électrique à quai. Enfin, les concentrations en NO₂ sont faiblement impactées par les mesures portant sur la nature du carburant, mais elles peuvent l'être fortement par le CENAQ. Pour les deux simulations où les concentrations en NO₂ modélisées sont cohérentes en moyenne avec les niveaux mesurés, i.e. pour les deux simulations pour lesquelles on trouve une corrélation satisfaisante entre les concentrations en NO₂ modélisées des panaches augmentées du fond et les concentrations mesurées, à savoir la simulation estivale de Toulon et la simulation hivernale de Nice, le CENAQ permet un gain en NO₂ allant jusqu'à 10 µg.m⁻³ dans le premier cas, et 25 µg.m⁻³ dans le second. Ces gains sont significatifs par rapport au niveau global de pollution, la contribution des navires au niveau de la cabine du port étant estimée dans ces deux cas à 77% et 61% de la concentration totale, respectivement. L'efficacité du CENAQ est bien plus importante l'hiver, les escales de ferries étant moins nombreuses à Nice, moins nombreuses et plus prolongées à Toulon, ce qui les rend quasiment toutes éligibles au CENAQ. L'abattement des concentrations des panaches atteint alors 85% à Toulon, ce qui constitue un impact majeur pour la concentration totale en NO₂, étant donnée l'importance de la contribution des navires à cette concentration au voisinage du port. On rappelle toutefois que le CENAQ est implémenté dans ce scénario en supposant que la totalité des ferries peut se raccorder à quai.

Ces résultats montrent que ces mesures de réduction permettent de réduire significativement les émissions en SO_x et NO_x au niveau local, et dans une moindre mesure les émissions en particules, pour lesquelles d'autres sources semblent préempter. Ces mesures sont complémentaires, l'efficacité des mesures portant sur la teneur en soufre du carburant s'appliquant aux escales courtes, celle du CENAQ s'appliquant aux escales longues. Le CENAQ s'impose comme une mesure de réduction de la pollution particulièrement efficace lors des périodes où les navires stationnent à quai de manière prolongée, l'utilisation d'un carburant à teneur réduite en soufre étant la solution privilégiée le reste du temps. Ces résultats confirment l'utilité et l'importance de poursuivre et étendre le développement et l'application de ces mesures.

2. PORTS D'AJACCIO ET BASTIA (QUALIT' AIR CORSE)

2.1. Méthodologie

2.1.1. Présentation des scénarios de base des ports d'Ajaccio et Bastia

Afin de définir les scénarii envisagés dans le cadre du projet AER NOSTRUM pour les ports d'Ajaccio et de Bastia, deux comités techniques ont été organisés les 18 et 20 Janvier 2022. Au total, une dizaine de partenaires locaux ont été réunis ; la **Chambre de Commerce et d'Industrie (CCI2A & CCI2B)**, les compagnies maritimes **Corsica Linea** et **Corsica Ferries**, le fournisseur d'électricité **EDF**, la communauté d'agglomération du pays Ajaccien **CAPA** et les communautés d'agglomération de Bastia **CAB**, l'Office des Transports de la Corse **OTC**, la Collectivité de Corse **CDC**, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie **ADEME**, le Secrétariat Général pour les Affaires de Corse **SGAC**, l'Agence de Développement Economique de la Corse **ADEC**, et les associations locales du Groupement d'Ajaccio et de la région Corse pour la Défense de l'Environnement **GARDE**, et **U Levante**.

En fonction des spécificités de chaque port, différents scénarii ont été envisagés pour Ajaccio et Bastia. Dans tous les cas, une modélisation de la situation actuelle sera réalisée grâce aux relevés de la campagne de mesure et des émissions de 2021 afin de travailler avec une base pertinente. Suite à la réalisation de ce « scénario de base », toute la flotte sera testée selon les différents scénarii définis par les ateliers.

Compte-tenu des contraintes techniques de la modélisation, un premier résultat portera sur la quantité de polluants estimée sur une année de référence (calcul et comparaison des émissions directes dues aux scénarii), puis sur l'impact local via la modélisation de certains de ces scénarii jugés plus pertinents / probables sur des journées spécifiques.

Afin de définir les scénarii à tester pour 2021, un bilan des émissions sur 2019 a été réalisé par type de navires.

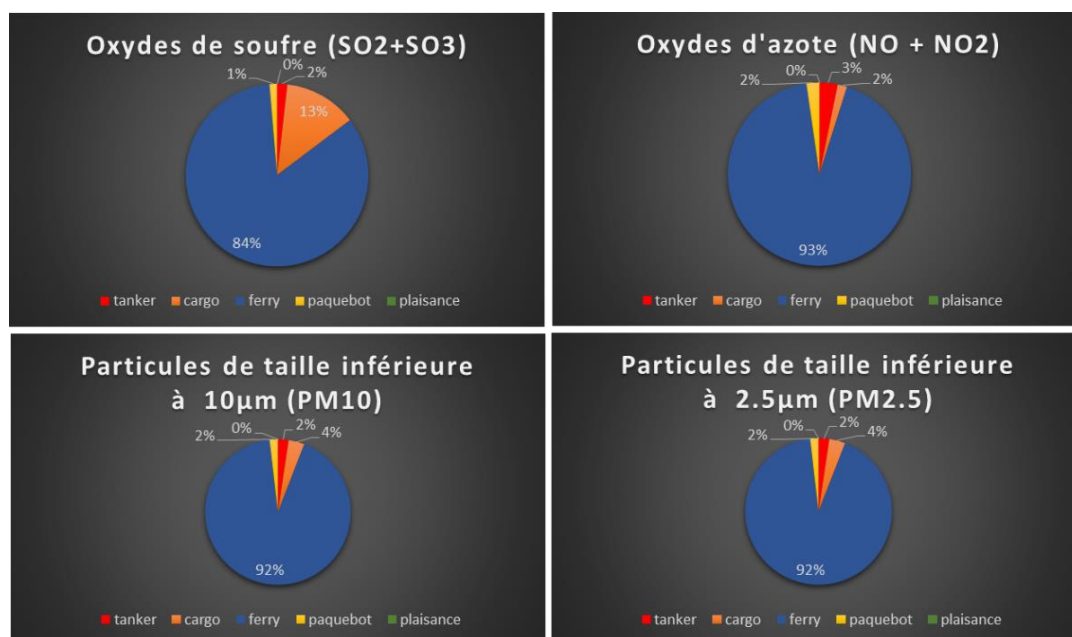


Figure 15 : Répartition des Emissions en fonction du type de navire sur Ajaccio (2019)

Les ferries représentaient la majeure partie des émissions de polluants et de ce fait ce sont en priorité les solutions portant sur la réduction des émissions des navires de transport de passager qui ont été évaluées dans le cadre du programme AER NOSTRUM (à noter que les émissions totales des croisières sur une année complète représentent de 2 à 4% des émissions maritimes pour Ajaccio pour la majorité des polluants particuliers et gazeux (13% pour les SO_x). En vérifiant la quantité d'émissions en fonction des différentes phases de l'escale, on se rend compte que c'est durant le stationnement à quai que la majorité de la pollution est émise. C'est principalement dû au fait que la durée de la phase à quai est en moyenne beaucoup plus grande que la phase de manœuvre, notamment pour les ferries stationnant toute la journée au port. Dans ce cas, une solution orientée raccordement électrique à quai serait d'un réel intérêt afin de supprimer / réduire la majeure partie de ces émissions.

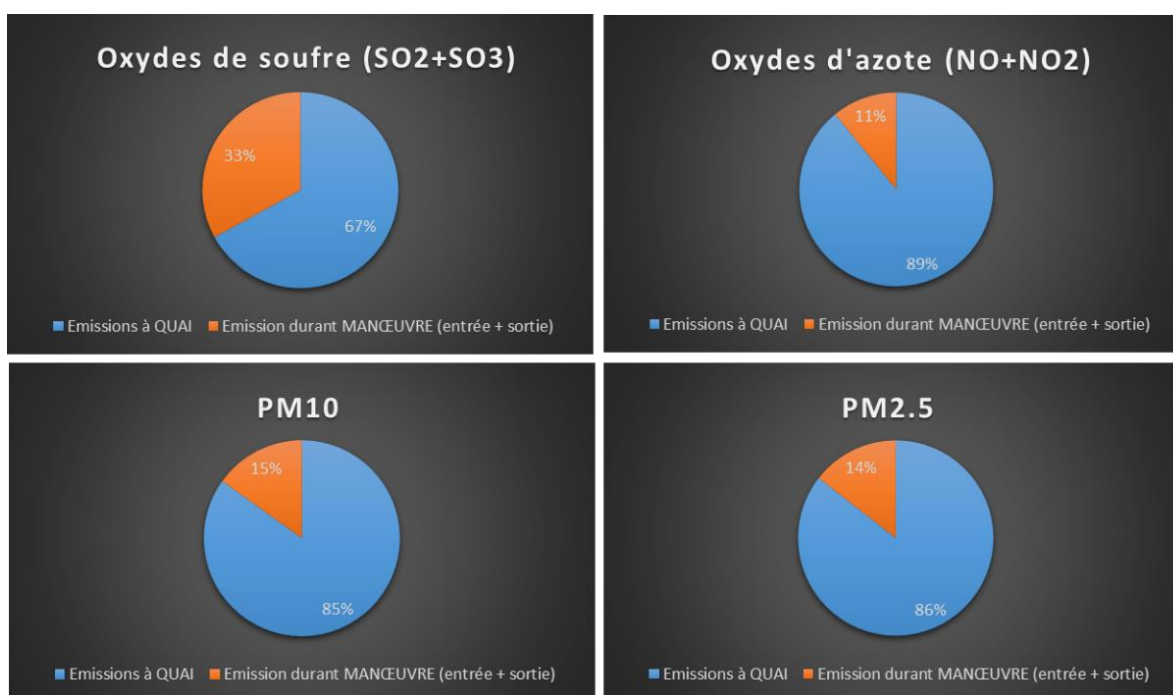


Figure 16 : Répartition des Emissions en fonction de la phase de l'escale sur Ajaccio (2019)

En revanche, lorsqu'il s'agit d'escales plus courtes, la proportion a tendance à drastiquement changer. En ramenant les émissions totales du précédent graphique par unité de temps (et en considérant que les phases de manœuvres durent au total 40 min), on constate que la phase manœuvre est la plus émettrice. C'est d'ailleurs cette phase qui est le plus souvent critiquée lorsque des plaintes sont reçues concernant les panaches de navires.

Dans ces cas-là, des solutions orientées dépollution semblent plus pertinentes pour endiguer ces pics d'émissions liées à une augmentation de la charge moteur pour manœuvrer.

Il n'y a donc pas qu'une solution à mettre en place afin d'améliorer la qualité de l'air, et certaines dépendent aussi des contraintes logistiques propres à chaque escale (impossibilité de connecter le navire au réseau pour des escales inférieures à 2h par exemple).

2.1.1.1. Scenarii étudiés pour le port d’Ajaccio

Suite aux discussions avec les partenaires locaux d’Ajaccio, il est ressorti que la plupart des solutions envisagées tournent autour du raccordement électrique des navires à quai et l’arrivée prochaine de ferries GNL. Il faut savoir qu’Ajaccio a la particularité d’avoir une centrale thermique à proximité de la ville (Vazzio ~3.5km du port) et dont la production électrique rentre dans le mix énergétique de l’île. Raccorder les navires électriquement ne revient pas nécessairement à augmenter la production de la centrale (et donc les émissions) car l’électricité arrivant sur Ajaccio est issue d’une répartition contrôlée des différents modes de production disponibles en Corse :

Puissance installée totale (*énergie hydraulique*) :

199 MW

Puissance installée totale (*énergie thermique*) :

369 MW

Puissance totale (*EDF Corse + imports des liaisons*) :

718 MW

dont 28% d’Energie Renouvelable (Hydraulique / Solaire / Eolien...)

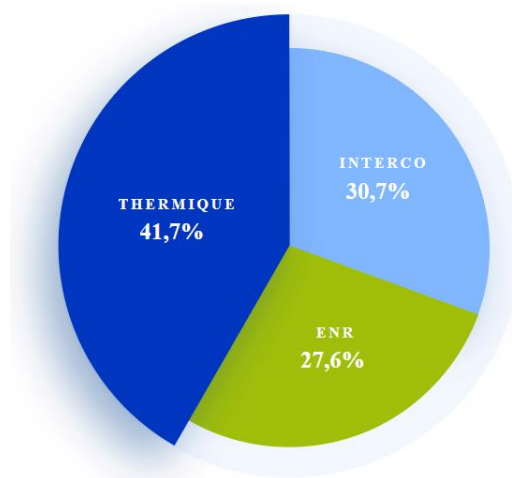


Figure 17 : Mix Energétique en Corse

Le schéma ci-dessous présente le mix énergétique :

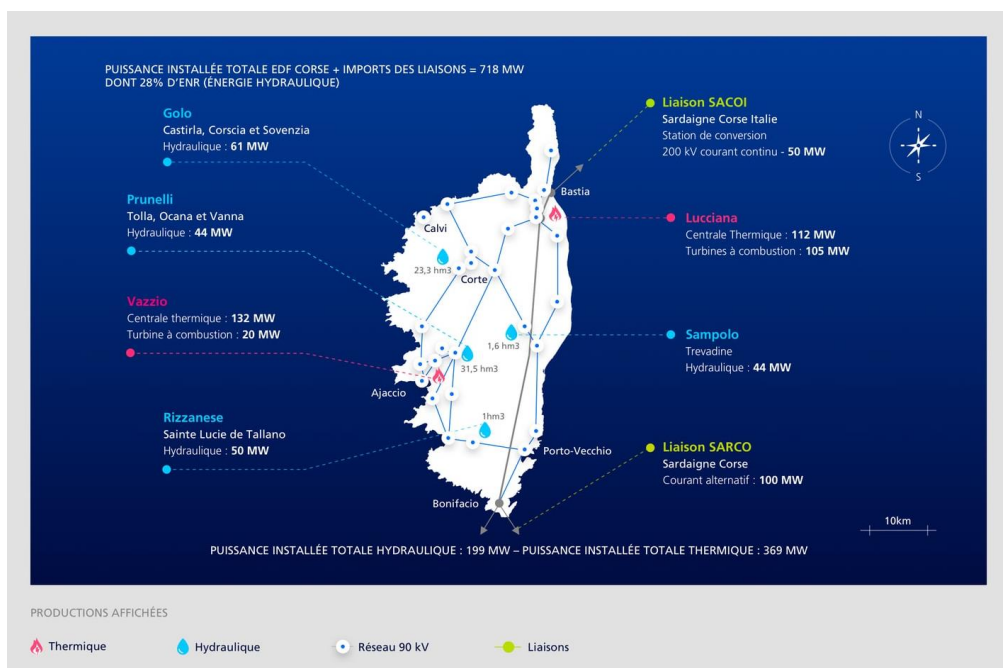


Figure 18 : Installations de production électrique d’EDF en Corse – EDF

Afin de quantifier le gain réel d'une solution de type CENAQ, il faut estimer avec EDF le potentiel accroissement des émissions sur la centrale thermique d'Ajaccio pour assurer les demandes des ferries (le raccordement des bateaux de croisière n'a pas été intégré dans le scénario car jugé techniquement peu réalisable à courts termes étant donné la puissance nécessaire pour ce type de navire), et les inclure en pollution de fond dans le modèle dans la zone d'étude de 2.5km x 2.5km. Associés à des projets d'énergie renouvelable (parc photovoltaïque, centrale à hydrogène, etc.) soutenus par le port, l'impact pourra être amoindri ; le cas idéal serait que toute la demande en énergie des ferries puisse être assurée par un parc photovoltaïque dédié, permettant dans ce cas une solution complètement neutre en émissions.

Suite aux études d'EDF, la production électrique supplémentaire par la centrale thermique d'Ajaccio pour le CENAQ des ferries est de l'ordre de quelques MW (entre 0.6 et 3MW en moyenne).

Au regard de la quantité de polluants supplémentaires engendrée et de la précision du modèle informatique, cette donnée ne semble pas apporter une plus-value dans le calcul des émissions globales de la microrégion et la différence de concentrations reste inférieure à l'incertitude du modèle. De ce fait, les scénarii CENAQ n'intègrent pas une augmentation significative des émissions dans les représentations et les statistiques suivantes en lien avec la production thermique électrique.

Un nouveau navire de la Corsica Linea fonctionnant au GNL est arrivé dans la flotte en 2023, sa prise en compte dans les scénarii peut être intéressante également à quantifier, en remplacement d'un ancien navire. Il a été décidé que leur navire vieillissant « A Nepita » et présent sur de nombreuses escales serait « remplacé » dans les calculs pour le scénario GNL par le nouveau navire, en se basant à nouveau sur les escales 2021.

L'arrivée de la zone SECA en Méditerranée inclut d'emblée un scénario à 0.1% de soufre, a priori déjà respecté lors de la phase à quai (quelque soit la durée) par la majorité des compagnies de ferries recensés, par le biais de filtres ou de meilleur carburant, (notamment suite à la législation imposant ce carburant pour les escales supérieures à 2h). Les solutions de type filtre à particule / scrubber sont déjà incluses dans l'inventaire des émissions, cela dépend donc des navires équipés ou non faisant escale au port.

Les scénarii intermédiaires incluront un assemblage des différentes options.

La liste de scénarii pour lesquels un **calcul des émissions sur l'année 2021** est réalisé pour Ajaccio est la suivante :

Scénario 0 : Situation actuelle (Données de 2021)

Scénario 1 : Flotte actuelle avec législation SECA (2025)

Scénario 2.1 : 100% des navires avec escales > 2h30 sont connectés au CENAQ sans émission (production électrique neutre) et flotte actuelle

Scénario 2.2 : 100% des navires avec escales > 2h30 sont connectés au CENAQ sans émission (production électrique neutre) et législation SECA

Scénario 4 : Ajout d'un ou plusieurs navires au GNL à la flotte actuelle sans CENAQ

Scénario 5 : Ajout d'un ou plusieurs navires au GNL à la flotte actuelle avec CENAQ

Scénario 6 : Ajout d'un ou plusieurs navires au GNL à la flotte SECA sans CENAQ

Scénario 7 : Ajout d'un ou plusieurs navires au GNL à la flotte SECA avec CENAQ

A noter qu'il existait un scénario 3 initialement prévu, correspondant à la prise en compte des émissions de la centrale dans un scénario CENAQ, jugées non pertinentes pour l'outil de modélisation suite aux estimations de puissance électrique requise pour les ferries.

Fiches Scénarii	0 Base	1 CENAQ	2.1 GNL	2.2 NH3	2.3 ELEC/H2	3.1 Scrubber	3.2 Filtre Amont	3.3 MDE	3.4 Gestion Port	4 Normes SECA
Scenario 0	X									
Scenario 1										X
Scenario 2.1	X	X								
Scenario 2.2		X								X
Scenario 4	X		X							
Scenario 5	X	X	X							
Scenario 6			X							X
Scenario 7		X	X							X

Figure 19 : Fiches utilisées pour les scénarii sur Ajaccio

Les scénarii sélectionnés pour la **partie de modélisation** sont les **0 (Scénario de base)**, **1 (SECA)** et **7 (SECA + CENAQ + 1 GNL)**. En effet, la modélisation de l'impact actuel est primordiale. La législation SECA est considérée comme certaine pour 2025. Enfin, le scénario 7 prend en compte l'arrivée de navires GNL à la flotte avec la possibilité de raccorder électriquement les navires à quai après 2025.

2.1.1.2. Scenarii étudiés pour le port de Bastia

Le port de Bastia accueille principalement des escales de ferries, dont certaines très longues sont particulièrement adaptées à la solution CENAQ. Comme pour Ajaccio, une centrale thermique se situe aux alentours de Bastia, mais à une distance beaucoup plus importante cette fois-ci. La principale hypothèse faite dans le cadre de l'étude AER NOSTRUM est que le raccordement électrique des navires à quai sera considéré comme neutre sur les émissions locales (i.e. de la zone d'étude et des alentours très proches), car le potentiel accroissement de la charge sur la centrale de Lucciana à 20 km est jugé négligeable car la centrale est trop éloignée pour avoir un impact significatif direct sur la ville. Pour le reste, les mêmes scenarii qu' Ajaccio sont envisagés.

La liste de scenarii avec calcul des émissions sur l'année 2021 a donc été établie pour Bastia :

Scénario 0 : Situation actuelle (Données de 2021)

Scénario 1 : Flotte actuelle avec législation SECA (2025)

Scénario 2.1 : 100% des navires avec escales > 2h30 sont connectés au CENAQ neutre et flotte actuelle

Scénario 2.2 : 100% des navires avec escales > 2h30 sont connectés au CENAQ neutre et législation SECA

Scénario 4 : Ajout d'un ou plusieurs navires au GNL à la flotte actuelle sans CENAQ

Scénario 5 : Ajout d'un ou plusieurs navires au GNL à la flotte actuelle avec CENAQ

Scénario 6 : Ajout d'un ou plusieurs navires au GNL à la flotte SECA sans CENAQ

Scénario 7 : Ajout d'un ou plusieurs navires au GNL à la flotte SECA avec CENAQ

Fiches Scenarii	0 Base	1 CENAQ	2.1 GNL	2.2 NH3	2.3 ELEC/H2	3.1 Scrubber	3.2 Filtre Amont	3.3 MDE	3.4 Gestion Port	4 Normes SECA
Scenarii 0	X									
Scenarii 1										X
Scenarii 2.1	X	X								
Scenarii 2.2		X								X
Scenarii 4	X		X							
Scenarii 5	X	X	X							
Scenarii 6			X							X
Scenarii 7		X	X							X

Figure 20 : Fiches utilisées pour les scenarii sur Bastia

A l'instar d' Ajaccio, les scenarii sélectionnés à Bastia pour la **partie de modélisation** sont les **0 (Scénario de base), 1 (SECA) et 7 (SECA + CENAQ + 1 GNL)** qui correspondent aux mêmes critères.

2.1.2. Emissions des scenarii

2.1.2.1. Facteurs d'émissions

Les émissions des navires sont calculées selon les préconisations du guide méthodologique pour l'élaboration des inventaires du LCSQA⁵ (guide PCIT2⁶). Ces émissions dépendent de la consommation énergétique des navires, selon la formule :

$$E_i = C F_i$$

où E_i est l'émission [kg] du polluant i , C est la consommation énergétique [J] et F_i est le facteur d'émission propre au polluant i [kg/J]. La consommation énergétique est donnée par la relation :

$$C = G p$$

où G est la consommation de carburant [g de fuel] et p est le pouvoir calorifique inférieur du carburant utilisé [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. Elle varie suivant la charge du moteur et donc suivant la phase de circulation considérée, qui peut être une phase « trajet » (navire loin du port), une phase « manœuvre » (navire dans le port) ou phase à quai (navire en stationnement).

Les facteurs d'émission en NO_x , SO_x et $PM_{2.5}$, pour les différents carburants utilisés dans ce travail sont résumés dans le tableau ci-dessous. Les fuels lourds, dont la teneur en soufre s'élève à 3.5%, 1.5% et 0.5% sont regroupés dans la catégorie *Bunker Fuel Oil* (BFO). Pour un carburant dont la teneur en soufre s'élève à 0.1%, on parlera plutôt de diesel marin, ou *Marine Diesel Oil* (MDO). Le BFO et le MDO sont des carburants de viscosité et de composition différentes, c'est pourquoi ils diffèrent non seulement par leurs émissions en SO_x , mais également en NO_x et PM .

<i>FE</i>	<i>NO_x</i>	<i>SO_x</i>	<i>PM_{2.5}</i>
<i>BFO 3.5%</i>	1982,50	1360,0	147,25
<i>BFO 1.5%</i>		470,0	
<i>BFO 0.5%</i>		265,0	
<i>MDO</i>	1842,72	47,0	33,45

Tableau 9 : Facteurs d'émission en NO_x , SO_x et $PM_{2.5}$ extraits de la base de données OMINEA du CITEPA⁷.

⁵ Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

⁶ 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

⁷ Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique : <https://www.citepa.org/fr/>

2.1.2.2. Situation actuelle (2021)

Afin d'établir les meilleures estimations de réduction des émissions sur les solutions à venir, il est d'abord important de savoir comment se comporte la flotte actuelle. 25 navires sont référencés en tant que ferries sur les escales à Bastia et Ajaccio, dont les informations ont été obtenues via les compagnies maritimes et la Chambre d'Industrie et de Commerce.

Au total, pour l'année 2021, il y a eu 947 escales à Ajaccio et 1320 à Bastia concernant les ferries recensés par les partenaires du projet.

Les carburants utilisés à ce jour sont principalement du Heavy Fuel Oil (HFO) aussi appelé Bunker Fuel Oil (BFO) pour les phases de manœuvre (à 0.5% de soufre), et du Marine Diesel Oil (MDO) pour les phases à quai (à 0.1% de soufre).

La plupart des navires ont des escales de plus de 2h imposant alors un carburant à 0.1% de soufre en sortie d'émission durant toute la durée sur place, privilégiant alors le MDO comme carburant principal pour l'arrivée et le stationnement à quai. Toutefois, certains navires bénéficient d'un système de traitement des fumées leur permettant de garder l'utilisation d'un carburant plus soufré car ramené aux concentrations réglementaires en sortie d'échappement.

La méthode de calcul des émissions se base alors sur l'équivalent carburant qui est obtenu avec ce système, c'est-à-dire qu'un navire utilisant du HFO à 0.5% filtré pour obtenir 0.1% en sortie de cheminée sera considéré comme utilisant du MDO.

L'année 2021 a été choisie pour calculer les émissions maritimes, et ne prennent en compte que les ferries eux-mêmes (les activités portuaires et annexes ne sont pas incluses dans cette étude). La phase de manœuvre et la phase à quai sont calculées de manière distincte afin d'identifier au mieux l'action de chaque solution simulée :

Polluant	Emissions Ferries – Ajaccio, 2021 (tonnes)	
	Phase de manœuvre	Phase à quai
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1600,29	12964,59
Méthane (CH ₄)	0,15	1,23
Monoxyde de carbone (CO)	3,80	30,22
Oxydes d'azote (NO + NO ₂)	40,67	320,59
Oxydes de soufre (SO ₂ + SO ₃)	5,44	8,18
Particules de taille inférieure à 10 µm (PM ₁₀)	3,02	5,82
Particules de taille inférieure à 2.5 µm (PM _{2.5})	2,86	5,51

Tableau 10 : Quantité de polluants émis par les ferries, cas de base - Ajaccio, 2021

Polluant	Emissions Ferries – Bastia , 2021 (tonnes)	
	Phase de manœuvre	Phase à quai
Dioxyde de carbone (CO ₂)	2024,19	9501,12
Méthane (CH ₄)	0,19	0,90
Monoxyde de carbone (CO)	4,80	22,15
Oxydes d'azote (NO + NO ₂)	51,45	234,94
Oxydes de soufre (SO ₂ + SO ₃)	6,88	5,99
Particules de taille inférieure à 10 µm (PM ₁₀)	3,82	4,26
Particules de taille inférieure à 2.5 µm (PM _{2.5})	3,62	4,04

Tableau 11 : Quantité de polluants émis par les ferries, cas de base - Bastia, 2021

Le premier constat qui s'effectue concerne la différence entre la phase à manœuvre et la phase à quai pour les deux ports. Dans tous les cas, la phase à quai émet beaucoup plus que celle en manœuvre. Cela est principalement dû au fait que celle-ci dure beaucoup plus longtemps (parfois jusqu'à 12h à quai contre 1h de manœuvre au total), malgré un débit de polluant plus important lors de l'arrivée et du départ, les moteurs étant beaucoup plus sollicités qu'à l'arrêt.

Un deuxième constat qui en découle est que la phase à quai d'Ajaccio est plus émissive que celle de Bastia, alors que c'est l'inverse pour la manœuvre. Cela s'explique notamment par un nombre plus important d'escales sur Bastia pour une durée totale à quai plus courte que sur Ajaccio.

En effet, la durée totale des escales des ferries recensés s'élève à :

6979 heures sur Ajaccio

5607 heures sur Bastia

Dans l'ordre, on remarque que les polluants principaux toutes phases confondues sont les oxydes d'azote, les oxydes de soufre, le monoxyde de carbone puis les particules fines et enfin le méthane. La suite de rapport visera à étudier l'efficacité des solutions possibles sur la réduction des polluants principaux, tant en phase de manœuvre que de stationnement.

Sur l'année 2021, plus de ferries ont fait escale sur Bastia mais pour une durée totale à quai moins longue que sur Ajaccio. Les émissions totales des ferries sont donc plus importantes sur Ajaccio.

2.1.2.3. Connexion Electrique des Navires à Quai (CENAQ)

Chronologie : *7 Phases distinctes peuvent être identifiées lors d'une escale maritime (2021).*

- 1 - Phase de Croisière Arrivée (PROP ON BFO, GEN OFF, Hors Zone d'Etude)
- 2 - Phase de Manœuvre Arrivée (PROP ON BFO, GEN OFF, Zone d'Etude)
- 3.1 - Phase à Quai sans CENAQ 1 (PROP OFF, GEN ON MDO, Zone d'Etude)
- 3.2 - Phase à Quai CENAQ (PROP OFF, GEN OFF, Zone d'Etude)
- **Durée utile avec CENAQ ON**
- 3.3 - Phase à Quai sans CENAQ 2 (PROP OFF, GEN ON MDO, Zone d'Etude)
- 4 - Phase de Manœuvre Départ (PROP ON BFO, GEN OFF, Zone d'Etude)
- 5 - Phase de Croisière Départ (PROP ON BFO, GEN OFF, Hors Zone d'Etude)

Glossaire :

- T_{DEB}** : Durée du débarquement avec GEN ON (Générateurs avec carburant MDO)
- T_{CENAQ}** : Durée de la phase CENAQ avec GEN OFF
- T_{EMB}** : Durée de l'embarquement avec GEN ON (Générateurs avec carburant MDO)
- T_{QUAI}** : Durée totale à quai avec PROP OFF (= **T_{DEB}** + **T_{CENAQ}** + **T_{EMB}**)
- T_{MAN1}** : Durée totale de la manœuvre arrivée avec PROP ON (Propulseurs en marche avec BFO)
- T_{MAN2}** : Durée totale de la manœuvre départ avec PROP ON (Propulseurs en marche avec BFO)
- T_{PROP}** : Durée totale du navire avec PROP ON (= **T_{MAN1}** + **T_{MAN2}**)
- T_{PORT}** : Durée totale du navire dans la zone d'étude

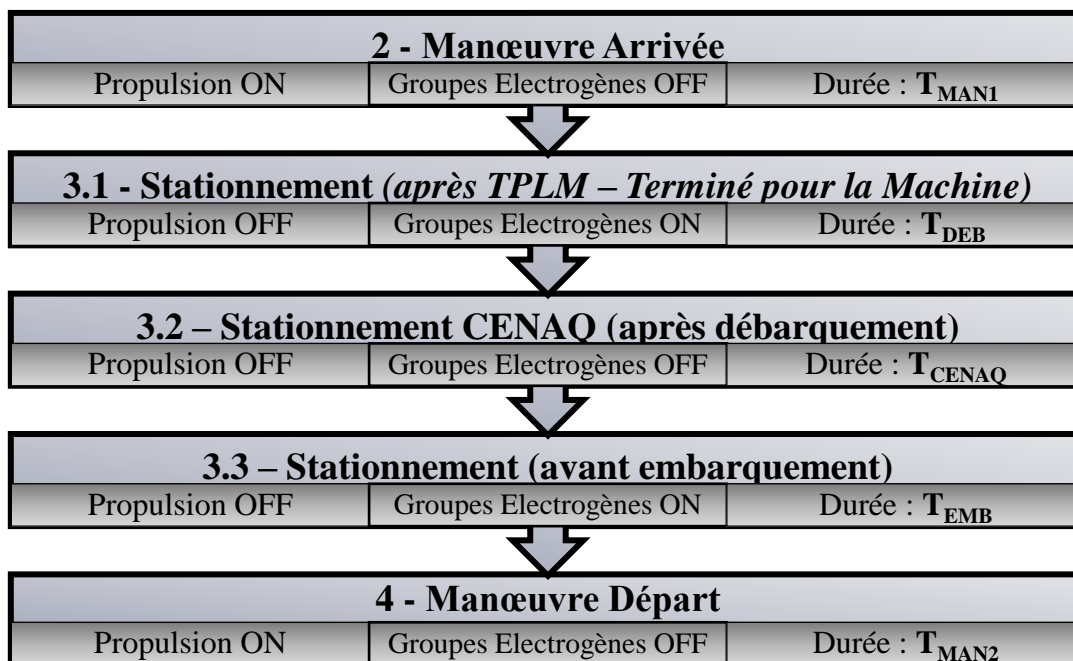


Tableau 12 : Chronologie partielle d'une escale avec CENAQ

La procédure complète de branchement au quai est décrite dans le produit T3.2.1.

Pour les besoins du calcul, les hypothèses suivantes ont été choisies :

- $T_{DEB} = 45 \text{ min}$
- $T_{EMB} = 1 \text{ h } 30$
- **Emissions CENAQ = 0**
- **Escales choisies pour le CENAQ > 2h30**

Polluant	Emissions Ferries – Ajaccio, 2021 (tonnes)	
	Phase de manœuvre	Phase à quai
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1600,29	3347,69
Méthane (CH ₄)	0,15	0,32
Monoxyde de carbone (CO)	3,80	7,80
Oxydes d'azote (NO + NO ₂)	40,67	82,78
Oxydes de soufre (SO ₂ + SO ₃)	5,44	2,11
Particules de taille inférieure à 10 µm (PM ₁₀)	3,02	1,50
Particules de taille inférieure à 2.5 µm (PM _{2.5})	2,86	1,42

Tableau 13 : Quantité de polluants émis par les ferries, CENAQ - Ajaccio, 2021

Polluant	Emissions Ferries – Bastia , 2021 (tonnes)	
	Phase de manœuvre	Phase à quai
Dioxyde de carbone (CO ₂)	2024,19	3459,17
Méthane (CH ₄)	0,19	0,33
Monoxyde de carbone (CO)	4,80	8,06
Oxydes d'azote (NO + NO ₂)	51,45	85,54
Oxydes de soufre (SO ₂ + SO ₃)	6,88	2,18
Particules de taille inférieure à 10 µm (PM ₁₀)	3,82	1,55
Particules de taille inférieure à 2.5 µm (PM _{2.5})	3,62	1,47

Tableau 14 : Quantité de polluants émis par les ferries, CENAQ - Bastia, 2021

En reprenant les émissions du cas de base, on peut ainsi sortir les différents gains obtenus grâce à l'utilisation du CENAQ.

Polluant	Différences CENAQ / Base (%)					
	Phase de manœuvre		Phase à quai		TOTAL	
	AJA	BIA	AJA	BIA	AJA	BIA
CO ₂	0%	0%	-74%	-64%	-66%	-52%
CH ₄	0%	0%	-74%	-64%	-66%	-52%
CO	0%	0%	-74%	-64%	-66%	-52%
NO + NO ₂	0%	0%	-74%	-64%	-66%	-52%
SO ₂ + SO ₃	0%	0%	-74%	-64%	-45%	-30%
PM ₁₀	0%	0%	-74%	-64%	-49%	-34%
PM _{2.5}	0%	0%	-74%	-64%	-49%	-34%

Tableau 15 : Différences entre le scénario de base et l'utilisation de CENAQ (%)

De manière évidente, la réduction des émissions concerne uniquement la phase à quai. Celle-ci étant la plus émissive sur une escale complète, cela se retrouve également dans un pourcentage de réduction important au total. Tous les polluants sont concernés, les moteurs étant par définition éteints durant la période de branchement au quai.

La différence entre les deux ports s'explique par la quantité plus importante d'escales longues à Ajaccio, dont la technologie CENAQ semble particulièrement adaptée (toutefois en considérant l'impact sur le réseau électrique et sur la pollution locale comme négligeable, comme évoqué plus haut dans ce rapport).

En résumé, une solution de type CENAQ pourrait apporter aux ports principaux de Corse une **réduction allant de 30 à 66% de réduction tout polluants confondus.** Cette solution concerne uniquement les ferries faisant escale pour au moins 2h30, la procédure de branchement à quai ne permettant pas actuellement de connecter les escales plus courtes (notamment, les escales en période estivale durant pour certaines à peine une heure).

2.1.2.4. Zone SECA

Dans le cadre de la mise en place de la zone SECA en Méditerranée, tous les armateurs transportant des passagers devront respecter une norme imposant en sortie de cheminée des émissions équivalentes à un carburant à 0.1% de soufre. Cela peut être fait directement en changeant le carburant ou via l'utilisation de filtres à particules / scrubbers.

La plupart des ferries accostant dans les ports Corses respectent déjà cette législation lors du stationnement (car obligation du passage à 0.1% pour les escales supérieures à 2h, mais étendue par les compagnies maritimes à quasiment toutes les escales). La différence en termes d'émissions concerne alors principalement la phase de manœuvre comme le montre le tableau suivant :

Polluant	Emissions Ferries – Ajaccio, 2021 (tonnes)	
	Phase de manœuvre	Phase à quai
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1505,48	12964,59
Méthane (CH ₄)	0,14	1,23
Monoxyde de carbone (CO)	3,51	30,22
Oxydes d'azote (NO + NO ₂)	37,23	320,59
Oxydes de soufre (SO ₂ + SO ₃)	0,95	8,18
Particules de taille inférieure à 10 µm (PM ₁₀)	0,68	5,82
Particules de taille inférieure à 2.5 µm (PM _{2.5})	0,64	5,51

Tableau 16 : Quantité de polluants émis par les ferries, SECA - Ajaccio, 2021

Polluant	Emissions Ferries – Bastia , 2021 (tonnes)	
	Phase de manœuvre	Phase à quai
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1936,95	9501,12
Méthane (CH ₄)	0,18	0,90
Monoxyde de carbone (CO)	4,52	22,15
Oxydes d'azote (NO + NO ₂)	47,90	234,94
Oxydes de soufre (SO ₂ + SO ₃)	1,22	5,99
Particules de taille inférieure à 10 µm (PM ₁₀)	0,87	4,26
Particules de taille inférieure à 2.5 µm (PM _{2.5})	0,82	4,04

Tableau 17 : Quantité de polluants émis par les ferries, SECA - Bastia, 2021

Polluant	Différences SECA / Base (%)					
	Phase de manœuvre		Phase à quai		TOTAL	
	AJA	BIA	AJA	BIA	AJA	BIA
CO ₂	-6%	-4%	0%	0%	-1%	-1%
CH ₄	-8%	-6%	0%	0%	-1%	-1%
CO	-8%	-6%	0%	0%	-1%	-1%
NO + NO ₂	-8%	-7%	0%	0%	-1%	-1%
SO ₂ + SO ₃	-83%	-82%	0%	0%	-33%	-44%
PM ₁₀	-78%	-77%	0%	0%	-27%	-37%
PM _{2,5}	-78%	-77%	0%	0%	-27%	-37%

Tableau 18 : Différences entre le scénario de base et l'utilisation du SECA (%)

La phase de manœuvre observe les plus gros changements au niveau des particules fines ainsi que du dioxyde de soufre, résultant de l'utilisation d'un carburant de meilleure qualité / d'une meilleure filtration. Peu de changements sont à noter au niveau du dioxyde de carbone et d'azote, et comme aucune différence n'est relevée concernant la phase à quai (de par l'utilisation déjà en place du MDO comme carburant à quai), les gains finaux sont disparates.

Au total, la solution de la zone SECA permettra une réduction d'environ **30% des émissions de particules fines et oxydes de soufre**, sans toutefois réduire significativement les autres polluants.

2.1.2.5. Navires au GNL

Un scénario intéressant à prendre en compte concerne l'arrivée sur le marché de navires aux GNL pour le transport de passager (déjà en place pour certains navires de croisières et cargos). L'étude a calculé l'impact d'un remplacement complet de la flotte actuelle avec des navires fonctionnant au GNL. A noter que dans ces scénarii, un navire au GNL ne se raccordera pas au CENAQ car jugé plus propre par les armateurs.

Polluant	Emissions Ferries – Ajaccio, 2021 (tonnes)	
	Phase de manœuvre	Phase à quai
Dioxyde de carbone (CO ₂)	991,64	7950,79
Méthane (CH ₄)	18,46	148,04
Monoxyde de carbone (CO)	2,82	22,64
Oxydes d'azote (NO + NO ₂)	2,82	22,64
Oxydes de soufre (SO ₂ + SO ₃)	0,01	0,06
Particules de taille inférieure à 10 µm (PM ₁₀)	0,06	0,52
Particules de taille inférieure à 2.5 µm (PM _{2.5})	0,00	0,00

Tableau 19 : Quantité de polluants émis par les ferries, GNL - Ajaccio, 2021

Polluant	Emissions Ferries – Bastia , 2021 (tonnes)	
	Phase de manœuvre	Phase à quai
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1251,25	5838,18
Méthane (CH ₄)	23,30	108,70
Monoxyde de carbone (CO)	3,56	16,62
Oxydes d'azote (NO + NO ₂)	3,56	16,62
Oxydes de soufre (SO ₂ + SO ₃)	0,01	0,04
Particules de taille inférieure à 10 µm (PM ₁₀)	0,08	0,38
Particules de taille inférieure à 2.5 µm (PM _{2.5})	0,00	0,00

Tableau 20 : Quantité de polluants émis par les ferries, GNL - Bastia, 2021

Les résultats obtenus ici sont particulièrement intéressants dans la mesure où la plupart des polluants enregistrent une baisse significative, allant pour certains jusqu'à 100% de réduction. C'est le cas notamment des oxydes de soufre, n'étant pas présent dans le carburant de base (GNL).

Une baisse significative des émissions de CO₂ est à noter également, tout comme celle des oxydes d'azote.

Polluant	Différences GNL / Base (%)					
	Phase de manœuvre		Phase à quai		TOTAL	
	AJA	BIA	AJA	BIA	AJA	BIA
CO ₂	-38%	-38%	-39%	-39%	-39%	-38%
CH ₄	11899%	11870%	11983%	12007%	11974%	11982%
CO	-26%	-26%	-25%	-25%	-25%	-25%
NO + NO ₂	-93%	-93%	-93%	-93%	-93%	-93%
SO ₂ + SO ₃	-100%	-100%	-99%	-99%	-100%	-100%
PM ₁₀	-98%	-98%	-91%	-91%	-93%	-94%
PM _{2,5}	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%

Tableau 21 : Différences entre le scénario de base et une flotte 100% au GNL (%)

Le GNL étant du gaz naturel liquide, composé principalement de méthane, on constate toutefois une très forte augmentation des émissions de ce dernier en sortie d'échappement. Il est alors important de quantifier la réduction des émissions de CO₂ par rapport à l'augmentation de celles de CH₄. En effet, le pouvoir réchauffant du méthane étant 28 fois plus important que celui du dioxyde de carbone, il est nécessaire de calculer les émissions de CO_{2eq} afin de quantifier au mieux cette réduction totale (ou non), selon la formule ci-dessous :

$$F_{CO_{2eq}} = \alpha_{CO_2} F_{CO_2} + \alpha_{CH_4} F_{CH_4} + \alpha_{N_2O} F_{N_2O}$$

où α_i est le pouvoir de réchauffement global du gaz i , rapporté au pouvoir réchauffant de la même masse de CO₂ sur une période de 100 ans. Par définition, $\alpha_{CO_2} = 1$; les valeurs utilisées pour les autres gaz, $\alpha_{CH_4} = 28$ $\alpha_{N_2O} = 265$, sont issues du cinquième rapport du GIEC. Précision faite qu'aucune émission de N₂O n'a été calculée lors de cette étude.

Polluant	Différences GNL / Base (%)					
	Phase de manœuvre		Phase à quai		TOTAL	
	AJA	BIA	AJA	BIA	AJA	BIA
CO _{2eq}	1508,62 t	1903,58 t	12095,88 t	8881,88 t	13604,51 t	10785,46 t
	-6%	-7%	-7%	-6%	-7%	-7%
CO ₂	-38%	-38%	-39%	-39%	-39%	-38%
CH ₄	11899%	11870%	11983%	12007%	11974%	11982%

Tableau 22 : Emissions en CO_{2eq} d'un scénario 100% GNL

Il en ressort que le scénario GNL, bien qu'annonçant une forte baisse des émissions de CO₂, enregistre une très forte hausse des émissions de méthane au pouvoir réchauffant bien plus impactant, diminuant alors les performances globales de ce carburant. L'ajout dans le calcul des émissions de N₂O pourrait venir alourdir le bilan final.

En résumé, un scénario 100% GNL permettrait de réduire complètement les émissions de particules fines et d'oxydes de soufre, de réduire drastiquement celles d'oxyde d'azote, mais n'aurait qu'un faible impact dans la réduction des gaz à effet de serre

2.1.2.6. Scenarii combinés

Il n'existe pas d'unique solution pour réduire les émissions de polluant. Les scenarii précédemment évoqués peuvent être alors combinés afin de bénéficier du meilleur facteur de réduction de chaque technologie, sur toutes les phases de l'escale.

Les différents scenarii calculés en émissions sont les suivants :

Remplacement d'un navire existant par un navire fonctionnant au GNL

CENAQ + SECA

CENAQ + Remplacement d'un navire existant par un navire fonctionnant au GNL

SECA + Remplacement d'un navire existant par un navire fonctionnant au GNL

CENAQ + Remplacement d'un navire existant par un navire fonctionnant au GNL + SECA

A noter que le navire au GNL ne se branchera pas au CENAQ.

Polluant	Différences Scenarii combinés / Base (%) TOTAL (Manœuvre + Quai)									
	Remplacement 1 GNL		SECA + 1 GNL		CENAQ + 1 GNL		CENAQ + SECA		CENAQ + SECA + 1 GNL	
	AJA	BIA	AJA	BIA	AJA	BIA	AJA	BIA	AJA	BIA
CO ₂	-10%	-2%	-10%	-3%	-68%	-53%	-67%	-53%	-57%	-45%
CH ₄	2980%	708%	2979%	707%	687%	62%	-67%	-54%	2932%	74%
CO	-6%	-1%	-7%	-3%	-67%	-53%	-67%	-54%	-54%	-45%
NO + NO ₂	-23%	-5%	-24%	-7%	-72%	-53%	-67%	-54%	-71%	-46%
SO ₂ + SO ₃	-22%	-4%	-50%	-47%	-54%	-31%	-78%	-74%	-82%	-69%
PM ₁₀	-21%	-4%	-43%	-40%	-58%	-35%	-75%	-70%	-78%	-65%
PM _{2,5}	-23%	-4%	-45%	-40%	-58%	-35%	-75%	-70%	-80%	-65%
CO _{2eq}	-2%	0%	-2%	-1%	-66%	-52%	-67%	-53%	-50%	-45%

Tableau 23 : Différences entre le scénario de base et des scenarii combinés (%) - Manœuvre + Quai

En combinant les résultats de tous les scenarii, certaines solutions semblent plus adaptées que d'autres.

Le remplacement d'un navire vieillissant de la flotte par un nouveau navire au GNL permettra de réduire d'une partie significative les émissions de polluants principaux (avec l'hypothèse que le navire remplacé est celui dont les émissions individuelles actuelles sont les plus élevées, avec quasiment 20% des émissions de SO_x à lui tout seul.

L'ajout de la norme SECA à ce scénario permettra de réduire davantage les particules fines et oxydes de soufre comme vu précédemment.

Le scénario apportant le plus de réduction en termes d'émissions globales est celui concernant le respect de la norme SECA couplé à l'utilisation du CENAQ. Notamment en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre.

En revanche, le remplacement d'un des navires existants par un navire au GNL permet d'accentuer la réduction des polluants atmosphériques au détriment des émissions de gaz à effet de serre, car il n'est prévu de connexion au CENAQ pour les navires au GNL, car considérés plus « propres » par les armateurs que le mix énergétique corse (navires récents / moteurs récents).

Un cas intéressant aurait été de vérifier si une flotte 100% GNL se branchant au CENAQ permettrait de réduire davantage les émissions globales, mais il n'a pas été question de l'étudier suite aux discussions avec les partenaires locaux (pour les raisons évoquées plus haut).

L'étude a permis de montrer que les différentes technologies permettent de réduire plus ou moins drastiquement certaines catégories de polluant. Les choix d'utilisation de telle ou telle solution relèveront alors de la volonté à réduire une catégorie en particulier (GES / Polluants locaux).

Réduction principale des polluants locaux (SO_x, PM_x, NO_x) = SECA + GNL (// CENAQ)

Réduction principale des GES (CO₂ CH₄) = SECA + CENAQ

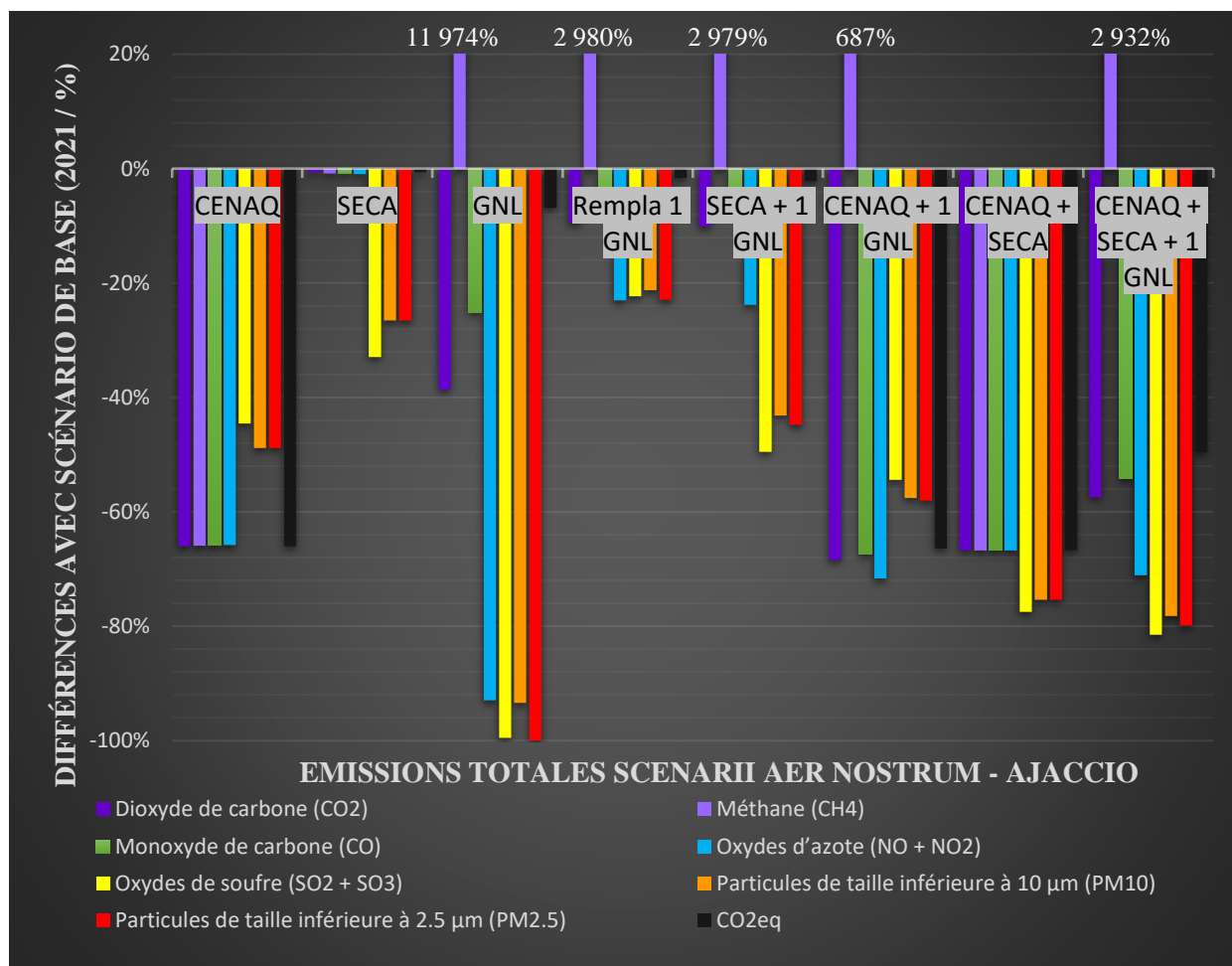


Figure 21 : Pourcentage de différences d'émissions entre les scenarii avec la situation 2021 à Ajaccio

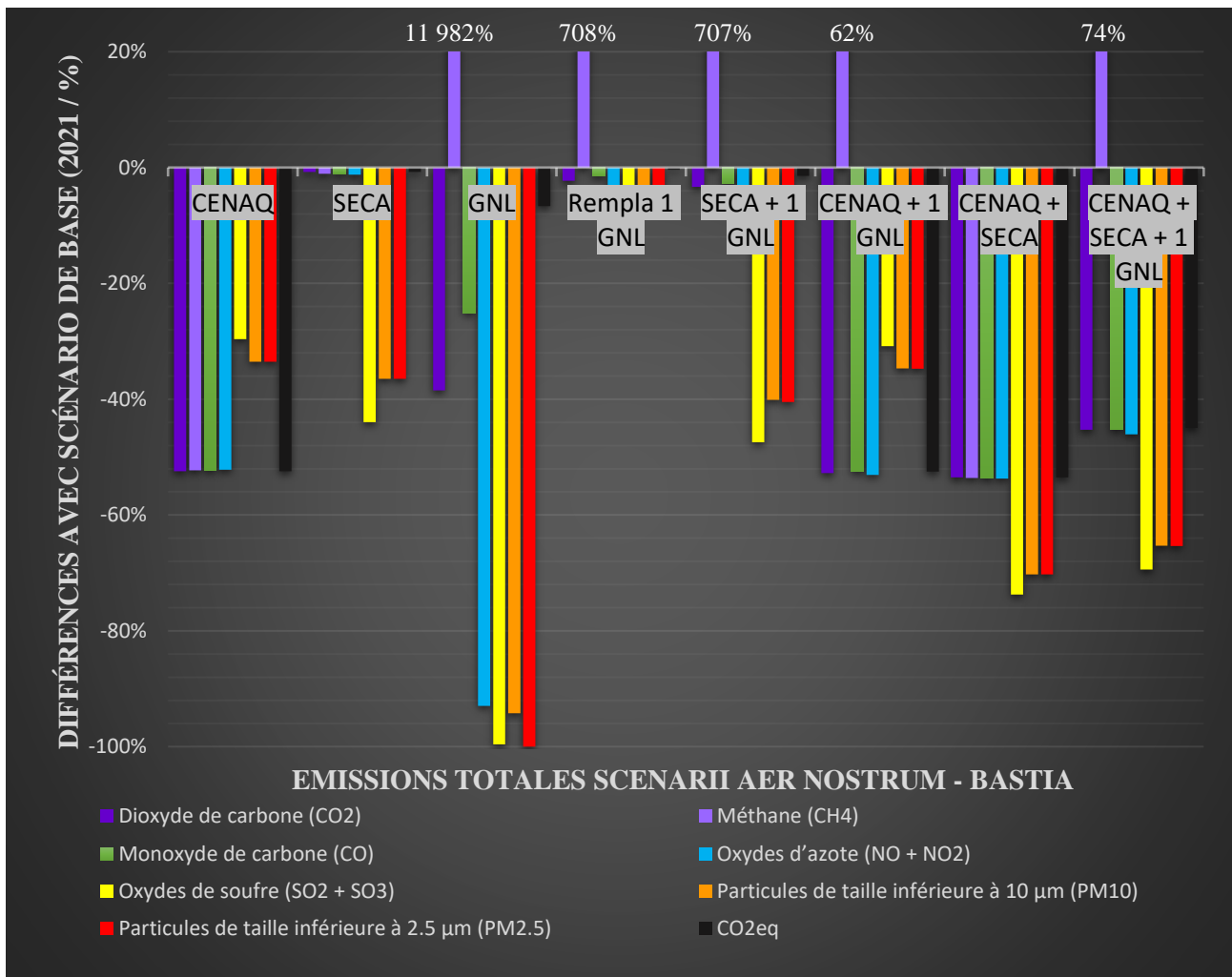


Figure 22 : Pourcentage de différences d'émissions entre les scénarii avec la situation 2021 à Bastia

2.2. Résultats des scenarii - Modélisation

Afin de qualifier la pollution sur Ajaccio et Bastia et les éventuels gains apportés par les scenarii, quatre journées ont été choisies pour faire tourner des modélisations en 3D.

Ces journées particulières se démarquent par des conditions de vent, de trafic maritime ainsi que de niveaux de pollution enregistrés intéressants à étudier. Suite aux résultats obtenues lors des campagnes de mesures et décrites dans le rapport T1.3.1, les journées du **15/09/2021** sur Ajaccio et du **27/08/2021** sur Bastia ressortent comme étant les plus favorables pour identifier un impact provenant du trafic maritime. Ces journées seront donc modélisées.

Dans le cadre des scenarii GNL, il a été question de modéliser l'impact qu'un nouveau navire fonctionnant au GNL pouvait avoir en venant remplacer un navire vieillissant. Le « A Nepita » a été choisi comme navire à remplacer, les escales concernées sont le 12/09/2021 à Ajaccio et le 14/07/2021 à Bastia.

	<i>Ajaccio</i>		<i>Bastia</i>	
	12/09/2021	15/09/2021	14/07/2021	27/08/2021
<i>Scenario</i>	CENAQ + SECA + 1 GNL	CENAQ + SECA	CENAQ + SECA + 1 GNL	CENAQ + SECA

Tableau 24 : Dates et modélisations concernées sur les ports d'Ajaccio et Bastia

Le modèle utilisé pour ces simulations mensuelles est le modèle PMSS développé par Aria Technologies, qui a été décrit dans le livrable T2.3.1 – Rapport sur les résultats des simulations de modélisation du projet. Ce modèle permet de simuler l'évolution temporelle du champ de concentration dû aux panaches des navires. Pour les NO_x et les PM_{2.5}, il est nécessaire d'estimer en plus une concentration de fond. Cette estimation est réalisée par le biais de la station de mesures la plus proche présente sur le domaine de simulation. La concentration de fond C_i^{fond} , est ici définie comme :

$$C_i^{\text{fond}}(t) = C_i^{\text{station}}(t) - C_i^{\text{sim}}(t)$$

où t est le temps, où C_i^{station} est la concentration de l'espèce i mesurée par la station de mesures, et où C_i^{sim} est la concentration du panache simulé de l'espèce i extraite à l'emplacement de la station. Lorsque la modélisation donne $C_i^{\text{sim}} > C_i^{\text{station}}$, on fixe $C_i^{\text{fond}} = 0$.

Les simulations sont réalisées avec un pas de temps d'une heure. Les concentrations de fond ont été estimées dans le livrable T2.3.1 à l'aide des mesures des stations fixes urbaines du réseau de Qualitair Corse. Ces concentrations correspondent au fond estimé pour les scenarii de référence, qui reproduisent la situation dans les ports d'Ajaccio et de Bastia en 2021. Dans ce travail, la réactivité chimique étant négligée, on ne quantifie pas l'impact des variations des concentrations des panaches des navires dans les différents scenarii sur la concentration de fond. C'est donc la même concentration de fond qui sera considérée pour tous les scenarii, celle du scénario de référence. Les moyennes des concentrations de fond estimées pour les deux saisons simulées dans les ports d'Ajaccio et de Bastia sont résumées dans le tableau ci-dessous :

	<i>Ajaccio</i>		<i>Bastia</i>	
	12/09/2021	15/09/2021	14/07/2021	27/08/2021
<i>PM2.5</i>	9.1	10.35	4.6	8.5
<i>PM10</i>	14.3	28.85	11.0	16.5
<i>NO₂</i>	8.7	33	2.7	6.9
<i>SO₂</i>	0.2	1.32	-	-
<i>NO₂/NO_x</i>	0.9	0.9	0.5	0.7

Tableau 25 : Concentrations de fond moyennes en $\mu\text{g.m}^{-3}$ estimées aux stations Ajaccio « Canetto » et Bastia « Giraud » pour les journées de simulations indiquées

La moyenne des champs de concentrations horaires exportée sur toute la durée des simulations permet d'obtenir un champ de concentration moyen journalier. Ces valeurs moyennes sont analysées sous forme de cartes et sous forme de box-plots (ou « boîtes à moustaches ») des concentrations au-dessus de la terre ferme, où sont les populations exposées. Les espèces modélisées sont les NO_x, SO_x et les PM_{2.5}, mais les espèces analysées, au regard de la réglementation nationale et internationale (lignes directrices de l'OMS) sont NO₂, SO₂ et les PM_{2.5}. Comme dans le livrable T2.3.1, on suppose que le ratio SO₃/SO₂ est suffisamment faible pour faire l'approximation SO₂ \approx SO_x. Les concentrations en NO₂ sont déduites des concentrations en NO_x en appliquant un facteur correctif, correspondant au ratio des concentrations en NO₂ et NO_x. La valeur moyenne de ce ratio, estimée au niveau des stations Ajaccio Canetto et Bastia Giraud sur plusieurs mois, s'élève à 0.8.

Le tableau suivant partage les résultats des moyennes en $\mu\text{g.m}^{-3}$ des concentrations mesurées par les cabines situées près des ports d'Ajaccio et de Bastia pour l'étude, extraites aux emplacements des cabines, aux temps tels que $C_i^{\text{sim}} \neq 0$.

Les scénarii testés sont ceux de base, du SECA ainsi que de la combinaison CENAQ / SECA / 1 GNL.

Les ratios des deux moyennes donnent ainsi la **contribution pour les navires référencés**.

Il est important de noter que ces résultats doivent être nuancés selon les incertitudes au niveau des émissions (qui ne sont pas totalement connues de Qualitair Corse, notamment concernant les navires de croisière). Les journées sur Ajaccio et Bastia ont été également choisies pour n'inclure que des navires connus afin d'obtenir des résultats d'émissions les plus fidèles à la réalité.

La calibration du modèle ainsi que les incertitudes de modélisation sont décrites dans le livrable T2.3.1.

		Ajaccio - Canetto		Bastia - Giraud	
		12/09/2021	15/09/2021	14/07/2021	27/08/2021
PM_{2.5} (µg.m⁻³)					
BASE	Mesures	9.33	12.0	5.5	8.6
	Simulation	3.81	0.78	1.8	0.20
	% Sim/Mes	40.8%	6.5%	32.7%	2.3%
SECA	Simulation	2.55	0.73	1.3	0.15
	% Sim/Mes	27.3%	6.1%	23.6%	1.7%
CENAQ / SECA / GNL	Simulation	1.01	0.30	0.5	0.10
	% Sim/Mes	10.8%	2.5%	9.1%	1.2%
PM₁₀ (µg.m⁻³)					
BASE	Mesures	15.90	31.4	13.9	14.6
	Simulation	5.15	0.94	1.8	0.21
	% Sim/Mes	32.4%	3.0%	12.9%	1.4%
SECA	Simulation	3.98	0.88	1.4	0.17
	% Sim/Mes	25.0%	2.8%	10.1%	1.2%
CENAQ / SECA / GNL	Simulation	1.52	0.25	0.9	0.14
	% Sim/Mes	9.6%	0.8%	6.5%	0.1%
NO₂ (µg.m⁻³)					
BASE	Mesures	-	-	-	-
	Simulation	91.64	37.35	41.2	6.49
	% Sim/Mes	-	-	-	-
SECA	Simulation	89.88	37.25	40.9	8.80
	% Sim/Mes	-	-	-	-
CENAQ / SECA / GNL	Simulation	53.19	17.13	19.5	6.23
	% Sim/Mes	-	-	-	-
SO₂ (µg.m⁻³)					
BASE	Mesures	-	-	-	1.2
	Simulation	8.18	1.15	3.0	0.26
	% Sim/Mes	-	-	-	21.7%
SECA	Simulation	6.37	1.02	2.1	0.31
	% Sim/Mes	-	-	-	25.8%
CENAQ / SECA / GNL	Simulation	1.41	0.46	0.8	0.21
	% Sim/Mes	-	-	-	17.5%

Tableau 26 : Part de la pollution maritime par rapport aux mesures des stations fixes sur Ajaccio et Bastia en fonction des scenarii (valeurs moyennées sur la journée)

2.2.1. Cartes de modélisation de la pollution pour les différents scenarii

2.2.1.1. Port d'Ajaccio

Les cartes de concentrations simulées avec fond pour la journée du 15/09/2021 sur Ajaccio. Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence.

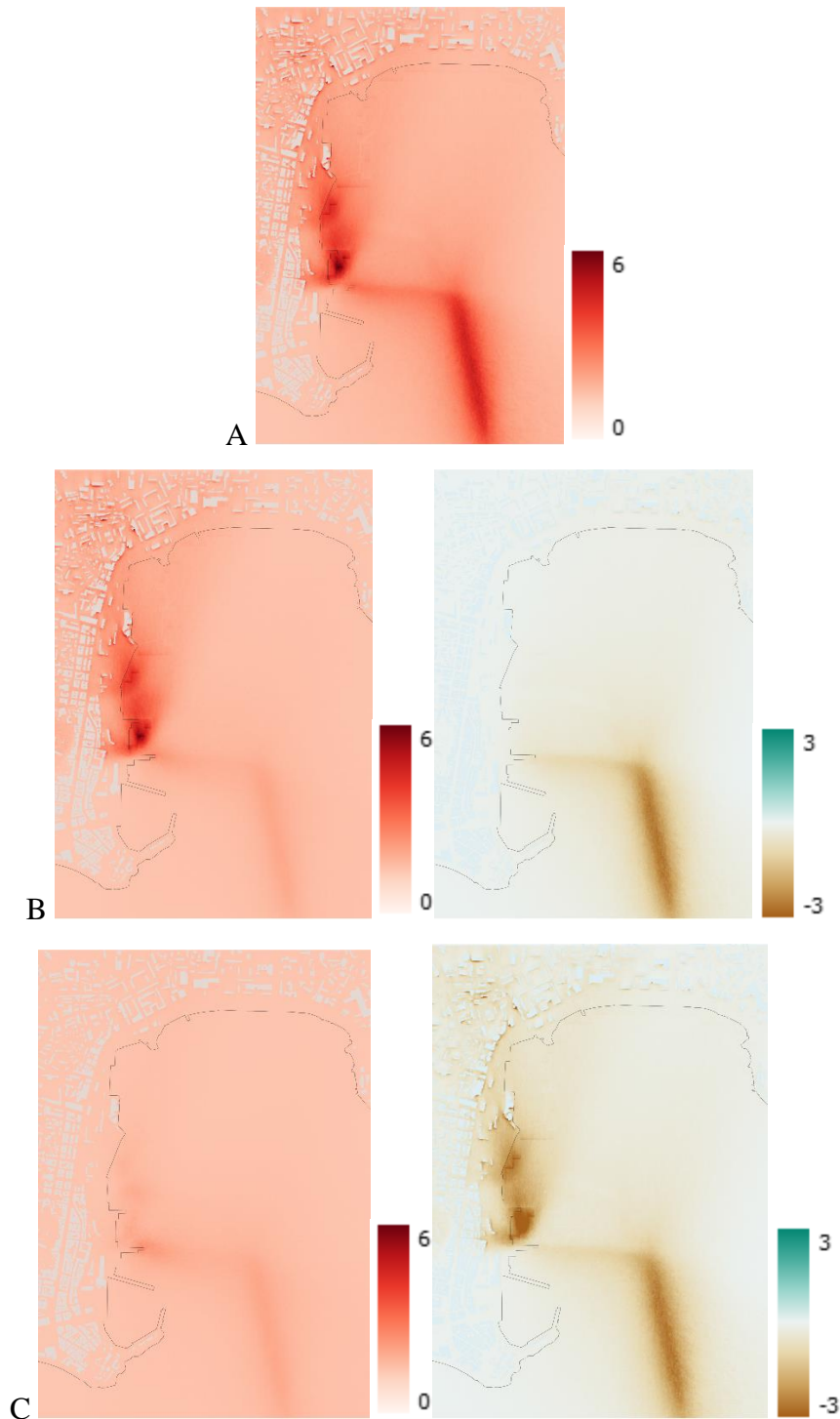


Figure 23 : Cartes des concentrations moyennes en SO_2 en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à Ajaccio le 15/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).

Une baisse de SO₂ est nettement visible respectivement sur la phase manœuvre (B) puis à quai (C), et concerne principalement le littoral proche.

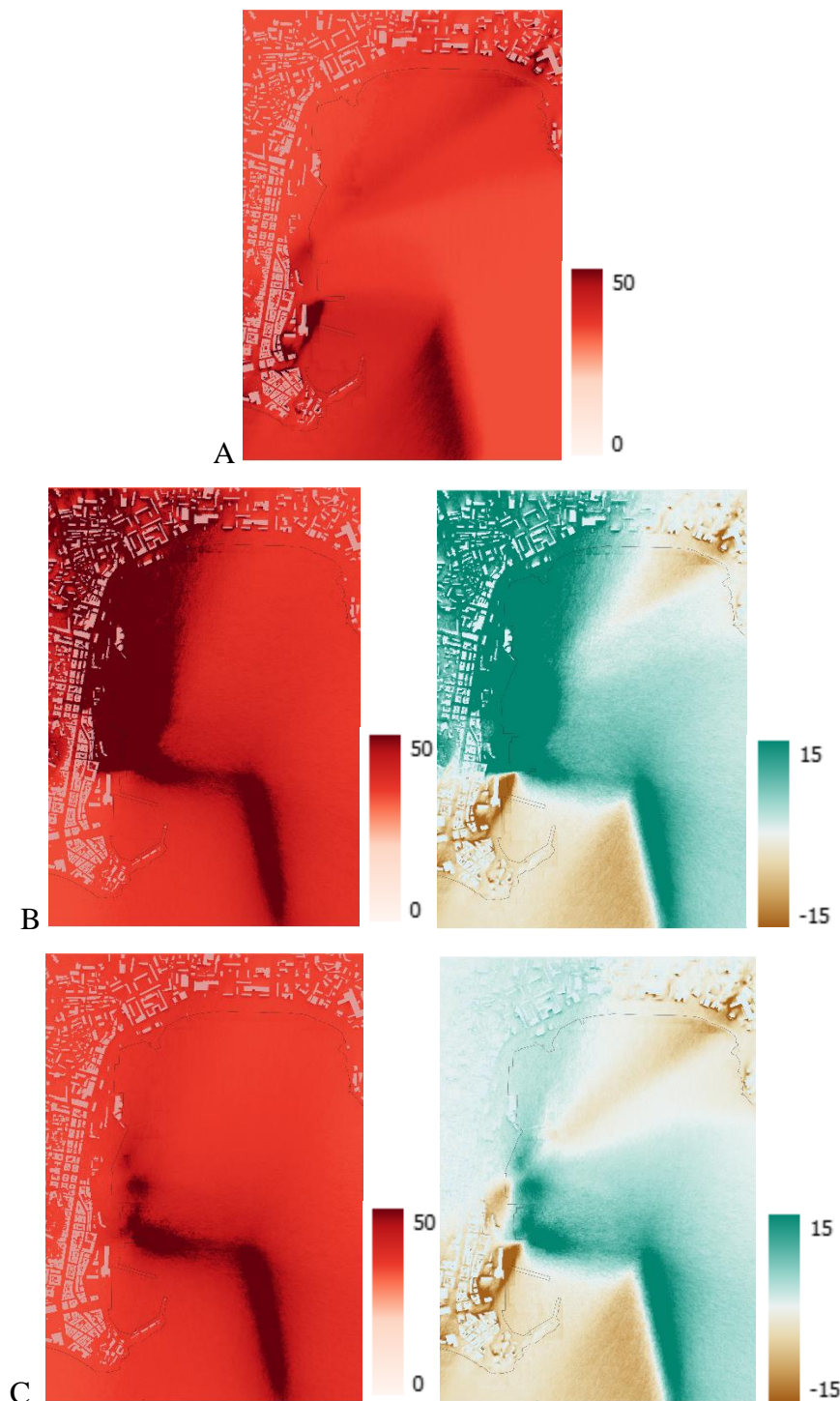


Figure 24 : Cartes des concentrations moyennes en NO₂ en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à Ajaccio le 15/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).

Les simulations sur le NO₂ semblent diverger des attentes en affichant des valeurs bien plus élevées avec l'utilisation du SECA que sur le scénario de base. Il semblerait que des effets de bords numériques soient la cause des valeurs observées. L'étude ne permet pas à ce jour de confirmer ces

observations avec les éléments à disposition. Les résultats obtenus sur ce polluant sont donc à nuancer.

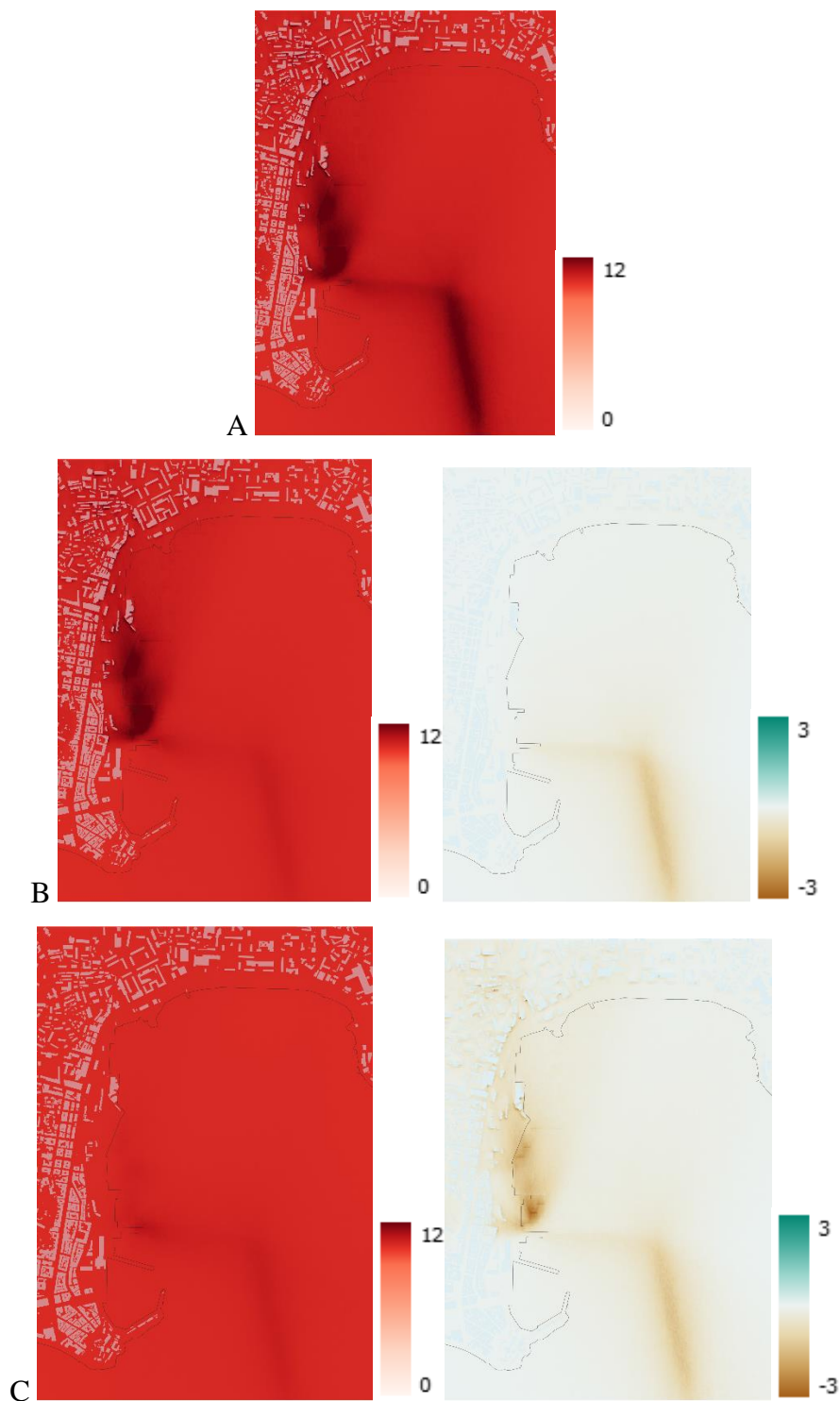


Figure 25 : Cartes des concentrations moyennes en $PM_{2.5}$ en $\mu g.m^{-3}$ à Ajaccio le 15/09/2021 pour le scénario de référence (A) et pour les scénarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).

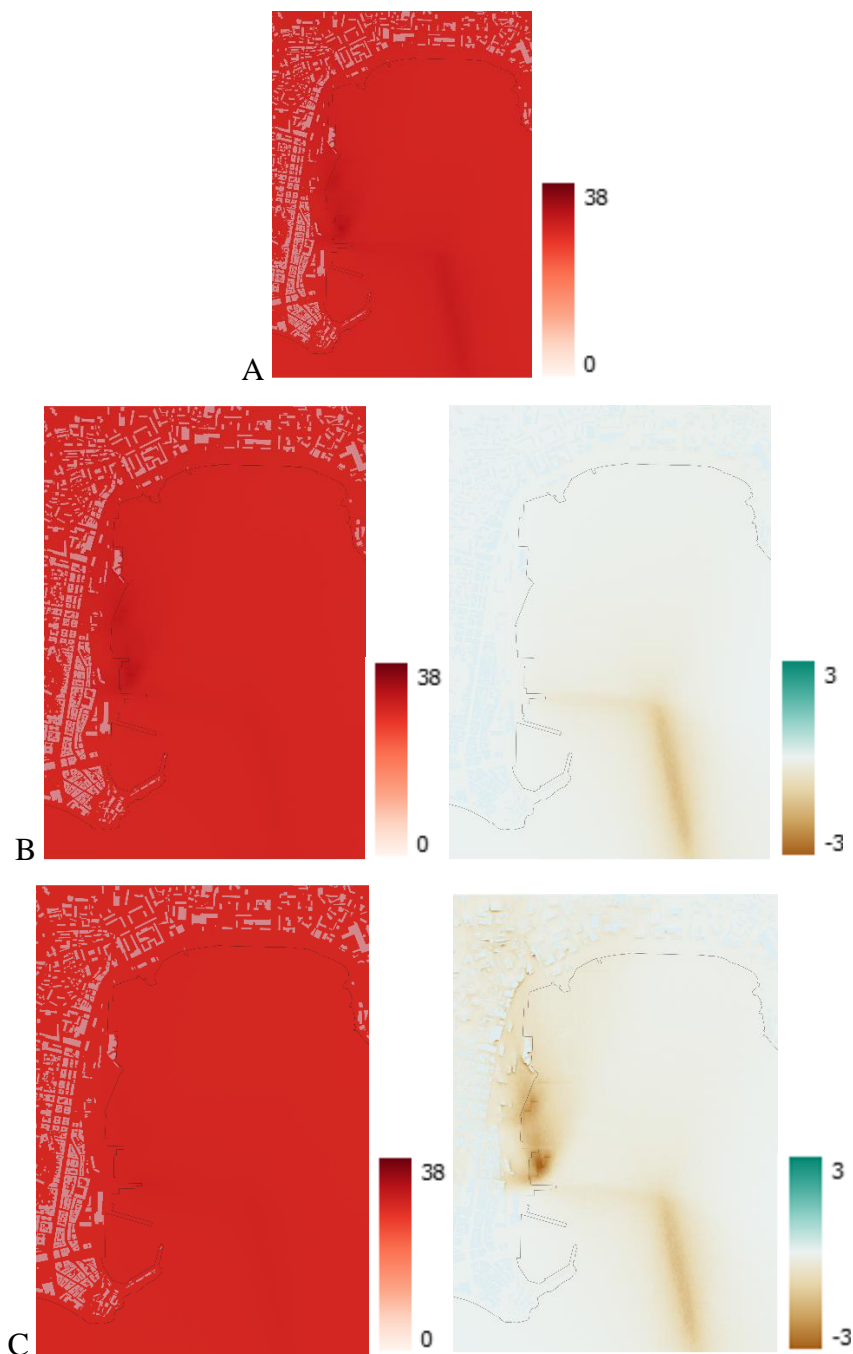


Figure 26 : Cartes des concentrations moyennes en PM_{10} en $\mu g \cdot m^{-3}$ à Ajaccio le 15/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).

Une baisse des particules fines est observée, bien que minime. Cela est à mettre en perspective avec une contribution relativement faible vis-à-vis des émissions du trafic maritime (cf. chapitre sur les résultats d'émissions).

Les cartes de concentrations simulées avec fond pour la journée du 12/09/2021 sur Ajaccio. Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence.

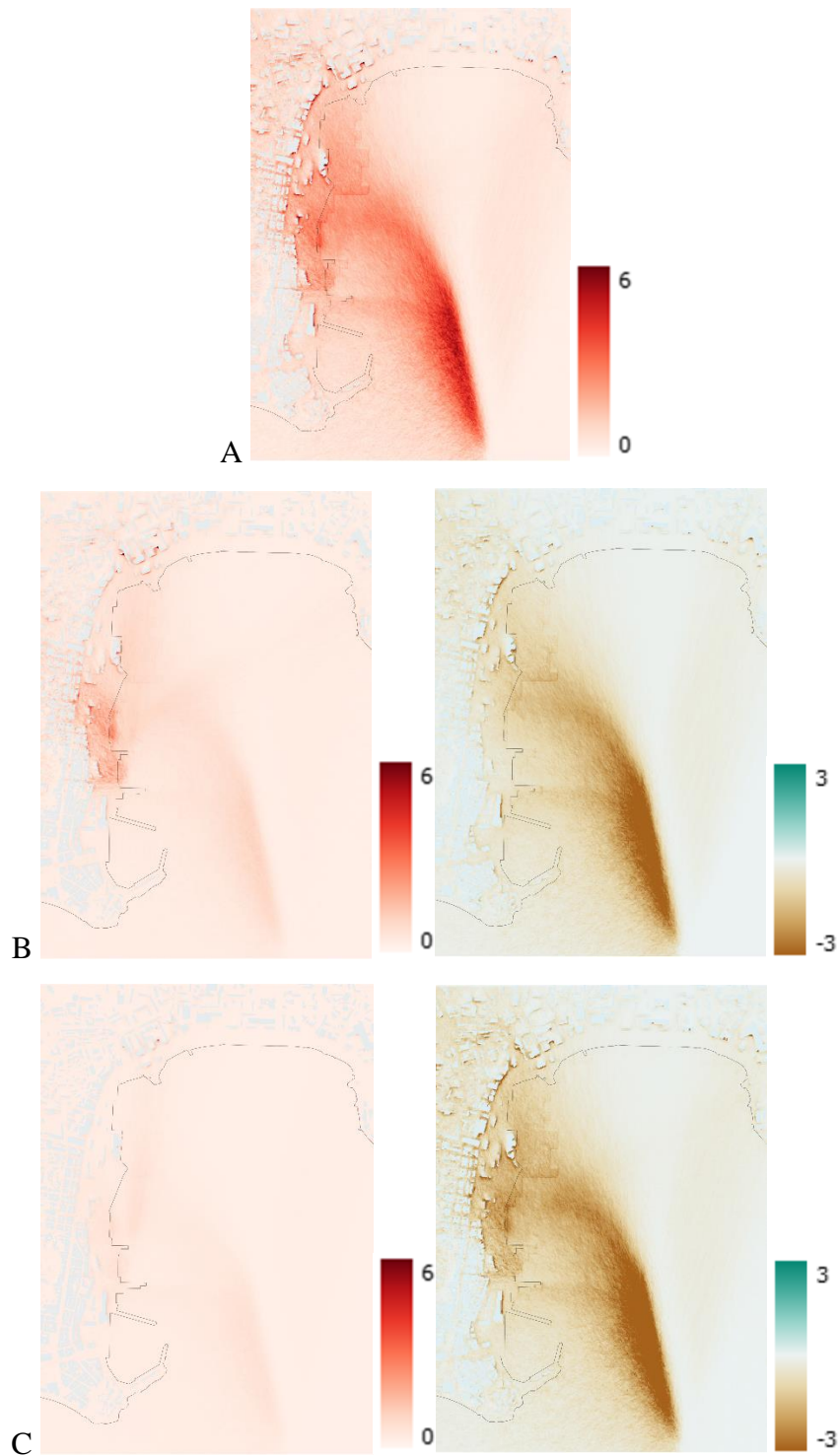


Figure 27 : Cartes des concentrations moyennes en SO_2 en $\mu g.m^{-3}$ à Ajaccio le 12/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1 GNL (C).

Une baisse de SO₂ est nettement visible respectivement sur la phase manœuvre (B) puis à quai (C). Cette diminution est plus globalisée dans ce cas-là, rapport avec la météo différente dans ce cas.

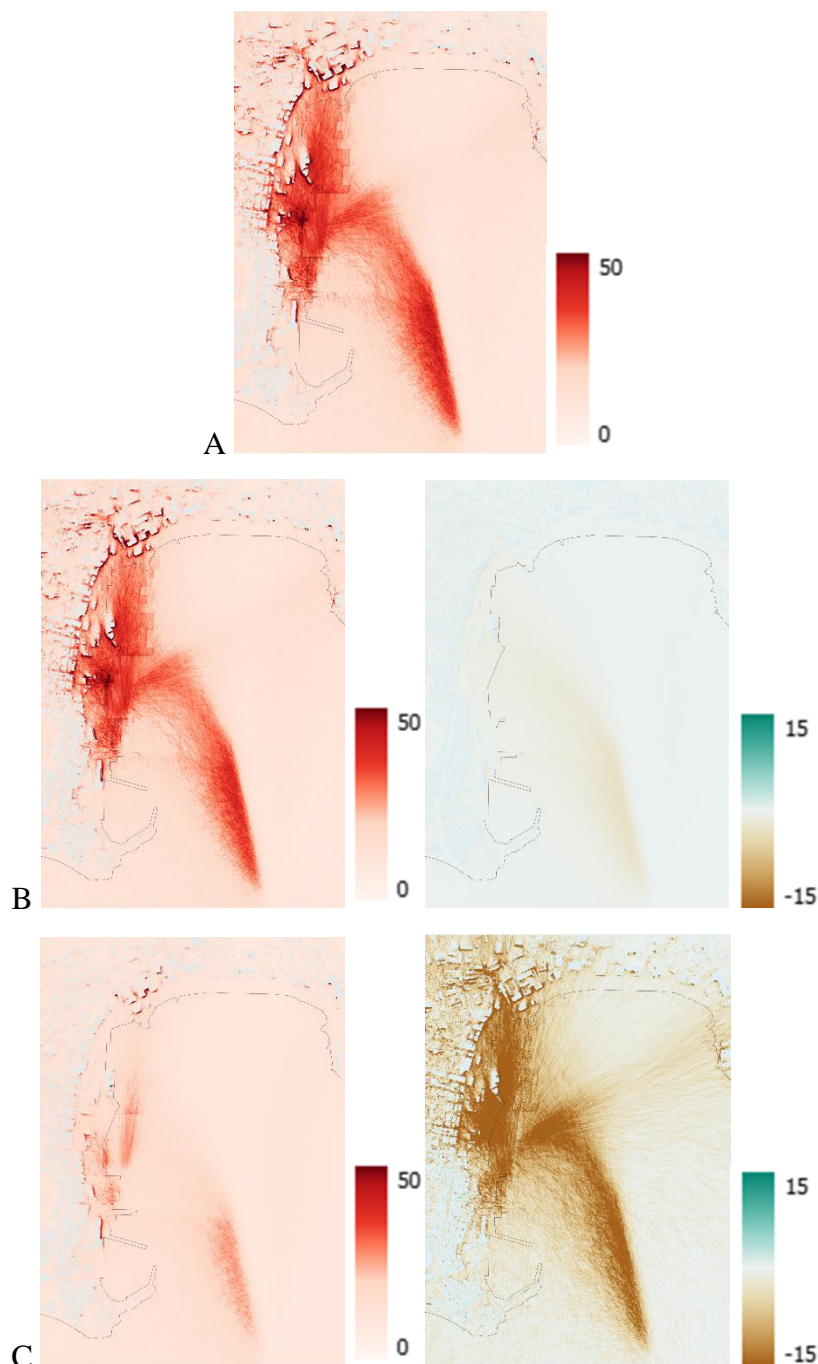


Figure 28 : Cartes des concentrations moyennes en NO₂ en µg.m⁻³ à Ajaccio le 12/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1 GNL (C).

Le constat est inversé ici concernant le NO₂, une réduction plus ou moins importante est observée avec le respect de la norme SECA, puis l'ajout du CENAQ et le remplacement du navire « A Nepita » par le « A Galleota », nouveau navire au GNL de la Corsica Linea.

Toutefois, les hypothèses de base étant similaires au cas précédent, l'étude ne pourra porter un jugement plus abouti sur les résultats de la modélisation, les éléments de calculs sur les effets de bords étant encore à confirmer.

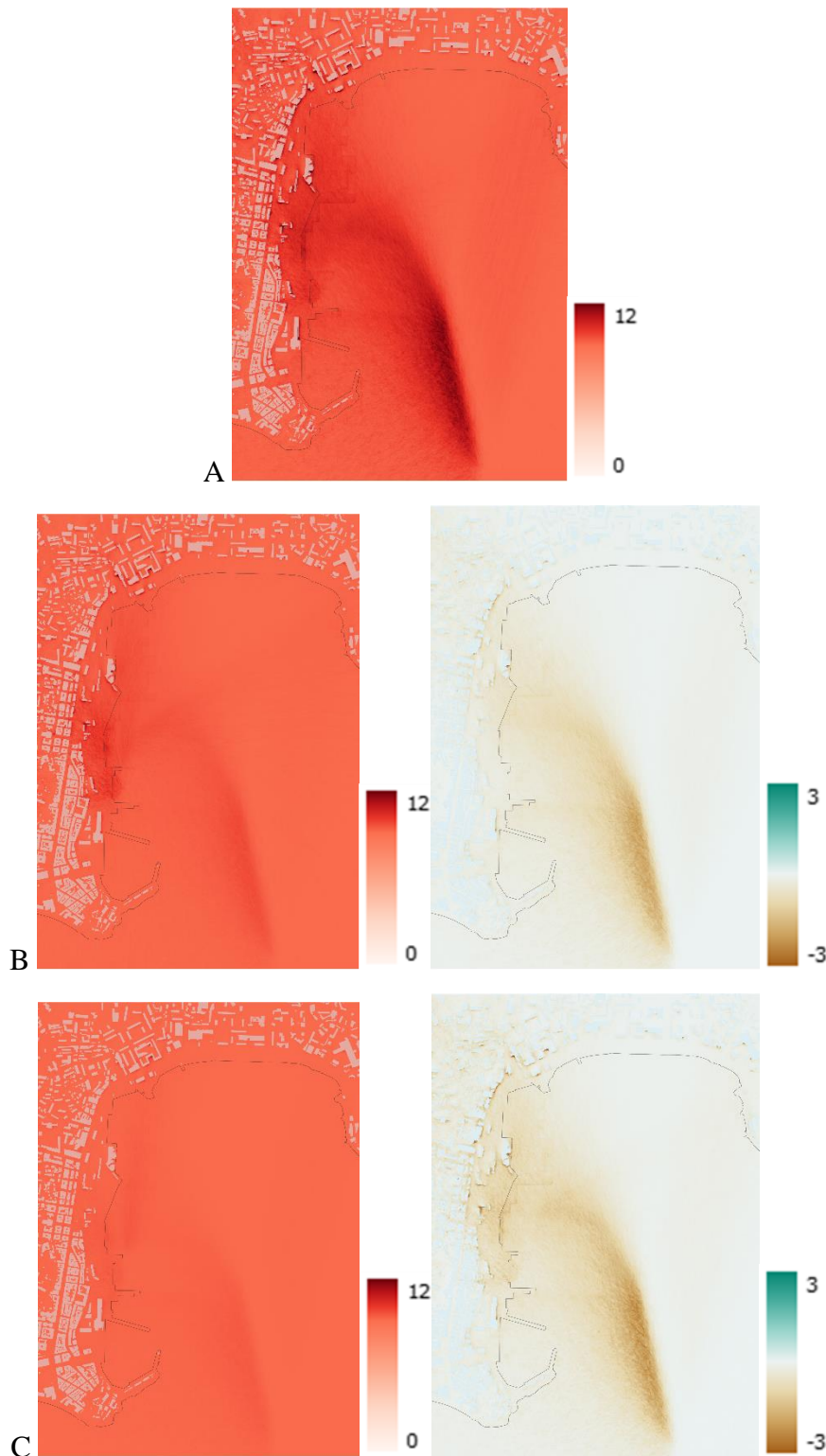


Figure 29 : Cartes des concentrations moyennes en $PM_{2.5}$ en $\mu g.m^{-3}$ à Ajaccio le 12/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1 GNL (C).

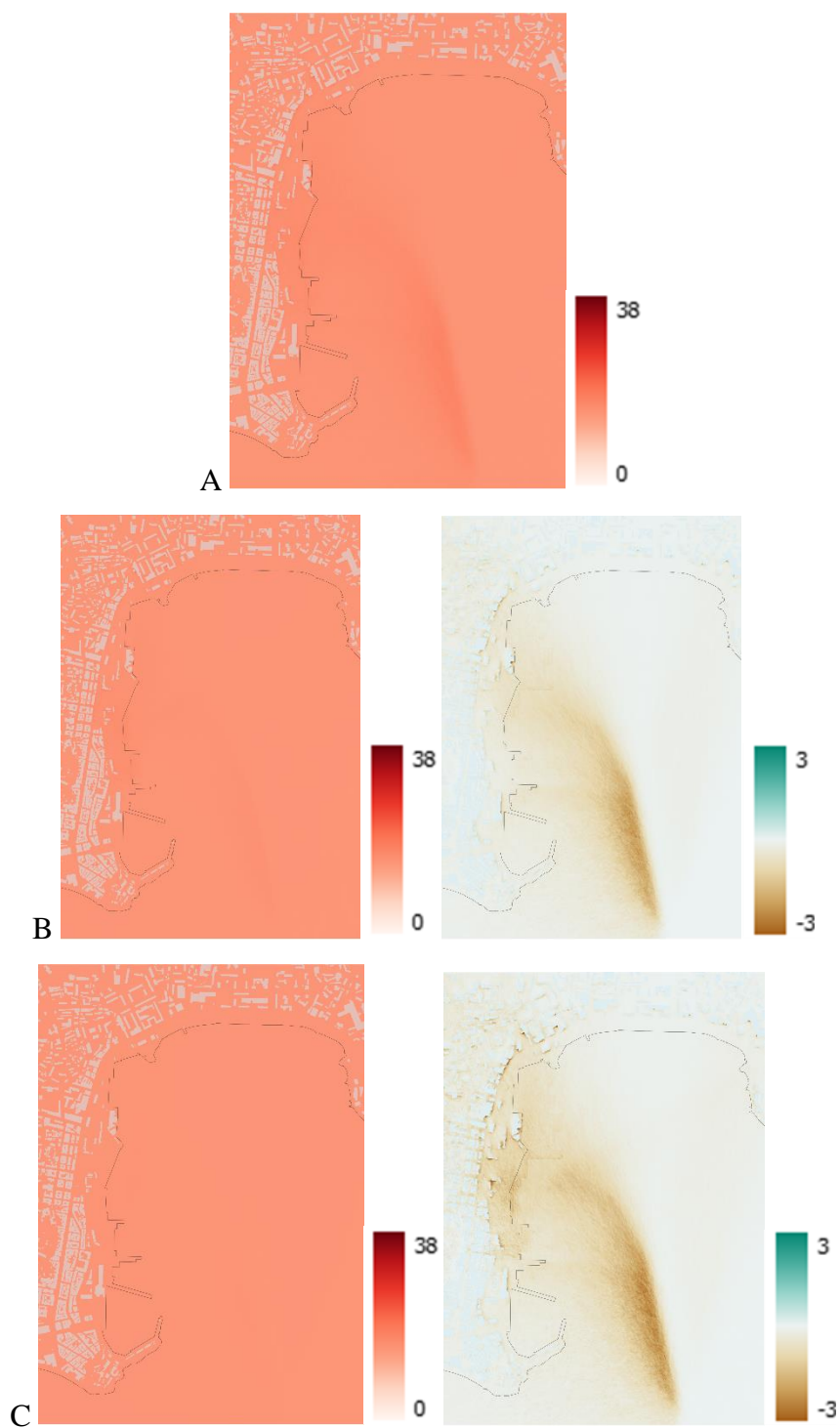


Figure 30 : Cartes des concentrations moyennes en PM_{10} en $\mu g.m^{-3}$ à Ajaccio le 12/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1 GNL (C).

2.2.1.2. Port de Bastia

Les cartes de concentrations simulées avec fond pour la journée du 27/08/2021 sur Bastia. Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence.

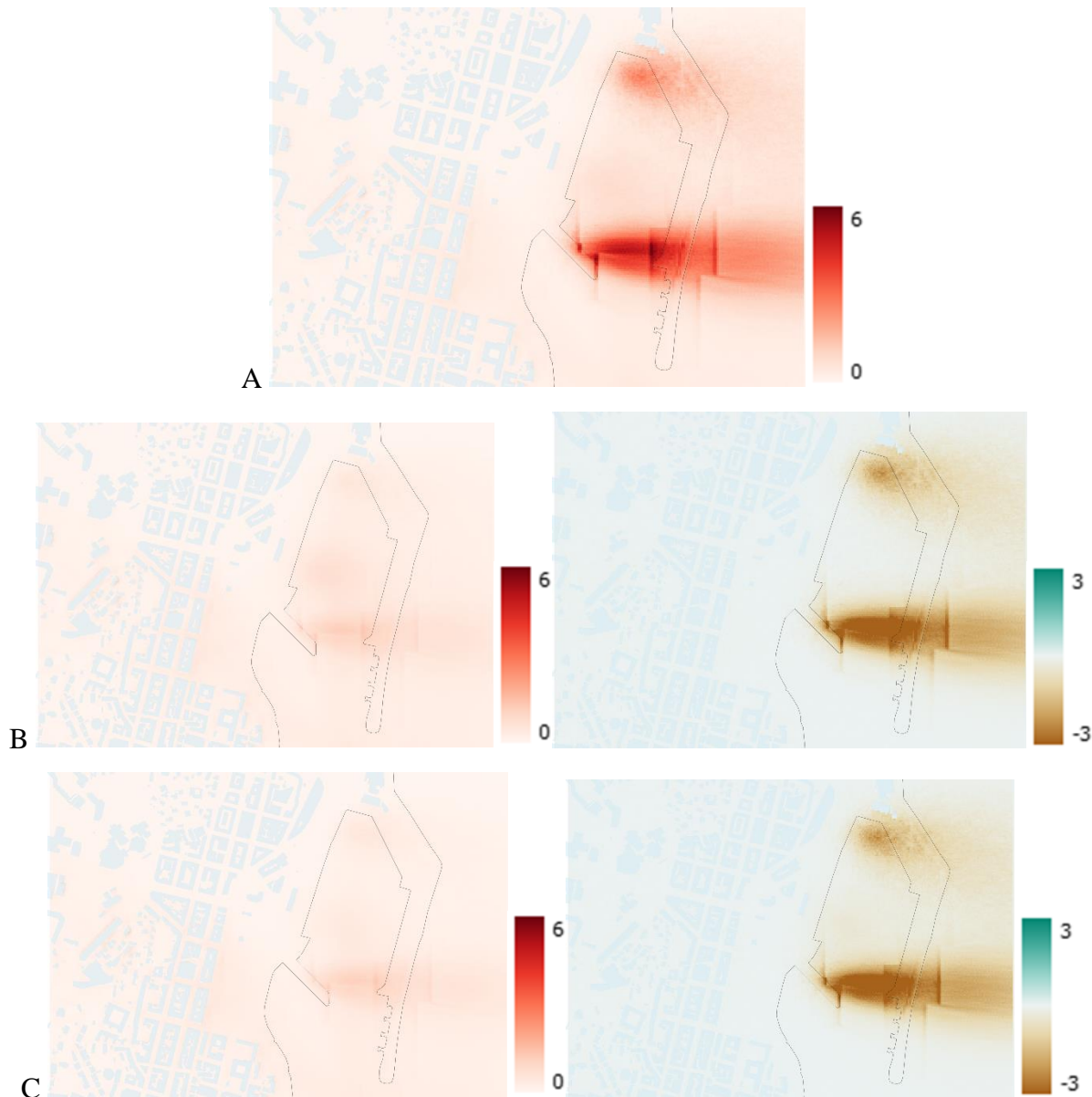


Figure 31 : Cartes des concentrations moyennes en SO_2 en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à Bastia le 27/08/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).

Une baisse de SO_2 est nettement visible respectivement sur la phase manœuvre (B) mais pas davantage à quai (C). Cela est dû au fait que le CENAQ n'est pas applicable à tous les navires dans ce cas précis, les escales étant trop courtes, et que la quantité de SO_2 n'est pas significative.

A noter également que le vent emmène les panaches vers la mer, réduisant ainsi l'impact sur la ville. Les réductions de concentrations des polluants ne concerneront donc pas la ville qui aura le même niveau de fond de pollution, celui-ci n'étant pas causé principalement par le maritime sur cette journée.

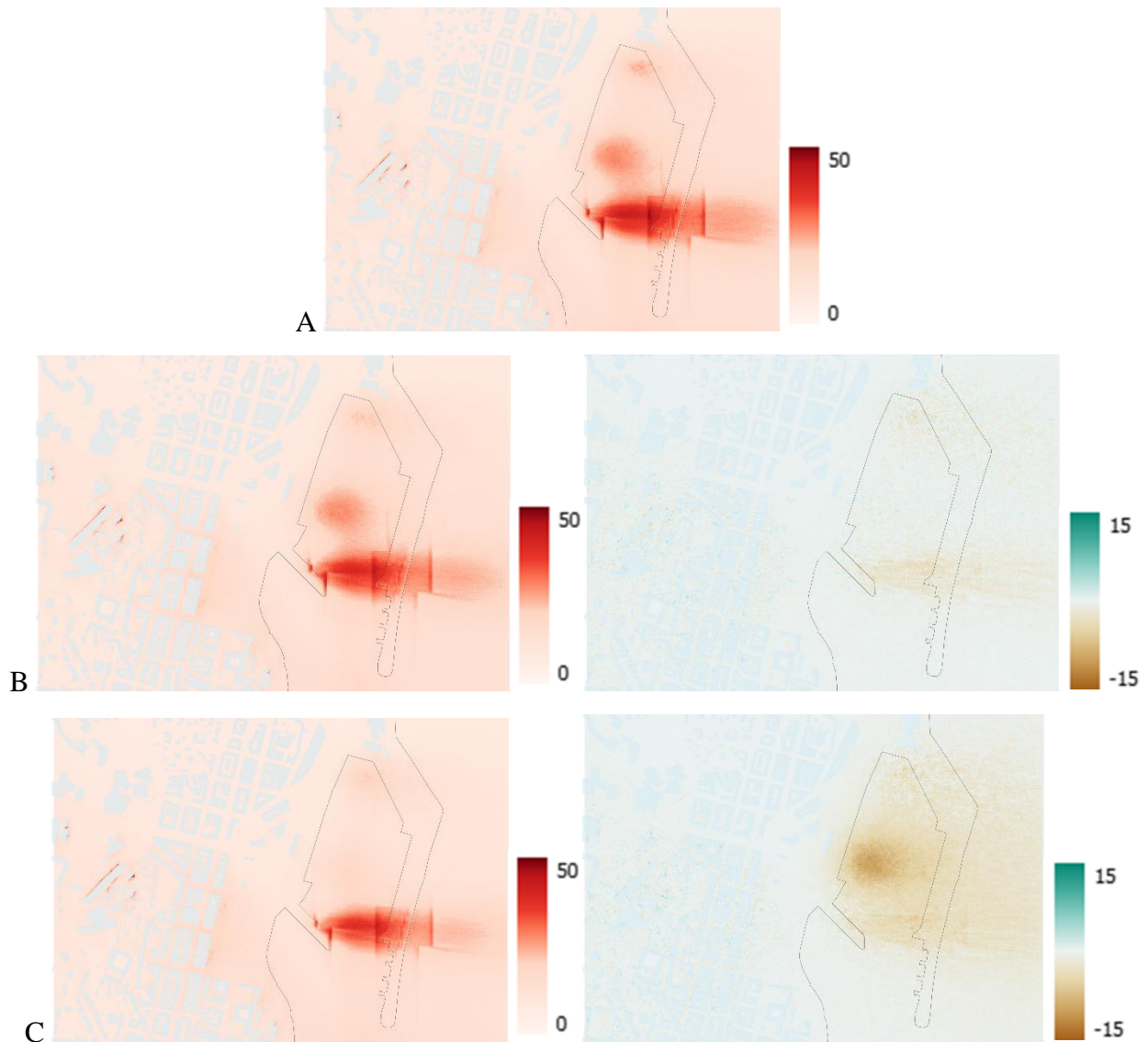


Figure 32 : Cartes des concentrations moyennes en NO₂ en µg.m⁻³ à Bastia le 27/08/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).

Même constat pour le NO₂ bien que le gain soit plus important sur la partie avec CENAQ. La pollution semble stagner au niveau de l'enceinte du port, mais a tendance à rejoindre la mer aussi. L'impact positif sur la ville est négligeable car le facteur vent est à nouveau le facteur déterminant.

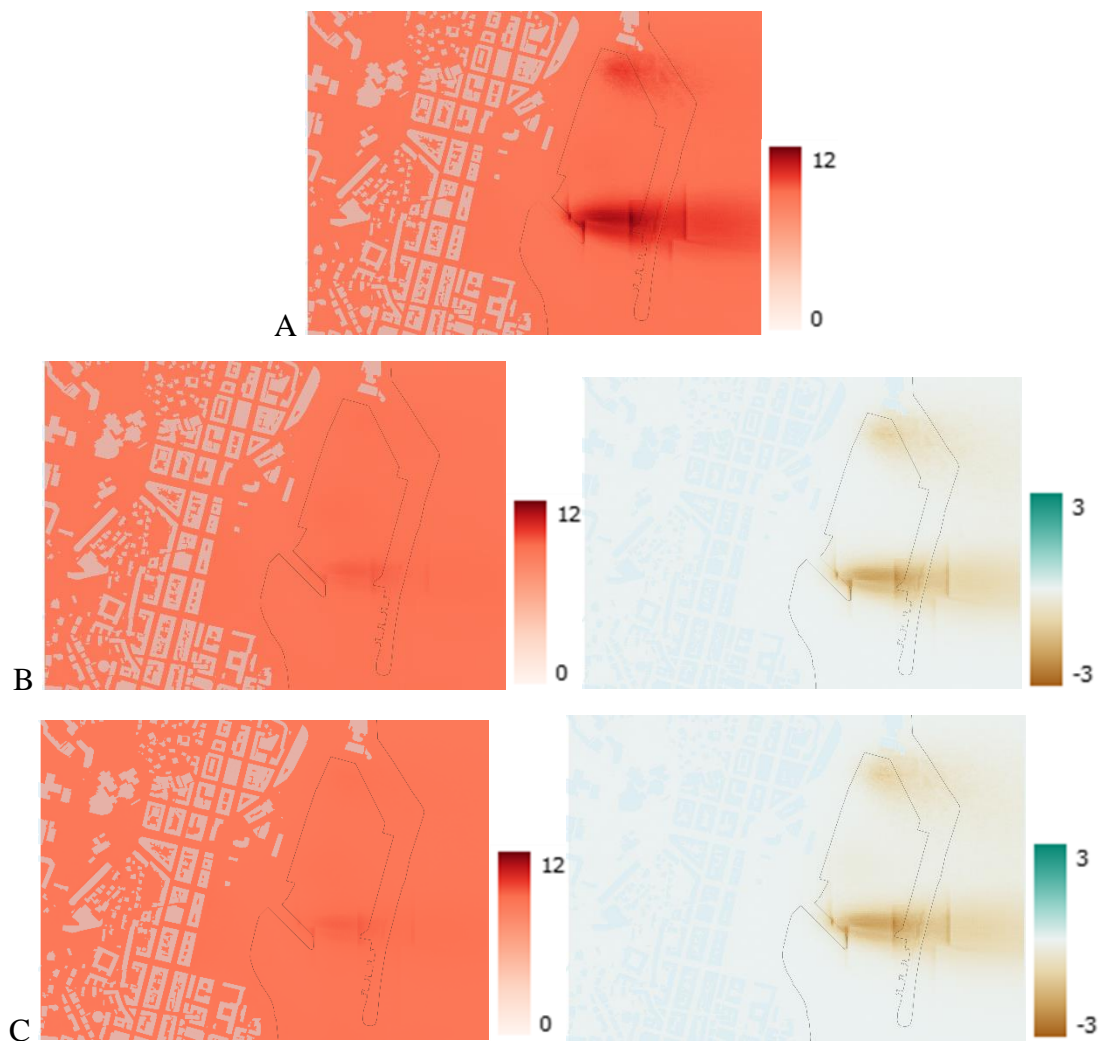


Figure 33 : Cartes des concentrations moyennes en PM_{2.5} en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Bastia le 27/08/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).

Il s'agit ici à nouveau d'une pollution de fond plus que d'une pollution exclusivement maritime. La baisse au niveau du port est présente, mais n'a aucun effet sur la ville, le vent évacuant les particules fines vers le large.

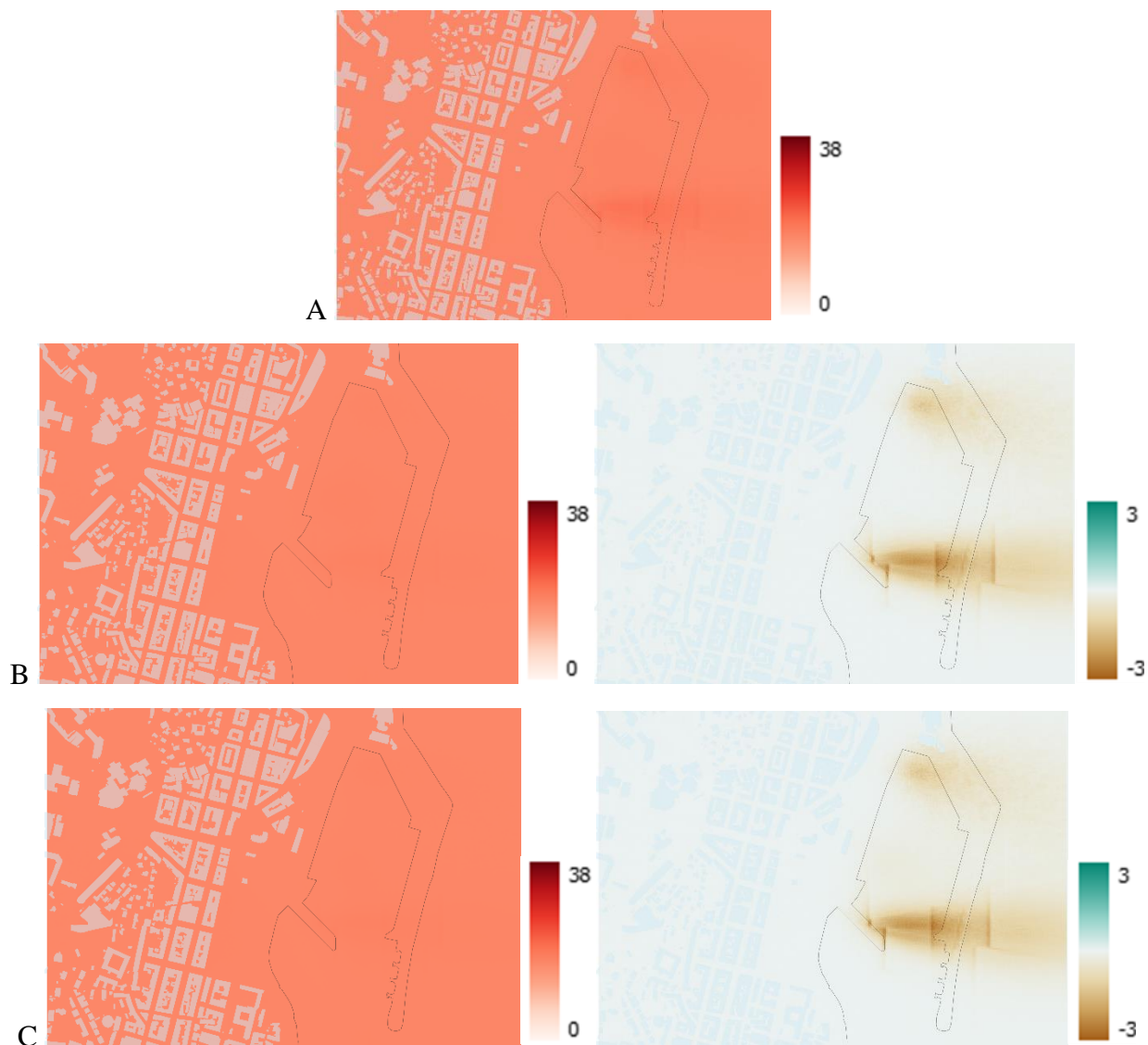


Figure 34 : Cartes des concentrations moyennes en PM_{10} en $\mu g.m^{-3}$ à Bastia le 27/08/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).

Il s'agit ici à nouveau d'une pollution de fond plus que d'une pollution exclusivement maritime. La baisse au niveau du port est présente, mais n'a aucun effet sur la ville, le vent évacuant les particules fines vers le large.

Les cartes de concentrations simulées avec fond pour la journée du 14/07/2021 sur Bastia. Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence.

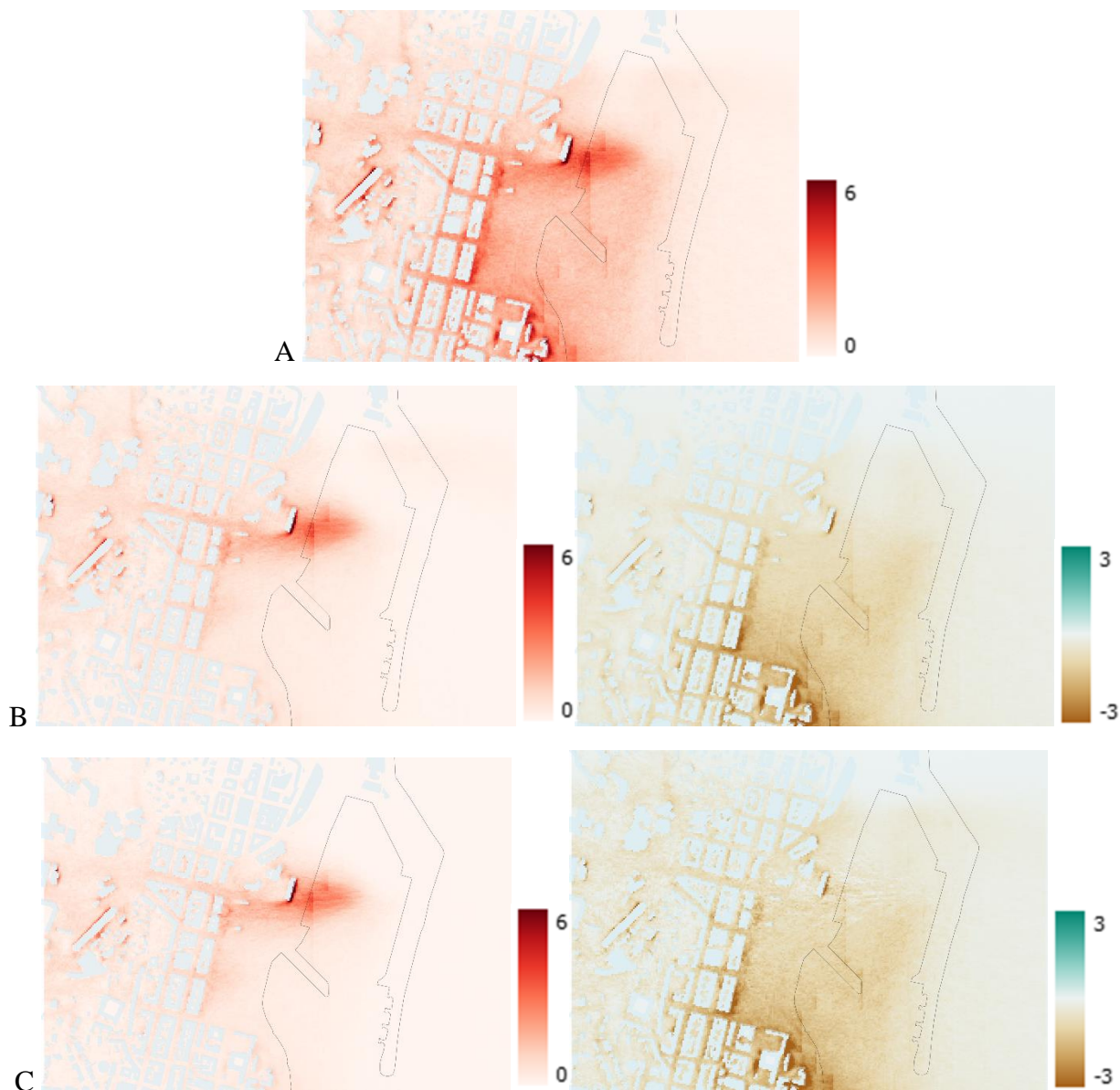


Figure 35 : Cartes des concentrations moyennes en SO₂ en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à Bastia le 14/07/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1GNL (C).

Cette journée s'avère beaucoup plus intéressante à étudier car le vent dirige la pollution vers la ville. L'étude permet de mettre en évidence une zone de concentration forte à proximité du port et des premiers bâtis interférant avec le vent. La réduction est assez importante sur le SO₂ et à proximité immédiate du port.

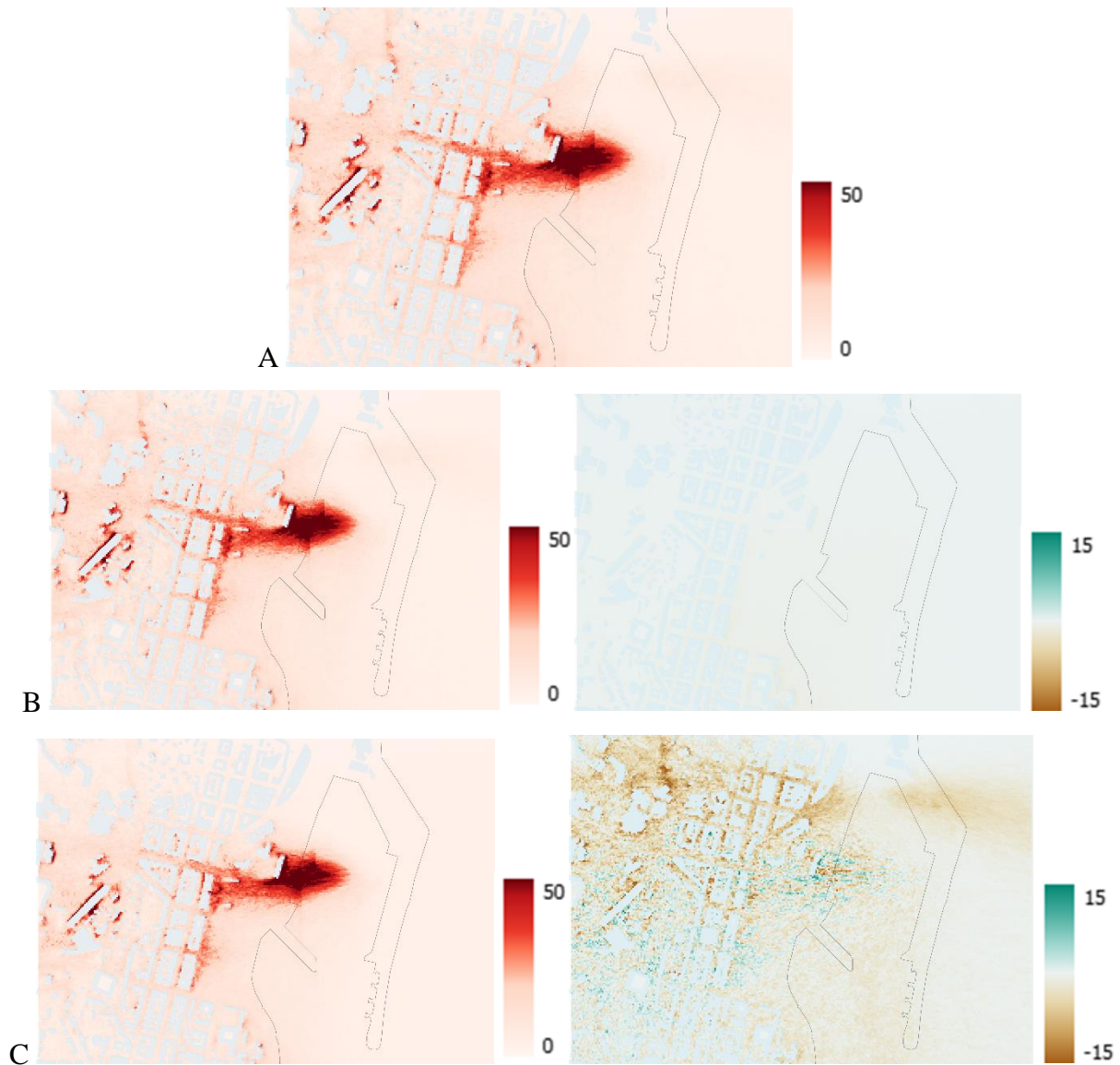


Figure 36 : Cartes des concentrations moyennes en NO₂ en µg.m⁻³ à Bastia le 14/07/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1GNL (C).

Le vent joue le même rôle de diffuseur de pollution sur ces cartes, avec sur la phase stationnement avec CENAQ une nette diminution sur la partie nord de la ville, mais une augmentation sur la partie sud. A nouveau, il semblerait que les effets de bords numériques en soient la cause, le logiciel traitant différemment le polluant NO₂.

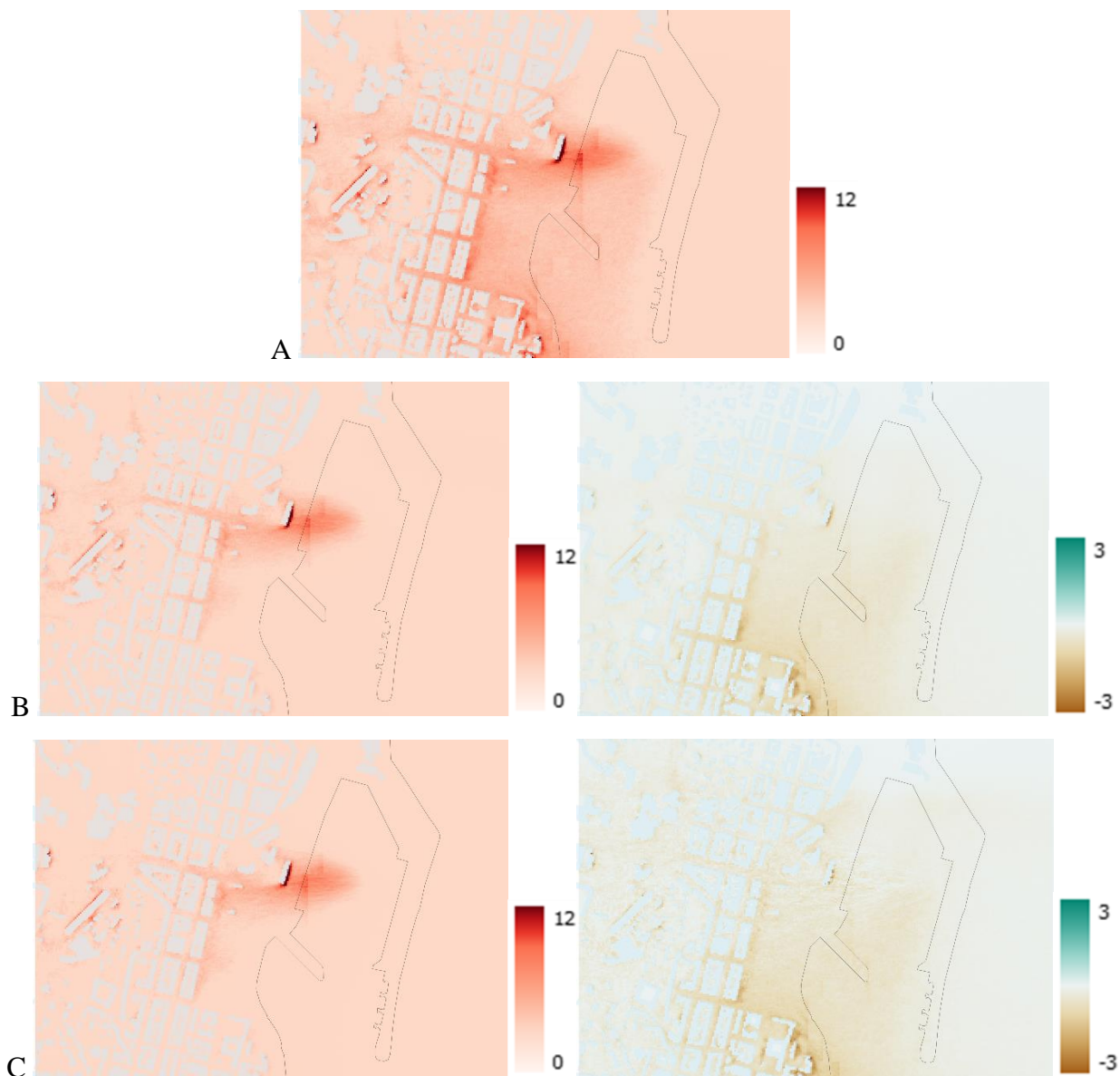


Figure 37 : Cartes des concentrations moyennes en $PM_{2.5}$ en $\mu g.m^{-3}$ à Bastia le 14/07/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1GNL (C).

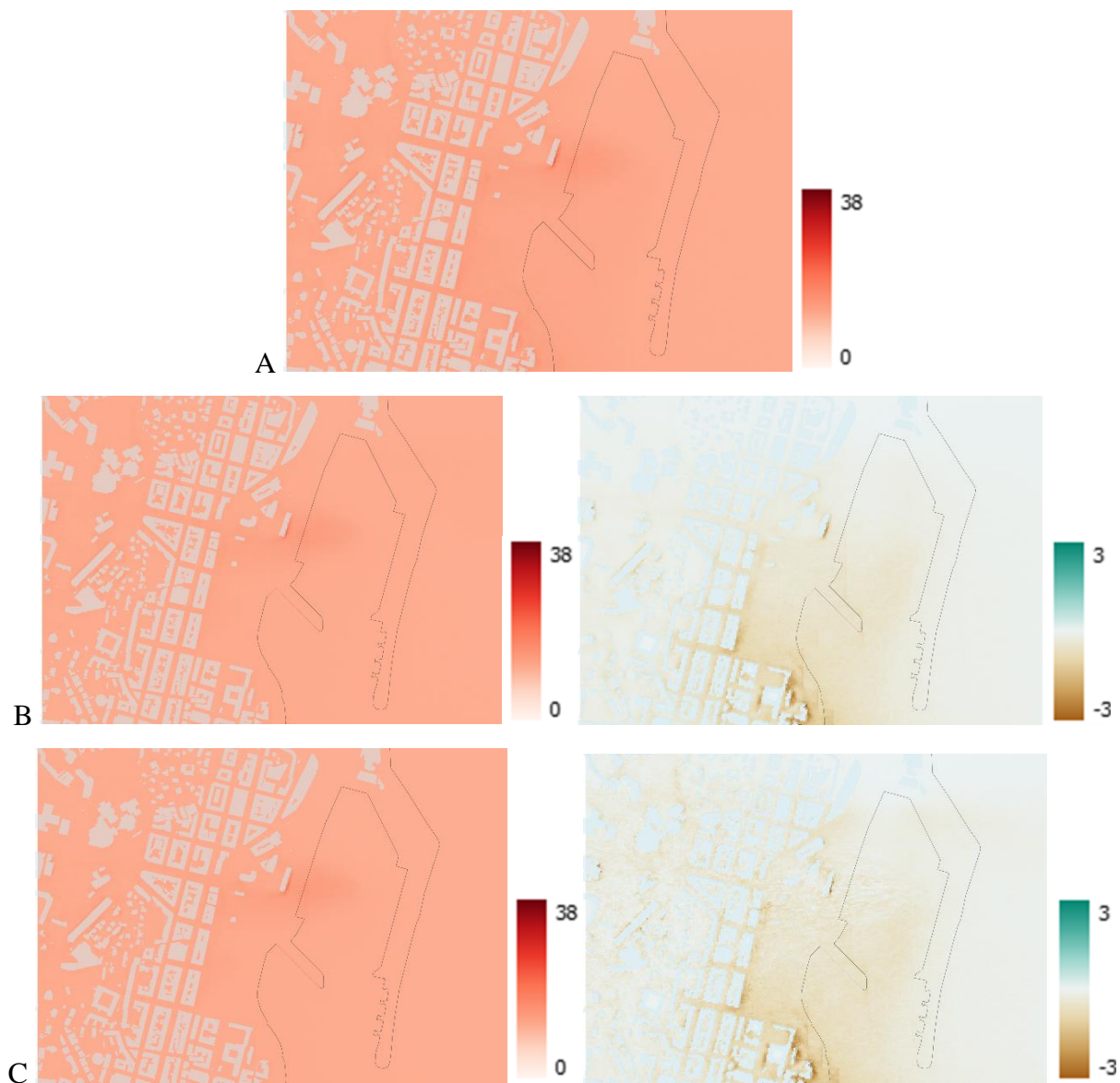


Figure 38 : Cartes des concentrations moyennes en PM_{10} en $\mu g \cdot m^{-3}$ à Bastia le 14/07/2021 pour le scénario de référence (A) et pour les scénarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1GNL (C).

La différence est négligeable sur la réduction des particules fines, la contribution du maritime sur ce polluant étant moindre à la base.

2.2.2. Box-plots des concentrations en zone terrestre

Ajaccio 15/09/2021

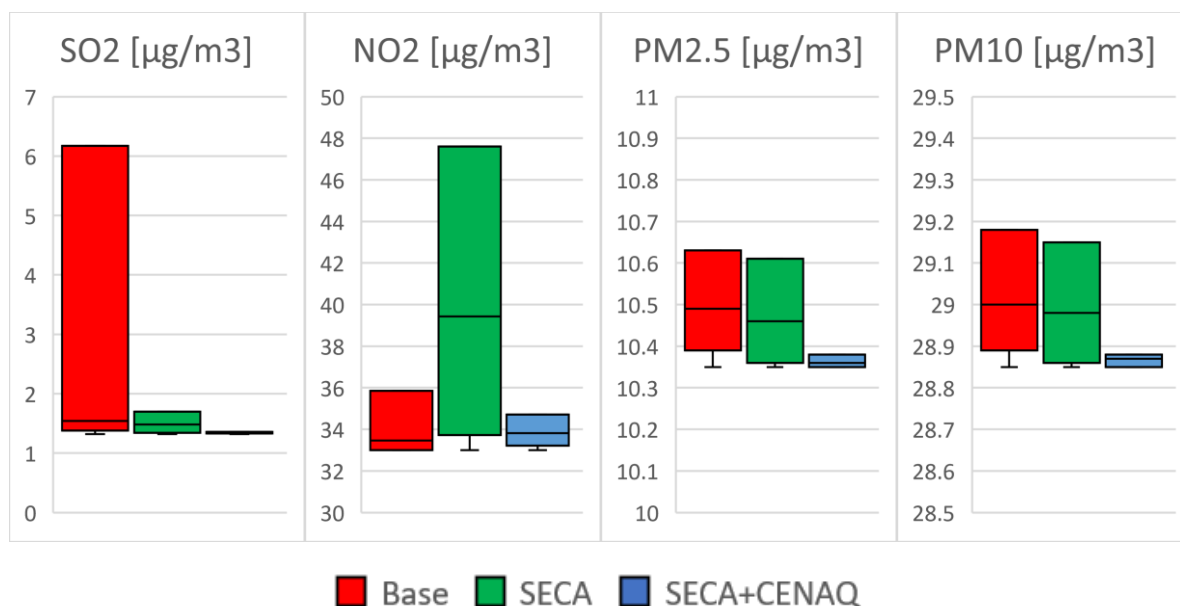


Figure 39 : Boxplot des concentrations avec fond uniquement sur terre (Ajaccio)

Les résultats des modélisations précédemment observées se retrouvent à nouveau dans le calcul des boxplots, notamment au niveau du NO₂ dont les valeurs ne sont pas recevables d'un point de vue scientifique, accusant une forte hausse sur des scénarii SECA dont les émissions de NO₂ ont été calculées à la baisse dans le chapitre 1. La tendance sur les autres polluants est en revanche bien confirmée à la baisse, quoique négligeable au niveau des PM, mais particulièrement intéressante sur le SO₂.

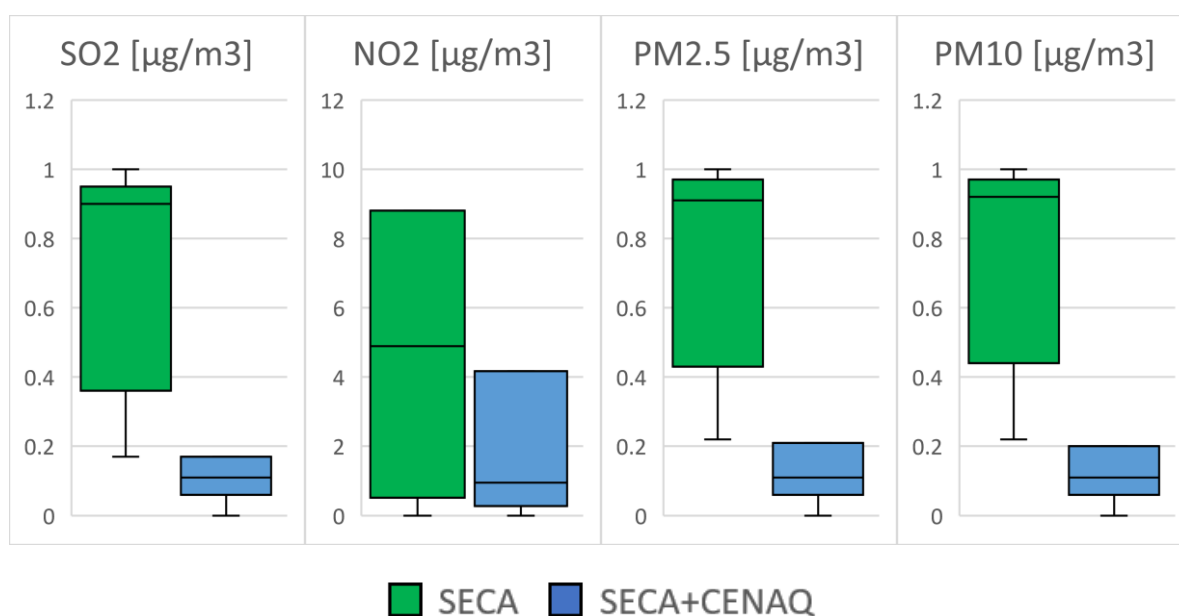


Figure 40 : Boxplot ratio des concentrations scenarii/ref sans le fond uniquement sur terre (Ajaccio)

Un ratio supérieur à 1 indique une augmentation des polluants, et inversement.

Ajaccio 12/09/2021

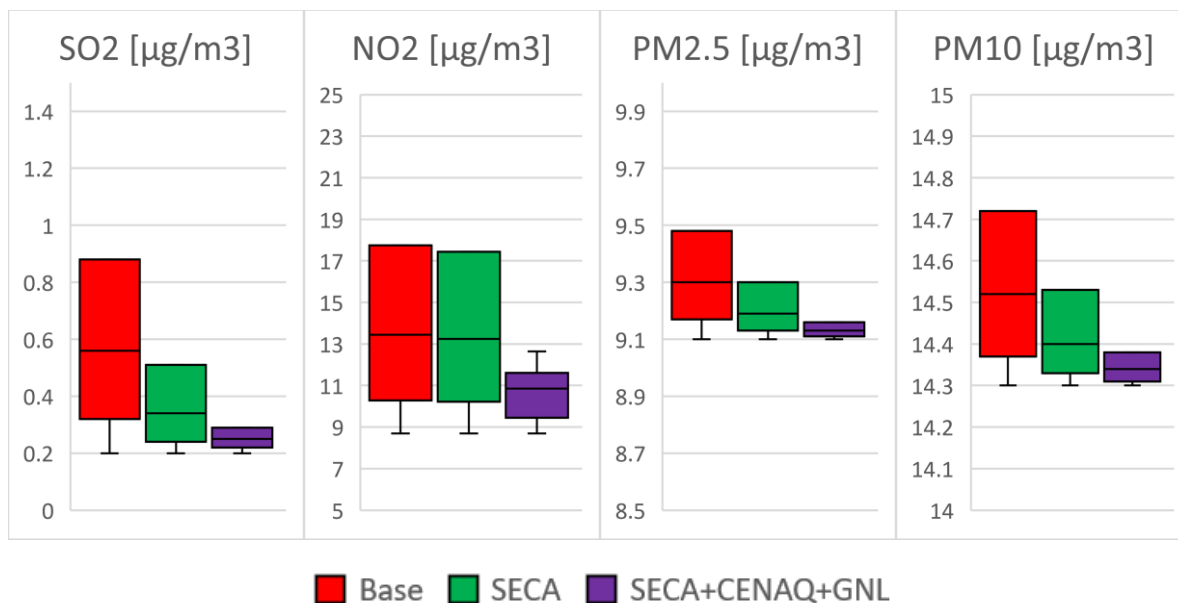


Figure 41 : Boxplot des concentrations avec fond uniquement sur terre (Ajaccio)

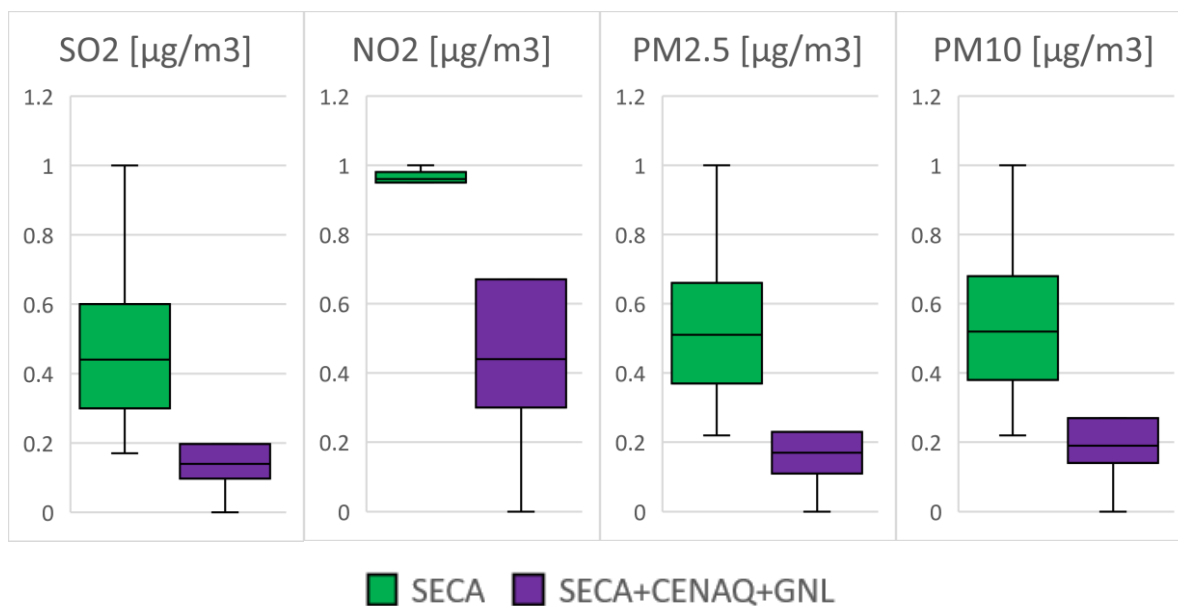


Figure 42 : Boxplot ratio des concentrations scenarii/ref sans le fond uniquement sur terre (Ajaccio)

Bastia 27/08/2021

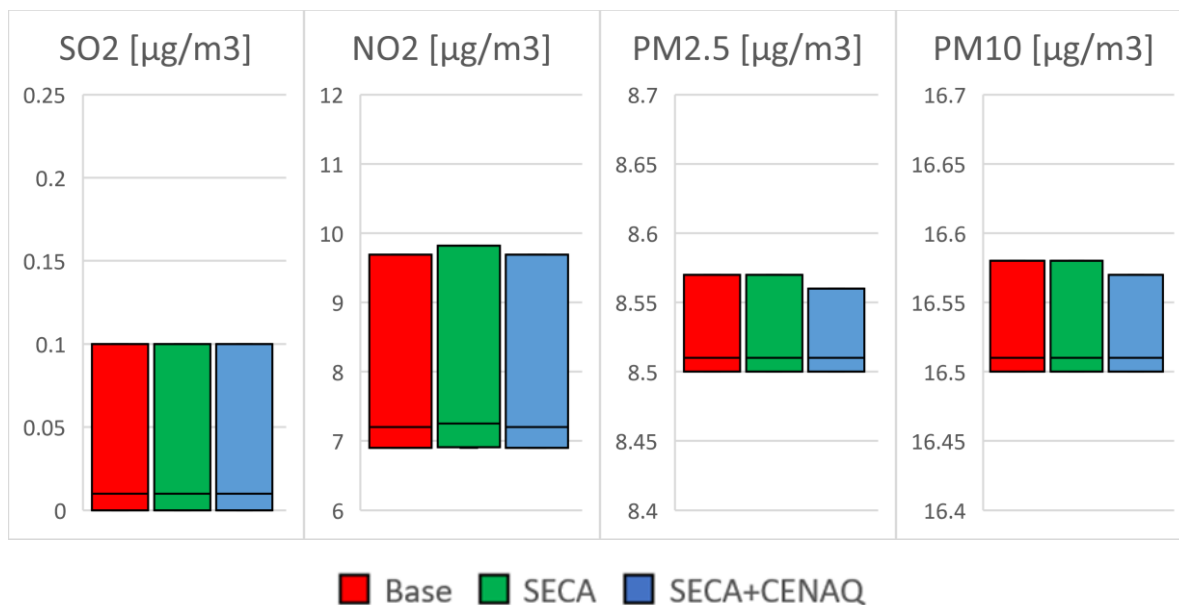


Figure 43 : Boxplot des concentrations avec fond uniquement sur terre (Bastia)

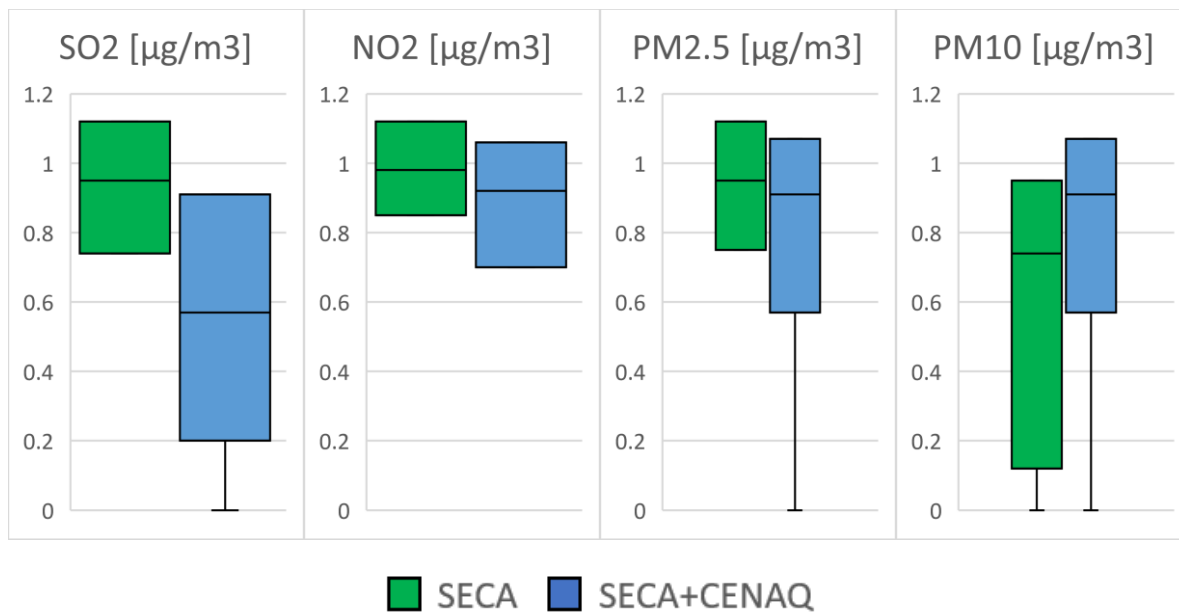


Figure 44 : Boxplot ratio des concentrations scenarii/ref sans le fond uniquement sur terre (Bastia)

Bastia 14/07/2021

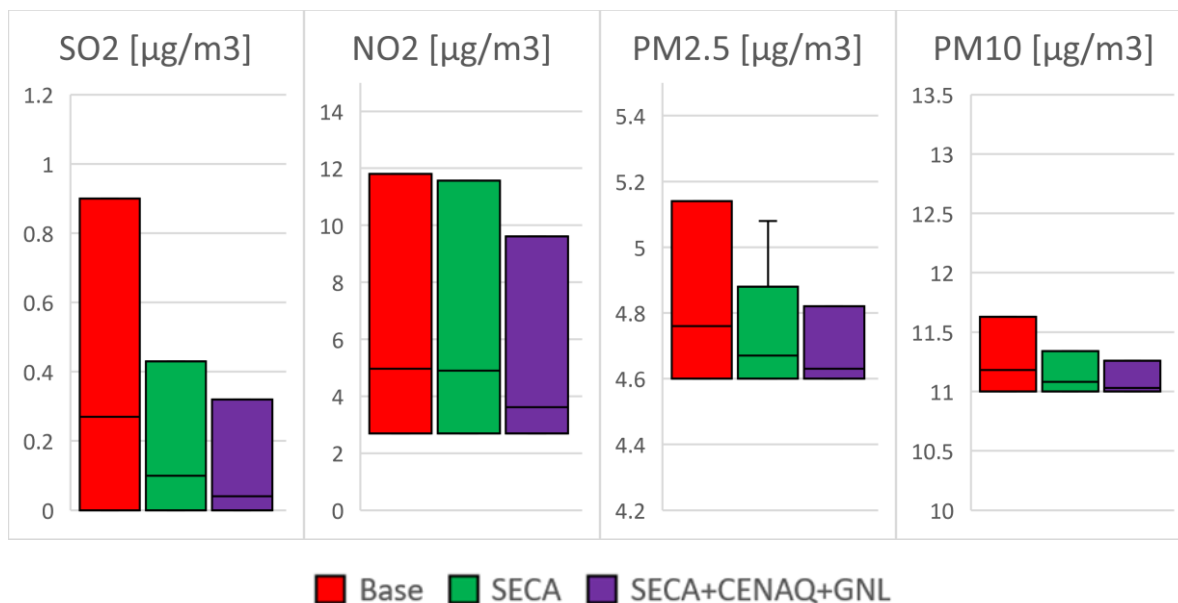


Figure 45 : Boxplot des concentrations avec fond uniquement sur terre (Bastia)

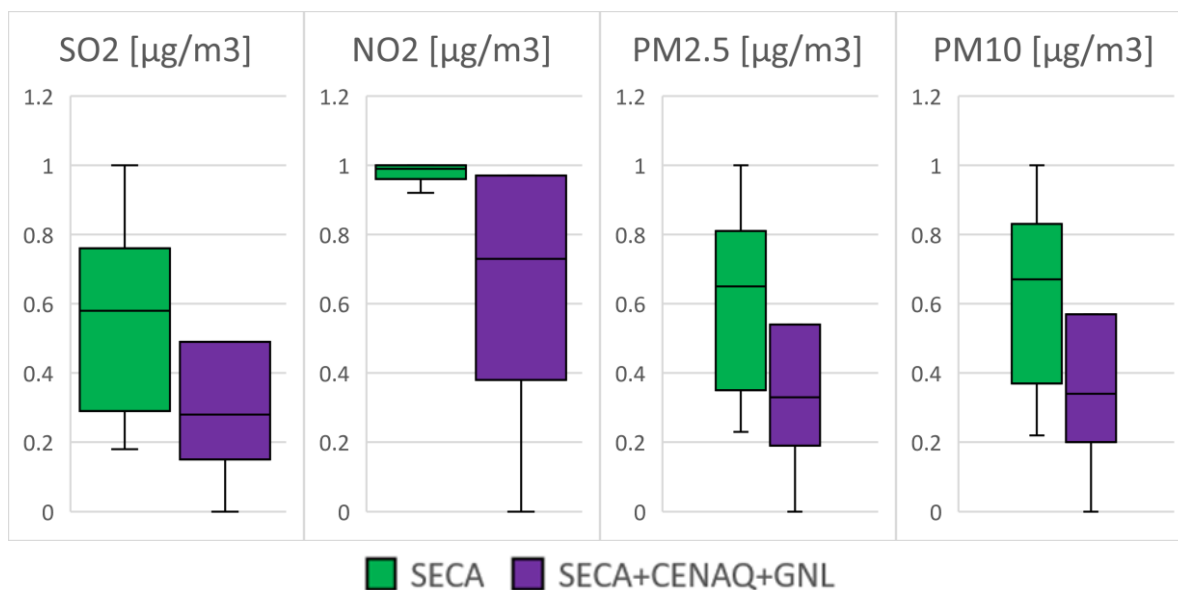


Figure 46 : Boxplot ratio des concentrations scenarii/ref sans le fond uniquement sur terre (Bastia)

La tendance générale montre une baisse pour tous les polluants.

2.2.3. Bilan statistique

Pour quantifier la réduction des concentrations induite dans chacun des scénarii, on définit le pourcentage de réduction R comme :

$$R = \frac{p_{\text{ref}} - p_{\text{scn}}}{p_{\text{ref}}} \cdot 100 \%$$

où p_{ref} est le 90^{ème} percentile des concentrations moyennes du scénario de référence sans le fond, et p_{scn} est le 90^{ème} percentile des concentrations moyennes du scénario de variation des émissions sans le fond. Avec cette statistique, on choisit de quantifier les variations des concentrations des panaches uniquement, pour deux raisons : (i) parce que l'impact dû à la réactivité chimique de ces variations sur les concentrations de fond n'est pas évalué ; (ii) pour éviter que cette évaluation ne soit biaisée par une surestimation ou une sous-estimation des concentrations des panaches, par rapport à la concentration de fond, comme c'est le cas dans certaines simulations. Le jeu de données utilisé comprend les concentrations du domaine complet, sur terre comme sur mer, qui affectent les populations riveraines mais également les personnes qui se trouvent sur les navires.

AJACCIO	15/09/2021		12/09/2021	
	SECA	SECA + CENAQ	SECA	SECA + CENAQ + GNL
SO2	8%	89%	51%	86%
NO2	-271%	57%	3%	59%
PM2.5	6%	90%	45%	84%
PM10	5%	89%	43%	81%

Tableau 27 : Réduction des concentrations des panaches à Ajaccio pour les différents scénarii avec comme référence le scénario base

Bastia	27/08/2021		14/07/2021	
	SECA	SECA + CENAQ	SECA	SECA + CENAQ + GNL
SO2	12%	20%	58%	64%
NO2	3%	58%	1%	89%
PM2.5	12%	24%	51%	57%
PM10	12%	21%	48%	54%

Tableau 28 : Réduction des concentrations des panaches à Bastia pour les différents scénarii avec comme référence le scénario base

2.3. Conclusion

Il est nécessaire de souligner que les calculs effectués pour les émissions de navires ont été réalisés uniquement à partir des données disponibles pour les navires connus dans les ports de Bastia et d'Ajaccio. Par conséquent, les résultats et les scénarios proposés doivent être interprétés en gardant à l'esprit cette limitation.

Ils fournissent néanmoins une estimation solide de l'impact des émissions de navires sur la qualité de l'air dans ces zones, ainsi que de l'efficacité potentielle des mesures de mitigation proposées en termes d'émission.

La modélisation de la qualité de l'air sur les ports de Bastia et d'Ajaccio met en évidence l'impact significatif des émissions des navires sur la qualité de l'air locale. Les résultats montrent que les mesures de réduction des émissions, en particulier la mise en place de la Connection Electrique des Navires à Quai (CENAQ), ont un impact significatif sur la réduction des émissions de SO₂ et de NO₂, mais moins sur les PM_{2.5}. Cependant, les résultats peuvent varier en fonction de la saison et de la durée d'escale des navires, notamment en été où les escales sont plus nombreuses et plus brèves.

Cette étude souligne l'importance de prendre en compte les émissions des navires dans les politiques de gestion de la qualité de l'air urbaine, en particulier en zone insulaire où les impacts peuvent être plus importants. Les résultats de cette étude pourront être utiles aux autorités portuaires et aux décideurs locaux pour prendre des mesures adaptées et efficaces afin de réduire les émissions des navires et améliorer la qualité de l'air à proximité des ports de Bastia et d'Ajaccio.

Cependant, cette étude présente également certaines incertitudes de mesure. En effet, la calibration des modèles a été réalisée en utilisant des stations de mesure urbaines multi influencées, qui sont souvent situées à distance de l'axe de vent des panaches des navires (cf. Rapport T1.3.1 et T2.3.1). Par conséquent, les résultats peuvent présenter une certaine marge d'erreur en raison de l'impact de la dispersion des émissions de navires sur la qualité de l'air.

Malgré ces incertitudes, une estimation précieuse des impacts des émissions des navires sur la qualité de l'air dans les ports de Bastia et d'Ajaccio a pu sortir de cette étude, ainsi que de l'efficacité des mesures de mitigation proposées. Ces résultats pourront être utilisés pour orienter les futures campagnes de mesure et d'observation pour affiner et améliorer la précision des modèles utilisés comme il est déjà prévu avec l'installation de nouvelles stations de mesures à proximité des ports et dans l'axe principal des vents.

Polluant	Ville	Phase	BASE	CENAQ	SECA	Diff	GNL	Diff	CENAQ + SECA	Diff	CENAQ + 1 GNL	Diff	CENAQ + SECA + 1 GNL	Diff	Rempla 1 GNL	Diff	SECA + 1 GNL	Diff		
Dioxyde de carbone (CO2)	AIA	MANŒUVRE	1600,29	1600,29	1505,48	0%	991,64	-38%	1505,48	-6%	1495,43	-7%	1416,54	-11%	1495,43	-7%	1416,54	-11%		
			0,15	0,15	0,14	0%	18,66	0%	11,88	-38%	18,66	-6%	18,66	-7%	18,66	-7%	18,66	-11%		
			3,80	3,80	3,51	0%	2,82	0%	2,82	-26%	3,51	-8%	3,59	-210%	3,38	-207%	3,38	-207%		
			40,67	40,67	37,23	0%	37,23	0%	37,23	-9%	37,23	-8%	34,05	-16%	31,19	-23%	34,05	-16%		
			5,44	5,44	0,95	0%	0,01	-83%	0,01	-100%	0,95	-83%	4,49	-17%	0,78	-86%	4,49	-17%		
			3,02	3,02	0,68	0%	0,06	-78%	0,06	-100%	0,68	-78%	2,50	-17%	0,57	-81%	2,50	-17%		
			2,86	2,86	0,64	0%	0,00	-78%	0,00	-100%	0,64	-78%	2,36	-18%	0,53	-82%	2,36	-18%		
			2034,19	2034,19	1936,95	0%	1251,25	-38%	1902,57	-6%	1902,57	-6%	2011,70	-1%	1892,00	-7%	2011,70	-1%	1892,00	-7%
			0,19	0,19	0,18	0%	23,30	-6%	0,18	-8%	23,30	-6%	0,38	95%	0,56	189%	0,38	195%	0,56	189%
			4,80	4,80	4,52	0%	3,56	-26%	4,43	-8%	4,78	0%	4,78	0%	4,42	-8%	4,78	0%	4,42	-8%
51,45	51,45	47,90	0%	3,56	-9%	47,05	-9%	47,05	-9%	50,66	-2%	46,33	-10%	50,66	-2%	46,33	-10%			
6,88	6,88	1,22	0%	0,01	-82%	1,20	-83%	1,22	-82%	6,76	-2%	1,18	-83%	6,76	-2%	1,18	-83%			
3,82	3,82	0,87	0%	0,08	-77%	0,08	-98%	0,85	-78%	3,76	-2%	0,84	-78%	3,76	-2%	0,84	-78%			
3,62	3,62	0,82	0%	0,00	-77%	0,00	-100%	0,81	-78%	3,56	-2%	0,80	-78%	3,56	-2%	0,80	-78%			
12964,59	12964,59	12964,59	-74%	7950,79	-39%	3347,69	-74%	3347,69	-74%	3105,59	-76%	4775,33	-63%	11881,82	-10%	11881,82	-10%			
1,23	1,23	1,23	-74%	148,04	0%	148,04	0%	148,04	0%	7,46	509%	38,43	307%	39,09	3090%	39,09	3090%			
30,22	30,22	30,22	-74%	22,64	-25%	7,80	-74%	7,80	-25%	7,80	-25%	12,19	-60%	28,29	-6%	28,29	-6%			
320,59	320,59	320,59	-74%	22,64	-9%	82,78	-74%	82,78	-9%	68,33	-79%	73,22	-77%	244,01	-24%	244,01	-24%			
8,18	8,18	8,18	-74%	0,06	0%	0,06	99%	2,11	-74%	1,72	-79%	1,73	-79%	6,09	-26%	6,09	-26%			
5,82	5,82	5,82	-74%	0,52	0%	0,52	-91%	1,50	-74%	1,25	-79%	1,36	-77%	4,46	-23%	4,46	-23%			
5,51	5,51	5,51	-74%	0,00	0%	0,00	-100%	1,42	-74%	1,16	-79%	1,16	-79%	4,10	-26%	4,10	-26%			
9500,12	9500,12	9500,12	-64%	9838,18	-39%	3459,17	-64%	3459,17	-64%	3429,77	-64%	4416,46	-54%	9250,90	-3%	9250,90	-3%			
0,90	0,90	0,90	-64%	106,70	0%	106,70	0%	106,70	0%	1,19	33%	1,34	49%	8,25	819%	8,25	819%			
22,15	22,15	22,15	-64%	16,62	0%	16,62	0%	16,62	0%	8,02	-64%	10,32	-58%	21,77	-2%	21,77	-2%			
234,94	234,94	234,94	-64%	16,62	-9%	85,54	-64%	85,54	-9%	83,79	-64%	108,12	-54%	220,04	-6%	220,04	-6%			
5,99	5,99	5,99	-64%	0,04	0%	0,04	99%	2,18	-64%	2,13	-64%	2,75	-54%	5,59	-7%	5,59	-7%			
4,26	4,26	4,26	-64%	0,38	0%	0,38	-91%	1,55	-64%	1,52	-64%	1,96	-54%	4,00	-6%	4,00	-6%			
4,04	4,04	4,04	-64%	0,00	0%	0,00	-100%	1,47	-64%	1,44	-64%	1,86	-54%	3,76	-7%	3,76	-7%			
14564,88	14564,88	14470,07	-66%	8942,43	-39%	4853,17	-67%	4853,17	-67%	4601,02	-68%	6191,87	-57%	13098,35	-10%	13098,35	-10%			
1,38	1,38	1,37	-66%	166,50	-1%	166,50	-1%	166,50	-1%	10,85	832%	41,81	2533%	42,48	2886%	42,48	2886%			
34,02	34,02	33,73	-66%	25,46	-1%	25,46	-1%	25,46	-1%	11,07	-67%	15,58	-54%	31,92	-6%	31,68	-7%			
361,26	361,26	357,81	-66%	25,46	-1%	25,46	-1%	25,46	-1%	120,01	-67%	104,42	-71%	278,06	-23%	275,20	-24%			
13,61	13,61	9,13	-33%	0,06	-100%	3,06	-78%	3,06	-33%	6,20	-54%	2,52	-82%	10,58	-22%	6,87	-50%			
8,84	8,84	6,50	-27%	0,59	-93%	2,18	-75%	2,18	-27%	3,75	-58%	1,93	-78%	6,96	-21%	5,03	-43%			
8,38	8,38	6,15	-27%	0,00	-100%	2,06	-75%	2,06	-27%	3,52	-58%	1,69	-80%	6,46	-23%	4,62	-45%			
11525,31	11525,31	11438,07	-52%	7089,43	-1%	5361,74	-53%	5361,74	-1%	5444,47	-53%	6308,46	-45%	11262,60	-2%	11142,90	-3%			
1,09	1,09	1,08	-52%	132,00	0%	132,00	0%	132,00	0%	1,77	62%	1,90	74%	8,83	708%	8,81	707%			
26,95	26,95	26,66	-52%	20,19	-1%	12,50	-54%	12,50	-1%	12,80	-45%	14,74	-45%	26,55	-1%	26,19	-3%			
286,39	286,39	282,84	-52%	20,19	-1%	132,58	-54%	132,58	-1%	134,45	-53%	154,46	-46%	270,71	-5%	266,38	-7%			
12,87	12,87	7,21	-44%	0,05	-100%	3,38	-74%	3,38	-44%	8,90	-31%	3,93	-69%	12,35	-4%	6,77	-47%			
8,09	8,09	5,13	-34%	0,46	-94%	2,41	-70%	2,41	-34%	5,28	-35%	2,80	-65%	7,76	-4%	4,84	-40%			
7,66	7,66	4,68	-34%	0,00	-100%	2,28	-70%	2,28	-34%	5,00	-35%	2,65	-65%	7,33	-4%	4,56	-40%			
1604,60	1604,60	1509,46	0%	1508,62	-6%	1509,46	-6%	1509,46	-6%	1590,37	-1%	1511,21	-6%	1900,37	-1%	1511,21	-6%			
12998,90	12998,90	12998,90	-74%	12095,88	0%	3356,55	-74%	3356,55	0%	3314,52	-57%	5851,44	-2%	12776,20	-2%	12776,20	-2%			
14603,50	14603,50	14508,36	-6%	13604,51	-7%	4865,01	-67%	4904,89	-6%	4904,89	-6%	7362,65	-50%	14866,58	-2%	14287,41	-2%			
2029,64	2029,64	1942,07	-4%	1903,58	-6%	1907,63	-6%	1907,63	-4%	2027,83	0%	1907,72	-6%	1907,72	0%	1907,72	-6%			
95,26	95,26	95,26	-64%	8881,88	-7%	3468,32	-64%	3468,32	-7%	3465,11	-64%	3465,11	-64%	9481,89	0%	9481,89	0%			
11555,90	11555,90	11468,34	-52%	10785,46	-1%	5375,93	-53%	5375,93	-1%	5490,94	-52%	6361,63	-45%	11509,72	0%	11389,61	-1%			
CO2eq	AIA	MANŒUVRE	1604,60	12998,90	14508,36	0%	13604,51	-7%	4865,01	-67%	4904,89	-6%	7362,65	-50%	14866,58	-2%	14287,41	-2%		
	BIA	MANŒUVRE	2029,64	1942,07	1942,07	0%	1903,58	-6%	1907,63	-6%	1907,72	-6%	1907,72	-6%	1907,72	0%	1907,72	-6%		
		TOTAL	11555,90	11468,34	11468,34	-52%	10785,46	-1%	5375,93	-53%	5490,94	-52%	6361,63	-45%	11509,72	0%	11389,61	-1%		

Emissions en tonnes des différents scénarii AER NOSTRUM pour les ports d'Ajaccio et de Bastia en fonction des phases de manœuvre et à quoi avec différences en pourcentage avec le scénario de base (201)

Tableau de synthèse des émissions des scenarii AERNOSTRUM pour les ports d'Ajaccio et de Bastia

3. PORT DE GÈNES (UNIGE)

3.1. Présentation des scénarios

Avant de présenter les scénarios envisagés pour atténuer l'impact des navires sur la qualité de l'air, il est utile de récapituler la configuration des émissions utilisée pour alimenter les simulations. La Figure 47 montre une image satellite de la zone portuaire considérée dans le projet, avec la géolocalisation des sources d'émissions ponctuelles identifiées comme données d'entrée pour le modèle de dispersion.



Figure 47: Image satellite de la zone portuaire de Gênes. Les repères représentent les points de stationnement sur les différents quais pris en compte dans la préparation des inputs des émissions de sources ponctuelles.

Il faut en effet rappeler que deux types de sources différentes ont été utilisées pour les navires, des sources ponctuelles pour la phase à quai et des sources aréolaires pour la phase de manœuvre avant ou après l'accostage. Dans ce second cas (phase de manœuvre), on a supposé que l'émission était distribuée de manière homogène le long de la trajectoire surfacique suivie par les navires entre l'entrée du port et le point d'accostage aux différents terminaux, en appliquant des facteurs de pondération appropriés calculés sur la base de considérations purement géométriques (Figure 48).

Parmi les 13 quais considérés, le quai nommé SECH est le seul où les navires amarrés appartiennent à la catégorie "Conteneurs" dans la classification EMEP, tandis que les autres appartiennent aux catégories "Ro_Ro_cargo" et "passagers". Dans ce qui suit, les sources ponctuelles représentant les navires stationnés à l'embarcadère SECH ne sont pas incluses dans les scénarios d'atténuation supposés, mais leurs taux d'émission sont maintenus au même niveau que dans le scénario de référence. Par scénario de référence (scénario 0), nous entendons ce qui est présenté dans le rapport

T2.3.1, c'est-à-dire les résultats fournis par le modèle de dispersion avec des émissions de navires aussi proches que possible de la situation réelle du port de Gênes.

Pour les scénarios d'atténuation, deux des quatre mois considérés pour les simulations de référence, août 2021 et avril 2022, ont été sélectionnés ; il a donc été possible d'utiliser les mêmes simulations météorologiques (obtenues à partir du système WRF-CALMET) et la même configuration du modèle de dispersion CALPUFF du scénario de référence (pour plus de détails, voir le produit T2.3.1). Ainsi, toutes les simulations numériques sont en tous points équivalentes, à l'exception des émissions : cela permet une évaluation comparative homogène des scénarios.

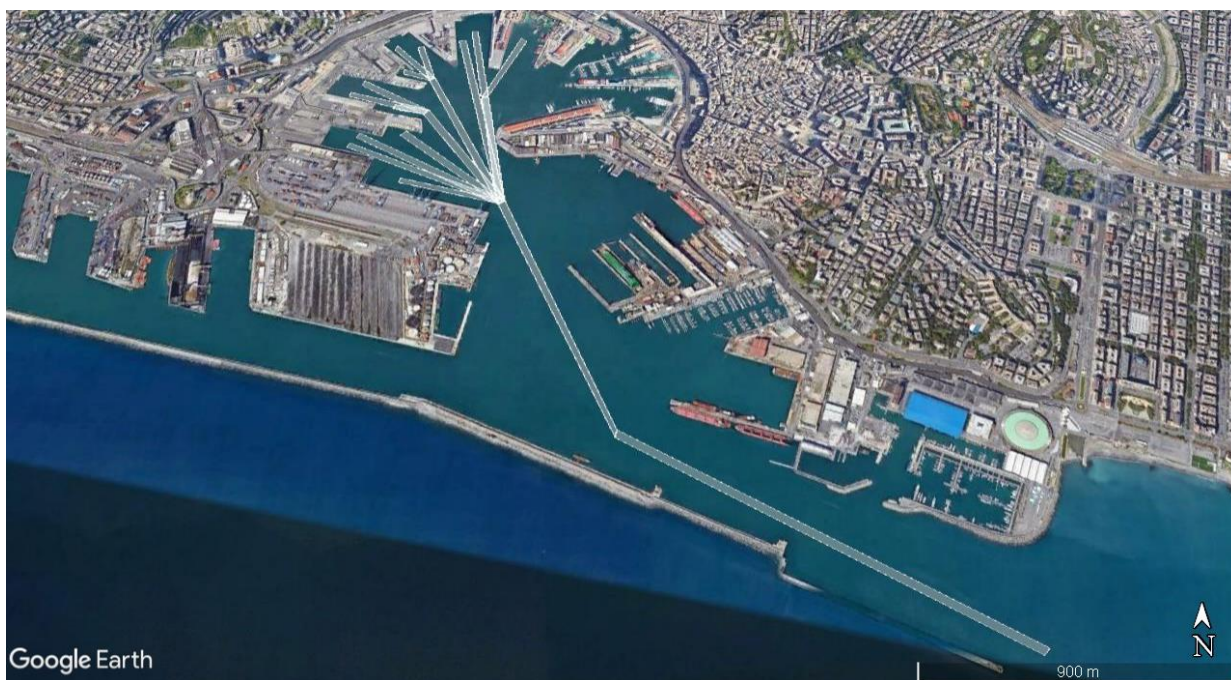


Figure 48 Image satellite de la zone portuaire de Gênes. En blanc, les sources surfaciques introduites dans les données d'entrée pour décrire les phases de manœuvre des navires entrant et sortant du port.

En ce qui concerne les scénarios formulés dans le rapport T3.2.1, en raison de ce qui est apparu lors de la campagne de surveillance T1 et discuté dans le produit T2.3.1, les hypothèses relatives à la zone SECA ont été exclues en raison des très faibles niveaux de concentration de SO₂ mesurés à Gênes, proches de la sensibilité des instruments et inférieurs à l'incertitude intrinsèque associée aux modèles. Par conséquent, deux scénarios d'atténuation sont envisagés : l'utilisation de quais électrifiés (scénario 1) et l'utilisation de gaz naturel liquéfié (GNL) comme combustible (scénario 2). En ce qui concerne le scénario 1, aucune émission n'a été prise en compte dans la phase de stationnement pour tous les quais accueillant des navires de passagers/croisières (catégories EMEP "Ro_Ro_cargo" et "passagers"), c'est-à-dire que les émissions à quai n'ont été prises en compte que pour les navires porte-conteneurs au terminal SECH ; dans la phase de manœuvre, les mêmes émissions que dans le scénario de référence ont été utilisées pour tous les types de navires. Dans le scénario 2, les paramètres d'émission des moteurs de toutes les catégories de navires de passagers/croisières ont été modifiés, tant en phase de manœuvre qu'en phase de stationnement, en utilisant les valeurs de l'EMEP pour la catégorie GNL. Là encore, les paramètres du scénario de référence ont été pris en compte pour les porte-conteneurs.

3.1.1. Facteurs d'émission

En particulier, les émissions du trafic maritime ont été calculées selon la méthodologie de référence de l'EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), présentée dans le guide EIG 2019 (Emission Inventory Guidebook 2019). Les émissions provenant du GNL, quant à elles, sont incluses dans la mise à jour 2021 du guide EIG précité version 2019. Les facteurs d'émission en NO_x et PM₁₀ pour les trois scénarios sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau 29: Facteurs d'émission pour les trois scénarios.

Scenario 0: Reference											
Main Engine						AUX Engine					
Stage	Engine	Fuel	Fuel Consumption (gfuel/KWh)	NOx (g/KWh)	PM10 (g/KWh)	Stage	Engine	Fuel	Fuel Consumption (gfuel/KWh)	NOx (g/KWh)	PM10 (g/KWh)
Hotelling	SSD	MDGO	204	12	0,9	Hotelling	SSD	MDGO	0	0	0
		BFO	215	12,7	2,4			BFO	0	0	0
	MSD	MDGO	223	9,3	0,9		MSD	MDGO	217	12,3	0,4
		BFO	234	9,8	2,4			BFO	227	12,9	0,4
	HSD	MDGO	223	8,4	0,9		HSD	MDGO	217	9,6	0,4
		BFO	234	9	2,4			BFO	227	10,2	0,4
Manoeuvring	SSD	MDGO	204	12	0,9	Manoeuvring	SSD	MDGO	0	0	0
		BFO	215	12,7	2,4			BFO	0	0	0
	MSD	MDGO	223	9,3	0,9		MSD	MDGO	217	12,3	0,4
		BFO	234	9,8	2,4			BFO	227	12,9	0,4
	HSD	MDGO	223	8,4	0,9		HSD	MDGO	217	9,6	0,4
		BFO	234	9	2,4			BFO	227	10,2	0,4
Scenario 1: Cold Ironing											
Main Engine						AUX Engine					
Stage	Engine	Fuel	Fuel Consumption (gfuel/KWh)	NOx (g/KWh)	PM10 (g/KWh)	Stage	Engine	Fuel	Fuel Consumption (gfuel/KWh)	NOx (g/KWh)	PM10 (g/KWh)
Hotelling	The same as Scenario 0 for terminal SECH					Hotelling	The same as Scenario 0 for terminal SECH				
	0 for all the other terminals						0 for all the other terminals				
Manoeuvring	The same as Scenario 0 for all the terminals					Manoeuvring	The same as Scenario 0 for all the terminals				
Scenario 2: Liquefied Natural Gas											
Main Engine						AUX Engine					
Stage	Engine	Fuel	Fuel Consumption (gfuel/KWh)	NOx	PM	Stage	Engine	Fuel	Fuel Consumption (gfuel/KWh)	NOx	PM
Hotelling	SSD	GNL	231	1,25	5,41E-04	Hotelling	SSD	GNL	0	0	0
	MSD	GNL	229	1,25	5,41E-04		MSD	GNL	169	0,566	1,80E-04
	HSD	GNL	265	1,25	5,41E-04		HSD	GNL	196	0,566	1,80E-04
Manoeuvring	SSD	GNL	231	1,25	5,41E-04	Manoeuvring	SSD	GNL	0	0	0
	MSD	GNL	229	1,25	5,41E-04		MSD	GNL	169	0,566	1,80E-04
	HSD	GNL	265	1,25	5,41E-04		HSD	GNL	196	0,566	1,80E-04

Les paramètres des sources associées à la catégorie EMEP "Ro_Ro_cargo" ont été calculés en traitant les informations fournies par la compagnie GNV. En l'absence d'informations plus détaillées, les paramètres à associer aux deux autres catégories ont été calculés en introduisant des facteurs d'échelle

appropriés, estimés sur la base d'appréciations globales relatives à la taille et à l'utilisation des navires pour reproduire un scénario le plus proche possible d'une description réaliste.

La Figure 49 présente un histogramme comparant les émissions pour les différents types de moteurs (SSD, MSD et HSD, c'est-à-dire des moteurs diesel à faible, moyenne et haute vitesse respectivement) et de carburants (huile résiduelle lourde BFO, distillats MDGO, c'est-à-dire diesel/gazole marin, et gaz naturel liquéfié GNL), à la fois en phase de stationnement et en phase de manœuvre.

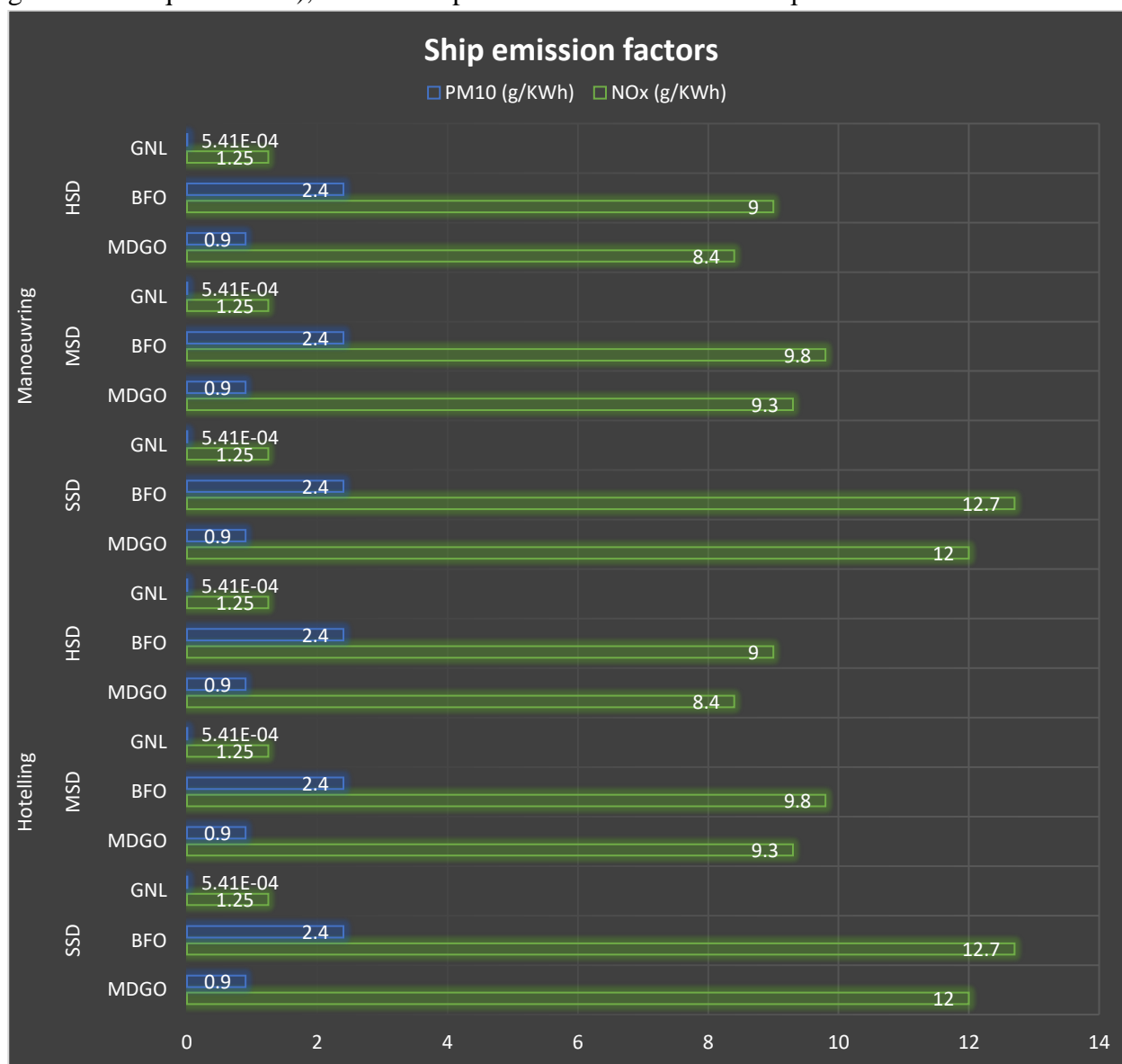


Figure 49 : Facteurs d'émission pour différents types de moteurs et de combustibles marins

Il convient de noter que les taux d'émission d'oxydes d'azote des carburants BFO et MDGO sont comparables (ce dernier étant légèrement inférieur), tandis que l'utilisation du GNL implique une diminution d'un facteur d'environ 10. En ce qui concerne les PM₁₀, les émissions du MDGO sont également inférieures à celles du BFO, mais d'un facteur 3, tandis que l'introduction du GNL entraîne une diminution considérable d'environ 4 ordres de grandeur.

3.2. Résultats

3.2.1. Cartes des concentrations moyennes

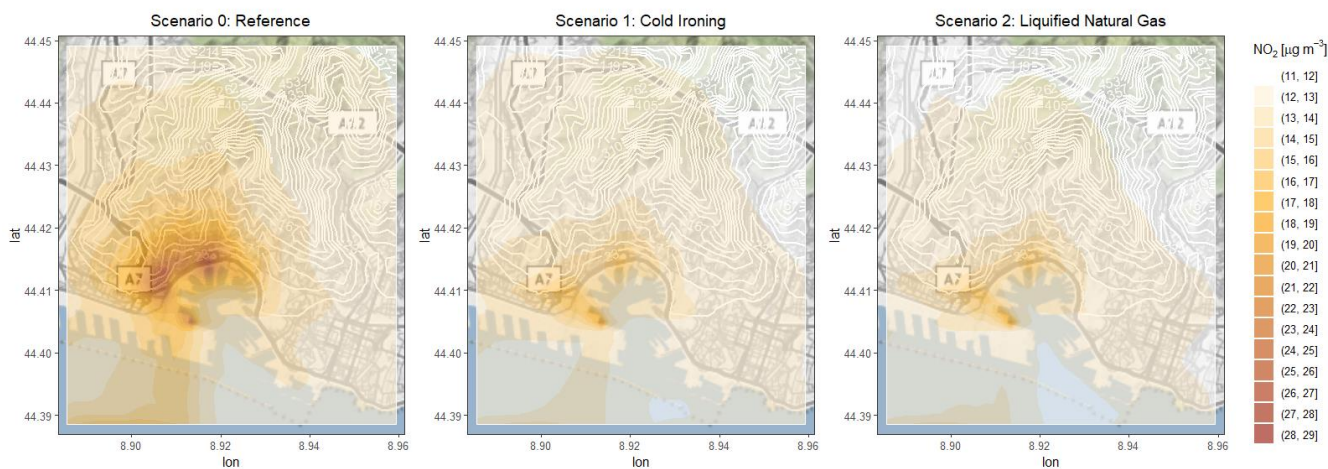
Les sorties de modélisation produites par le système WRF-CALMET-CALPUFF pour les concentrations en NO₂, PM₁₀ et PM₂₅ pour les trois scénarios sont maintenant analysées et comparées. Le modèle atmosphérique WRF, avec lequel le préprocesseur météorologique CALMET a été initialisé, a été réglé à une résolution de 3.3 km, tandis que les simulations CALMET-CALPUFF ont été effectuées avec une grille de résolution 90 m sur un domaine horizontal caractérisé par 70 x 80 cellules de calcul. Comme dans le produit T2.3.1, les concentrations de fond (c'est-à-dire non directement influencées par les émissions des navires) ont été estimées à partir de mesures expérimentales. En effet, les simulations effectuées sont alimentées par les seules émissions des navires et il est nécessaire d'ajouter les niveaux de concentration dus aux autres sources. Dans le produit T2.3.1, la validation a porté sur trois sites récepteurs spécifiques, pour chacun desquels une station de fond a été sélectionnée avec des caractéristiques similaires (type, flux de trafic, etc.) mais éloignée du port. Ici, l'ensemble du domaine est évalué et il a été jugé approprié de choisir une seule station de fond, la plus représentative de la zone considérée, pour chaque polluant. En particulier, la station de Parco Acquasola a été choisie pour le dioxyde d'azote et la station de Quarto pour les particules (pour la localisation, voir le rapport T2.3.1). Les valeurs moyennes pour les deux périodes de simulation sont indiquées dans le Tableau 30. Il convient de noter que la valeur moyenne de fond pour le NO₂ est plus élevée au printemps, contrairement aux valeurs pour les PM₁₀ et les PM₂₅, qui sont légèrement plus élevées en été.

Tableau 30 : Valeurs des concentrations de fond estimées pour les deux périodes de simulation considérées.

Polluant ↓ / Période →	Fond moyen Août 2021 (µg/m ³)	Fond moyen Avril 2022 (µg/m ³)
NO ₂ (Parco Acquasola)	11.66	17.62
PM ₁₀ (Quarto)	17.00	14.71
PM ₂₅ (Quarto)	9.50	8.37

La Figure 50 montre les cartes de champ de concentration en NO₂ avec la concentration de fond, obtenues pour les trois scénarios sur l'ensemble du domaine de calcul ; il convient de noter que, comme les réactions chimiques ne sont pas prises en compte, les variations de concentrations dues aux panaches émis par les navires n'affectent pas les niveaux de fond, qui seront donc les mêmes pour les trois scénarios. Dans les Figure 50 et suivantes, les panneaux supérieurs se réfèrent à la moyenne d'août 2021, les panneaux inférieurs à celle d'avril 2022. La zone d'étude choisie est principalement affectée par le trafic de passagers, étant la plaque tournante des navires de croisière et des ferries. Les terminaux portuaires considérés constituent un élément critique pour la ville en termes d'émissions atmosphériques, en raison à la fois du stationnement des navires et du trafic automobile induit. En fait, les cartes du domaine montrent clairement que la zone portuaire se développe dans un bras de mer semi-circulaire qui pénètre au cœur du centre historique de Gênes.

First campaign: August 2021



Second campaign: April 2022

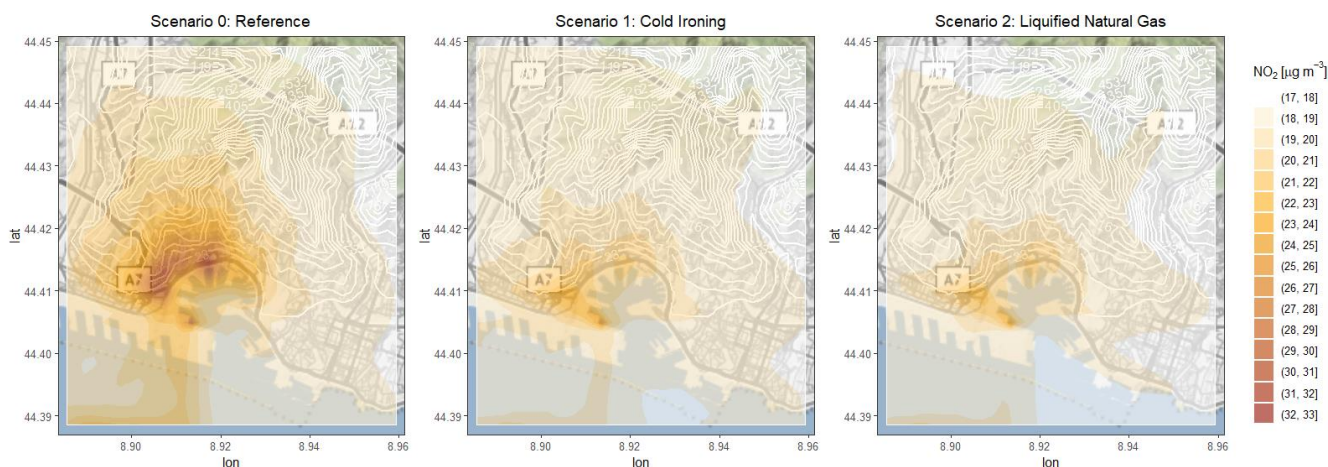


Figure 50 : Cartes des champs de concentration en NO₂ obtenues pour les trois scénarios (référence à gauche, quais électrifiés au milieu et GNL à droite) pour août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas).

Par rapport au scénario de référence (panneau de gauche), on observe une nette diminution des niveaux de NO₂, aussi bien grâce à l'introduction de quais électrifiés pour le stationnement des navires (panneau du milieu) que grâce à l'utilisation du GNL comme carburant (panneau de droite). Les diminutions les plus évidentes se produisent dans la zone entourant immédiatement le port, et en particulier dans les zones situées au nord et à l'ouest du bras de mer, où se trouvent les jetées où sont stationnés respectivement les navires de croisière (jetées 1003 et 1012 de la Figure 47) et les cargos RoRo (jetées T1 à T9 de la Figure 47). Dans les scénarios 1 et 2, la zone située au sud-ouest de l'entrée du port présente une petite zone de concentration plus élevée, probablement due au terminal SECH pour les navires porte-conteneurs, qui n'est pas affecté par les mesures d'atténuation. Les valeurs de concentration en NO₂ sont comparables pour les scénarios 1 et 2, de même que le schéma spatial de dispersion; de légères différences entre les deux mesures d'atténuation peuvent être observées principalement dans la partie maritime, en raison du fait que le GNL a également un impact sur les émissions pendant la phase d'approche et de manœuvre du port, contrairement à l'électrification des quais. Les considérations précédentes s'appliquent aux deux périodes de simulation, avec toutefois des valeurs légèrement plus élevées pour le mois de printemps : par exemple, les maxima mensuels

absolus sur l'ensemble du domaine des trois scénarios sont de 28.4, 21.6 et 20.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour août 2021, alors qu'ils sont de 32.7, 26.5 et 25.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour avril 2022.

La Figure 51 et la Figure 52 représentent les mêmes cartes que la Figure 50, mais pour les PM_{10} et les PM_{25} respectivement. Les considérations énumérées pour le NO_2 s'appliquent également aux particules, mais avec une différence substantielle : alors que pour le dioxyde d'azote, les valeurs de concentration varient dans une fourchette de 15 à 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pour les PM_{10} et les PM_{25} , la variation est inférieure à 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; par exemple, en août 2021, les PM_{10} et les PM_{25} varient respectivement de 17.0 à 17.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et de 9.3 à 9.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le scénario 0, de 17.0 à 17.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et de 9.3 à 9.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le scénario 1, de 17.0 à 17.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et de 9.3 à 9.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le scénario 2 ; ce résultat est conforme à ce qui a été présenté dans le produit T2.3.1. dans lequel une distribution très homogène des particules a été mise en évidence dans le domaine de calcul, avec une faible contribution des émissions des navires. Contrairement à ce qui a été simulé pour le NO_2 , les niveaux de concentration des particules sont plus élevés en août 2021 qu'en avril 2022, notamment d'environ 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} et d'environ 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{25} .

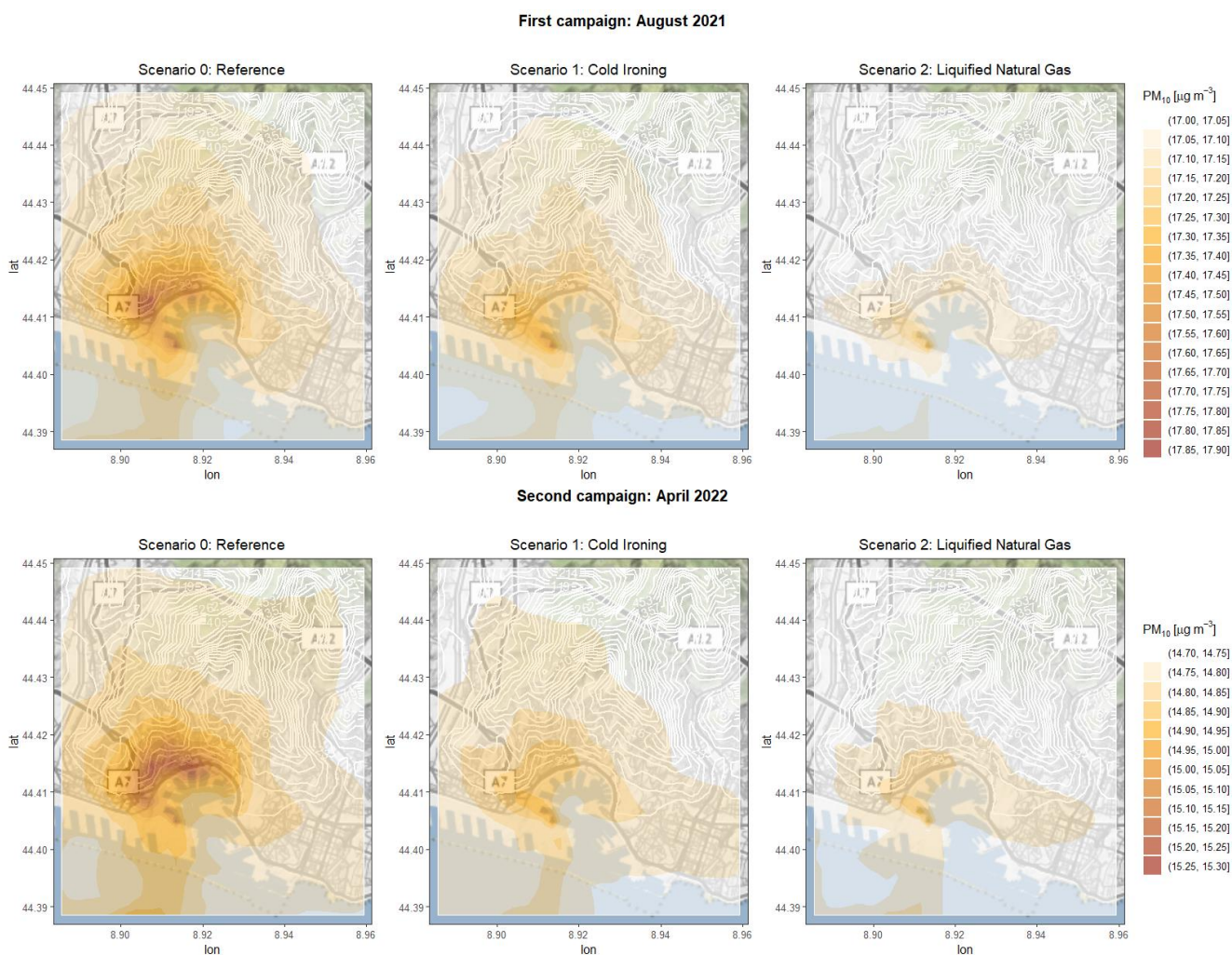
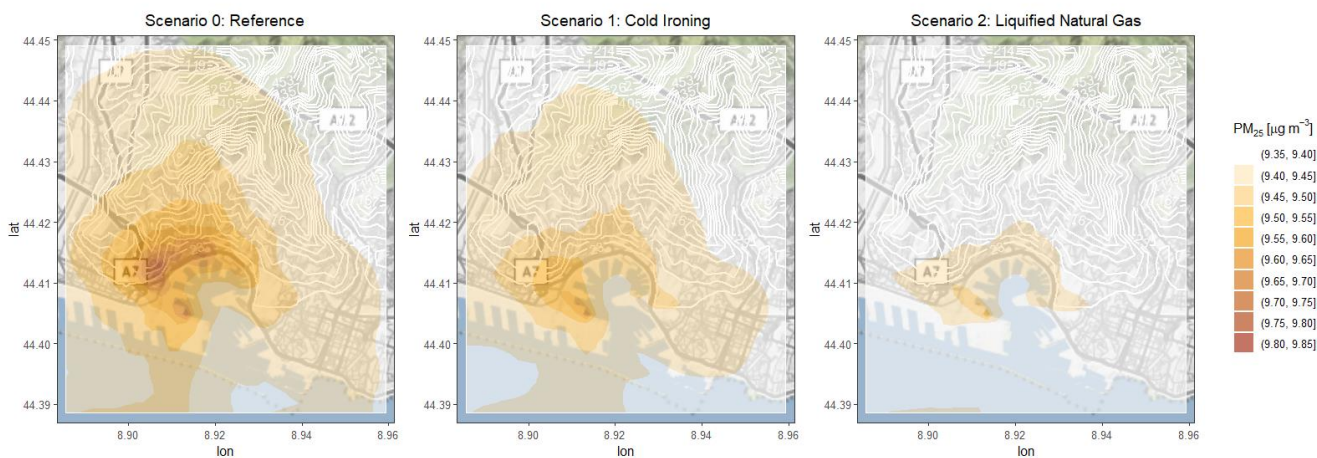


Figure 51 : cartes des champs de concentration de PM_{10} obtenues pour les trois scénarios (référence à gauche, quais électrifiés au milieu et GNL à droite) pour août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas).

First campaign: August 2021



Second campaign: April 2022

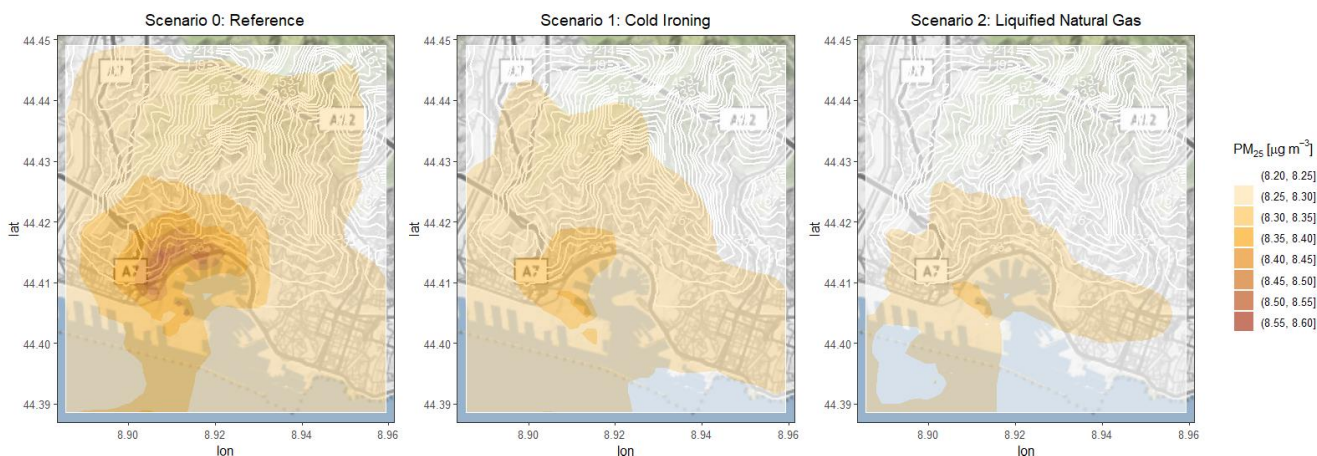


Figure 52 : cartes des champs de concentration de PM₂₅ obtenues pour les trois scénarios (référence à gauche, quais électrifiés au milieu et GNL à droite) pour août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas).

Pour une meilleure visualisation des zones d'impact des actions supposées, la Figure 53 présente des cartes des différences de concentrations en NO₂ entre les scénarios d'atténuation et les scénarios de référence (électrification des quais à gauche et utilisation de GNL à droite) pour les deux périodes simulées (août 2021 en haut et avril 2022 en bas). Il convient de souligner que, dans cette figure, l'effet de la concentration de fond est neutralisé puisque, les concentrations supplémentaires dues à d'autres sources sont les mêmes pour les trois scénarios. Dans l'ensemble, les observations mises en évidence pour les concentrations absolues sont confirmées par les cartes de différence entre les scénarios d'atténuation et de référence. En fait, les zones d'impact maximal sont situées au nord et à l'ouest de l'entrée du port, à proximité immédiate des jetées accueillant les bateaux de croisière et les ferries. Il convient de noter qu'en revanche, la partie orientale accueille des bateaux de plaisance, qui ont beaucoup moins d'impact du point de vue des émissions et ne sont pas pris en compte dans les simulations. Il est intéressant de noter que, tant pour le scénario 1 que pour le scénario 2, les différences et donc les impacts légèrement plus élevés sont enregistrés pour le mois d'août 2021, qui est la période de pointe de la saison des croisières et des ferries à destination des îles pour les vacances. En revanche, les valeurs les plus élevées des concentrations absolues sont observées en avril 2022, ce qui est donc dû aux niveaux de fond.

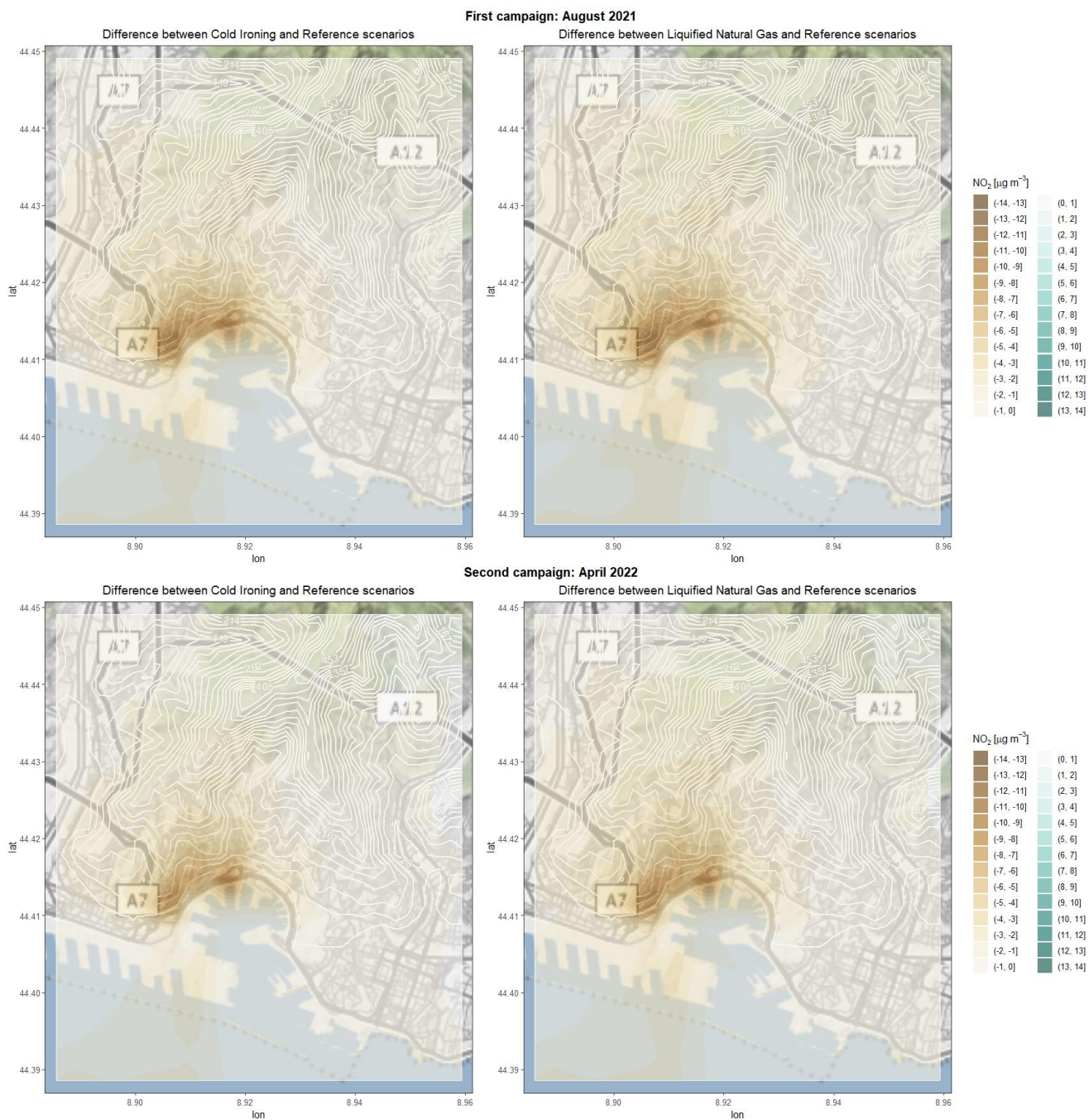


Figure 53 : cartes des différences de concentration de NO_2 entre le scénario 1 et le scénario 0 (à gauche) et entre le scénario 2 et le scénario 0 (à droite) pour la période août 2021 (ci-dessus) et avril 2022 (ci-dessous).

La Figure 54 et la Figure 55 représentent les mêmes différences, mais concernant respectivement les PM_{10} et PM_{25} . Pour les deux scénarios d'atténuation, la plus grande différence entre les deux polluants se produit au cours du premier mois de simulation, août 2021 ; cependant, il faut souligner que les niveaux de diminution de concentration dus aux deux actions de réduction sont d'amplitude limitée : moins de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} et moins de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{25} . Ce résultat est conforme à ce qui a été obtenu dans le produit T2.3.1, où la contribution en pourcentage des émissions portuaires aux niveaux de particules a été estimée à moins de 3 %, soulignant que les navires ne sont pas une source prédominante de particules.

En général, pour tous les polluants considérés, l'effet d'atténuation dû aux scénarios est légèrement plus prononcé dans le cas du GNL que dans celui de l'électrification des quais. Ce résultat est probablement dû au fait que, selon les hypothèses du scénario 1, les navires en phase de manœuvre utilisent des carburants BFO et MDGO, alors que le GNL peut être utilisé à la fois en phase de manœuvre et en phase de stationnement.

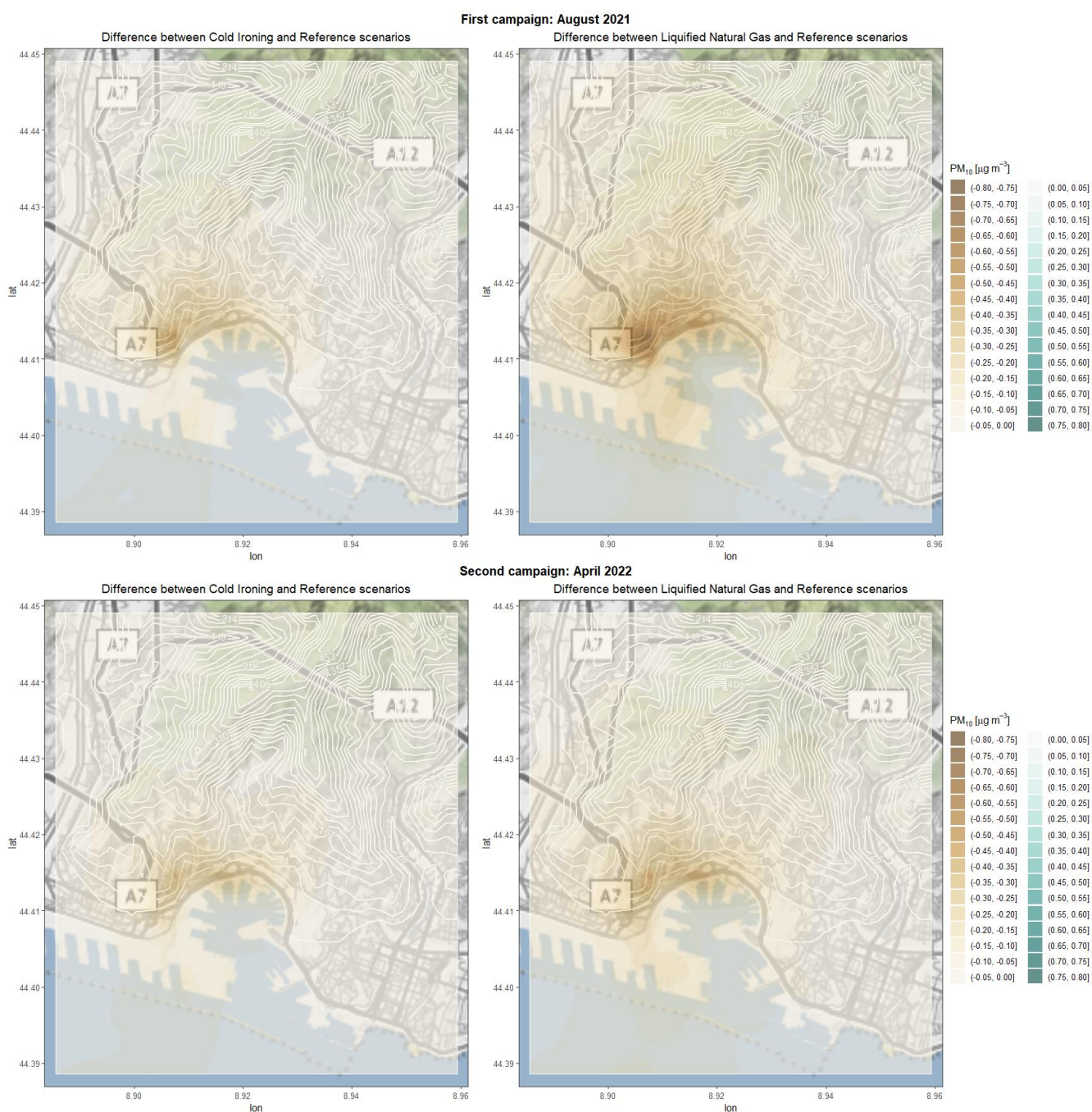


Figure 54 : cartes des différences de concentration en PM_{10} entre le scénario 1 et le scénario 0 (à gauche) et entre le scénario 2 et le scénario 0 (à droite) pour la période d'août 2021 (en haut) et d'avril 2022 (en bas).

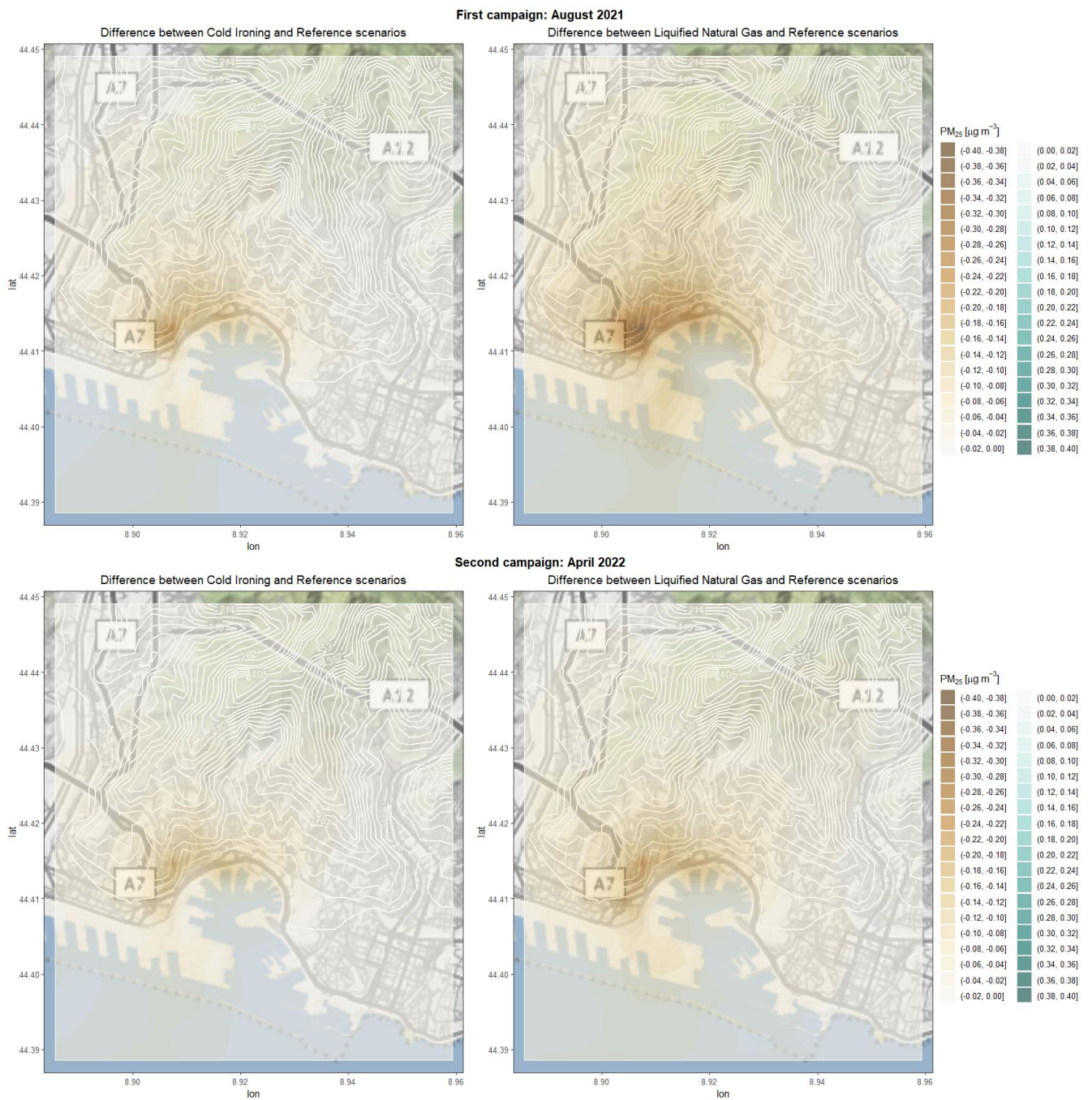


Figure 55 : cartes des différences de concentration en PM₂₅ entre le scénario 1 et le scénario 0 (à gauche) et entre le scénario 2 et le scénario 0 (à droite) pour la période d'août 2021 (en haut) et d'avril 2022 (en bas).

3.2.2. Statistiques descriptives

Pour résumer les statistiques descriptives des trois scénarios, les boxplots des valeurs obtenues sont maintenant présentés. Les graphiques sont réalisés à partir des valeurs de concentration ajoutées aux valeurs de fond et en ne sélectionnant que les cellules situées sur le sol, de sorte que les statistiques ne sont calculées que dans les zones où il y a une population potentiellement exposée. Outre les cinq indices statistiques standard (premier et troisième quartiles, médiane et extrêmes), la moyenne est représentée dans le boxplot par un cercle jaune ; en outre, pour simplifier la lecture des statistiques, les valeurs numériques des indices sont transcrites au sommet de chaque boxplot. La Figure 56 montre le boxplot des concentrations en NO₂. La diminution due aux mesures d'atténuation est visible dans les valeurs moyennes, médianes et quartiles des trois scénarios. Comme l'a déjà montré la Figure 50, en tenant compte de la concentration de fond, les valeurs de NO₂ et donc les indices descriptifs associés sont généralement plus élevés pour la deuxième période de simulation, avril 2022. Des deux scénarios d'atténuation, celui impliquant l'utilisation de GNL présente des indices statistiques légèrement plus faibles que l'introduction de quais électrifiés, et ce pour les deux périodes de simulation ; à titre d'exemple, les maxima (c.-à-d. les extrémités supérieures des "moustaches" du boxplot) estimés pour le mois d'août 2021, sur les seules cellules terrestres et en excluant les valeurs aberrantes, sont de 16.9, 13.8 et 13.2 µg/m³ pour les scénarios 0, 1 et 2 respectivement ; les valeurs correspondantes pour la seconde période de simulation sont de 22.7, 20.0 et 19.3 µg/m³. En outre, l'observation de l'intervalle interquartile montre clairement que l'introduction de mesures d'atténuation entraîne une diminution de la variabilité de la distribution des valeurs de concentration.

Les boxplots des PM₁₀ et PM₂₅ (Figure 57 et Figure 58 respectivement) confirment la diminution des valeurs de concentration grâce à l'introduction des deux actions d'atténuation et montrent que l'effet d'atténuation obtenu est légèrement plus important dans le cas de l'utilisation du GNL que dans l'électrification du quai. Par ailleurs, les valeurs moyennes et médianes confirment la tendance des niveaux de concentration en particules (avec concentration de fond) à être plus élevés au cours du mois d'août 2021 qu'en avril 2022, contrairement au dioxyde d'azote. Les statistiques de la boîte à moustaches montrent toutefois comment les mesures d'atténuation ont un impact beaucoup plus faible sur les particules fines ; par exemple, pour le mois d'août 2021, les valeurs moyennes sont de 17.13, 17.08 et 17.03 µg/m³, respectivement pour le scénario 0, 1 et 2 et les valeurs médianes correspondantes sont de 17.09, 17.06 et 17.02 µg/m³. Il convient de souligner à nouveau que cela est probablement dû à la faible contribution des émissions du transport maritime à la concentration totale en particules ; en effet, rappelons que, comme calculé dans le produit T2.3.1, le pourcentage de contribution des navires à la qualité globale de l'air est estimé à environ 20 % pour le dioxyde d'azote et 2 à 3 % pour les particules. Enfin, les écarts interquartiles très faibles (de l'ordre du dixième de µg/m³ voire inférieurs pour le Scénario de référence 0) témoignent de la forte homogénéité de la répartition des particules sur le territoire, également attestée par les nombreuses stations de mesure disséminées sur le territoire.

Afin d'évaluer l'efficacité des actions de réduction de la pollution uniquement sur la fraction de concentration due aux émissions des navires, des boxplots des quotients entre les concentrations (sans fond) des deux scénarios d'atténuation et le scénario de référence sont maintenant présentés. De cette manière, les valeurs varient entre 0 (air pur) et 1 (aucun effet d'atténuation). A nouveau, seules les cellules du domaine situées sur la terre sont considérées, de sorte que seules les valeurs qui peuvent réellement être une source de risque pour la population sont prises en compte. En ce qui concerne le NO₂ (Figure 59), la médiane du quotient entre le scénario avec quais électrifiés et le scénario de

référence est de 0.41 pour les deux périodes de simulation ; la médiane du quotient entre le scénario GNL et le scénario de référence est de 0.31 pour le mois d'été et de 0.29 pour le mois de printemps ; la tendance du GNL à atténuer les émissions des navires plus efficacement que l'électrification des quais est donc confirmée. En ce qui concerne les particules, cette tendance semble beaucoup plus prononcée ; en effet, la médiane du quotient $S1/S0$ est de 0.67 pour août 2021 et de 0.58 pour avril 2021 pour les PM_{10} et de 0.66 et 0.58 pour les PM_{25} ; la médiane du quotient $S2/S0$ pour les PM_{10} est de 0.25 pour la première période de simulation et de 0.27 pour la seconde, tandis que pour les PM_{25} , elle est de 0.21 et de 0.27 respectivement. Cela signifie que, tant pour les oxydes d'azote que pour les particules, l'utilisation du GNL a un impact important sur les concentrations dues aux seules émissions des navires, en diminuant sensiblement les valeurs simulées ; toutefois, la qualité globale de l'air doit toujours être prise en compte : l'effet des scénarios d'atténuation sur les niveaux de particules dus aux seules émissions des navires est en fait largement estompé par les valeurs prépondérantes des concentrations de fond dues à d'autres sources. Il convient de souligner que les concentrations de fond n'ont pas été calculées de manière rigoureuse, car les interactions chimiques possibles entre les polluants qu'elles contiennent et les divers panaches de navires émis dans les scénarios n'ont pas été prises en compte. Malgré cette approximation, on considère que la précédente considération au sujet des particules reste valable étant donné la différence de près de deux ordres de grandeur entre les valeurs des concentrations de fond et les valeurs simulées par CALPUFF pour les panaches navals (voir par exemple le tableau de la section 1.2.1 du produit T2.3.1).

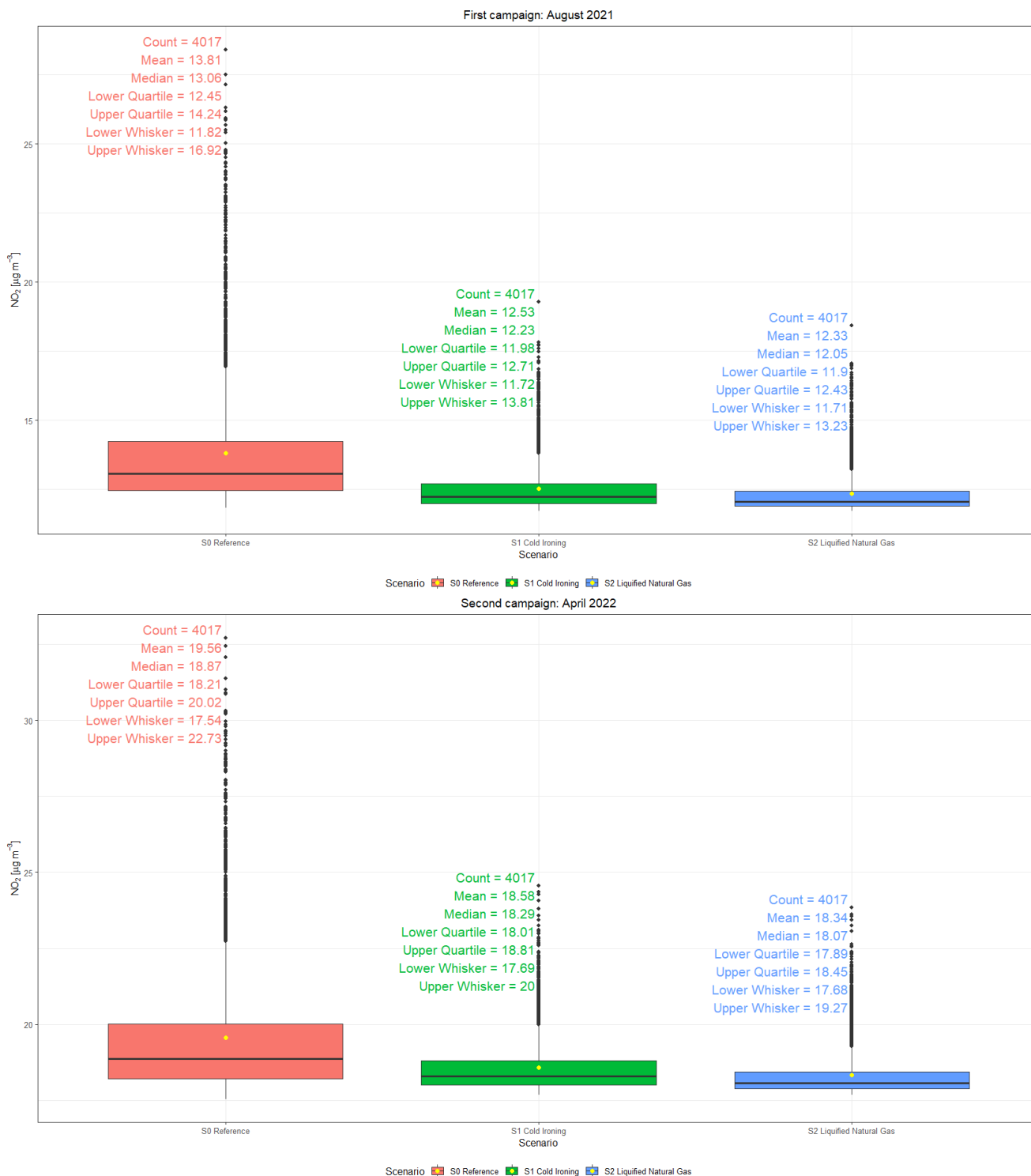


Figure 56 : Boxplots des concentrations en NO_2 (avec fond) simulées pour les trois scénarios, en ne considérant que les cellules du domaine situées sur terre, moyennées sur août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas).

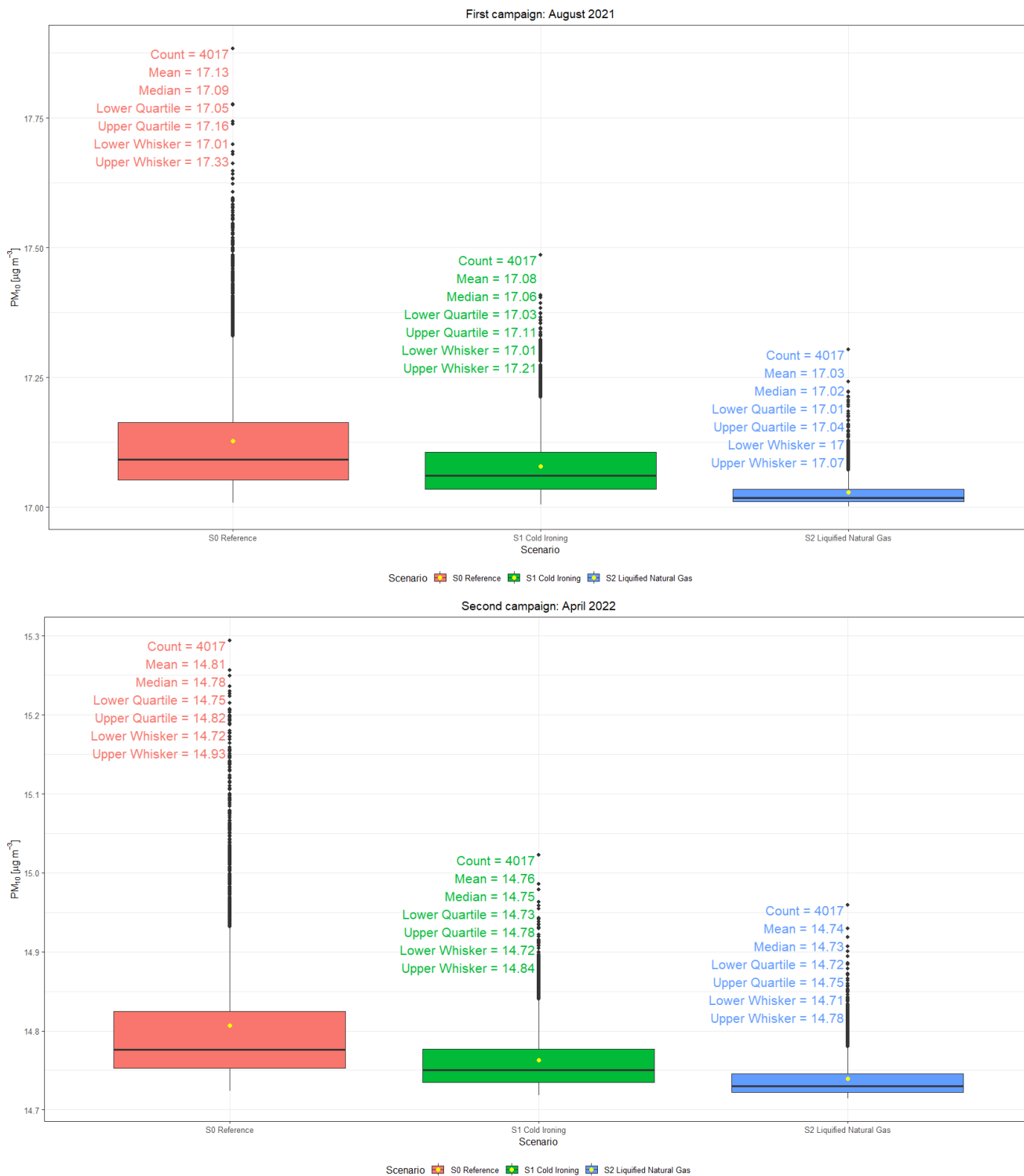


Figure 57 : Boxplots des concentrations en PM_{10} (avec fond) simulées pour les trois scénarios, en ne considérant que les cellules du domaine situées sur terre, moyennées sur août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas).

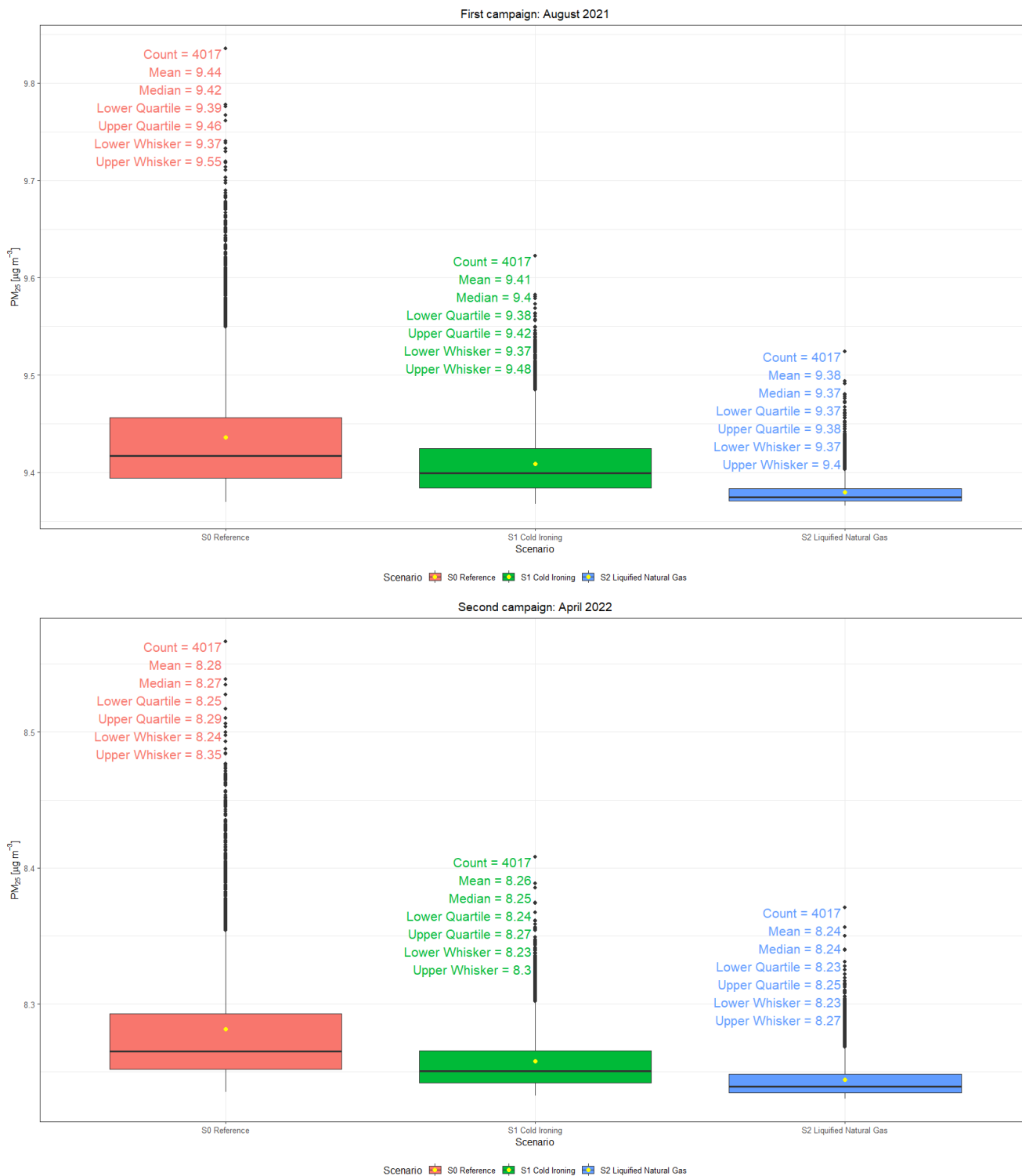


Figure 58 : Boxplots des concentrations en $PM_{2.5}$ (avec fond) simulées pour les trois scénarios, en ne considérant que les cellules du domaine situées sur terre, moyennées sur août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas).

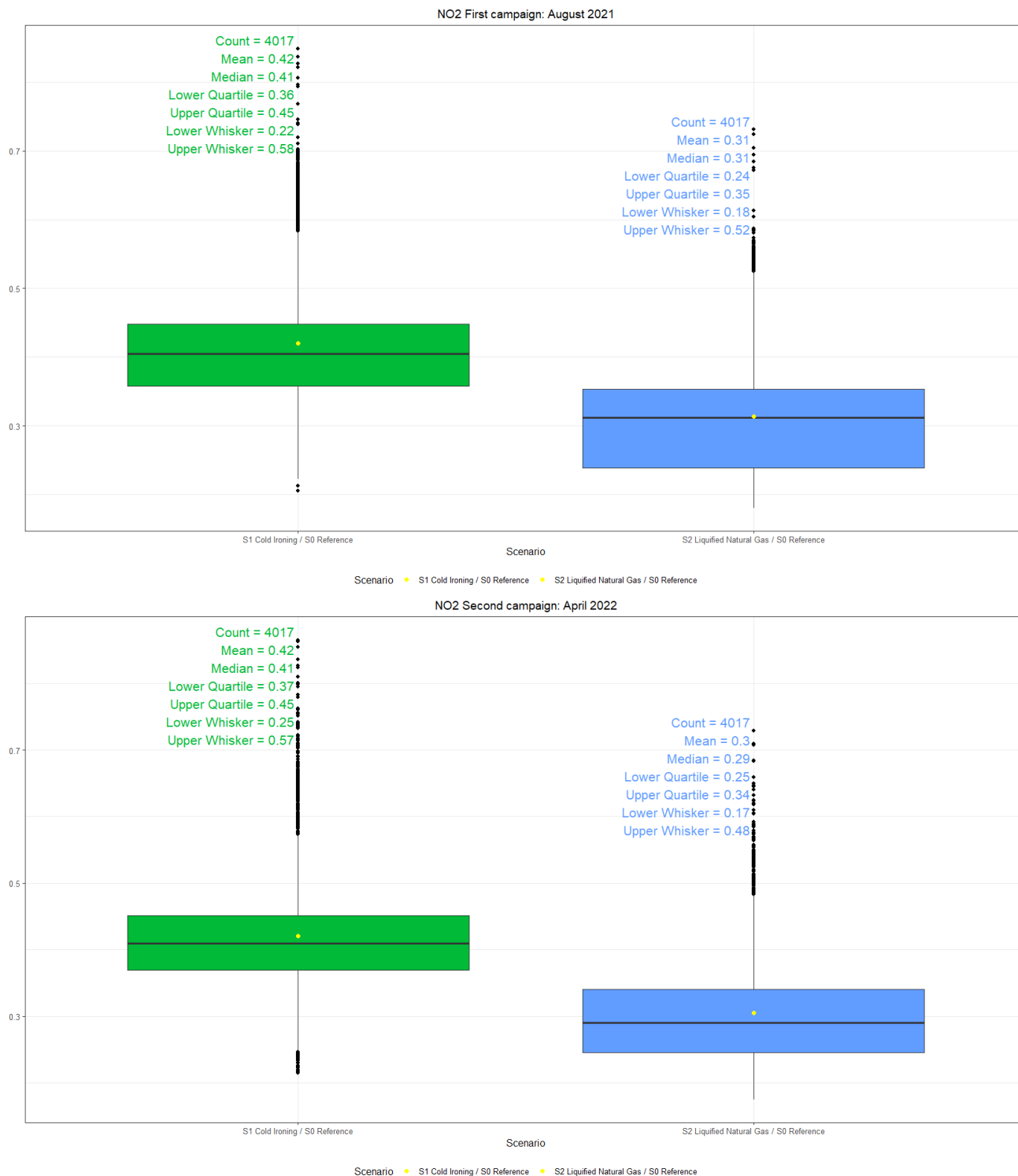


Figure 59 : Boxplots du rapport entre les concentrations en NO₂ (sans concentration de fond) des scénarios d'atténuation et de référence, en ne considérant que les cellules du domaine situées sur terre, moyennées sur la période simulée (août 2021 en haut et avril 2022 en bas).

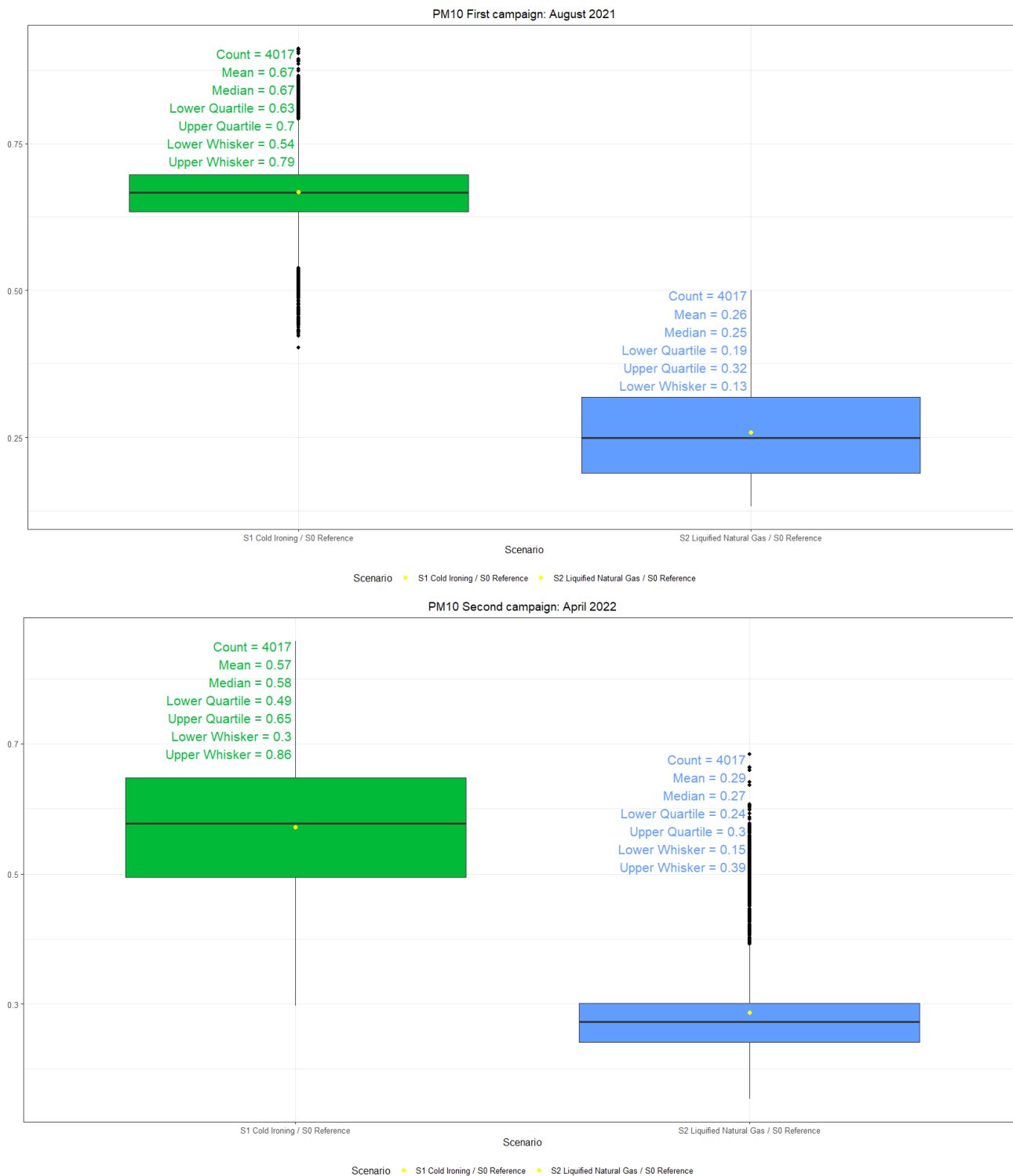


Figure 60 : Boxplots du rapport entre les concentrations en PM₁₀ (sans concentration de fond) des scénarios d'atténuation et de référence, en ne considérant que les cellules du domaine situées à terre, moyennées sur la période simulée (août 2021 en haut et avril 2022 en bas).

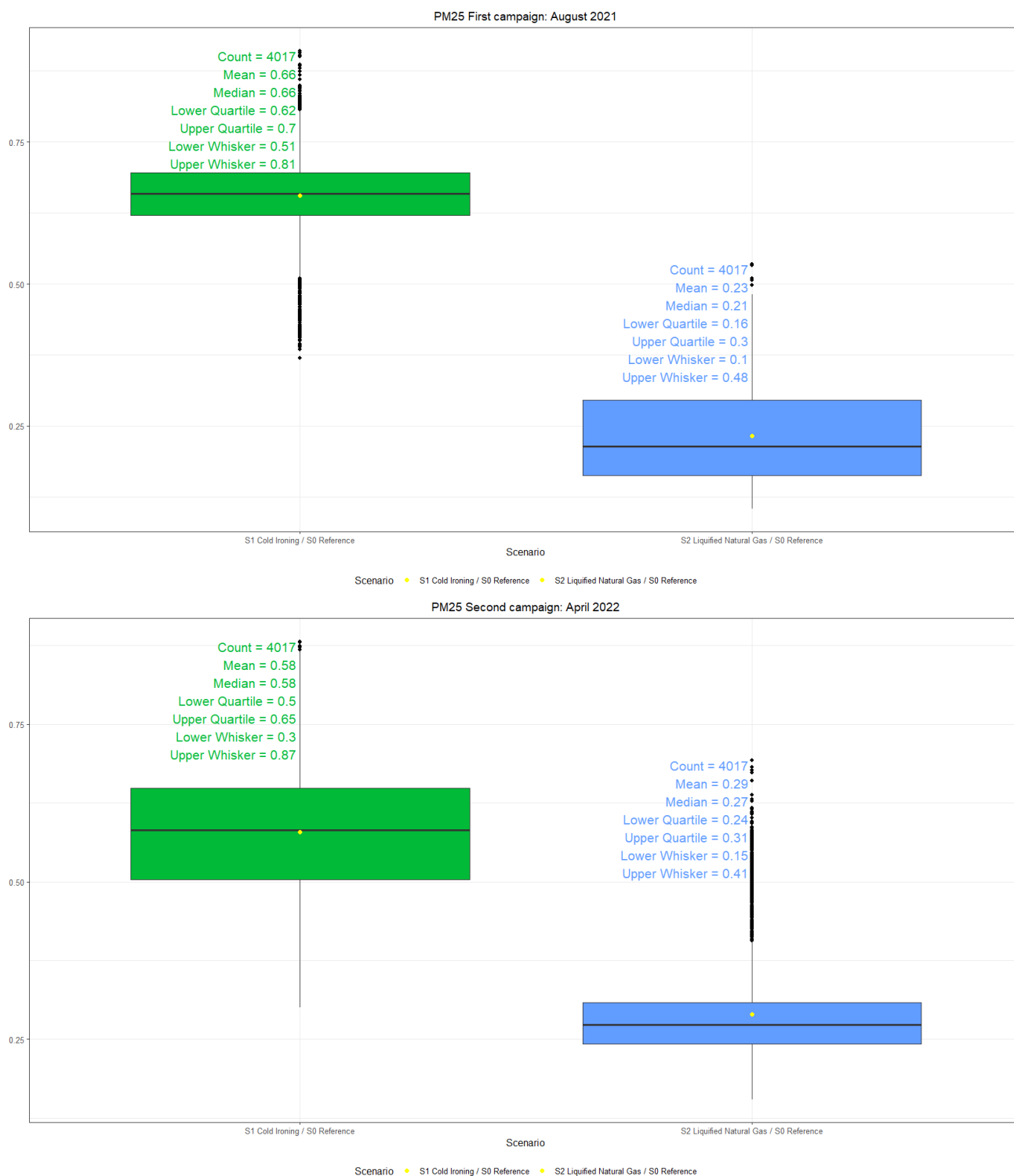


Figure 61 : Boxplots du rapport entre les concentrations en NO_2 (sans concentration de fond) des scénarios d'atténuation et de référence, uniquement sur les cellules du domaine situées à terre, moyennées sur la période simulée (août 2021 en haut et avril 2022 en bas).

Pour une quantification numérique de l'efficacité de la réduction des niveaux de polluants, l'indice de réduction en pourcentage R est introduit, défini comme :

$$R = \frac{p_{ref} - p_{scen}}{p_{ref}} 100$$

où p_{ref} et p_{scen} représentent les 90e percentiles des concentrations moyennes du scénario de référence et des scénarios d'atténuation. Du fait de l'absence d'interactions chimiques entre les panaches navals et les polluants provenant d'autres sources, l'indice R est d'abord calculé sans inclure la concentration de fond ; cette approche permet d'estimer l'efficacité d'abattement de chaque scénario exclusivement sur la contribution navale, sans introduire de degrés d'incertitude supplémentaires dus à l'estimation du fond ; cependant, pour avoir un aperçu complet de l'impact effectif des actions formulées sur la qualité de l'air, le Tableau 31 montre le même indice calculé avec le fond et nommé R_{bg} .

Tableau 31 : tableau récapitulatif de l'indice de réduction en pourcentage pour les deux scénarios d'atténuation et pour les deux périodes considérées

Polluant	Scénario	Période	R (%)	R _{bg} (%)
NO ₂	S1: Quais électrifiés	août-21	59.22	17.37
		avril-22	60.96	11.2
	S2: Gaz Naturel Liquéfié	août-21	67.07	19.68
		avril-22	68.62	13.05
PM ₂₅	S1: Quais électrifiés	août-21	40.53	0.66
		avril-22	47.96	0.65
	S2: Gaz Naturel Liquéfié	août-21	76.42	1.24
		avril-22	70.31	0.95
PM ₁₀	S1: Quais électrifiés	août-21	38.78	0.66
		avril-22	48.26	0.66
	S2: Gaz Naturel Liquéfié	août-21	72.99	1.21
		avril-22	70.33	0.96

L'indice de réduction en pourcentage du NO₂ se situe dans la fourchette 59.2-61 % pour le scénario 1 et dans la fourchette 67.1-68.6 % pour le scénario 2, confirmant la plus grande efficacité de l'introduction du carburant GNL par rapport à l'électrification des quais ; pour les deux scénarios, les réductions produites dans les deux périodes de simulation sont comparables entre elles, avec des valeurs supérieures d'environ 1.5 % au cours du mois d'avril, par rapport à août 2021. En ce qui concerne les particules, la différence entre le scénario 1 et le scénario 2 est beaucoup plus accentuée, tant pour les PM₁₀ que pour les PM₂₅ qui présentent des comportements similaires. Le pourcentage de réduction produit par le GNL est en effet toujours supérieur à 70%, alors que l'électrification des quais est de l'ordre de 38.8-48.2 % ; l'analyse des périodes de simulation montre que l'électrification des quais est plus efficace au printemps (7-10% de plus qu'au mois d'été), alors que pour le GNL, le résultat est inverse, bien que la différence soit moins marquée (les réductions d'août 2021 sont de 2 à

6 % supérieures à celles d'avril 2022). Cet aspect présente un intérêt considérable et pourrait être approfondi à l'avenir, en introduisant de nouvelles périodes de simulation dans les saisons plus froides.

En étendant l'analyse aux valeurs de R_{bg} , c'est-à-dire en considérant l'effet sur la qualité de l'air globale, les deux scénarios montrent des pourcentages de réduction de NO_2 plus élevés en août 2021 qu'en avril 2022, contrairement à ce qui a été obtenu pour R , révélant des niveaux de fond plus élevés au printemps. Cependant, le résultat le plus évident concerne la différence de valeurs R_{bg} entre le dioxyde d'azote et les particules fines ; pour le gaz, les pourcentages de réduction en été sont de 11 à 13 %, ceux au printemps de 17 à 20 %, tandis que pour les particules, ils sont toujours inférieurs à 1.3 %, démontrant une fois de plus que les navires ne sont pas les principales sources de particules.

3.3. Conclusion

Dans ce rapport, les résultats fournis par la modélisation des scénarios de réduction des émissions envisagés pour le port de Gênes ont été analysés. Les simulations ont été réalisées sur deux périodes, une estivale (août 2021) et une printanière (avril 2022) et pour trois espèces de polluants, NO_2 , PM_{10} et PM_{25} . Les scénarios d'atténuation considérés sont au nombre de deux : l'électrification des quais (scénario 1) et l'utilisation du gaz naturel liquéfié comme combustible (scénario 2). Le premier scénario n'affecte que la phase de stationnement, éliminant les émissions des navires amarrés aux quais, tandis que le second impacte à la fois la phase de stationnement et la phase de manœuvre, avec des facteurs d'émission plus faibles par rapport aux autres types de carburant. Le domaine considéré comprend 13 quais principaux, dont 12 sont dédiés aux navires de croisière et aux ferries. La treizième jetée, le terminal SECH, est impactée par les porte-conteneurs et n'est pas intégrée dans les scénarios d'atténuation : les émissions ont été maintenues égales au scénario de référence.

Pour le dioxyde d'azote, les résultats montrent que les deux scénarios d'atténuation produisent une réduction considérable de la concentration due uniquement à la contribution navale. L'indice de réduction en pourcentage de NO_2 , défini ici pour quantifier synthétiquement les résultats obtenus, est d'environ 60 % pour le mois d'été et d'un peu moins de 70 % pour le mois de printemps.

Pour les particules en revanche, l'utilisation du carburant GNL produit une réduction beaucoup plus importante de la concentration due uniquement à la contribution navale, par rapport à l'électrification des quais. Le scénario 2, en effet, produit une réduction de plus de 70 %, alors que pour le scénario 1, elle est d'environ 40-50 %.

Les conclusions qui viennent d'être présentées concernent la fraction de concentration provenant des seules émissions navales. Les réactions chimiques qui se produisent entre les panaches navals et les polluants émis par d'autres sources (et qui affectent la partie secondaire des concentrations de fond) ont été ici négligées ; malgré cette approximation, il est également utile de considérer les impacts sur la qualité globale de l'air en ajoutant les niveaux de fond estimés à partir de mesures expérimentales. Cette approche a permis de mettre en évidence que les deux scénarios envisagés ont un impact significatif sur les niveaux globaux de NO_2 ; le pourcentage de réduction sur la concentration totale de gaz varie en effet de 11% à 20% selon le scénario et la période considérée; au contraire, pour les particules, ce pourcentage de réduction ne dépasse jamais la valeur de 1.2 %, ce qui montre que les navires n'ont pas d'impact significatif sur la concentration totale de ce type de polluant.

4. PORT DE LIVOURNE (ARPA TOSCANA)

4.1. Présentation des scénarios de calcul

L'Autorité du Système Portuaire de la Mer Tyrrhénienne Septentrionale (désormais AdSP MTS) dispose d'un modèle de calcul de la qualité de l'air, acquis afin de répondre aux exigences prévues lors de l'Évaluation d'Impact Environnemental (EIE) avancée par la Région de Toscane pour la réalisation du Bassin Europe dans le Port de Livourne.

Le modèle développé a donc été élaboré et configuré spécifiquement pour la zone de Livourne et comprend un système de modélisation intégré (conformément aux obligations liées aux prescriptions de l'Évaluation Environnementale Stratégique du nouveau Plan Régulateur Portuaire (PRP), limité aux émissions atmosphériques et à la qualité de l'air).

Cette activité est rendue possible grâce aux composantes qui constituent l'ensemble du modèle : différents modules pour la modélisation météorologique, les émissions et la qualité de l'air, alimentés par des bases de données décrivant la configuration du territoire, les émissions liées aux activités qui y sont présentes, ainsi que les contributions aux niveaux de fond des concentrations provenant des sources les plus éloignées.

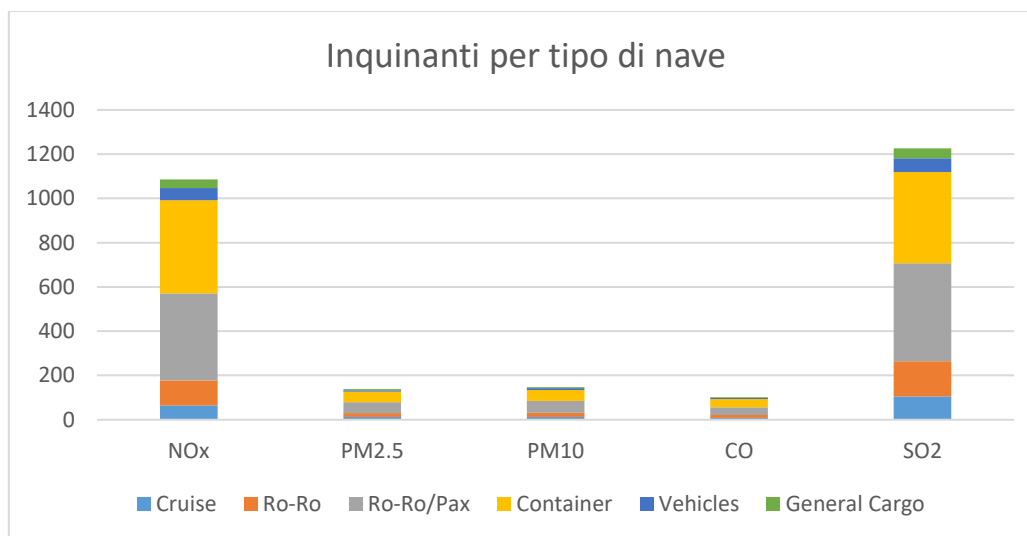


Figure 62 : Carbon footprint 2021

De plus, l'AdSP MTS réalise chaque année un document qui contient le calcul de l'empreinte carbone navale dans le cadre du port de Livourne, en analysant les données relatives aux mouvements individuels effectués par les navires pendant les phases en port. Le rapport sur l'empreinte carbone navale est un outil préliminaire, réalisé avec des outils innovants, grâce auquel il a été possible d'évaluer d'éventuels scénarios de réduction des émissions de polluants.

Dans les phases préliminaires du projet, l'AdSP MTS a envisagé certains scénarios concrets de réduction des émissions de polluants par le biais d'actions dans le secteur naval. Cependant, les statistiques des arrivées et des départs à Livourne au cours des années précédentes ont été évaluées en tenant compte de la nette diminution due à la pandémie de COVID-19.

Voici quelques chiffres qui illustrent au mieux l'évolution des principaux indicateurs de trafic pour les années 2021-2022.

Principali indicatori di traffico	2021	2022	Var. %
	GEN - DIC	GEN - DIC	
Totale movimentazione del porto (ton)	34.346.072	31.909.489	-7,1%
Navi arrivate	6.246	6.309	1,0%
TEUs	791.356	751.811	-5,0%
Rotabili (n. mezzi commerciali)	509.989	480.873	-5,7%
Passeggeri (unità)	2.226.765	2.811.322	26,3%
Crocieristi (unità)	56.338	437.670	676,9%
Auto nuove (unità)	467.338	491.159	5,1%
Prodotti forestali (ton)	1.788.512	2.131.105	19,2%

Figure 63 : Évolution du trafic maritime 2021/2022

Parmi les indicateurs les plus évidents, nous pouvons attirer l'attention sur la variation, sur la période 2021-2022, des différentes typologies de trafic de marchandises arrivant dans le port. Comme mentionné précédemment, celles-ci mettent en évidence une contraction des chiffres due une fois de plus à la modification significative des flux après la pandémie.

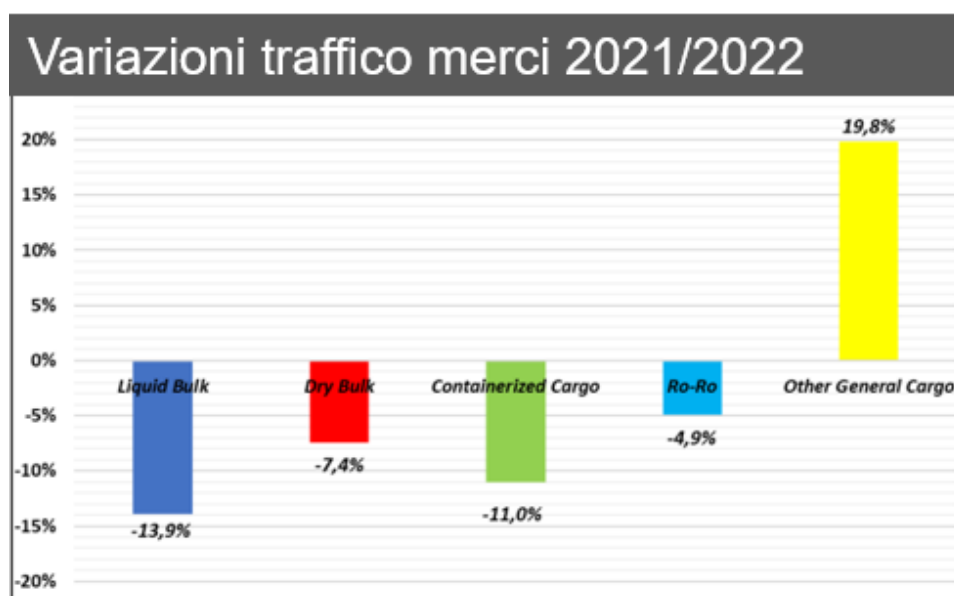


Figure 64 : Variation du trafic au cours de la période 2021/2022

Les statistiques présentées illustrent bien comment la pandémie a affecté principalement le secteur du tourisme, réduisant de manière significative les arrivées de croisiéristes avant 2022.

La définition des scénarios, réalisée en 2022, a été basée sur les arrivées maritimes de 2021, considérées comme la première année complète en termes d'arrivées et de départs, mais en prenant comme référence une année avec moins d'arrivées dans le secteur des croisières par rapport au passé et surtout par rapport à l'année suivante.

Les données utilisées pour le calcul des scénarios, en plus du modèle ARIA régional décrit dans la sortie T2.3.1, sont celles relatives aux arrivées et aux départs du secteur maritime à Livourne. Les informations sur les horaires d'arrivée en rade, au port et à quai (tout comme pour les départs) sont disponibles dans la plateforme MONICA, une architecture standard de surveillance portuaire mise en place par l'AdSP MTS. La plateforme contient toutes les informations sur les voyages en navire dans le port, sur toutes les caractéristiques des navires opérant à Livourne et sur tous les éléments liés aux mouvements des navires dans le port. Les spécifications des navires sont disponibles dans la base de données navale liée à la plateforme MONICA et fournie par IHS Markit, le seul organisme certifié détenant ces données. Les données disponibles ont été utilisées pour le calcul des scénarios de réduction des émissions, en évaluant les voyages en navire effectués au cours de l'année 2021 et les quantités d'émissions de polluants qui en résultent.

La première phase de l'activité consistait à évaluer les émissions uniquement pour la part du secteur maritime en utilisant un modèle "Bottom Up" (Bottom Up Harbour) avec des données d'entrée relatives aux voyages en navire de 2021. Les données d'entrée comprenaient le type de navire (catégorisé de manière précise), les données temporelles relatives à l'arrivée du navire à quai, ainsi que les minutes de mouvement et de stationnement à quai. Comme indiqué, le modèle nécessite la saisie des temps de mouvement et des temps d'arrêt ; pour avoir un meilleur contrôle des données de sortie, les calculs des polluants émis ont été réalisés en deux étapes : la première en saisissant les données relatives aux temps de mouvement en annulant les temps d'arrêt, et la seconde en saisissant les données relatives à la phase à quai en annulant les temps de manœuvre. Cela nous a permis d'obtenir des valeurs spécifiques pour chaque phase, nous permettant de maintenir le contrôle à la fois sur les données d'entrée et, bien sûr, sur les données de sortie.

Le modèle BUH a été utilisé pour le simple calcul des quantités de polluants émis dans tous les scénarios envisagés, en commençant par le scénario de base. Ensuite, les émissions individuelles pour chaque voyage en navire ont été ajustées pour tous les scénarios envisagés.

4.1.1. Scénarios hypothétiques

Pendant la phase préliminaire de cette activité, une analyse des résultats du modèle BUH a été réalisée pour le scénario de base (celui sans mesures de réduction) qui couvre toute l'année 2021, pour toutes les phases de navigation, à savoir l'arrivée, le départ, les déplacements internes et les périodes d'immobilisation à quai.

Les suppositions initiales comprenaient une évaluation des scénarios réalisables, en effectuant les calculs sur les navires réels arrivant et les voyages effectués tout au long de l'année 2021.

La liste des scénarios initialement envisagés est la suivante :

- Scénario 1.1 : Situation actuelle (données de 2021)
- Scénario 2.1 : Cold Ironing sur 10 % des navires de croisière et Ro-Ro/Pax à quai 59-62 et la flotte actuelle
- Scénario 2.2 : Cold Ironing sur 10 % des navires de croisière à quai 59-62 et la flotte actuelle

- Scénario 2.3 : Cold Ironing sur 10 % des navires Ro-Ro/Pax à quai 59-62 et la flotte actuelle
- Scénario 3.1 : 10 % des navires alimentés au GNL
- Scénario 4.1 : Flotte actuelle avec réglementation SECA (2025)
- Scénario 5.1 : Cold Ironing sur 10 % des navires de croisière et Ro-Ro/Pax à quai 59-62 + 10 % des navires alimentés au GNL
- Scénario 5.2 : Cold Ironing sur 10 % des navires de croisière et Ro-Ro/Pax à quai 59-62 et la flotte actuelle + Flotte actuelle avec réglementation SECA (2025)
- Scénario 5.3 : 10 % des navires alimentés au GNL + Flotte actuelle avec réglementation SECA (2025)
- Scénario 5.4 : Cold Ironing sur 10 % des navires de croisière et Ro-Ro/Pax à quai 59-62 + 10 % des navires alimentés au GNL + Flotte actuelle avec réglementation SECA (2025)

Les scénarios sélectionnés initialement pour Livourne dans la phase de modélisation sont : Scénario 1.1, Scénario 2.1, 2.2, 2.3, Scénario 3.1, Scénario 5.1, 5.2.

Pendant la première phase de calcul du premier scénario, qui concerne la mise en place de quais pour le cold ironing dans le port de Livourne, il est apparu dès le premier calcul des polluants émis par le modèle BUH que les résultats ont peu d'impact par rapport au scénario de base. La différence observée est en effet inférieure à 1 %, comme le montrent les résultats indiqués dans le tableau suivant :

	Combustible	Scénario	NOX	PM	SO2	CO
			t	t	t	t
Hotelling	MDGO	base	2724.11	91.41	93.36	345.42
		cold ironing	2695.99	90.79	93.12	341.83
Maneuver	MDGO	base	19.18	1.30	8.16	3.48
		cold ironing	19.18	1.30	8.16	3.48
Tug	MDGO	base	49.17	4.35	2.30	8.49
		cold ironing	49.17	4.35	2.30	8.49
C_ter	MDGO	base	159.23	3.56	66.54	24.62
		cold ironing	158.41	3.55	66.46	24.49
C_ext	MDGO	base	0.00	0.00	0.00	0.00
		cold ironing	0.00	0.00	0.00	0.00
Hotelling	BFO	base	0.00	0.00	0.00	0.00
		cold ironing	0.00	0.00	0.00	0.00
Maneuver	BFO	base	155.61	23.69	126.54	21.65
		cold ironing	155.61	23.69	126.54	21.65
Tug	BFO	base	0.00	0.00	0.00	0.00
		cold ironing	0.00	0.00	0.00	0.00
C_ter	BFO	base	1474.25	111.24	924.63	162.65
		cold ironing	1466.64	110.87	923.48	161.81
C_ext	BFO	base	0.00	0.00	0.00	0.00
		cold ironing	0.00	0.00	0.00	0.00

Tableau 32 : Bottom-Up-Harbour - Comparaison Scénario de base / Scénario Cold Ironing

Les différences sont clairement indiquées en rouge dans le tableau précédent et mettent en évidence que les principales réductions sont obtenues dans la phase d'arrêt (hotelling) avec du carburant MDGO (marine diesel gas oil), et dans la phase de navigation dans les eaux territoriales (C_ter) avec les deux types de carburant calculés. Cette réduction, bien que faible pour tous les polluants surveillés, a conduit à la nécessité de modifier les hypothèses de scénario envisagées et a entraîné une augmentation des chiffres dans les hypothèses avancées pour le secteur naval.

Les objectifs indiqués, tels que le cold ironing, le LNG et le SECA, ont été maintenus, en évitant d'entrelacer les scénarios et en envisageant un autre scénario innovant, en utilisant l'hydrogène comme combustible naval, une hypothèse qui pourrait devenir réalité d'ici 2030. Les nouveaux scénarios ont été évidemment évalués préliminairement à l'aide du modèle BUH pour calculer la quantité de polluants.

4.1.2. Scénarios calculés

L'analyse des scénarios d'émissions est une méthode permettant d'estimer, à l'aide de modèles, les effets attendus sur la qualité de l'air suite à la mise en œuvre de mesures de réduction des émissions, en fonction de l'atteinte des objectifs fixés par la réglementation. Pour réaliser ces analyses de scénario, il est nécessaire de prévoir des scénarios futurs ou tendanciels en matière d'émissions, à partir d'un scénario de base, hypothétique et sans aucune mesure de réduction, qui sert de référence et tient compte des évolutions technologiques et comportementales, ainsi que de la mise en œuvre de mesures de réduction à différents niveaux (communautaire, national, régional).

Comme indiqué précédemment, les scénarios calculés ont été modifiés afin d'obtenir des scénarios "réels" qui puissent montrer des résultats concrets. En d'autres termes, cela se traduit par le calcul de scénarios qui ont une dimension "émissive", en ajustant légèrement la quantité de navires faisant l'objet de modifications, afin d'évaluer la contribution du secteur naval dans l'évaluation de la qualité de l'air dans la commune de Livourne.

Il convient de souligner un aspect infrastructurel et économique lié à la mise en œuvre de mesures physiques telles que le cold ironing : l'installation d'une solution telle que celle indiquée entraîne indéniablement des coûts élevés qui doivent ensuite être confrontés à "l'impact environnemental" objectif.

Les scénarios suivants ont été pris en compte :

1. Cold Ironing : Hypothèse d'installation d'une infrastructure pour l'alimentation des navires à quai par l'électricité (cold ironing). Identification du type de navire et des quais hypothétiques : catégories croisières et Ro-Ro/Pax en fonction des quais 59 et 62 (afin d'utiliser la même armoire électrique pour deux quais). Total des arrivées de croisières et de Ro-Ro/Pax aux quais 59 et 62 : 1032. Hypothèse de calcul : 10 % des navires (103 quais). On agit uniquement sur le stationnement.
2. LNG : Hypothèse de propulsion navale au GNL avec l'hypothèse que 30 % de tous les navires arrivant à Livourne soient alimentés au GNL. Identification des voyages en fonction du nombre total d'arrivées pour chaque navire. On agit sur les croisières, les manœuvres et le stationnement.
3. Hydrogène : Hypothèse d'un scénario où l'hydrogène est une solution possible pour la propulsion navale. On suppose une diffusion de 50 % sur tous les navires de croisière et de 30 % sur tous les ferries (Ro-Ro/Pax). On suppose également que 100 % des remorqueurs sont électriques. On agit sur les croisières, les manœuvres et le stationnement.
4. SECA : Hypothèse de la mise en œuvre, dans la navigation en Méditerranée, d'obligations concernant les émissions de soufre (zone SECA à 0,1 %). On agit sur tous les navires et toutes les catégories, pour chaque phase (croisière, manœuvre et stationnement).

4.2. Calcul

Le résultat *conceptuel* du travail a été réalisé à l'aide d'une série de *modèles* (voir Figure 65) ayant comme entrées : les conditions aux limites, les données météorologiques, l'inventaire des émissions, le trafic routier, le trafic maritime, les sources ponctuelles d'émissions, les sources naturelles à un point du domaine (comme une zone d'étude) et comme *sortie*, la qualité de l'air (définie par la loi par des valeurs limites spécifiques des polluants) à des stations prédéfinies. Ce travail a principalement une valeur de planification des modèles utilisés pour évaluer des scénarios hypothétiques de développement de la navigation afin d'évaluer des solutions potentielles conformes aux éléments d'innovation et de développement dans le domaine portuaire, tant du point de vue de l'infrastructure portuaire que de l'énergie. Dans ce contexte, nous pouvons considérer que les résultats de ces modèles peuvent soutenir la phase de planification et de programmation du développement environnemental à adopter dans le port dans une perspective de durabilité environnementale.

Pour la simulation des concentrations de polluants primaires et secondaires provenant des sources liées aux activités portuaires, ainsi que de toutes les sources présentes sur le territoire environnant, le modèle photochimique eulérien FARM a été utilisé.

FARM est un modèle eulérien réactif capable de simuler le transport et la diffusion, les transformations chimiques en phase gazeuse et aérosol, ainsi que les éliminations par voie sèche et humide des polluants émis par l'ensemble de toutes les sources présentes dans les domaines de calcul considérés, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle. Grâce aux "conditions aux limites" pour différents polluants aux frontières du domaine de calcul, il permet également de tenir compte des contributions des sources les plus éloignées aux niveaux de fond des polluants secondaires. Le modèle, une fois correctement configuré et alimenté, est capable d'estimer les niveaux de qualité de l'air à comparer aux normes légales.

FARM est le modèle de référence national utilisé dans le cadre du projet MINNI (www.minni.org), dans les activités institutionnelles de différentes ARPA (Lombardie, Piémont, Vallée d'Aoste, Frioul-Vénétie Julienne, Latium, Molise, Pouilles, Calabre), comprenant des évaluations annuelles de la qualité de l'air à l'échelle régionale, des systèmes de prévision quotidienne et des études de scénarios, ainsi que des évaluations d'impact environnemental à différentes échelles.

FARM fait partie d'ARIA Regional, pour la simulation multi-échelle de la qualité de l'air. Le système de modélisation utilisé dans la configuration utilisée pour cette étude est schématiquement illustré dans la figure suivante (figure 2) et comprend :

- des modules pour le traitement des données territoriales (topographie, utilisation des sols, cartographie) ;
- un ensemble de modules pour la préparation d'une entrée d'émission complexe (Emission Manager) à partir des données d'inventaire ;
- des modèles pour la préparation de l'entrée météorologique pour les simulations de qualité de l'air (WRF et SURFpro) ;
- des préprocesseurs pour le traitement des conditions aux limites chimiques ;
- le modèle FARM pour la dispersion et les transformations chimiques des polluants.

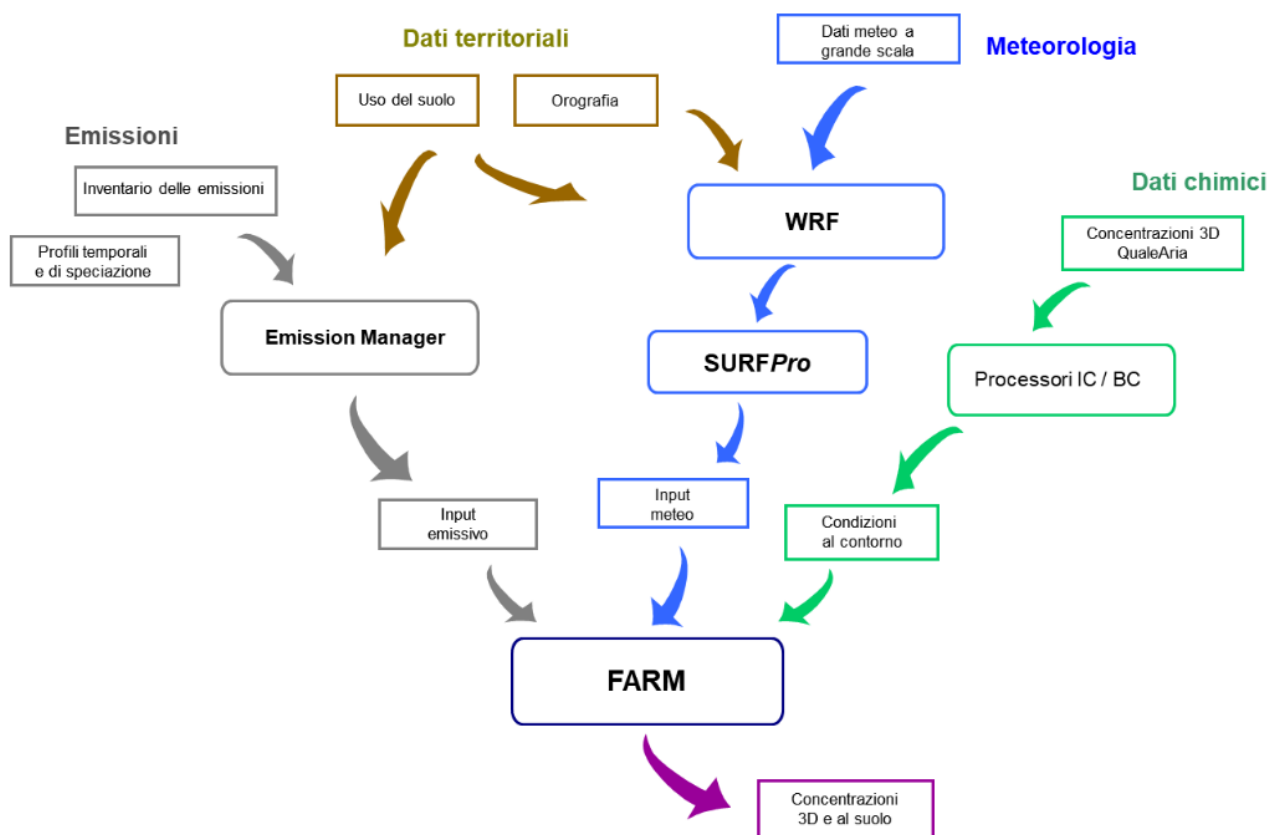


Figure 65 : Suite de modélisation ARIA Regional/ FARM.

Les résultats du calcul du modèle FARM concernent les valeurs de la qualité de l'air dans des stations prédéfinies au sein du modèle lui-même. Lors de la création des fichiers système du modèle, les emplacements des stations de surveillance de la qualité de l'air de l'ARPAT ont été indiqués afin d'ajuster le système et de permettre des comparaisons avec les modèles et les données mesurées.

À ces stations fixes (appelées Capiello, La Pira, Carducci), une nouvelle station, appelée Porto, a été ajoutée afin d'évaluer la qualité de l'air dans la zone portuaire, dans la zone directe d'interaction entre le port et la ville. De plus, les coordonnées de la station Porto sont généralement utilisées pour positionner le laboratoire mobile de l'ARPAT, qui effectue des campagnes de surveillance dans le cadre d'activités spécifiques liées à la qualité de l'air.

Dans l'image ci-dessous, les emplacements réels des stations de surveillance de la qualité de l'air de l'ARPAT sont indiqués en vert, tandis que la station Livorno Porto, créée ultérieurement, est représentée en rouge.

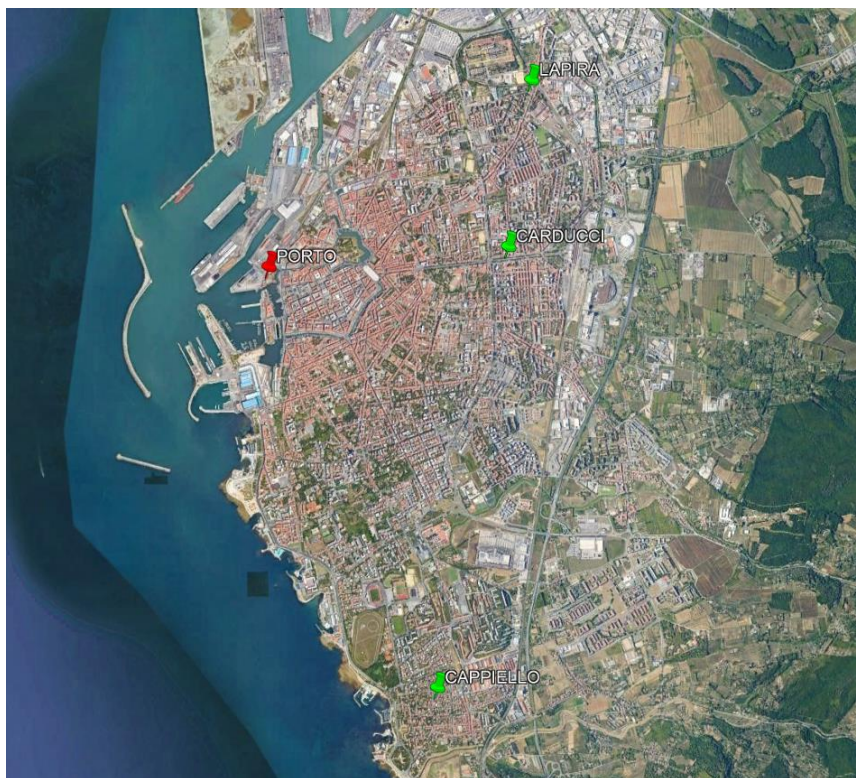


Figure 66 : Stations de l' ARPAT et du Port de Livourne

Le modèle produit également une série de sorties graphiques, c'est-à-dire des cartes de dispersion des polluants à partir desquelles il est possible d'extraire l'évolution des polluants sous forme de gradients de concentration, permettant de représenter l'aire de calcul à l'aide de lignes de contour.

4.2.1. Scénario de Base

Le cadre d'émission de départ, le scénario de base, représente la condition initiale de notre système (= modèle). Celui-ci, tout comme tous les autres scénarios, a été calculé à l'aide du modèle de simulation photochimique eulerien (FARM), à partir duquel la dispersion des polluants, d'intérêt principal, dans l'atmosphère de la source de la zone d'évaluation (Livorno-Porto) a été analysée.

L'entrée, la partie de départ la plus importante de l'ensemble de la procédure, comprend les données sur le trafic maritime de l'année 2021, avec les temps de passage réels des navires dans le port de Livourne. Les résultats de ce modèle comprennent : les valeurs de concentration des principaux polluants par rapport aux postes prédéfinis (LI-Porto) ; les cartes de concentrations de polluants quotidiennes et annuelles. Après l'examen des différents scénarios, les différences seront comparées pour tirer des conclusions qualitatives et quantitatives sur la meilleure application à développer.

La première partie du calcul du scénario a été le calcul des polluants émis par le secteur naval à l'aide du modèle Bottom-Up-Harbour (BUH), dont les résultats sont indiqués ci-dessous.

	Combustible	NO _x	PM	SO ₂	CO
		t	t	t	t
Emiss_HOT	MDGO	2724.11	91.41	93.36	345.42
Emiss_MAN	MDGO	19.18	1.30	8.16	3.48
Emiss_tug	MDGO	49.17	4.35	2.30	8.49
Emiss_Cter	MDGO	159.23	3.56	66.54	24.62
Emiss_Cext	MDGO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_HOT	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_MAN	BFO	155.61	23.69	126.54	21.65
Emiss_tug	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_Cter	BFO	1474.25	111.24	924.63	162.65
Emiss_Cext	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
	totale	4581.56	235.55	1221.53	566.32

Tableau 33 : Bottom-Up-Harbour – Scénario de Base

- Emiss_HOT - MDGO: estimation des émissions lors de la phase de stationnement pour le carburant MDO-MGO
- Emiss_MAN - MDGO: estimation des émissions lors de la phase de manœuvre pour le carburant MDO-MGO
- Emiss_tug - MDGO: estimation des émissions des remorqueurs pour le carburant MDO-MGO
- Emiss_Cter - MDGO: estimation des émissions lors de la phase de navigation en eaux territoriales pour le carburant MDO-MGO
- Emiss_Cext – MDGO: estimation des émissions lors de la phase de navigation en eaux extraterritoriales pour le carburant MDO-MGO
- Emiss_HOT – BFO: estimation des émissions lors de la phase de stationnement pour le carburant BFO
- Emiss_MAN - BFO: estimation des émissions lors de la phase de manœuvre pour le carburant BFO
- Emiss_tug - BFO: estimation des émissions des remorqueurs pour le carburant BFO (par défaut, nul)
- Emiss_Cter - BFO: estimation des émissions lors de la phase de navigation en eaux territoriales pour le carburant BFO
- Emiss_Cext – BFO: estimation des émissions lors de la phase de navigation en eaux extraterritoriales pour le carburant BFO

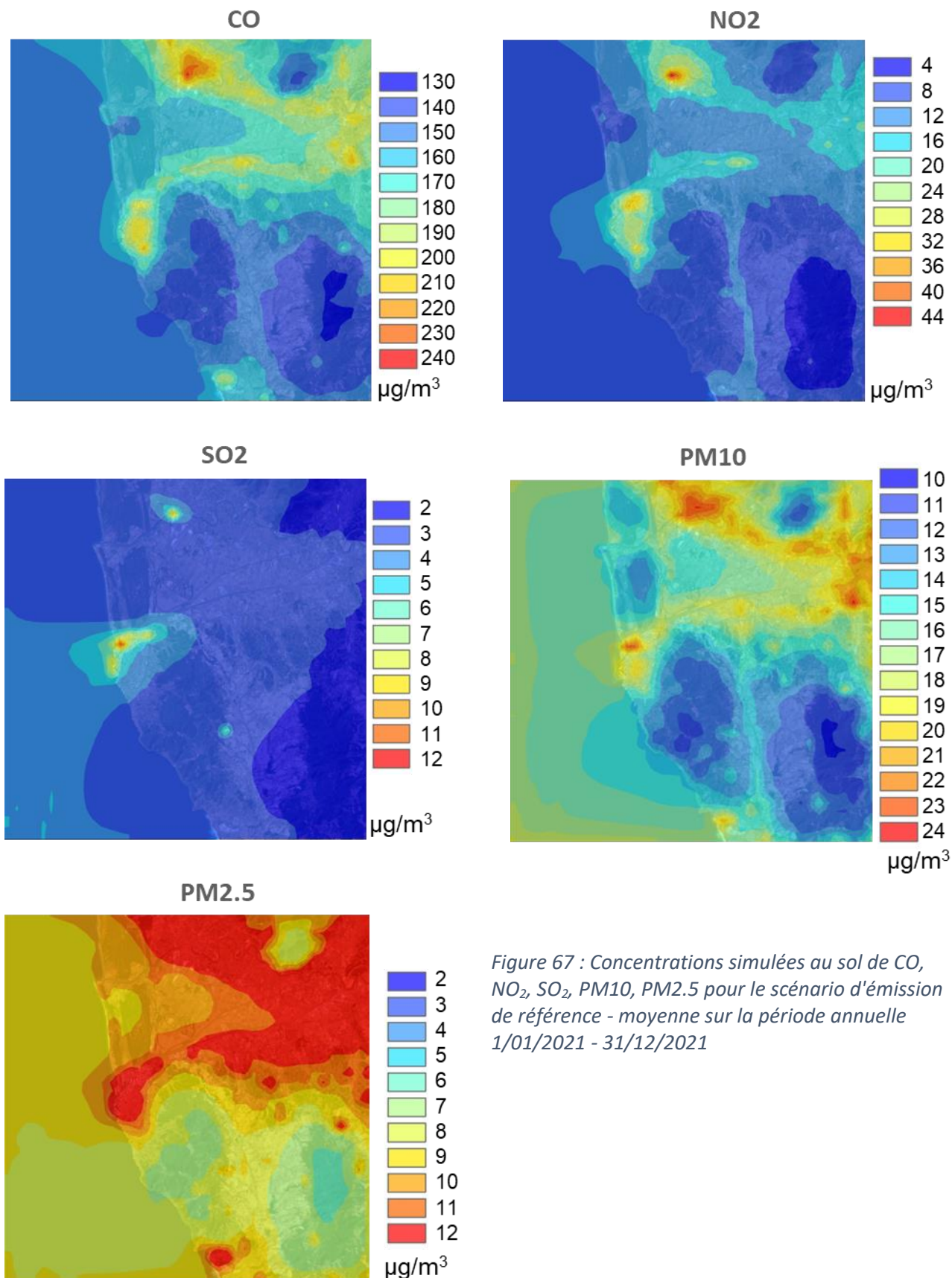


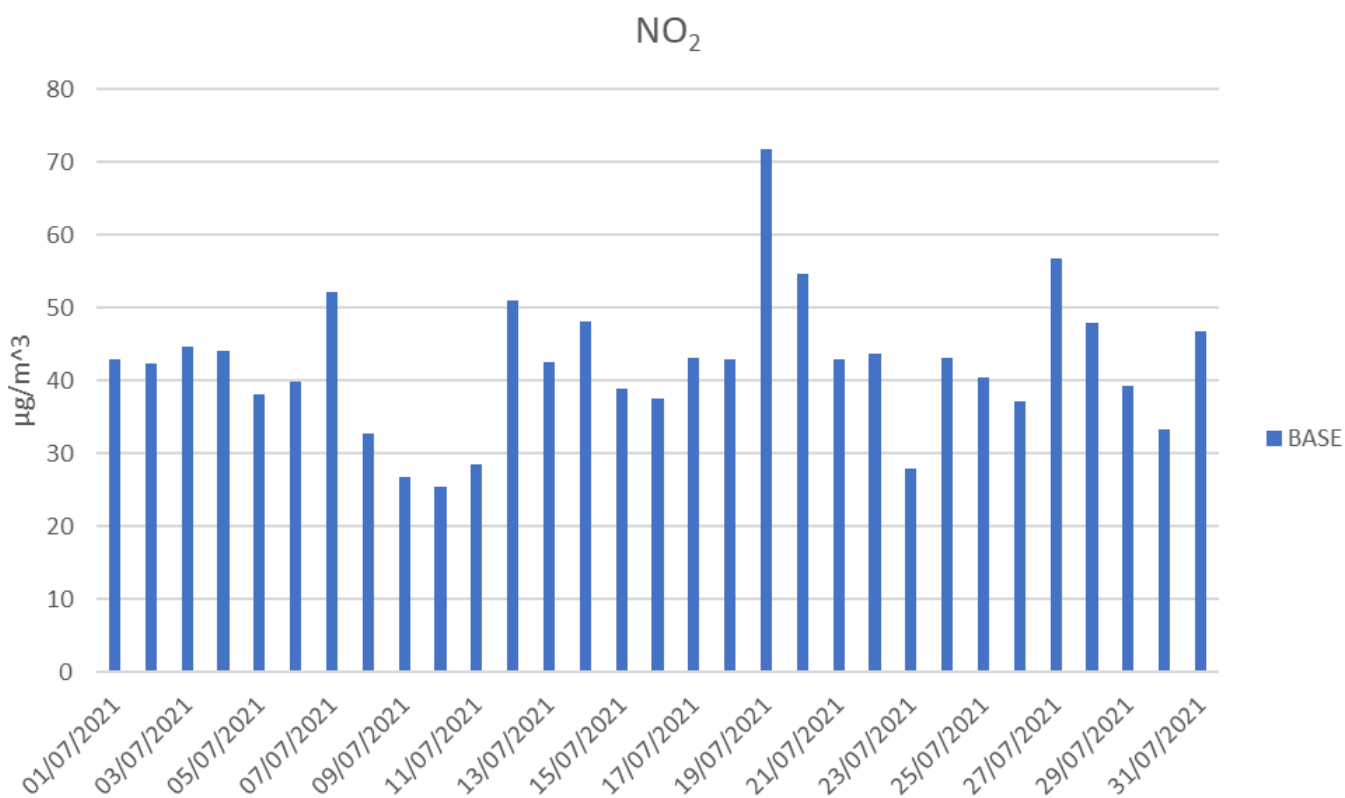
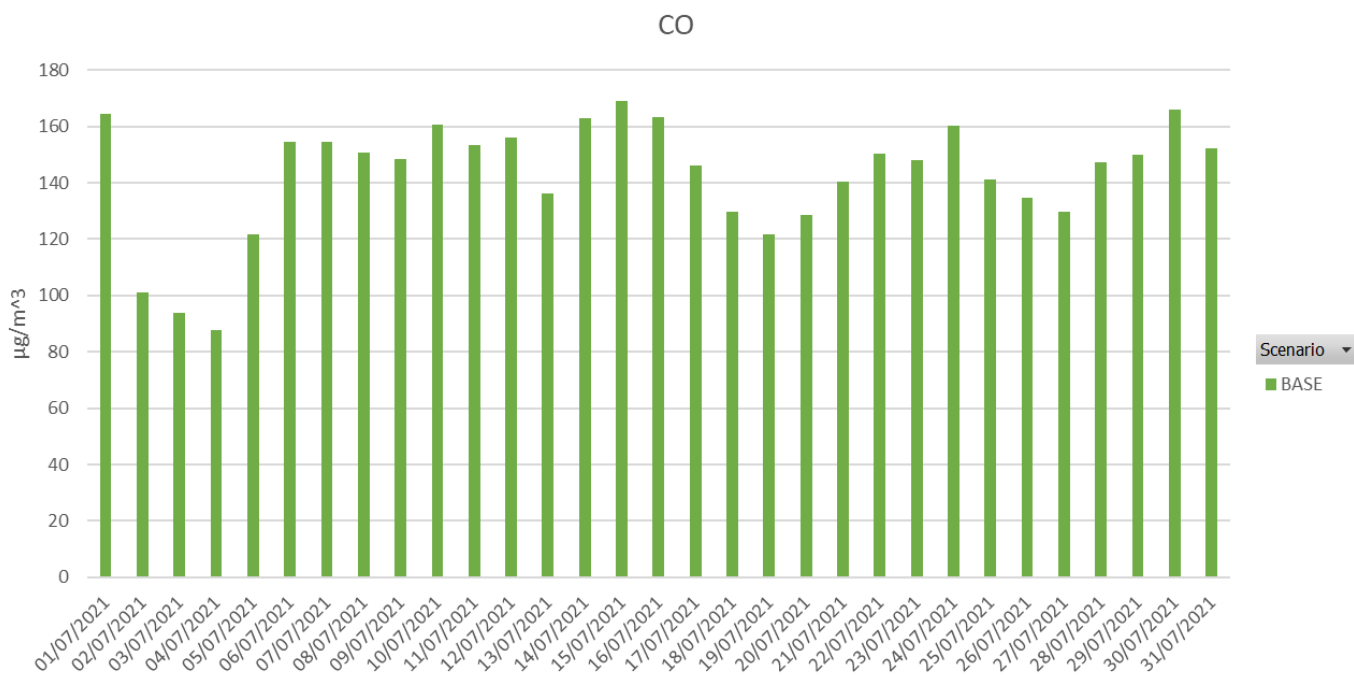
Figure 67 : Concentrations simulées au sol de CO, NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} pour le scénario d'émission de référence - moyenne sur la période annuelle 1/01/2021 - 31/12/2021

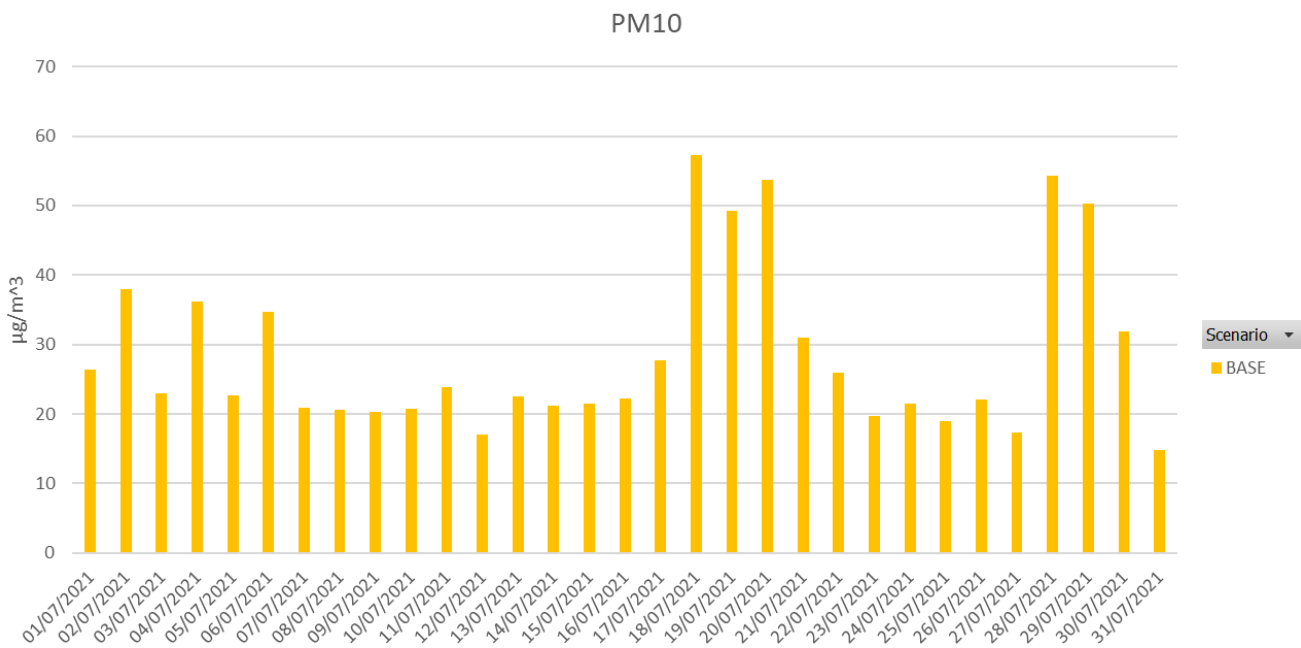
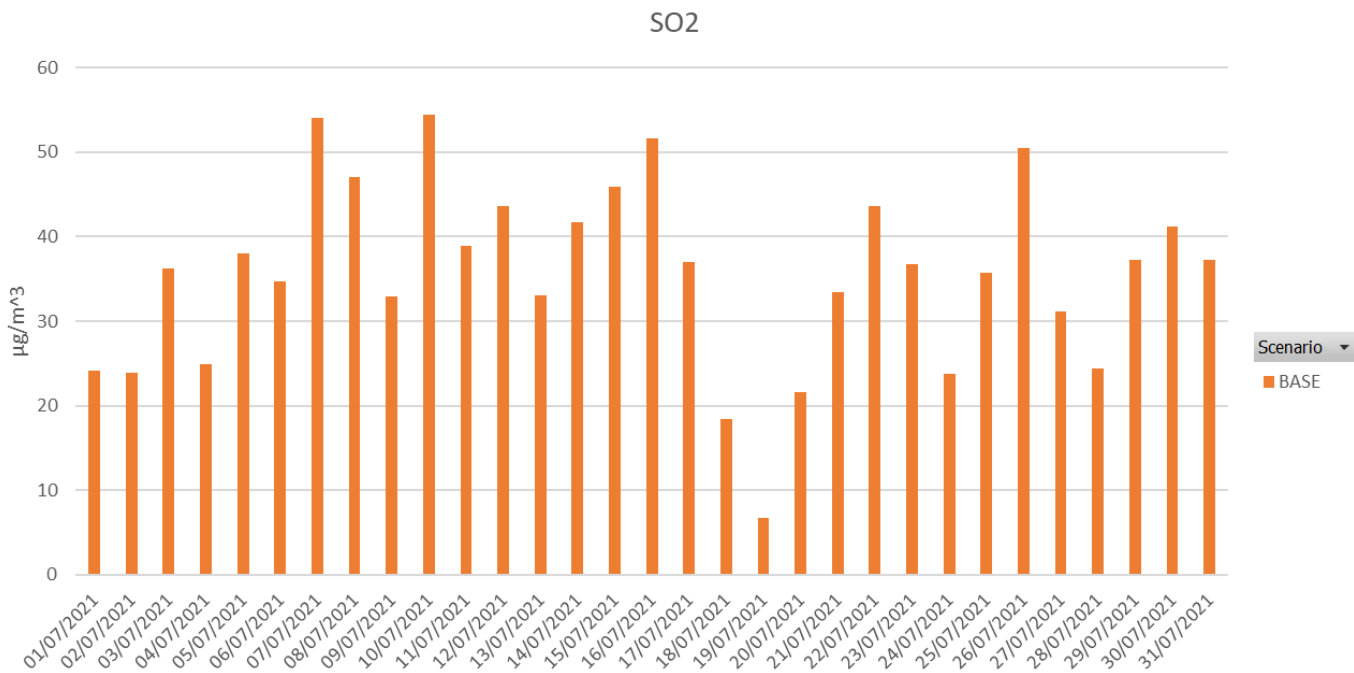
Les cartes des niveaux de concentration au sol des principaux polluants d'intérêt sont représentées dans les figures ci-dessus, correspondant au scénario d'émission de référence. Les niveaux de concentration sont évalués sur une période temporelle spécifique, en l'occurrence la moyenne annuelle. Pour évaluer l'impact des émissions atmosphériques, la concentration moyenne annuelle a été choisie pour les polluants CO, NO₂, SO₂, PM10 et PM2.5. Les graphiques associés à ces cinq indicateurs montrent les valeurs de concentration au sol en µg/m³ dans une grille du domaine, où chaque cellule se voit attribuer la valeur de la moyenne annuelle. Plus spécifiquement, pour représenter les cartes, des interpolations bilinéaires ont été réalisées entre les différentes cellules afin d'obtenir des cartes plus lisibles.

En observant ces cartes, nous pouvons faire plusieurs constatations :

1. L'influence combinée de la topographie du territoire (présence de reliefs et de la mer) et de la répartition des sources d'émission.
2. La distribution spatiale du NO₂ reflète la distribution des sources avec des gradients spatiaux importants. Cela est également vrai pour les composants primaires des particules, tandis que la composante secondaire augmente à mesure que l'on s'éloigne des sources, avec des gradients spatiaux moins marqués que pour le NO₂.
3. Les zones urbaines principales sont clairement identifiables dans les champs de concentration de ces polluants (influence du trafic urbain et du chauffage des bâtiments, notamment pour les particules), ainsi que les principaux axes routiers (en particulier pour le dioxyde d'azote). De plus, l'influence des émissions de la zone urbaine et du trafic maritime est visible dans la zone marine en face de Livourne.
4. La distribution des concentrations moyennes de SO₂ sur le territoire est étroitement liée à la présence de sources industrielles et portuaires, cette dernière étant celle qui contribue le plus.

Par la suite, les valeurs des polluants ont été évaluées pour le suivi de la qualité de l'air à la station précédemment définie, Livourne Porto.





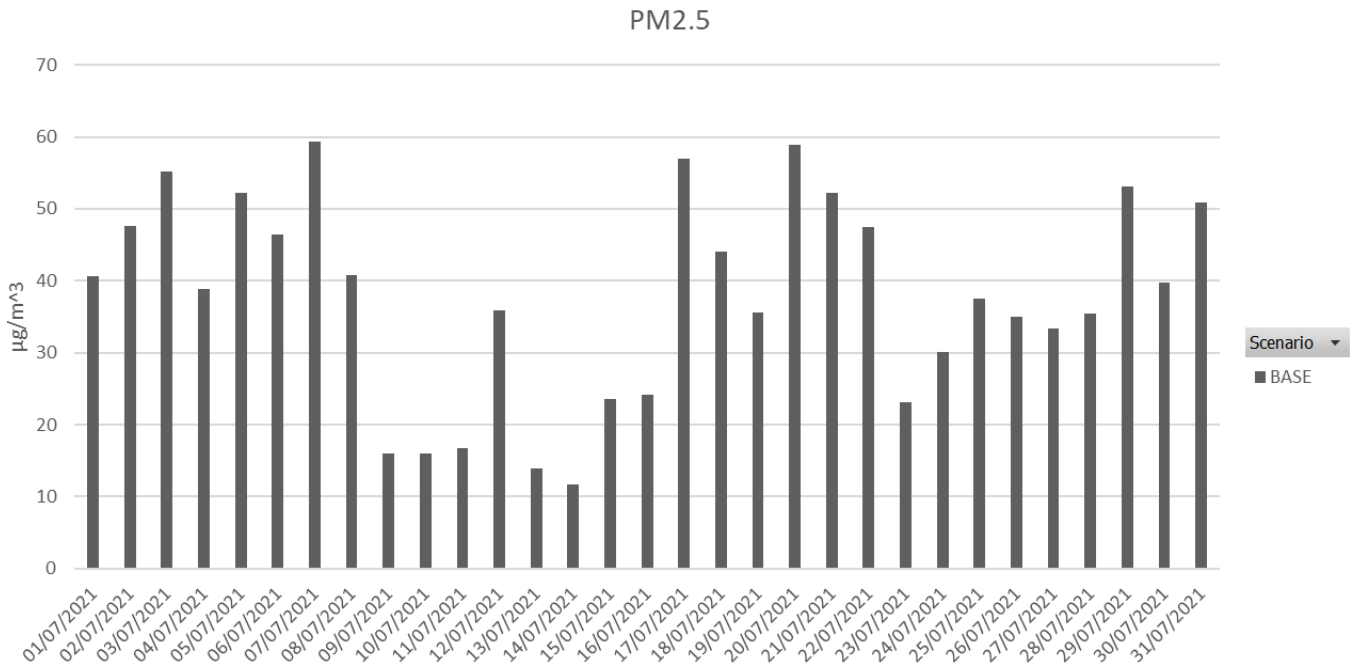


Figure 68 : Graphiques des moyennes journalières de CO, NO₂, SO₂, PM2.5, PM10 pour la période 01.01.2021 - 31.12.2021

4.2.2. Scénario 1- Cold Ironing

Ce scénario évalue l'hypothèse d'installation d'une infrastructure au quai destinée à alimenter les navires en électricité (« cold ironing ») pendant leur arrêt. Tout d'abord, nous avons pris en compte les données suivantes :

1. Type de navire et d'accostage hypothétique : catégories croisière et Ro-Ro/Pax en fonction des accostages 59 et 62 (même cabine pour deux accostages).
2. Nombre total d'arrivées de navires de croisière et Ro-Ro/Pax aux accostages 59 et 62 : 1032.

L'hypothèse de calcul est basée sur environ 10 % des navires arrivant, ce qui représente une réduction d'environ 103 accostages sur un total de 1030 arrivées des catégories croisière et Ro-Ro/Pax aux accostages mentionnés.

La première phase a consisté à calculer les émissions à l'aide du modèle Bottom-Up-Harbour.

	Combustible	NO _x	PM	SO ₂	CO
		t	t	t	t
Emiss_HOT	MDGO	2695.99	90.79	93.12	341.83
Emiss_MAN	MDGO	19.18	1.30	8.16	3.48
Emiss_tug	MDGO	49.17	4.35	2.30	8.49
Emiss_Cter	MDGO	158.41	3.55	66.46	24.49
Emiss_Cext	MDGO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_HOT	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_MAN	BFO	155.61	23.69	126.54	21.65
Emiss_tug	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_Cter	BFO	1466.64	110.87	923.48	161.81
Emiss_Cext	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
	totale	4545.01	234.54	1220.06	561.75
		-0.80%	-0.43%	-0.12%	-0.81%

Tableau 34 : Bottom-Up-Harbour - Scénario Cold Ironing

Dans le tableau précédent, on ne remarque pas de grandes réductions des polluants émis, que ce soit pour tous les polluants, toutes les phases d'émission ou les deux types de combustible, comme le montre le pourcentage de réduction dans la dernière ligne.

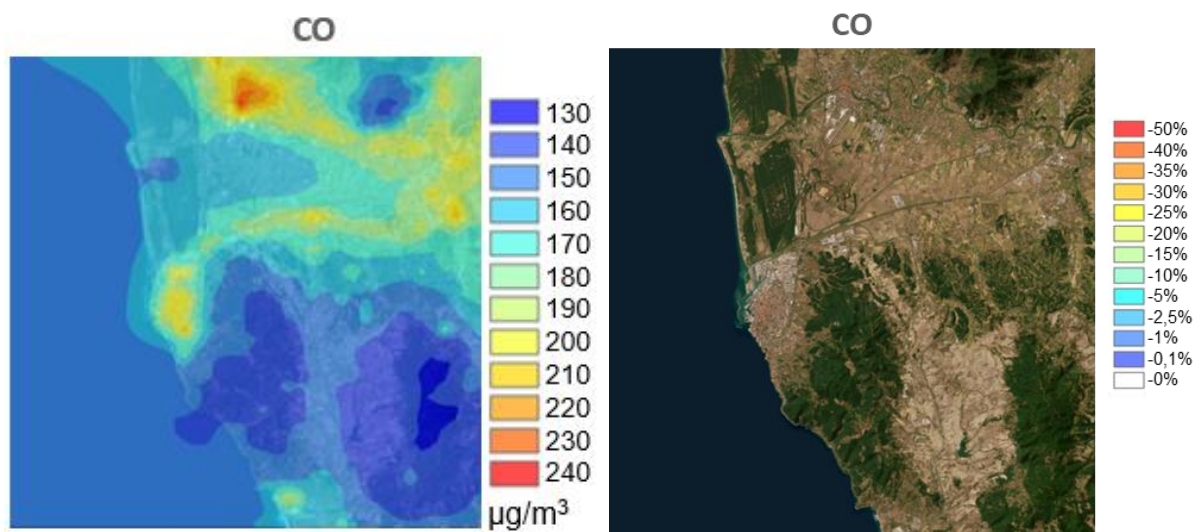
Les résultats des simulations sont des matrices numériques à partir desquelles ont été extraites les cartes de concentration au sol sur une base annuelle. Selon la méthodologie de travail suivie, pour chaque polluant considéré et pour chaque simulation effectuée - pour des scénarios hypothétiques - une configuration basée sur la comparaison entre le "scénario de référence" et le "scénario hypothétique" est obtenue. Étant donné le grand nombre de cartes obtenues, afin de simplifier leur interprétation et d'obtenir des informations, seules les représentations graphiques de la moyenne annuelle ont été prises en compte pour les polluants étudiés, tels que le CO, le NO₂, le SO₂, le PM10

et le PM2.5. Cependant, le système à disposition permettrait, en cas d'études plus approfondies, de réaliser des cartes prenant en compte les aspects suivants :

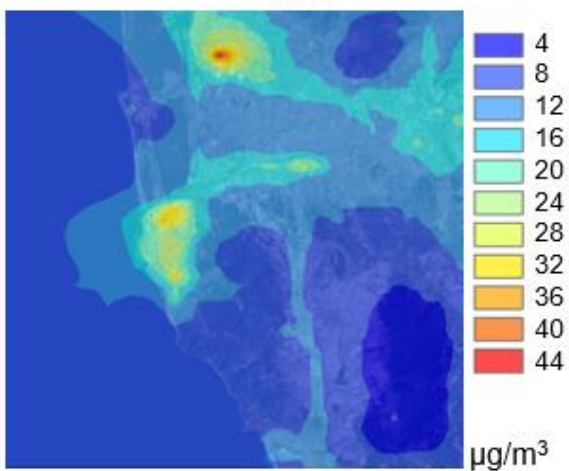
1. Concentrations moyennes au sol de CO, NO₂, SO₂, PM10, PM2.5 obtenues en tenant compte de toutes les sources (TS) ou de la contribution spécifique du cold ironing (CI) ;
2. Maximum annuel des concentrations moyennes sur 24 heures de CO, pour TS et CI ;
3. Dépôts totaux annuels de PM10 au sol, pour TS et CI ;
4. Moyennes mensuelles des concentrations de PM10 pour TS et CT.

Les informations fournies par les cartes produites doivent être considérées comme étant purement qualitatives et spatialement distribuées, car, comme mentionné à plusieurs reprises, toutes les sources d'émission possibles n'ont pas été prises en compte, telles que la circulation routière, le chauffage domestique et les autres installations industrielles présentes dans la région, car les données correspondantes n'étaient pas disponibles.

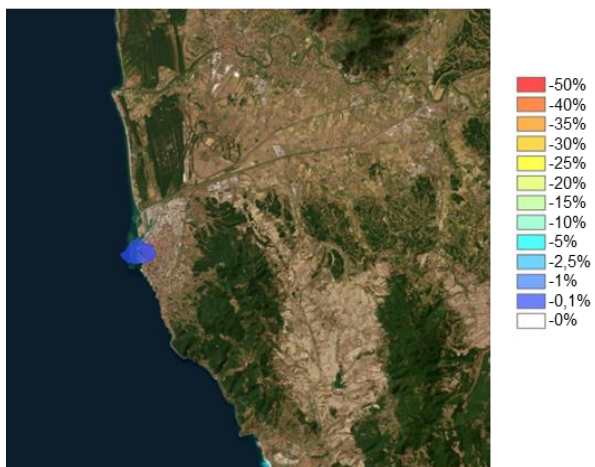
Les graphiques ci-dessous représentent les cinq principaux polluants surveillés (CO, NO₂, SO₂, PM10, PM2.5) en ce qui concerne la moyenne annuelle du domaine (à gauche) ainsi que la différence en pourcentage entre la moyenne annuelle du scénario calculé et la moyenne annuelle du scénario de référence (à droite), utilisé comme scénario de comparaison.



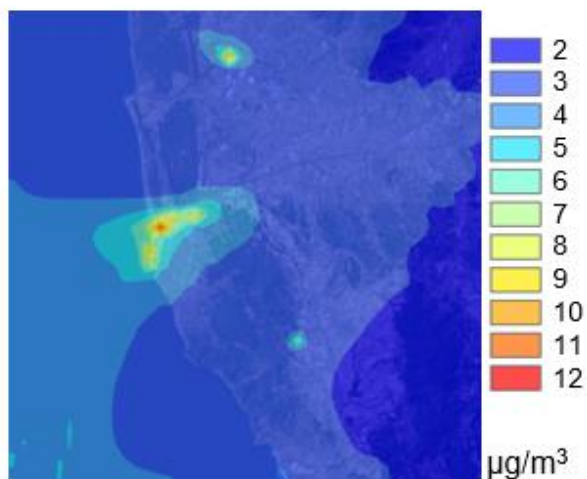
NO2



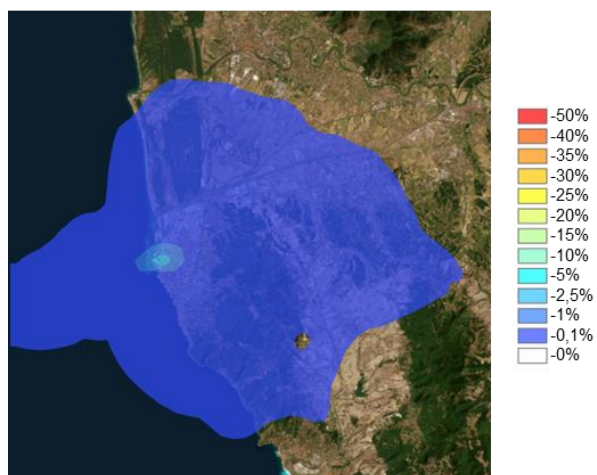
NO2



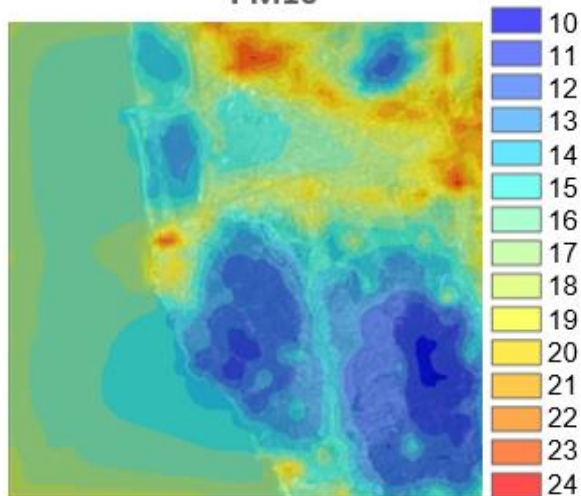
SO2



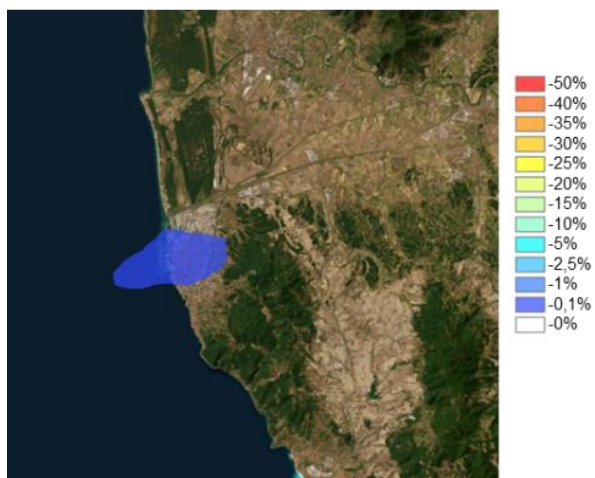
SO2



PM10



PM10



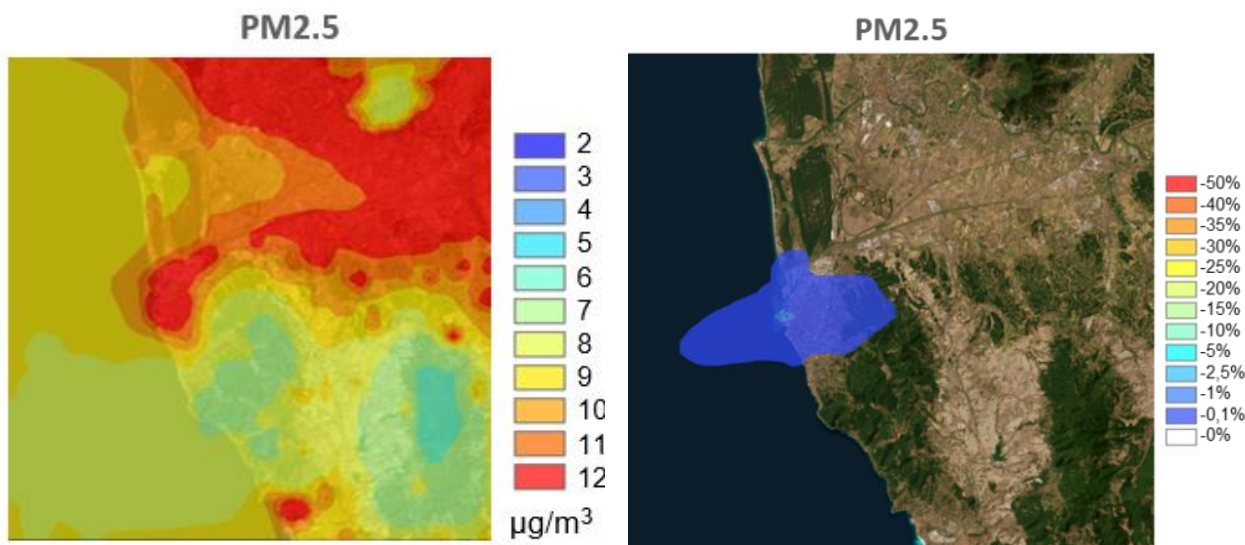


Figure 69 : Gauche : Concentrations au sol de CO , NO_2 , SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ simulées pour le scénario de repassage à froid - moyenne sur la période annuelle 1/01/2021 - 31/12/2021 - Droite : Pourcentage de réduction entre le scénario calculé et le scénario de base sur la moyenne annuelle.

D'après l'analyse des cartes, on peut déduire que les deux simulations produisent des résultats différents en termes de distribution spatiale :

- Dans le scénario de référence, on observe une distribution le long de l'axe de la zone industrielle, de l'ouest vers l'est.
- Dans le scénario du "cold ironing", aucun axe prédominant n'est identifié, mais on observe une distribution plus uniforme et centrée par rapport aux sources d'émission. Les cartes des moyennes annuelles de concentration montrent que les pics de concentration se trouvent à l'intérieur ou à proximité immédiate du périmètre industriel.

Ci-dessous, les graphiques comparant l'évolution des polluants entre le scénario de référence et celui du "cold ironing" pour le mois de juillet sont présentés.

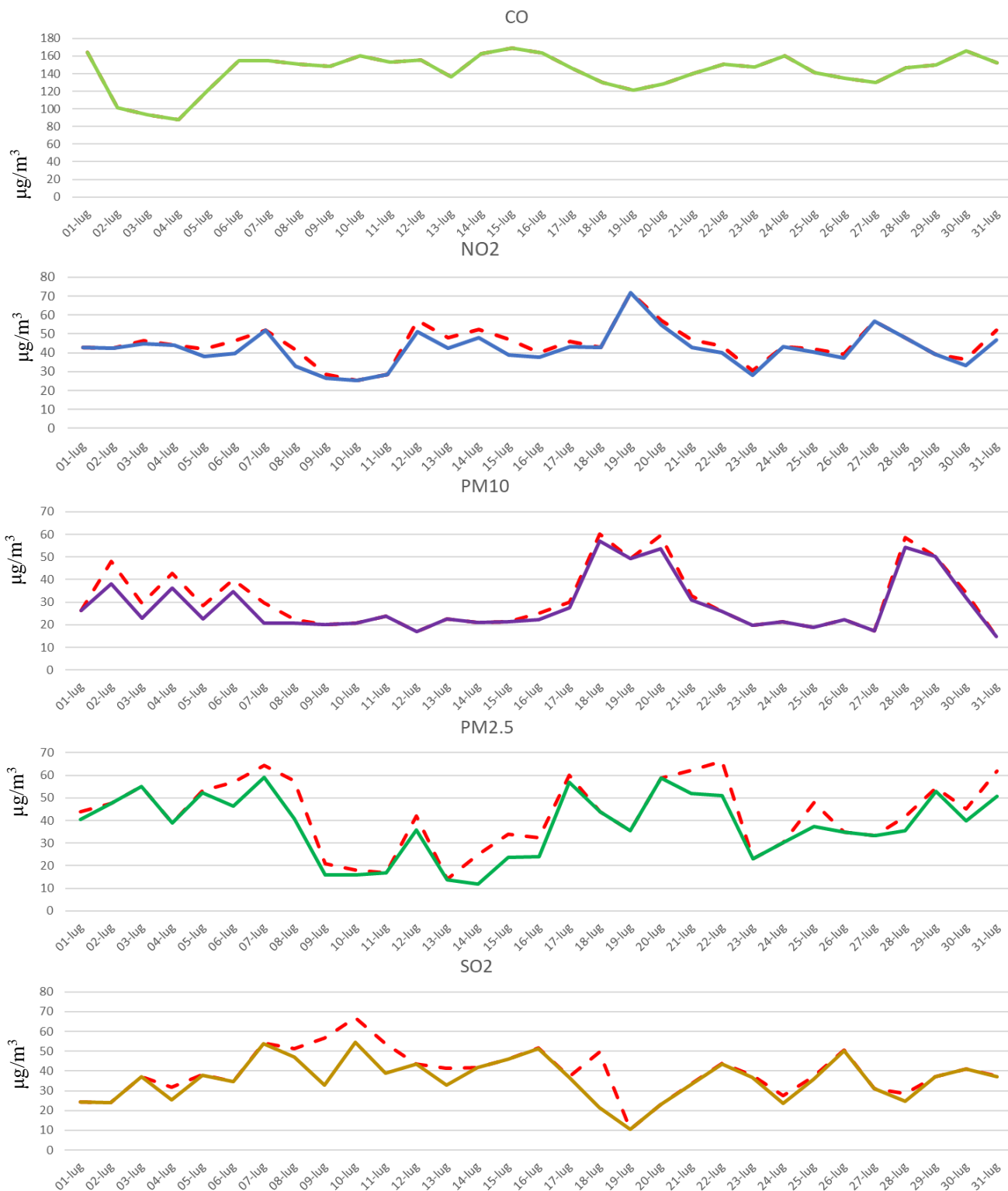


Figure 70 : Graphiques des moyennes journalières de CO, NO₂, SO₂, PM2.5, PM10 pour la période du 01.07.2021 au 31.07.2021 pour le scénario de Cold Ironing.

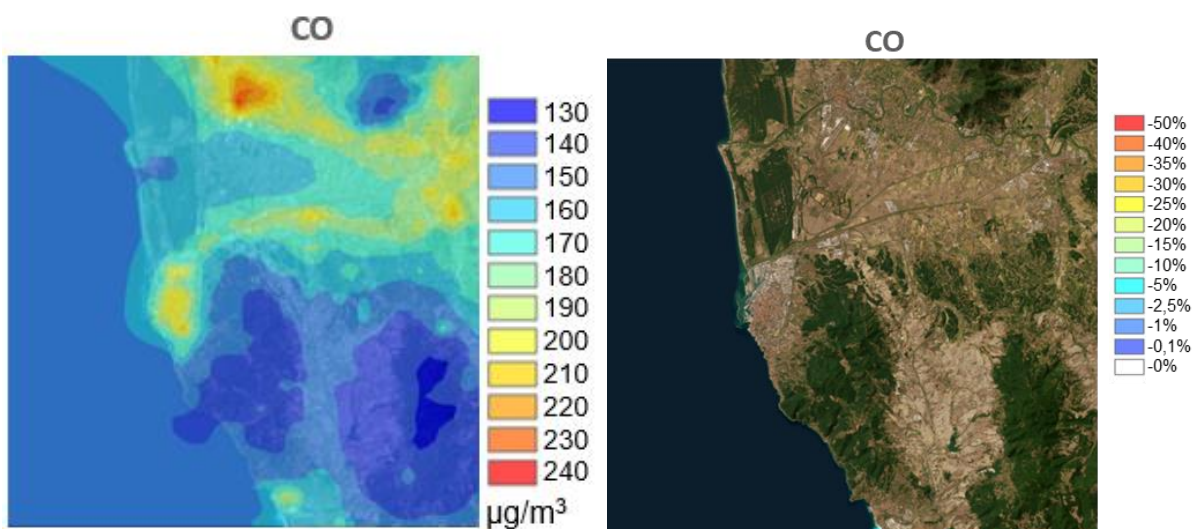
4.2.3. Scénario 2- GNL

Dans ce scénario, l'hypothèse de propulsion navale au GNL a été évaluée. Dans cette hypothèse, il a été considéré que 30% de tous les navires arrivant à Livourne fonctionnent au GNL. Pour l'identification des voyages, le critère pris en compte était le nombre total d'arrivées pour chaque navire. La réduction des émissions grâce au carburant GNL affecte toutes les phases du navire, c'est-à-dire la croisière, la manœuvre et l'arrêt.

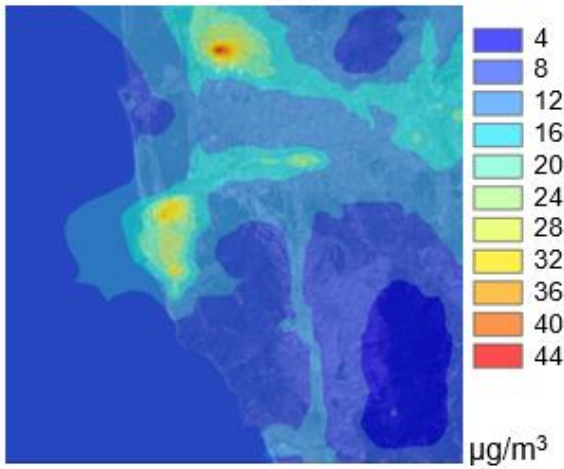
Le calcul préliminaire du modèle BUH a donné les résultats suivants, comparés comme toujours aux résultats du scénario de référence.

	Combustible	NO _x	PM	SO ₂	CO
		t	t	t	t
Emiss_HOT	MDGO	2054.87	60.58	64.59	341.83
Emiss_MAN	MDGO	17.46	1.19	7.55	3.48
Emiss_tug	MDGO	42.85	3.68	1.91	8.49
Emiss_Cter	MDGO	151.08	3.32	61.77	24.49
Emiss_Cext	MDGO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_HOT	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_MAN	BFO	138.26	20.94	106.73	21.65
Emiss_tug	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_Cter	BFO	1317.32	95.74	790.27	161.81
Emiss_Cext	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
	totale	3721.83	185.47	1032.82	561.75
		-18.76%	-21.26%	-15.45%	-0.81%

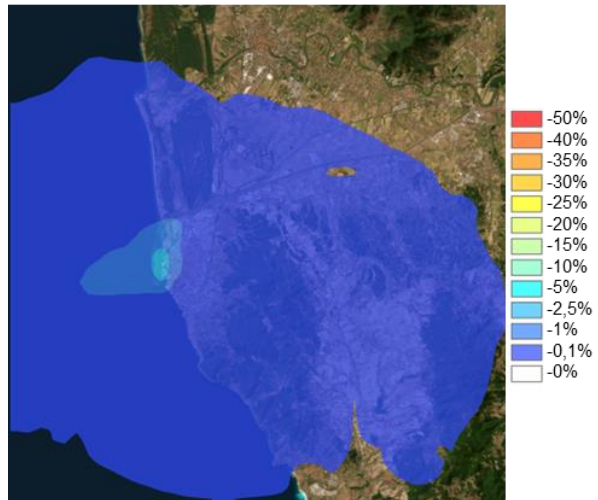
Tableau 35 : Bottom-Up-Harbour - Scénario GNL



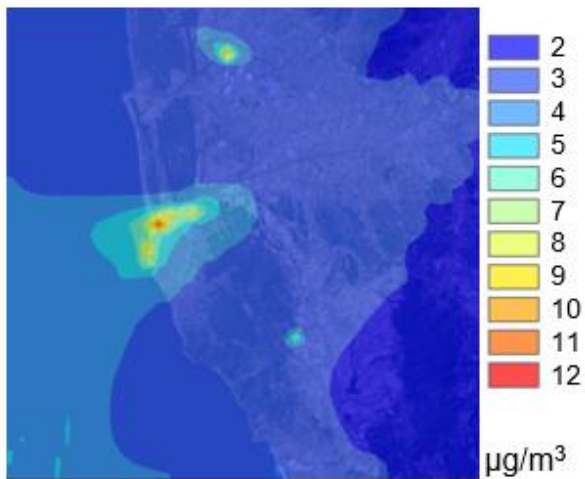
NO2



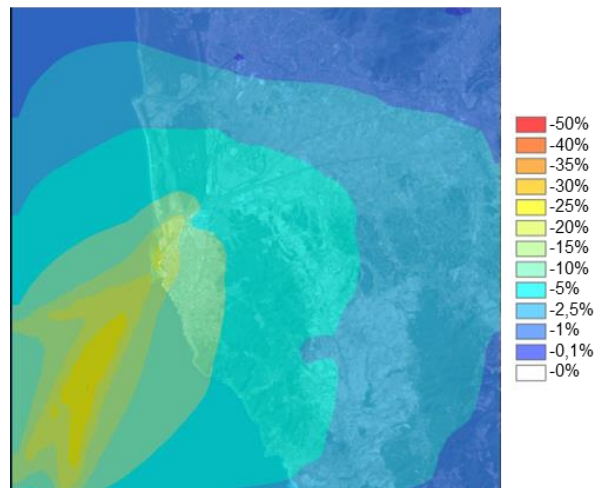
NO2



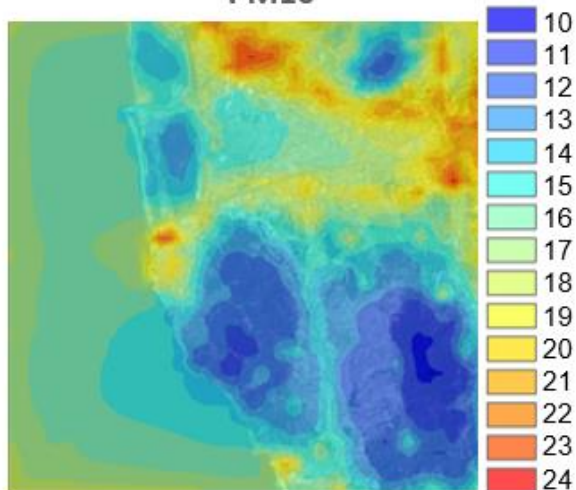
SO2



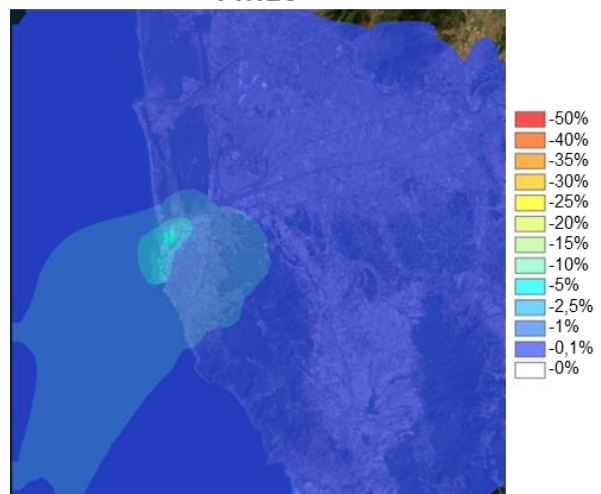
SO2



PM10



PM10



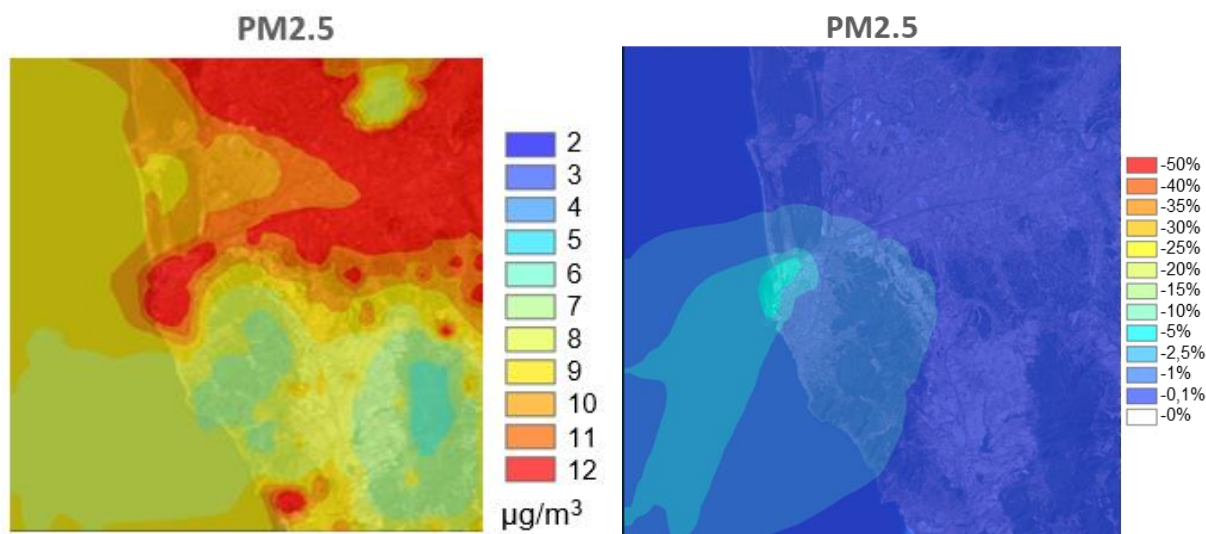
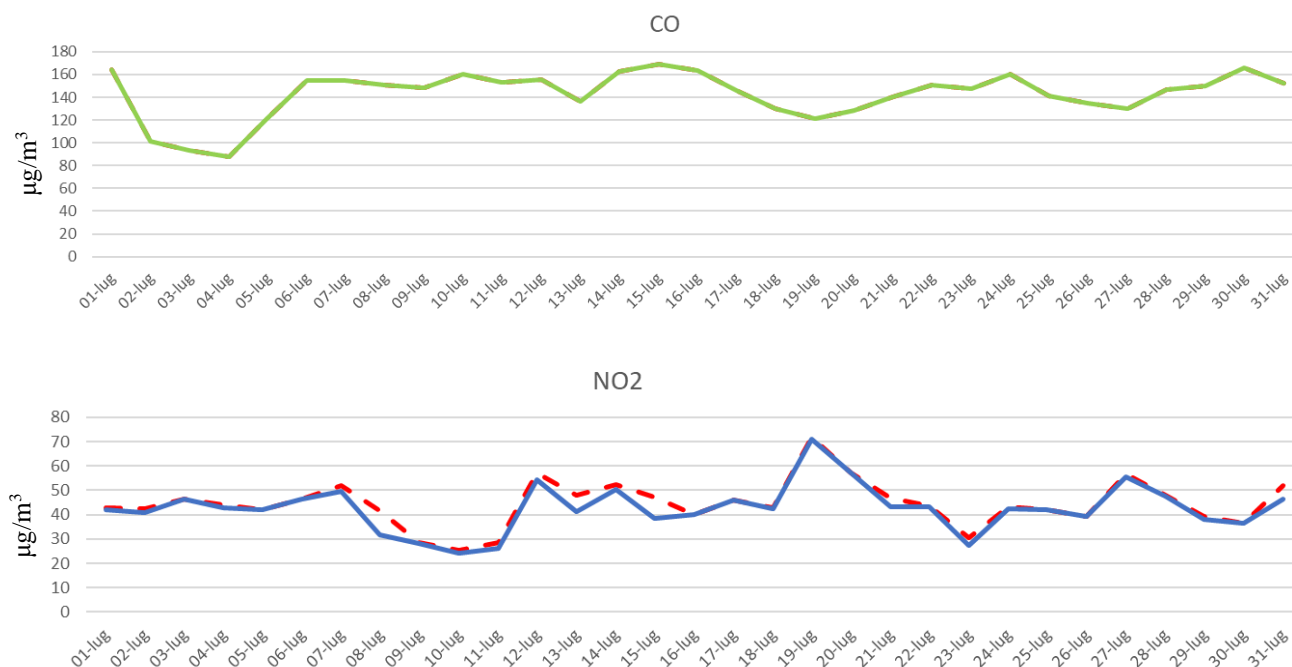


Figure 71 : Gauche : Concentrations au sol de CO, NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} simulées pour le scénario GNL - moyenne sur la période annuelle 1/01/2021 - 31/12/2021 - Droite : Pourcentage de réduction entre le scénario calculé et le scénario de référence sur la moyenne annuelle.

Les graphiques ci-dessous comparent les tendances des polluants - entre le scénario de base et le scénario GNL - pour le mois de juillet.



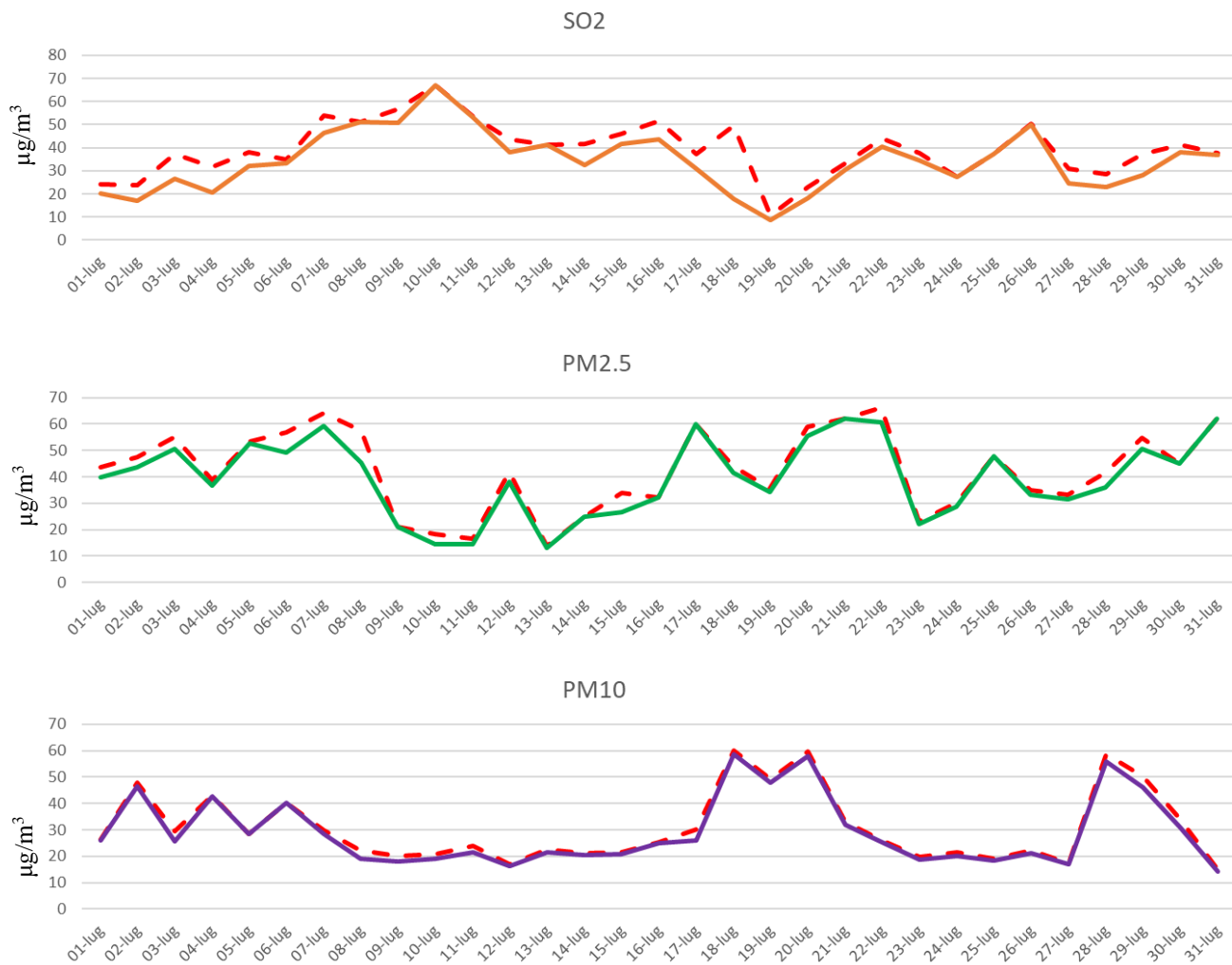


Figure 72 : Graphiques des moyennes journalières de CO, NO₂, SO₂, PM2.5, PM10 pour la période 01.07.2021 31.07.2021 pour le scénario GNL

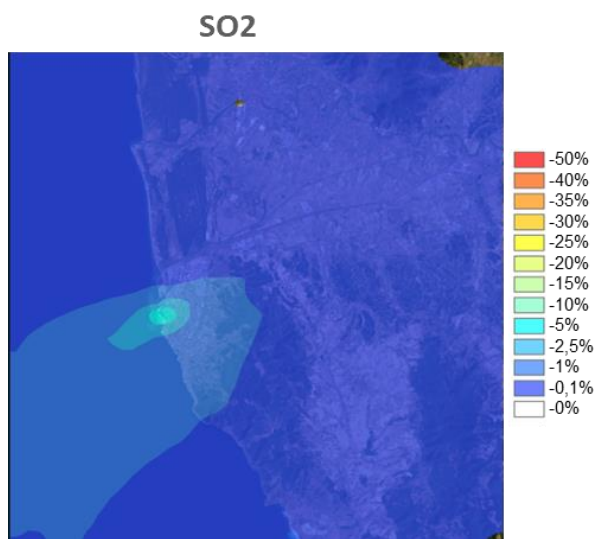
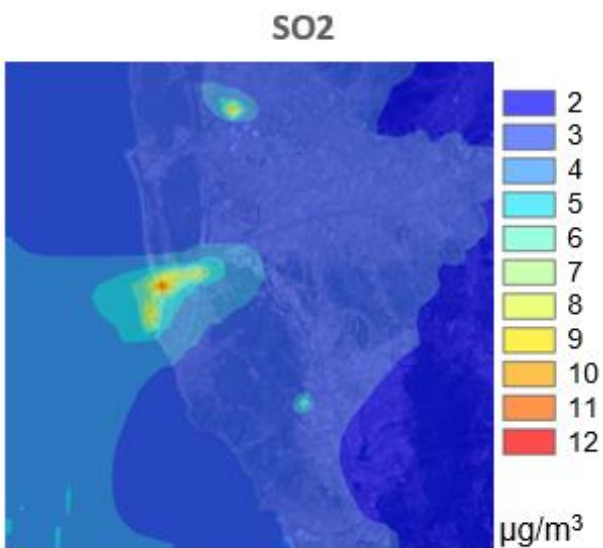
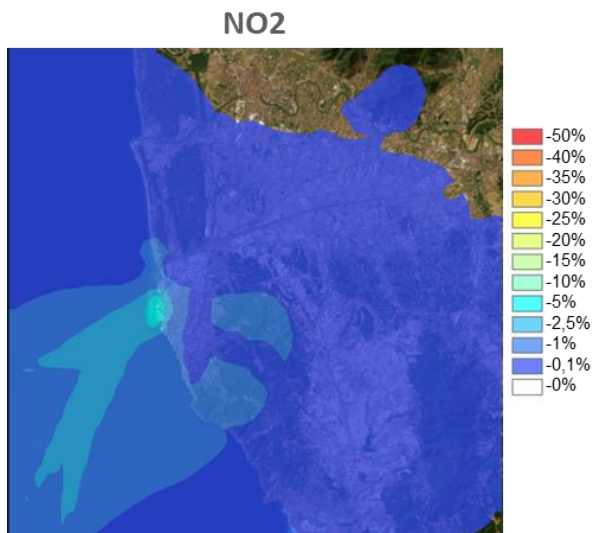
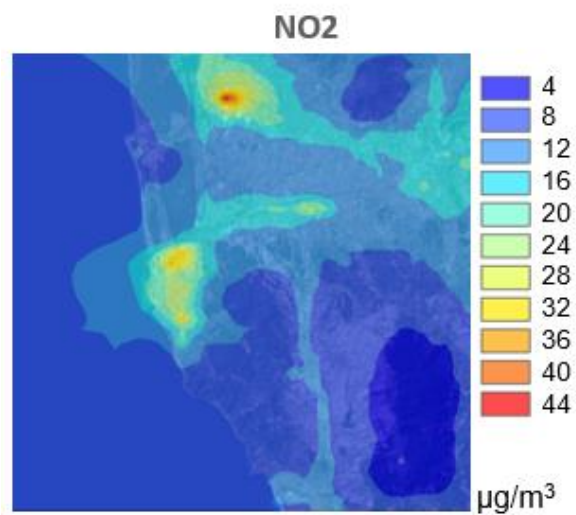
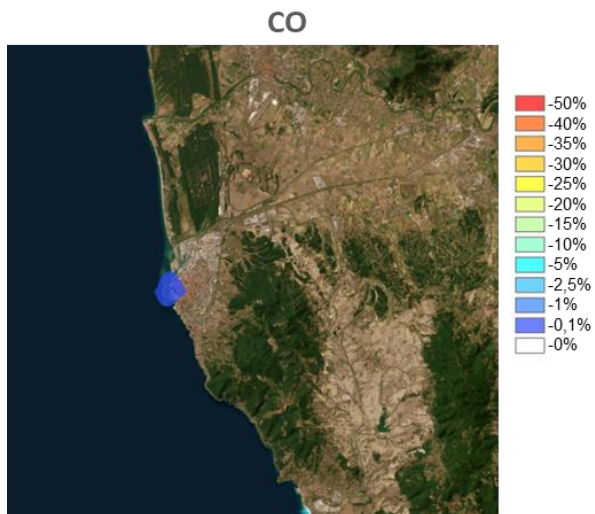
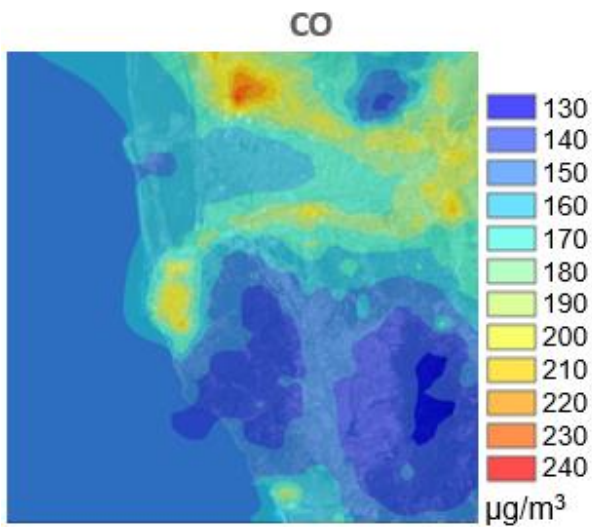
4.2.4. Scénario 3- Hydrogène

Dans ce scénario hypothétique, la technologie de l'hydrogène a été évaluée comme une solution possible pour la propulsion navale ou l'alimentation à quai des navires à l'arrêt. En effet, ce scénario porte sur toutes les phases opérationnelles du navire, à savoir l'arrêt, la manœuvre et la croisière. Dans ce scénario, nous avons cherché à évaluer la diffusion des navires à hydrogène sur le marché et les intérêts des armateurs navals, avec une diffusion de 50% pour les navires de croisière (d'une importance particulière pour les utilisateurs finaux) et de 30% pour les ferries Ro-Ro/Pax (également pertinents pour les citoyens et intéressants du point de vue des chiffres liés à l'ensemble du secteur naval). De plus, il a été supposé qu'il y aurait une diffusion rapide des solutions de propulsion électrique pour les petites embarcations, telles que les remorqueurs portuaires : ces navires effectuent de nombreux voyages par an et, bien que sur de courtes distances, leur utilisation dans le port est considérée comme importante. Pour ces embarcations, une diffusion de 100% a été supposée, en considérant une électrification complète de ces moyens et de ce service portuaire. Évidemment, l'hypothèse initiale d'électrification des remorqueurs et d'alimentation à l'hydrogène part du principe que la production des deux vecteurs énergétiques passe par des voies durables en utilisant des sources renouvelables sans impact sur l'environnement.

Préalablement, comme pour les autres hypothèses, un calcul a été effectué à l'aide du modèle Bottom-Up Harbour en réduisant les émissions de 50% des navires de croisière arrivant à Livourne, de 30% des ferries et de 100% des remorqueurs.

	Combustible	NO _x	PM	SO ₂	CO
		t	t	t	t
Emiss_HOT	MDGO	2591.01	87.35	88.64	345.42
Emiss_MAN	MDGO	16.11	1.07	7.39	2.91
Emiss_tug	MDGO	45.99	4.07	2.15	7.95
Emiss_Cter	MDGO	132.13	2.99	53.94	22.29
Emiss_Cext	MDGO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_HOT	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_MAN	BFO	145.18	21.92	120.01	20.04
Emiss_tug	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_Cter	BFO	1271.73	98.50	822.80	150.09
Emiss_Cext	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
	totale	4202.15	215.90	1094.93	548.70
		-8.28%	-8.34%	-10.36%	-3.11%

Tableau 36 : Bottom-Up-Harbour - Scénario Hydrogène



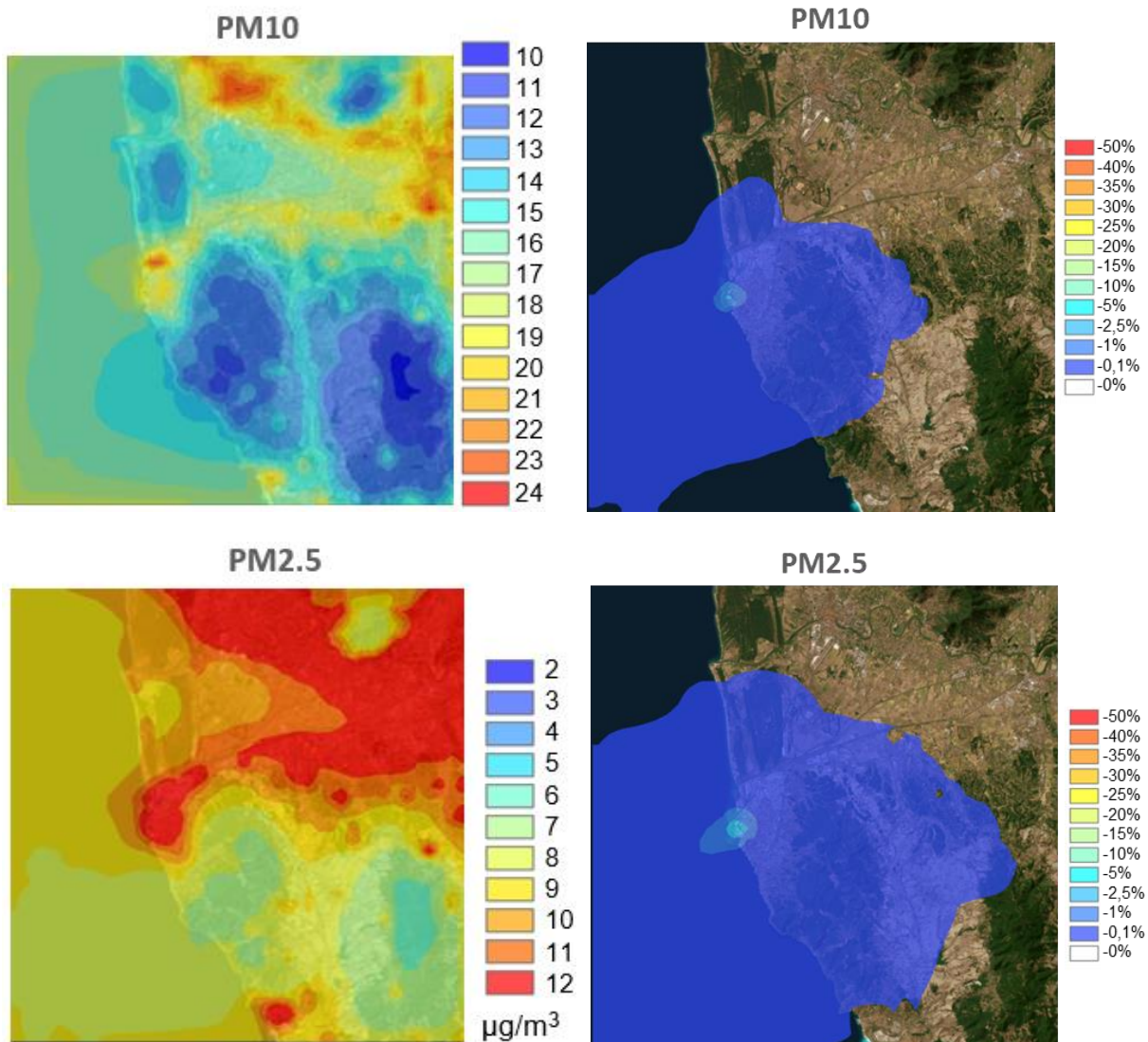


Figure 73 : Gauche : Concentrations au sol de CO , NO_2 , SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ simulées pour le scénario Hydrogène - moyenne sur la période annuelle 1/01/2021 - 31/12/2021 - Droite : Pourcentage de réduction entre le scénario calculé et le scénario de base sur la moyenne annuelle.

Les graphiques ci-dessous comparent l'évolution des polluants - entre le scénario de base et le scénario hydrogène - pour le mois de juillet.

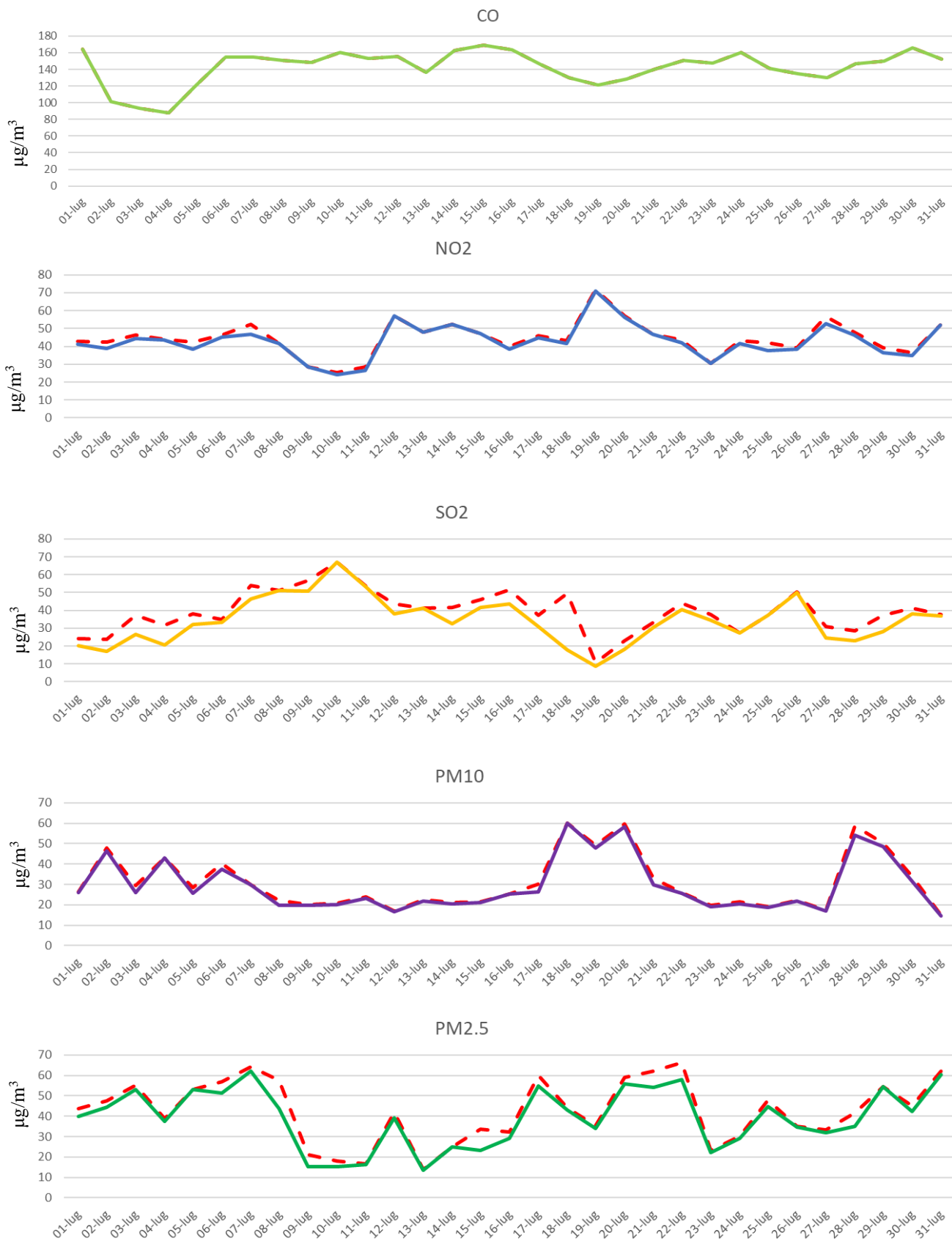


Figure 74 : Graphiques des moyennes journalières de CO, NO₂, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ pour la période du 01.07.2021 au 31.07.2021 pour le scénario hydrogène.

4.2.5. Scénario 4- SECA

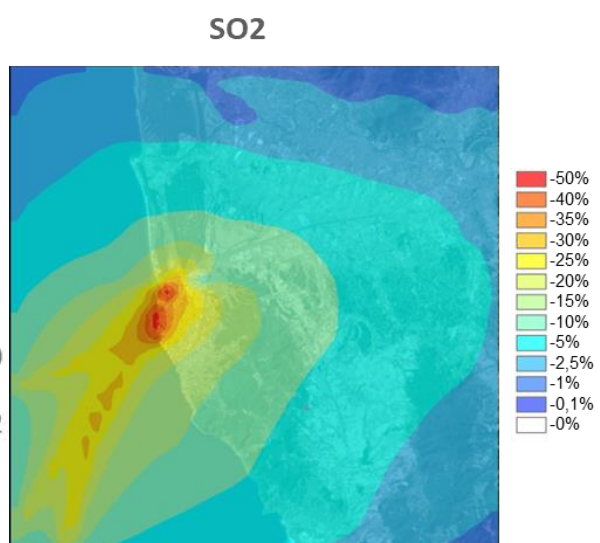
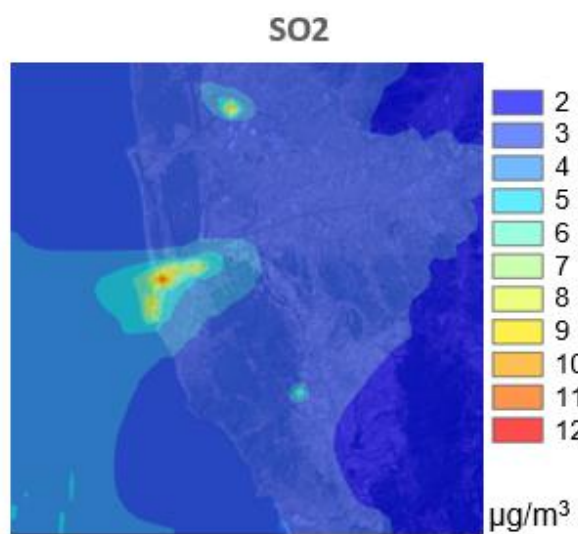
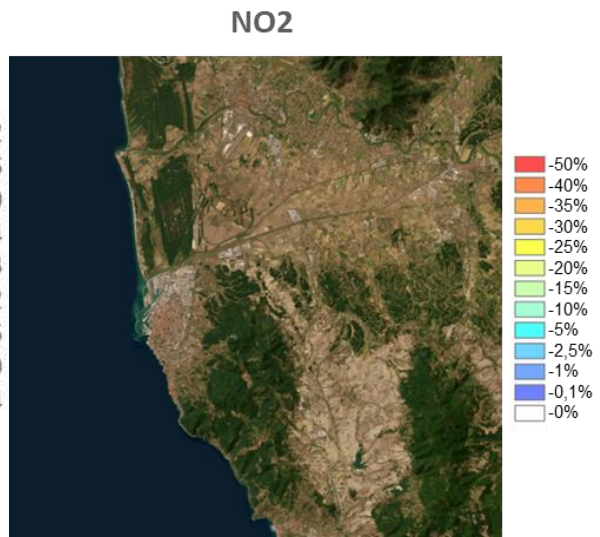
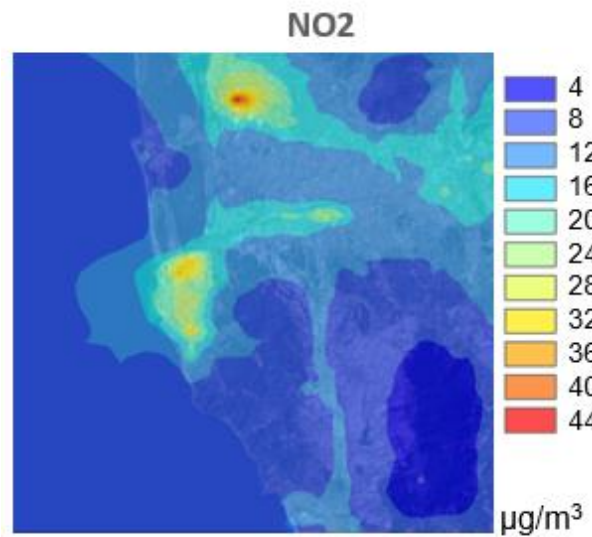
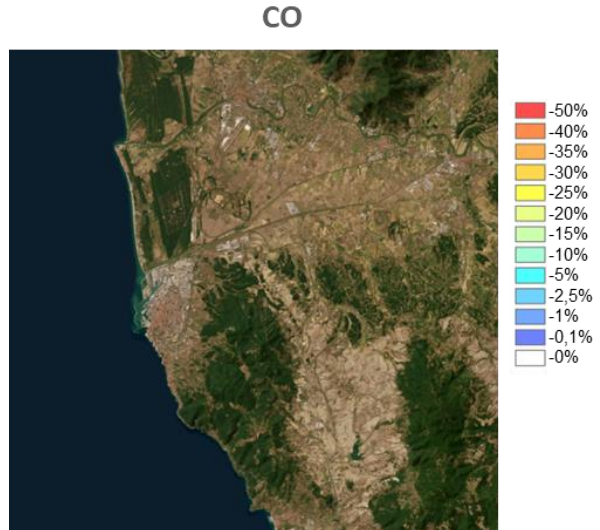
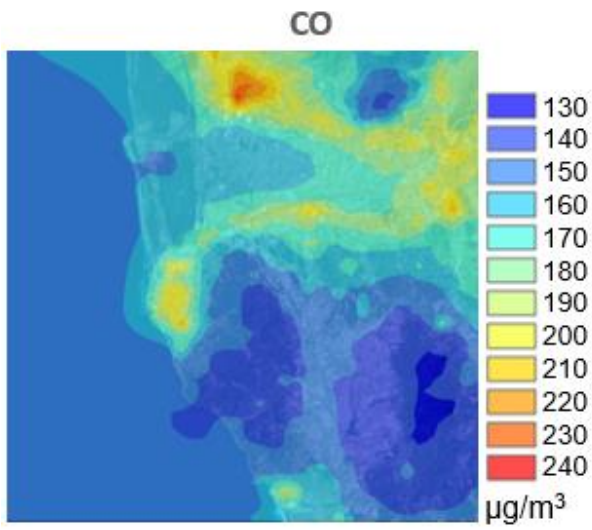
Dans le dernier scénario élaboré, on suppose la mise en place de réglementations sur les émissions de soufre des navires dans la zone méditerranéenne, par le biais de la création d'une zone SECA (zone de contrôle des émissions des navires), qui impose l'utilisation de carburants à faible teneur en soufre (0,1%). Dans ce scénario, toutes les catégories de navires sont concernées, pour chaque phase (croisière, manœuvre et arrêt).

Ce scénario est le plus simple à envisager et, logiquement, il sera très probablement mis en œuvre en raison des obligations réglementaires qui en découlent.

Comme précédemment, un calcul des émissions a été effectué à l'aide du modèle Bottom-Up-Harbour pour évaluer la quantité de polluants émis.

	Combustible	NO _x	PM	SO ₂	CO
		t	t	t	t
Emiss_HOT	MDGO	2724.11	73.13	9.34	345.42
Emiss_MAN	MDGO	19.18	1.04	0.82	3.48
Emiss_tug	MDGO	49.17	3.48	0.23	8.49
Emiss_Cter	MDGO	159.23	2.85	6.65	24.62
Emiss_Cext	MDGO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_HOT	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_MAN	BFO	155.61	18.95	12.65	21.65
Emiss_tug	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
Emiss_Cter	BFO	1474.25	88.99	92.46	162.65
Emiss_Cext	BFO	0.00	0.00	0.00	0.00
	totale	4581.56	188.44	122.15	566.32
		0.00%	-20.00%	-90.00%	0.00%

Tableau 37 : Bottom-Up-Harbour - Scénario SECA



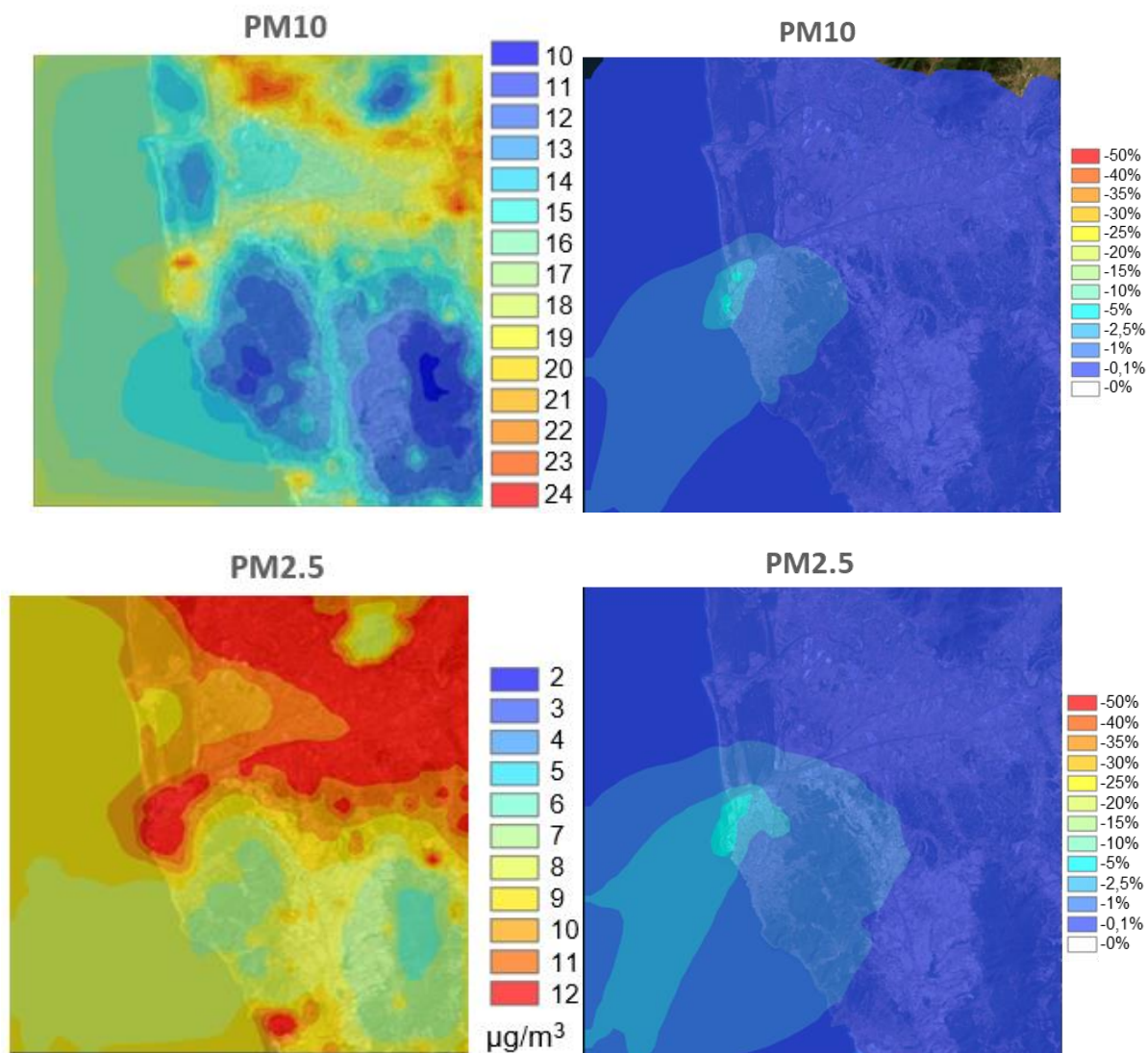


Figure 75 : Gauche : Concentrations au sol de CO , NO_2 , SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ simulées pour le scénario SECA - moyenne sur la période annuelle 1/01/2021 - 31/12/2021 - Droite : Pourcentage de réduction entre le scénario calculé et le scénario de base sur la moyenne annuelle

Les graphiques ci-dessous comparent les tendances des polluants - entre le scénario de base et le scénario SECA - pour le mois de juillet.

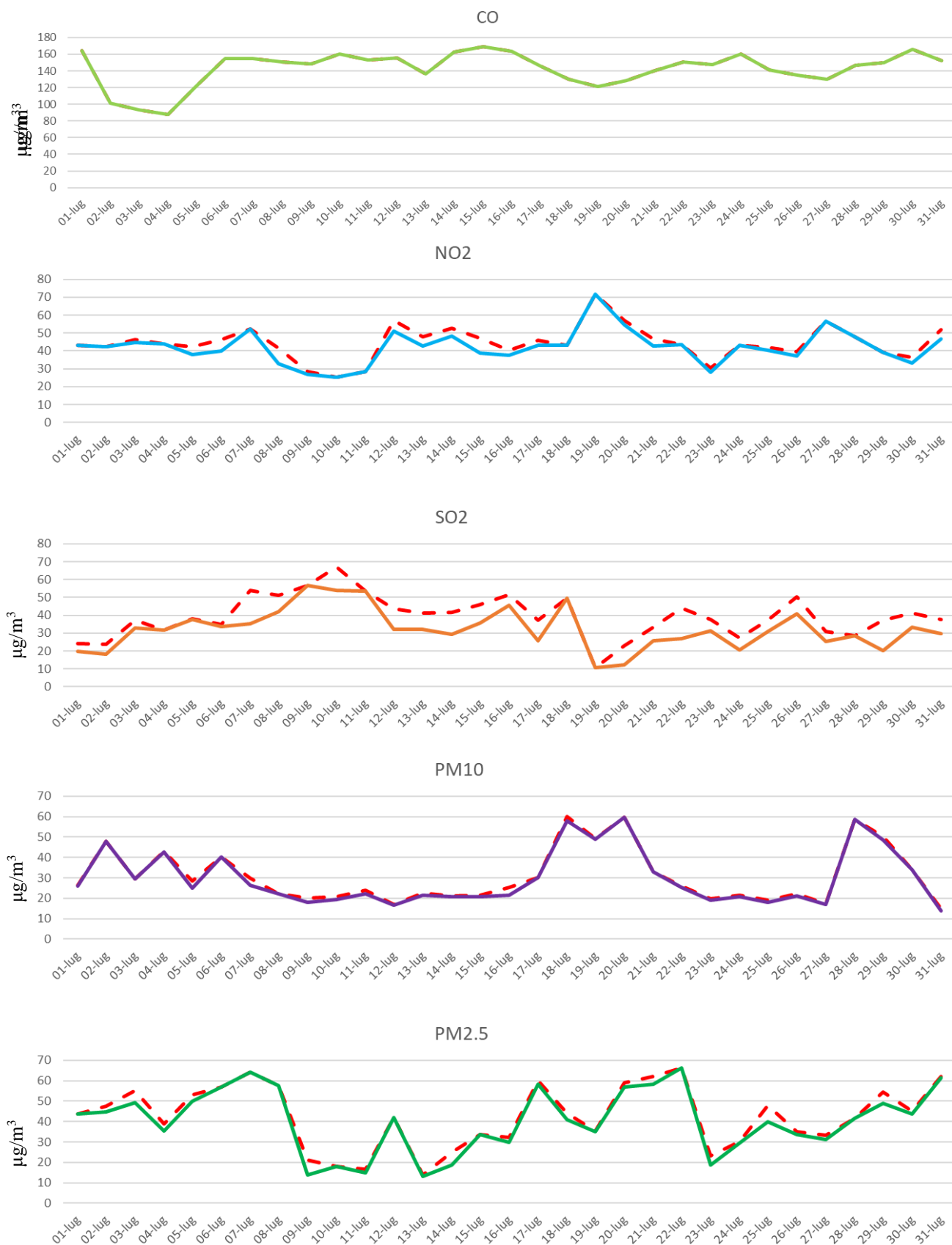


Figure 76 : Graphiques des moyennes journalières de CO, NO₂, SO₂, PM2.5, PM10 pour la période 01.07.2021 31.07.2021 pour le scénario SECA

4.3. Conclusion

Cette section vise à commenter les résultats obtenus à partir des calculs précédents du point de vue des calculs Bottom-Up et des valeurs extrapolées à partir du modèle FARM.

Scénario de Base

Le scénario de base met en évidence que la qualité de l'air dans le port de Livourne est considérée comme "bonne", comme le souligne l'ARPAT dans ses rapports suite aux campagnes de surveillance. Les données obtenues à partir du modèle, comparées aux données relevées par les stations Coppielo, Carducci et La Pira, bien que différentes du point de vue numérique, confirment la tendance positive de la qualité de l'air dans la région côtière toscane.

Scénario Cold Ironing

Le scénario proposé, bien qu'il présente des résultats limités, met en évidence certains aspects importants concernant l'environnement et la planification des infrastructures portuaires. En effet, dans le cas où il serait nécessaire de construire une infrastructure portuaire pour réduire les polluants navals, la construction de quais électrifiés doit avoir deux objectifs différents : le premier concerne le nombre de navires et d'arrêts (et donc les temps d'arrêt) qui doivent être concernés, en réalisant une solution qui maximise les amarrages électrifiés et en mettant en place une solution technologique étendue et impliquant davantage de quais. Le deuxième aspect, d'intérêt plus large, concerne la source d'énergie qui alimente les navires eux-mêmes : une solution prévoyant la production d'électricité à partir de sources traditionnelles n'améliorerait en aucun cas la qualité de l'air, mais déplacerait simplement les émissions vers des zones différentes éloignées du port.

À la suite de ces concepts préliminaires, la conception et la réalisation d'une série de quais électrifiés passent également par une évaluation coûts-avantages qui prend en compte le pourcentage de réduction des polluants (avantages) par rapport au coût économique nécessaire (coûts). Le coût d'une solution similaire à celle envisagée dans le scénario ne parvient pas à garantir une réduction satisfaisante par rapport au coût de l'infrastructure elle-même. Cela s'explique également par le fait que la construction d'un quai électrifié affecte non seulement le réseau électrique portuaire, mais aussi le réseau électrique urbain. Un navire de croisière de grande taille, à quai pendant toute la nuit, peut nécessiter environ 50 mégawatts (environ 4,5 mégawatts/heure) avec des fréquences différentes. Ces demandes énergétiques ont évidemment un impact important sur le réseau électrique urbain, et la disponibilité d'énergie au niveau local peut être fortement influencée en cas de besoins de puissance plus élevée. De plus, dans le cas du cold ironing, il est difficile de prévoir l'utilisation conjointe de quais électrifiés pour deux navires différents à quai, précisément pour ces raisons énergétiques.

Scénario GNL

Ce scénario, qui présente néanmoins des chiffres importants difficiles à atteindre à court terme, à moins d'interventions politiques et normatives, est celui qui offre le plus d'avantages en termes d'émissions, en particulier en ce qui concerne les niveaux de SO₂ générés par le secteur maritime. Cette réduction de SO₂ a également un impact sur la réduction des PM (particules en suspension) qui sont "produites" par des processus chimiques et qui, dans ce cas, deviennent des particules

secondaires. Les particules secondaires se forment lorsque le SO_2 réagit avec l'oxygène et l'eau dans l'air pour former de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et des sulfates (SO_4), qui se combinent avec d'autres composés pour former des particules fines.

La question suivante, également analysée en ce qui concerne le cold ironing, concerne la faisabilité de la solution proposée. La faisabilité dans ce cas spécifique passe par la modification des moteurs et des combustibles utilisés par les navires. La modification des moteurs a plusieurs implications :

- La première concerne les investissements économiques que les armateurs devraient réaliser. Ils pourraient envisager l'utilisation du GNL (gaz naturel liquéfié) uniquement en cas d'incitations de l'État pour la construction de nouveaux navires ou pour la rénovation navale.
- Un autre aspect est que l'arrivée d'un grand nombre de navires alimentés au gaz naturel liquéfié pose un problème du côté du port, à savoir la nécessité de créer un point d'approvisionnement en carburant. La création d'un dépôt côtier, même de petite taille, présente des problèmes de localisation, d'autorisation, d'ordre économique et de gestion.
- Les délais nécessaires à la création de ces deux derniers aspects, à savoir le nombre de navires et les dépôts pour le ravitaillement en carburant, ne sont pas courts, étant donné la nécessité de procédures administratives complexes.
- Les fonds européens disponibles pour le développement de la filière GNL ont déjà été largement utilisés, en se concentrant principalement sur les moyens de transport routiers (environ 130 stations-service ont été construites sur le territoire national et un peu plus de 20 sont en projet à ce jour). Les nouveaux fonds européens (par exemple, le plan national de relance et de résilience) sont plutôt orientés vers des combustibles et des vecteurs énergétiques innovants tels que l'hydrogène, l'ammoniac ou les biocombustibles.

Scénario hydrogène

Les prévisions incluses dans ce scénario sont considérées comme hautement futuristes : 50% des navires de croisière et 30% des navires Ro-Ro/Pax alimentés à l'hydrogène, ainsi que 100% des remorqueurs électriques, sont des hypothèses très éloignées de la réalité. Il manque encore des moteurs avec des technologies répandues, des solutions de stockage portuaire et une chaîne d'approvisionnement nationale est totalement absente. Les résultats environnementaux, qui peuvent être considérés comme évidents étant donné la réduction des émissions pour chaque navire alimenté à l'hydrogène, doivent être comparés aux coûts générés par la mise en place de cette chaîne d'approvisionnement, un processus qui nécessite une dépense de ressources considérable et qui doit être envisagé dans une perspective de développement global, pas seulement national. Les fonds européens mis à disposition dans les derniers appels d'offres encouragent cette solution technologique novatrice, dans le but d'orienter la politique européenne et nationale vers le développement de la filière de l'hydrogène.

Les réductions de polluants mises en évidence par le calcul obtenu à partir du modèle FARM mettent en évidence les avantages environnementaux qui résulteraient d'un système naval entièrement alimenté à l'hydrogène. Les faibles pourcentages actuels, également visibles dans les valeurs obtenues grâce au BUH, s'expliquent par le faible nombre de voyages réduits (en particulier pour les remorqueurs et les navires de croisière, qui étaient encore soumis aux restrictions liées à la pandémie

en 2021). Il convient de prendre en compte la réduction que le port de Livourne obtiendrait en cas de ferries Ro-Ro/Pax à l'hydrogène, ce qui est hautement improbable à court terme. L'intervention sur les ferries serait utile à évaluer sur la liaison Piombino-Portoferraio, dont les chiffres sont beaucoup plus élevés, surtout pendant la période estivale.

Scénario SECA

Le dernier scénario doit être considéré comme le meilleur en termes à la fois de faisabilité de la solution et de résultats environnementaux. À partir du 1er janvier 2025, l'ensemble de la région méditerranéenne deviendra une Zone de Contrôle des Émissions de Soufre (SECA : sulphur emission controlled area), dans laquelle il sera obligatoire d'utiliser un combustible à faibles émissions de soufre, à hauteur de 0,1%. Cette hypothèse, qui est d'ailleurs concrète, aura une incidence sur tous les navires en transit, réduisant ainsi la quantité de soufre émis par les navires dans l'air. Cette solution aura des répercussions sur les armateurs, qui pourront soit changer de combustible (avec des coûts plus élevés pour les approvisionnements), soit installer des systèmes de lavage des fumées (scrubbers) (avec des coûts élevés d'achat et d'installation, ainsi que des problèmes liés à l'élimination des produits chimiques générés pendant le traitement des fumées d'échappement), soit procéder à une refonte du navire afin d'utiliser un combustible différent (avec des coûts élevés pour la procédure de modification).

Les avantages sont obtenus, comme le montrent les cartes, principalement en ce qui concerne les émissions de SO₂, avec une réduction des émissions dans l'air pouvant atteindre 50%, et pour les PM (particules fines) à un niveau beaucoup plus bas.

La solution proposée a déjà été définie au niveau réglementaire et affectera tous les pays riverains de la mer Méditerranée.

Liste des Figures

Figure 1 : Histogrammes des durées d'escales dans les ports de Toulon et Nice par tranche de 2h30 durant les deux saisons modélisées.....	5
Figure 2 : Règlementation sur la teneur en soufre des fuels.....	6
Figure 3 : Somme des émissions en NO _x , SO _x et PM et émissions par espèce calculées pour le port de Toulon pour les différents scenarii en 2021.....	8
Figure 4 : Somme des émissions en NO _x , SO _x et PM et émissions par espèce calculées pour le port de Nice pour les différents scenarii en 2019.....	9
Figure 5 : Cartes des concentrations moyennes en SO ₂ à Toulon en été pour le scenario de référence (première ligne) et pour les scenarii (a) BFO 1.5%, (b) BFO 0.5%, (c) MDO + CENAQ. Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence. Les concentrations sont en µg.m ⁻³	12
Figure 6 : Cartes des concentrations moyennes en NO ₂ à Toulon en été pour le scenario de référence (première ligne) et pour les scenarii (a) BFO, (b) MDO + CENAQ. Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence. Les concentrations sont en µg.m ⁻³	13
Figure 7 : Cartes des concentrations moyennes en PM _{2.5} à Toulon en été pour le scenario de référence (première ligne) et pour les scenarii (a) BFO, (b) MDO + CENAQ. Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence. Les concentrations sont en µg.m ⁻³	14
Figure 8 : Cartes des concentrations moyennes en SO ₂ à Nice en été pour le scenario de référence (première colonne) et pour les scenarii (a) BFO 0.5%, (b) MDO, (c) CENAQ, (d) MDO + CENAQ. Les cartes situées sur la seconde ligne montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence. Les concentrations sont en µg.m ⁻³	15
Figure 9 : Cartes des concentrations moyennes en NO ₂ à Nice en été pour le scenario de référence (première colonne) et pour les scenarii (a) MDO, (b) CENAQ, (c) MDO + CENAQ. Les cartes situées sur la seconde ligne montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence. Les concentrations sont en µg.m ⁻³	16
Figure 10 : Cartes des concentrations moyennes en PM _{2.5} à Nice en été pour le scenario de référence (première colonne) et pour les scenarii (a) MDO, (b) CENAQ, (c) MDO + CENAQ. Les cartes situées sur la seconde ligne montrent les différences de concentration entre les scenarii et la référence. Les concentrations sont en µg.m ⁻³	17
Figure 11 : Cartes des concentrations moyennes en (a) SO ₂ , (b) NO ₂ , (c) PM _{2.5} à Toulon en hiver pour le scenario de référence (première colonne) et pour le scenario MDO + CENAQ (seconde colonne). Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre le scenario et la référence. Les concentrations sont en µg.m ⁻³	18
Figure 12 : Cartes des concentrations moyennes en (a) SO ₂ , (b) NO ₂ , (c) PM _{2.5} à Nice en hiver pour le scenario de référence (première ligne) et pour le scenario CENAQ (seconde colonne). Les cartes situées du côté droit montrent les différences de concentration entre le scenario et la référence. Les concentrations sont en µg.m ⁻³	19
Figure 13 : Box-plots des concentrations au-dessus du sol (première ligne) et box-plots des ratios des concentrations scenario/référence (seconde ligne) à Toulon pour la période estivale (gauche) et la période hivernale (droite). Le scenario de référence est le scenario MDO.....	22

Figure 14 : Box-plots des concentrations au-dessus du sol (première ligne) et box-plots des ratios des concentrations scenario/référence (seconde ligne) à Nice pour la période estivale (gauche) et la période hivernale (droite). Le scenario de référence est le scenario BFO 1.5%.....23

Figure 15 : Répartition des Emissions en fonction du type de navire sur Ajaccio (2019).....28

Figure 16 : Répartition des Emissions en fonction de la phase de l’escale sur Ajaccio (2019)29

Figure 17 : Mix Energétique en Corse30

Figure 18 : Installations de production électrique d'EDF en Corse – EDF.....30

Figure 19 : Fiches utilisées pour les scenarii sur Ajaccio32

Figure 20 : Fiches utilisées pour les scenarii sur Bastia33

Figure 21 : Pourcentage de différences d’émissions entre les scenarii avec la situation 2021 à Ajaccio45

Figure 22 : Pourcentage de différences d’émissions entre les scenarii avec la situation 2021 à Bastia46

Figure 23 : Cartes des concentrations moyennes en SO_2 en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Ajaccio le 15/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).50

Figure 24 : Cartes des concentrations moyennes en NO_2 en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Ajaccio le 15/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).51

Figure 25 : Cartes des concentrations moyennes en $\text{PM}_{2.5}$ en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Ajaccio le 15/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).52

Figure 26 : Cartes des concentrations moyennes en PM_{10} en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Ajaccio le 15/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).53

Figure 27 : Cartes des concentrations moyennes en SO_2 en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Ajaccio le 12/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1 GNL (C).....54

Figure 28 : Cartes des concentrations moyennes en NO_2 en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Ajaccio le 12/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1 GNL (C).....55

Figure 29 : Cartes des concentrations moyennes en $\text{PM}_{2.5}$ en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Ajaccio le 12/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1 GNL (C).....56

Figure 30 : Cartes des concentrations moyennes en PM_{10} en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Ajaccio le 12/09/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1 GNL (C).....57

Figure 31 : Cartes des concentrations moyennes en SO_2 en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Bastia le 27/08/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).58

Figure 32 : Cartes des concentrations moyennes en NO_2 en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Bastia le 27/08/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).59

Figure 33 : Cartes des concentrations moyennes en $\text{PM}_{2.5}$ en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Bastia le 27/08/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).60

Figure 34 : Cartes des concentrations moyennes en PM_{10} en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Bastia le 27/08/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ (C).61

Figure 35 : Cartes des concentrations moyennes en SO_2 en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Bastia le 14/07/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1GNL (C).....62

Figure 36 : Cartes des concentrations moyennes en NO_2 en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Bastia le 14/07/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1GNL (C).....63

Figure 37 : Cartes des concentrations moyennes en $\text{PM}_{2.5}$ en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Bastia le 14/07/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1GNL (C).....64

Figure 38 : Cartes des concentrations moyennes en PM_{10} en $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Bastia le 14/07/2021 pour le scenario de référence (A) et pour les scenarii SECA(B) puis SECA + CENAQ + 1GNL (C).....65

Figure 39 : Boxplot des concentrations avec fond uniquement sur terre (Ajaccio).....	66
Figure 40 : Boxplot ratio des concentrations scenarii/ref sans le fond uniquement sur terre (Ajaccio)	66
Figure 41 : Boxplot des concentrations avec fond uniquement sur terre (Ajaccio).....	67
Figure 42 : Boxplot ratio des concentrations scenarii/ref sans le fond uniquement sur terre (Ajaccio)	67
Figure 43 : Boxplot des concentrations avec fond uniquement sur terre (Bastia)	68
Figure 44 : Boxplot ratio des concentrations scenarii/ref sans le fond uniquement sur terre (Bastia)	68
Figure 45 : Boxplot des concentrations avec fond uniquement sur terre (Bastia)	69
Figure 46 : Boxplot ratio des concentrations scenarii/ref sans le fond uniquement sur terre (Bastia)	69
Figure 47: Image satellite de la zone portuaire de Gênes. Les repères représentent les points de stationnement sur les différents quais pris en compte dans la préparation des inputs des émissions de sources ponctuelles.	74
Figure 48 Image satellite de la zone portuaire de Gênes. En blanc, les sources surfaciques introduites dans les données d'entrée pour décrire les phases de manœuvre des navires entrant et sortant du port.	75
Figure 49 : Facteurs d'émission pour différents types de moteurs et de combustibles marins	77
Figure 50 : Cartes des champs de concentration en NO ₂ obtenues pour les trois scénarios (référence à gauche, quais électrifiés au milieu et GNL à droite) pour août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas).	79
Figure 51 : cartes des champs de concentration de PM ₁₀ obtenues pour les trois scénarios (référence à gauche, quais électrifiés au milieu et GNL à droite) pour août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas).	80
Figure 52 : cartes des champs de concentration de PM ₂₅ obtenues pour les trois scénarios (référence à gauche, quais électrifiés au milieu et GNL à droite) pour août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas).	81
Figure 53 : cartes des différences de concentration de NO ₂ entre le scénario 1 et le scénario 0 (à gauche) et entre le scénario 2 et le scénario 0 (à droite) pour la période août 2021 (ci-dessus) et avril 2022 (ci-dessous).	82
Figure 54 : cartes des différences de concentration en PM ₁₀ entre le scénario 1 et le scénario 0 (à gauche) et entre le scénario 2 et le scénario 0 (à droite) pour la période d'août 2021 (en haut) et d'avril 2022 (en bas).	83
Figure 55 : cartes des différences de concentration en PM ₂₅ entre le scénario 1 et le scénario 0 (à gauche) et entre le scénario 2 et le scénario 0 (à droite) pour la période d'août 2021 (en haut) et d'avril 2022 (en bas).	84
Figure 56 : Boxplots des concentrations en NO ₂ (avec fond) simulées pour les trois scénarios, en ne considérant que les cellules du domaine situées sur terre, moyennées sur août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas).	87
Figure 57 : Boxplots des concentrations en PM ₁₀ (avec fond) simulées pour les trois scénarios, en ne considérant que les cellules du domaine situées sur terre, moyennées sur août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas).	88

Figure 58 : Boxplots des concentrations en PM₂₅ (avec fond) simulées pour les trois scénarios, en ne considérant que les cellules du domaine situées sur terre, moyennées sur août 2021 (en haut) et avril 2022 (en bas). 89

Figure 59 : Boxplots du rapport entre les concentrations en NO₂ (sans concentration de fond) des scénarios d'atténuation et de référence, en ne considérant que les cellules du domaine situées sur terre, moyennées sur la période simulée (août 2021 en haut et avril 2022 en bas). 90

Figure 60 : Boxplots du rapport entre les concentrations en PM₁₀ (sans concentration de fond) des scénarios d'atténuation et de référence, en ne considérant que les cellules du domaine situées à terre, moyennées sur la période simulée (août 2021 en haut et avril 2022 en bas). 91

Figure 61 : Boxplots du rapport entre les concentrations en NO₂ (sans concentration de fond) des scénarios d'atténuation et de référence, uniquement sur les cellules du domaine situées à terre, moyennées sur la période simulée (août 2021 en haut et avril 2022 en bas). 92

Figure 62 : Carbon footprint 2021 96

Figure 63 : Évolution du trafic maritime 2021/2022 97

Figure 64 : Variation du trafic au cours de la période 2021/2022 97

Figure 65 : Suite de modélisation ARIA Regional/ FARM. 103

Figure 66 : Stations de l' ARPAT et du Port de Livourne 104

Figure 67 : Concentrations simulées au sol de CO, NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} pour le scénario d'émission de référence - moyenne sur la période annuelle 1/01/2021 - 31/12/2021 107

Figure 68 : Graphiques des moyennes journalières de CO, NO₂, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ pour la période 01.01.2021 - 31.12.2021 111

Figure 69 : Gauche : Concentrations au sol de CO, NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} simulées pour le scénario de repassage à froid - moyenne sur la période annuelle 1/01/2021 - 31/12/2021 - Droite : Pourcentage de réduction entre le scénario calculé et le scénario de base sur la moyenne annuelle. 115

Figure 70 : Graphiques des moyennes journalières de CO, NO₂, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ pour la période du 01.07.2021 au 31.07.2021 pour le scénario de Cold Ironing. 116

Figure 71 : Gauche : Concentrations au sol de CO, NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} simulées pour le scénario GNL - moyenne sur la période annuelle 1/01/2021 - 31/12/2021 - Droite : Pourcentage de réduction entre le scénario calculé et le scénario de référence sur la moyenne annuelle. 119

Figure 72 : Graphiques des moyennes journalières de CO, NO₂, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ pour la période 01.07.2021 31.07.2021 pour le scénario GNL 120

Figure 73 : Gauche : Concentrations au sol de CO, NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} simulées pour le scénario Hydrogène - moyenne sur la période annuelle 1/01/2021 - 31/12/2021 - Droite : Pourcentage de réduction entre le scénario calculé et le scénario de base sur la moyenne annuelle. 123

Figure 74 : Graphiques des moyennes journalières de CO, NO₂, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ pour la période du 01.07.2021 au 31.07.2021 pour le scénario hydrogène. 124

Figure 75 : Gauche : Concentrations au sol de CO, NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} simulées pour le scénario SECA - moyenne sur la période annuelle 1/01/2021 - 31/12/2021 - Droite : Pourcentage de réduction entre le scénario calculé et le scénario de base sur la moyenne annuelle 127

Figure 76 : Graphiques des moyennes journalières de CO, NO₂, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ pour la période 01.07.2021 31.07.2021 pour le scénario SECA 128

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Périodes de simulation pour les ports de Nice et Toulon-la Seyne.....	3
Tableau 2 : Facteurs d'émission en NO _x , SO _x et PM _{2.5} [g/GJ] extraits de la base de données OMINEA du CITEPA.....	7
Tableau 3 : Liste des scenarii modélisés. Le scenario de référence est le scenario "MDO" pour le port de Toulon, le scenario "BFO 1.5%" pour le port de Nice, (cases en orange clair).....	7
Tableau 4 : Concentrations de fond moyennes en µg.m ⁻³ estimées aux stations Toulon Claret et Nice Arson pour les périodes de simulations indiquées dans le Tableau 1	10
Tableau 5 : Moyennes en µg.m ⁻³ des concentrations mesurées par les cabines situées sur les ports de Toulon et Nice et des concentrations simulées dans le cadre des simulations de référence, extraites aux emplacements des cabines, aux temps tels que C _i ^{sim} ≠ 0. Les ratios des deux moyennes donnés en pourcentages donnent la contribution des navires. Les ratios sur fond orange sont ceux pour lesquels la corrélation mesure/modèle est satisfaisante (voir livrable T2.3.1 – Rapport sur les résultats des simulations de modélisation du projet, pour plus de détails).....	11
Tableau 6 : Evolution des concentrations des panaches à Toulon pour les différents scenarii, avec comme référence le scenario MDO (situation en 2021).	24
Tableau 7 : Evolution des concentrations des panaches à Toulon pour les différents scenarii, avec comme référence le scenario BFO 0.5% (situation s'il n'y avait pas eu de charte).	25
Tableau 8 : Evolution des concentrations des panaches à Nice pour les différents scenarii, avec comme référence le scenario BFO 1.5% (situation en 2019).	25
Tableau 9 : Facteurs d'émission en NO _x , SO _x et PM _{2.5} extraits de la base de données OMINEA du CITEPA.....	34
Tableau 10 : Quantité de polluants émis par les ferries, cas de base - Ajaccio, 2021	35
Tableau 11 : Quantité de polluants émis par les ferries, cas de base - Bastia, 2021.....	36
Tableau 12 : Chronologie partielle d'une escale avec CENAQ	37
Tableau 13 : Quantité de polluants émis par les ferries, CENAQ - Ajaccio, 2021.....	38
Tableau 14 : Quantité de polluants émis par les ferries, CENAQ - Bastia, 2021	38
Tableau 15 : Différences entre le scénario de base et l'utilisation de CENAQ (%).....	39
Tableau 16 : Quantité de polluants émis par les ferries, SECA - Ajaccio, 2021	40
Tableau 17 : Quantité de polluants émis par les ferries, SECA - Bastia, 2021.....	40
Tableau 18 : Différences entre le scénario de base et l'utilisation du SECA (%).....	41
Tableau 19 : Quantité de polluants émis par les ferries, GNL - Ajaccio, 2021	42
Tableau 20 : Quantité de polluants émis par les ferries, GNL - Bastia, 2021.....	42
Tableau 21 : Différences entre le scénario de base et une flotte 100% au GNL (%)	43
Tableau 22 : Emissions en CO _{2eq} d'un scénario 100% GNL	43
Tableau 23 : Différences entre le scénario de base et des scenarii combinés (%) - Manœuvre + Quai	44
Tableau 24 : Dates et modélisations concernées sur les ports d'Ajaccio et Bastia	47
Tableau 25 : Concentrations de fond moyennes en µg.m ⁻³ estimées aux stations Ajaccio « Canetto » et Bastia « Giraud » pour les journées de simulations indiquées.....	48
Tableau 26 : Part de la pollution maritime par rapport aux mesures des stations fixes sur Ajaccio et Bastia en fonction des scenarii (valeurs moyennées sur la journée).....	49

Tableau 27 : Réduction des concentrations des panaches à Ajaccio pour les différents scenarii avec comme référence le scenario base.....	70
Tableau 28 : Réduction des concentrations des panaches à Bastia pour les différents scenarii avec comme référence le scenario base.....	70
Tableau 29: Facteurs d'émission pour les trois scénarios.	76
Tableau 30 : Valeurs des concentrations de fond estimées pour les deux périodes de simulation considérées.	78
Tableau 31 : tableau récapitulatif de l'indice de réduction en pourcentage pour les deux scénarios d'atténuation et pour les deux périodes considérées	93
Tableau 32 : Bottom-Up-Harbour - Comparaison Scénario de base / Scénario Cold Ironing.....	100
Tableau 33 Bottom-Up-Harbour – Scénario de Base	105
Tableau 34 : Bottom-Up-Harbour - Scénario Cold Ironing.....	112
Tableau 35 : Bottom-Up-Harbour - Scénario GNL	117
Tableau 36 : Bottom-Up-Harbour - Scénario Hydrogène.....	121
Tableau 37 : Bottom-Up-Harbour - Scénario SECA	125