

Evolution physique et chimique des particules fines produites par le trafic maritime

Journée des doctorant(e)s et docteur(e)s AtmoSud : 06/05/2021

Lise LE BERRE

Directeurs de thèse LCE : Henri WORTHAM et Brice TEMIME-ROUSSEL

Responsables du suivi de la thèse : Philippe CAUNEAU (ADEME) et Damien PIGA (AtmoSud)

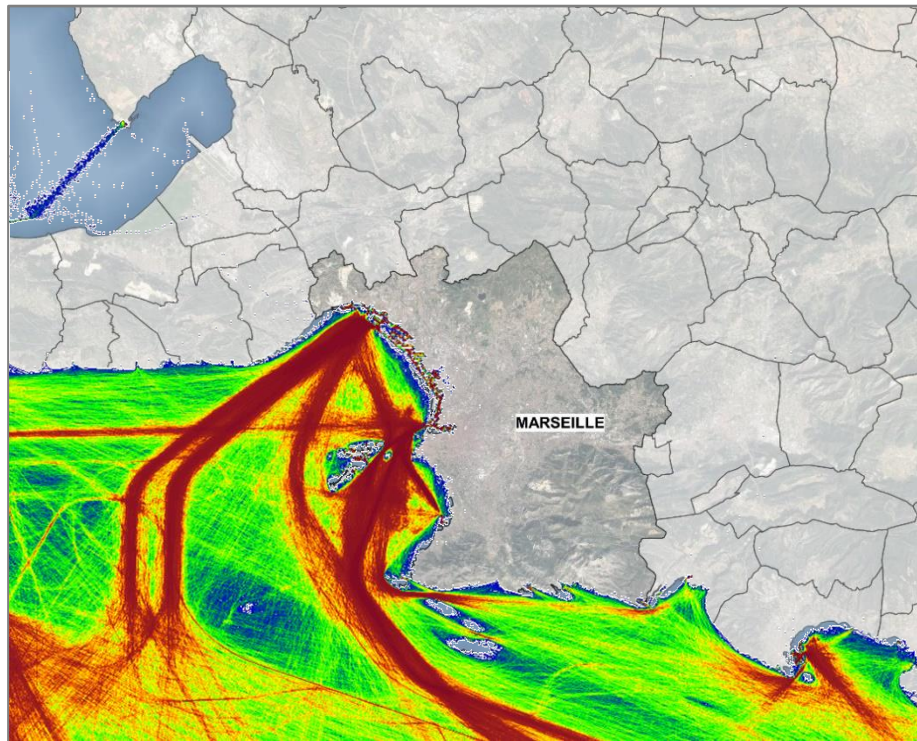
Le trafic maritime : enjeux importants dans les villes portuaires

- Fort émetteur de SO_2 , de NO_x , de COV et $\text{PM}_{2.5}$ (Aardenne et al., 2013)
- Contribution significative à la dégradation de la qualité de l'air (Aardenne et al., 2013)
- Corrélation entre quantité de $\text{PM}_{2.5}$ émises par les navires et, augmentation des hospitalisations et de la mortalité (Corbett et al., 2007) (estimation de près de 250 000 décès prématurés dans le monde en 2020) (Sofiev et al., 2018)

Particules générées par les navires : une connaissance parcellaire



⇒ **Nécessité de caractériser ces particules, leur précurseurs et de quantifier leur contribution**



Marseille

- Deuxième ville française (INSEE, 2020) largement impactée par la pollution aux particules
- Un des plus grands ports de la méditerranée
 - **1^{er} port Français de marchandises**
~ 80 millions de tonnes en 2018 (SDES, 2019)
 - **1^{er} port Français de croisières**
~ 3 millions de passagers dont
~ dont 1,7 croisiéristes en 2018 (SDES, 2019)

Particularité

- Fort ensoleillement (photo oxydation)
- Orographie et circulation de masses d'air particulières
- Multitudes de sources (anthropiques et naturelles)

Objectif 1

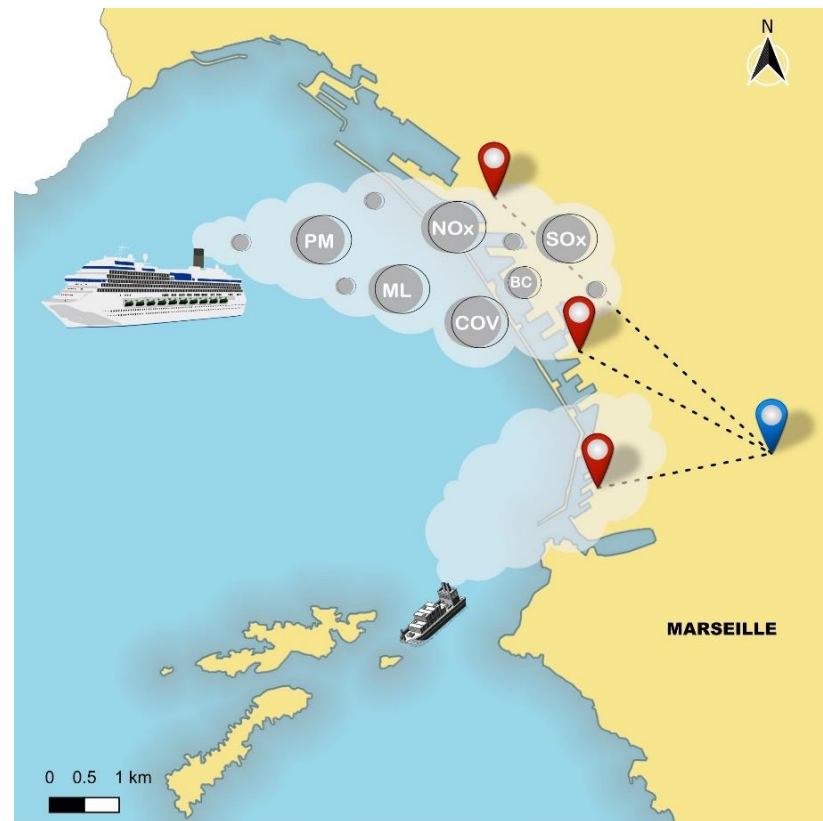
Caractérisation physico chimique des émissions maritimes

Campagne de mesures à haute résolution temporelle

 des mesures « à la source »

 des mesures « fond urbain »

⇒ **Base de données de mesures
(composition physique et chimique)**



Objectif 1

Caractérisation physico chimique des émissions maritimes

Campagne de mesures à haute résolution temporelle



des mesures « à la source »



des mesures « fond urbain »

⇒ **Base de données de mesures (composition physique et chimique)**

Objectif 2

Identification de profil(s) de source(s)



Individualisation des panaches des navires par croisement des :

- mesures haute résolution
- données météorologiques
- données AIS

⇒ **Profil(s) de source(s)**

⇒ **Facteur d'émission (EF)**

Objectif 1

Caractérisation physico chimique des émissions maritimes

Campagne de mesures à haute résolution temporelle



des mesures « à la source »



des mesures « fond urbain »

⇒ Base de données de mesures
(composition physique et chimique)

Objectif 2

Identification de profil(s) de source(s)

Objectif 3

Contribution des émissions maritimes sur la qualité de l'air

Modélisation statistique de type PMF

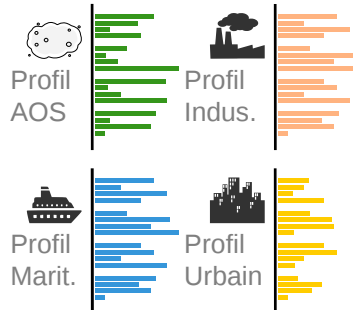
- matrice de mesures
- dont métaux, traceurs ≠ navires et industries



⇒ Profil(s) de source(s)

⇒ Facteur d'émission (EF)

— IDENTIFICATION DES SOURCES —

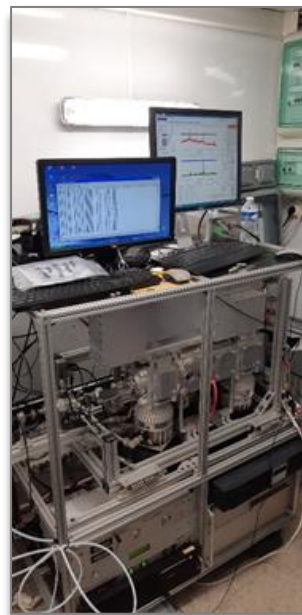


— CONTRIBUTION DES SOURCES —



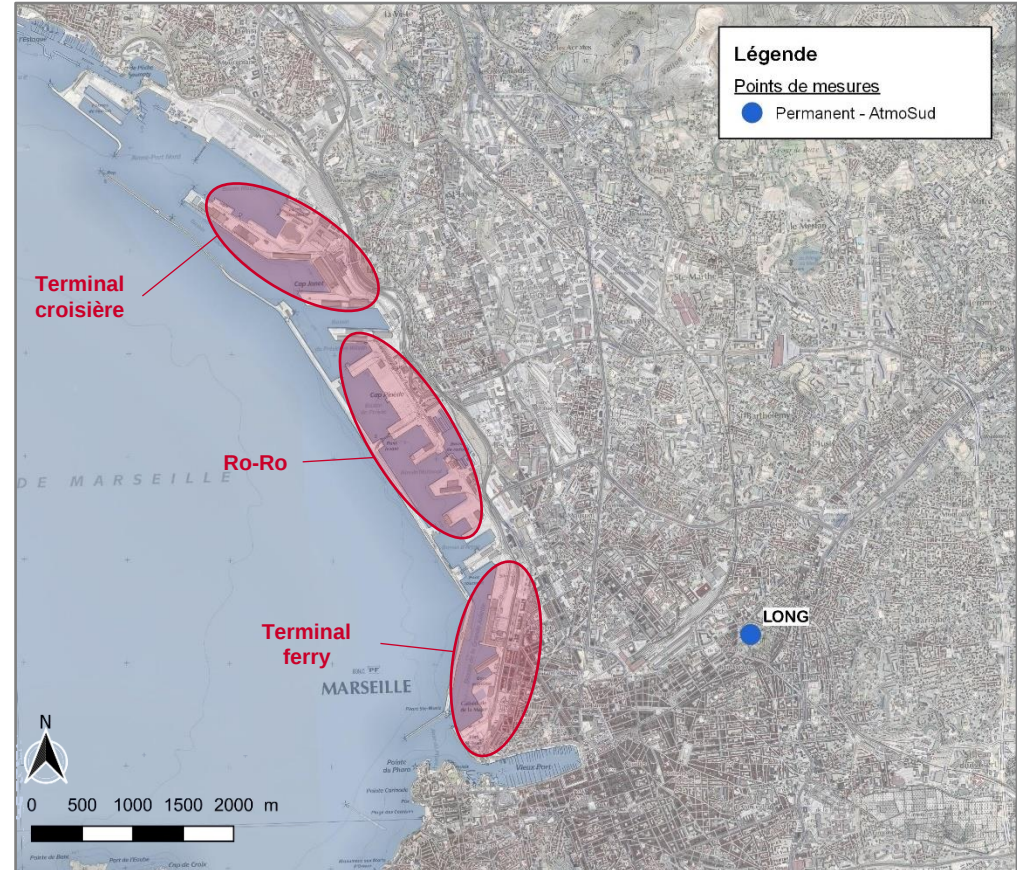
Objectif 1 : Caractérisation physico- chimique des émissions

Campagne de mesures haute-
résolution

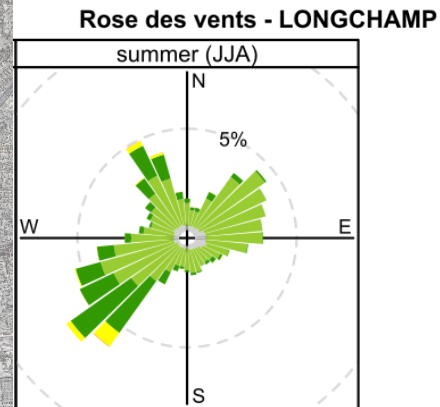
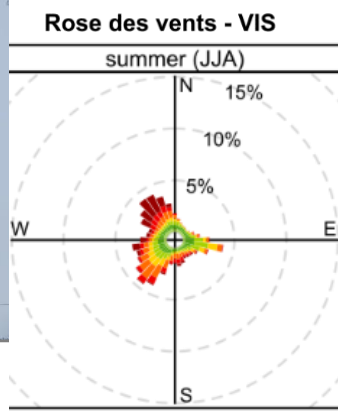
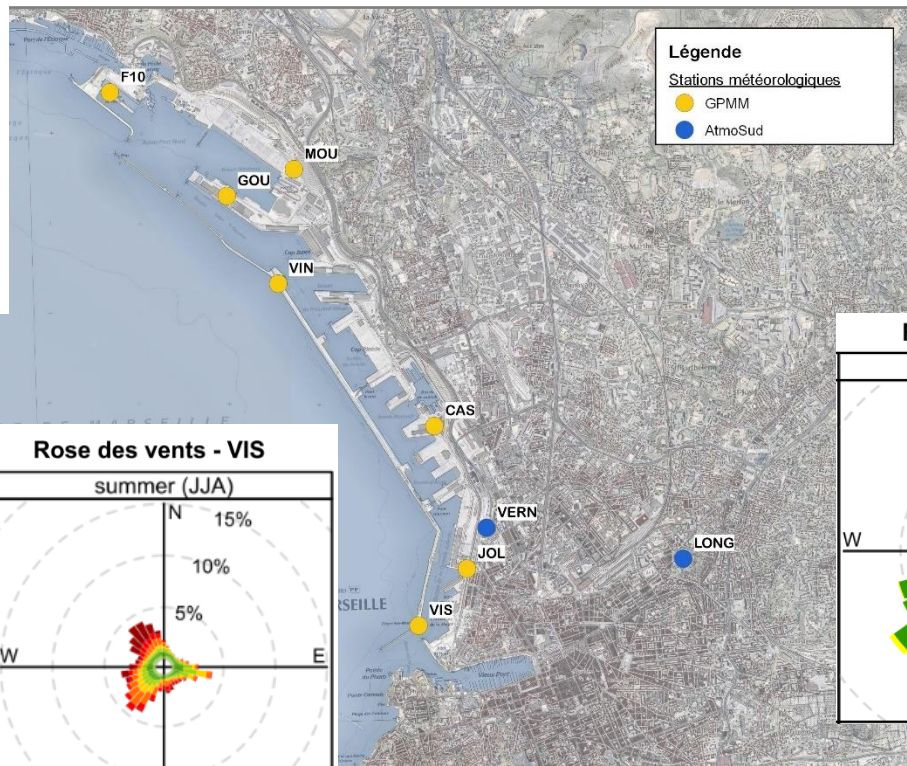
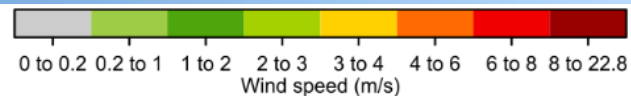
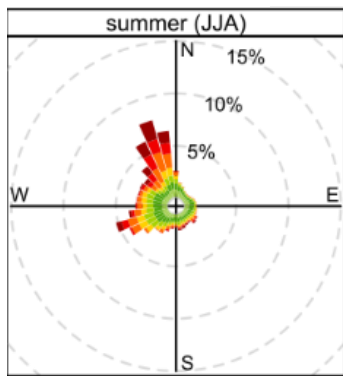


Complexité de trouver un site de mesure idéal

- Multitude de sources
 - ⇒ Limiter l'influence des autres sources (autoroutes, coactivité du port ...)
- Conditions météorologiques
 - ⇒ Identifier les zones préférentiellement sous les vents des bateaux
 - ⇒ Maximiser l'alignement entre le point de mesures et « Longchamp »
- Flux de bateaux non continu
 - ⇒ Maximiser le nombre de panaches de bateaux détectés
 - ⇒ Obtenir une représentativité des bateaux circulant au port
- Faisabilités techniques (alimentation électriques)
- Autorisations du GPMM



Rose des vents - F10



% du temps sous les vents du port

« Major » sous les vents :

Du Port en général (230° - 360°)

- 69 % du temps pendant C4.0
- Vitesse de vents associées 3,6 m/s
[Q1 : 1.7 / Q3 : 4,8]

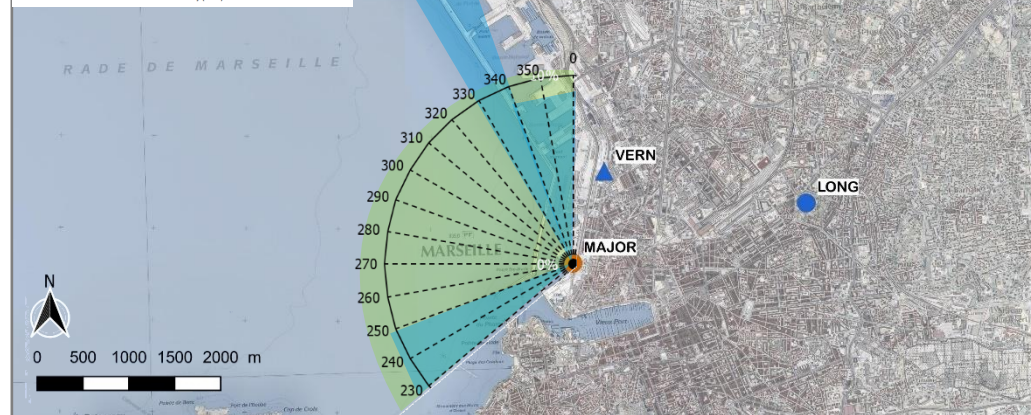
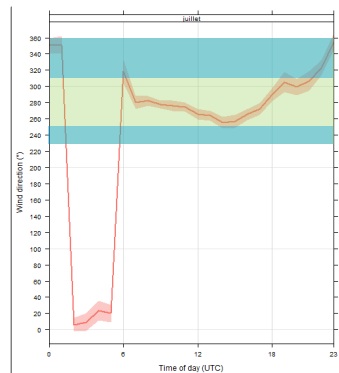
Des principales zones d'émissions

230° - 250°

- 15 % du temps pendant C4.0
- Vitesse de vents associées 3,5 m/s
[Q1 : 1.9 / Q3 : 4,5]
- plutôt entre 8 -18 h (UTC)

330° - 360°

- 19 % du temps pendant C4.0
- Vitesse de vents associées 4,5 m/s
[Q1 : 2.6 / Q3 : 6,3]
- plutôt entre 18 -06 h (UTC)



% du temps sous les vents du port

« Longchamp » sous les vents :

Du Port en général (250° - 315°)

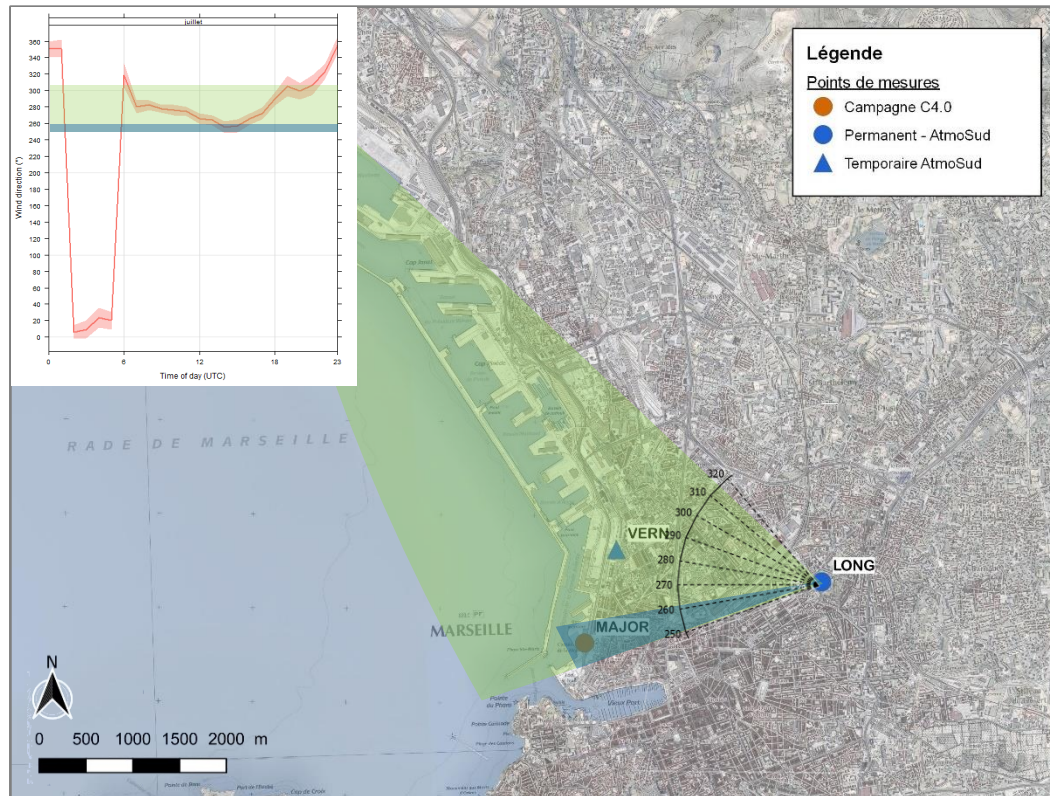
- 21 % du temps pendant C4.0
- Vitesse de vents associées 2,5 m/s
[Q1 : 1.1 / Q3 : 3,1]
- Plutôt entre 7 -18 h (UTC)

Du port et aligné avec « Major » (250° - 260°)

- 5 % du temps pendant C4.0
- Vitesse de vents associées 3,6 m/s
[Q1 : 1.4 / Q3 : 4,2]
- Plutôt entre 8 -18 h (UTC)

Temps de déplacement de la masse d'air

- Depuis Terminal Ferry (d ~ 2 500 m)
=> ~ 15 min [Q1 : 10 / Q3 : 40]
- Depuis Terminal Croisière (d ~ 6 000 m)
=> ~ 40 min [Q1 : 30 / Q3 : 90]



Campagne exploratoire

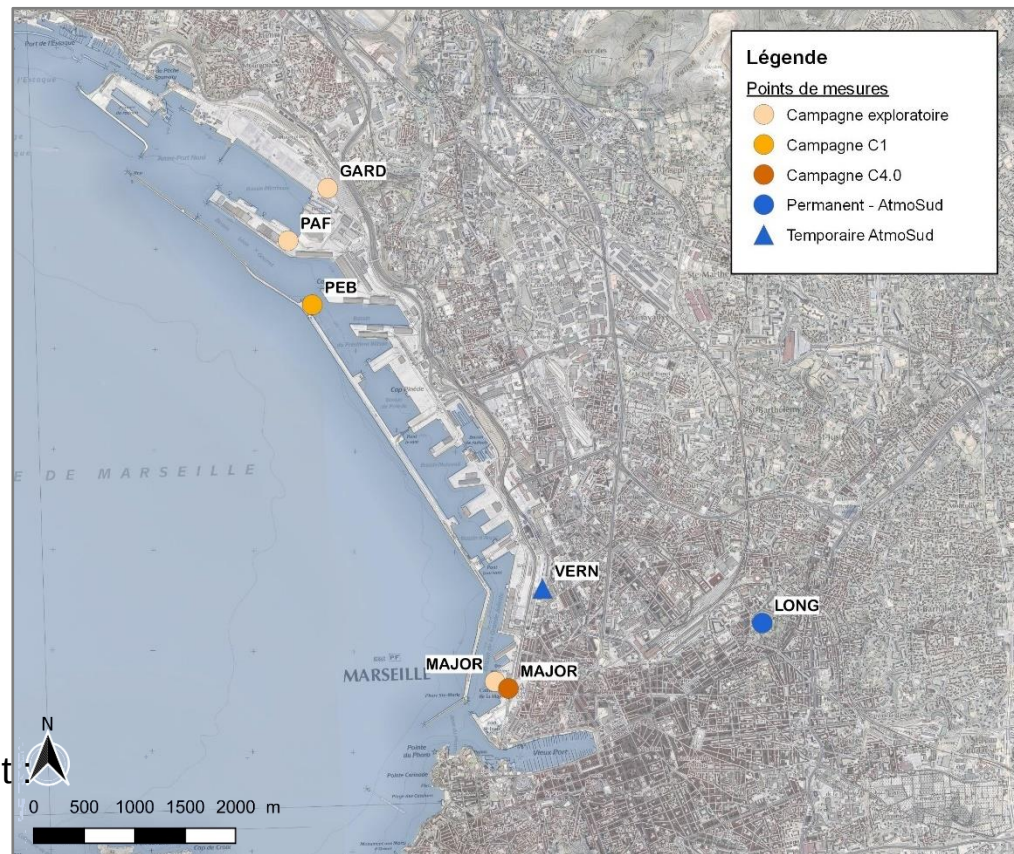
- Du 15/07/2019 au 22/07/2019
- 3 points de mesures :
 - 1 OPC / site

Campagne C1 – projet SCIPPER

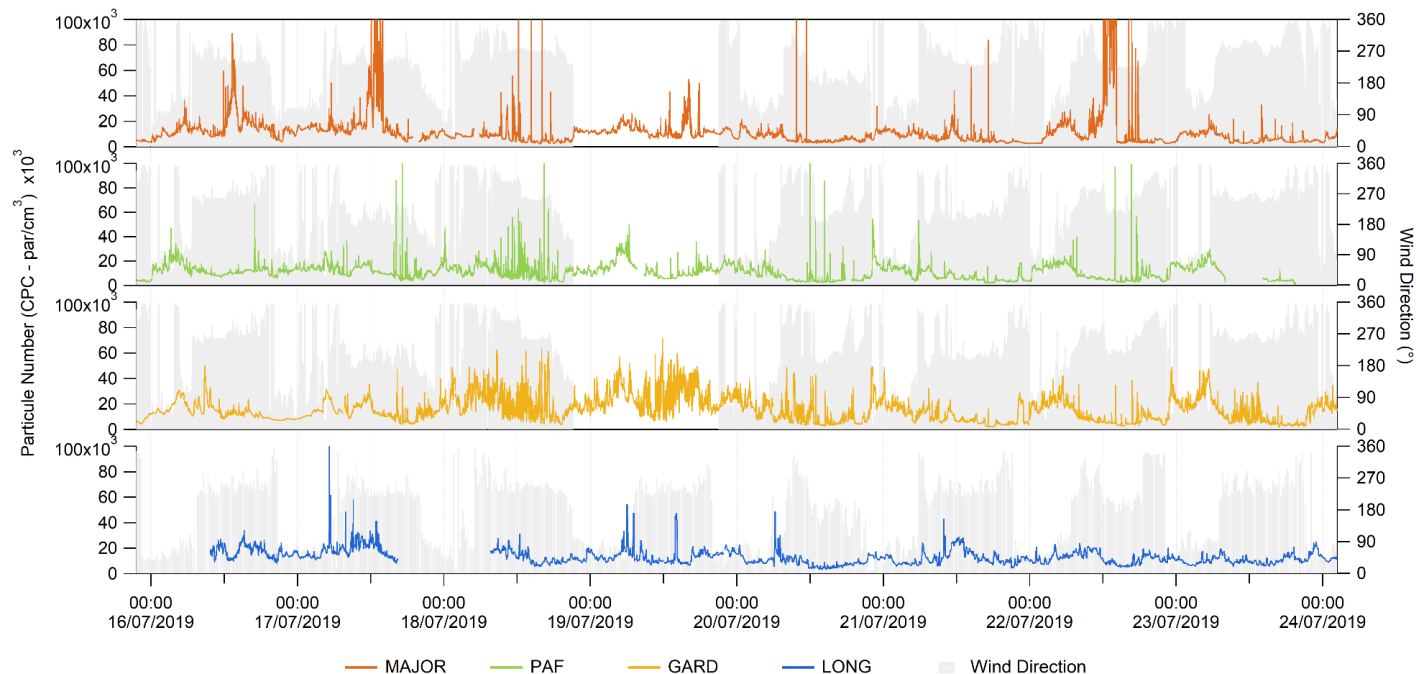
- Du 16/09/2019 au 27/09/2019
- 1 point de mesures avec :
 - OPC
 - CPC
 - SMPS
 - MAAP
 - SO₂
 - O₃
 - NO_x
 - CO₂

Campagne C4.0 – projet SCIPPER

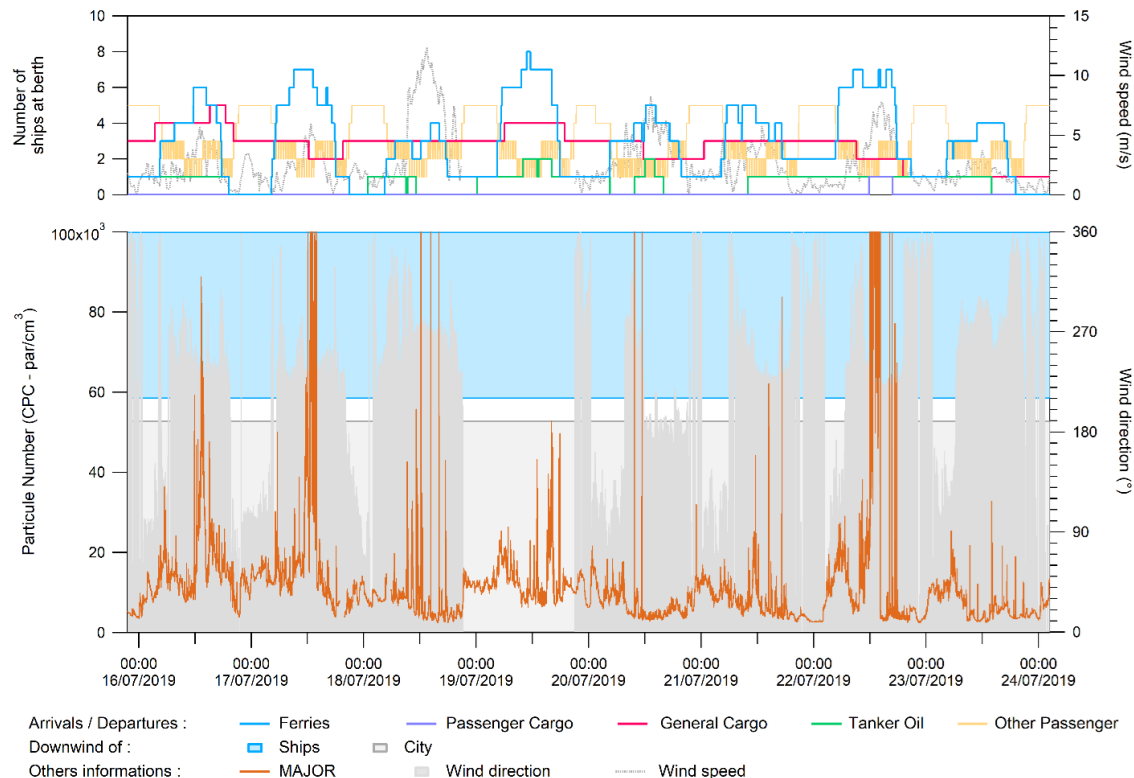
- Du 03/07/2020 au 20/07/2020
- 1 point avec mêmes analyseurs que C1 et :
 - HR-ToF-AMS
 - PTR-ToF-MS
 - PICARRO
 - Filtres métaux



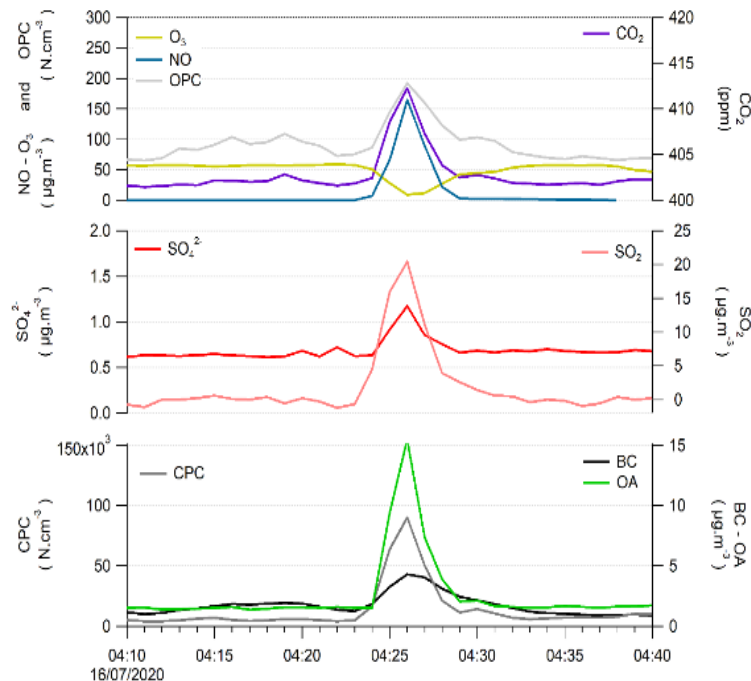
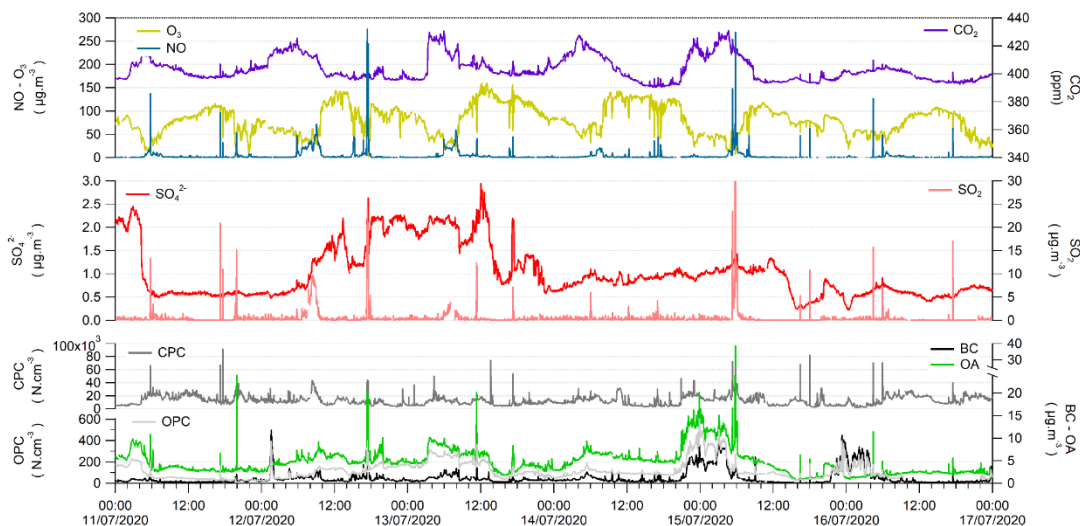
En fonction du point de mesures – panache de différents types de bateaux



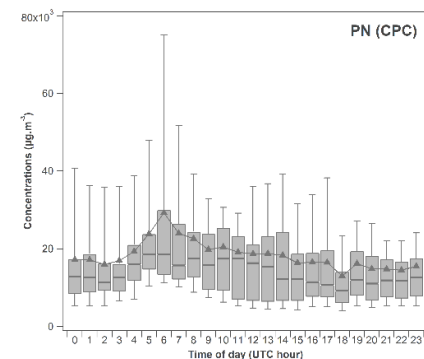
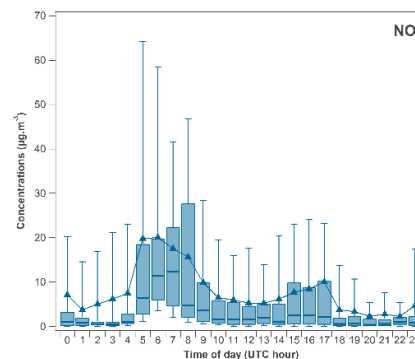
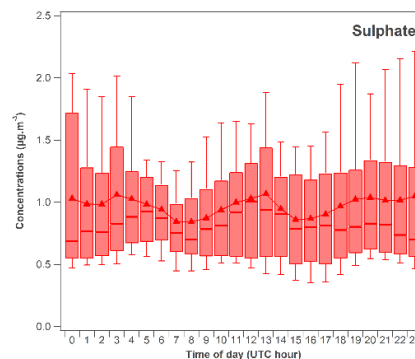
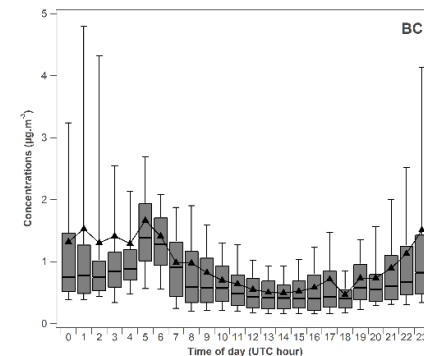
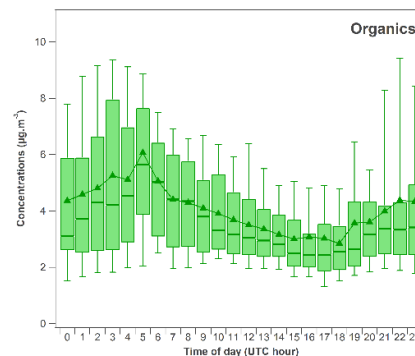
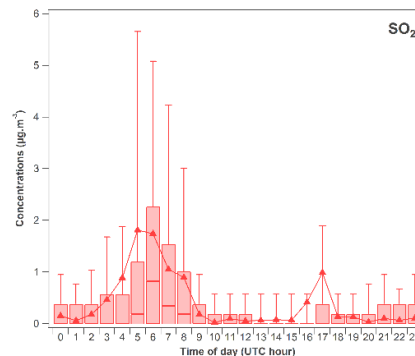
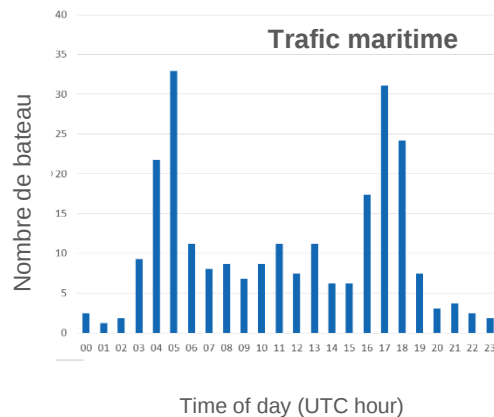
Pics importants corrélés avec les arrivées / départs de croisières ou de ferries



Durée moyenne des panaches : 6 min



Pas si simple d'identifier le pic bateau dans les profils journaliers



Compromis entre positionnement idéal, faisabilités techniques et autorisations du GPMM

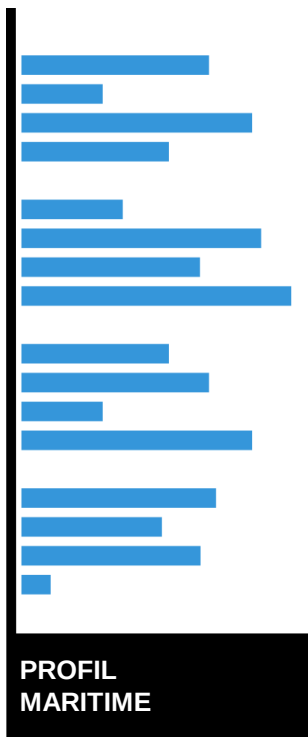
Début de la campagne 1^{er} juin 2021



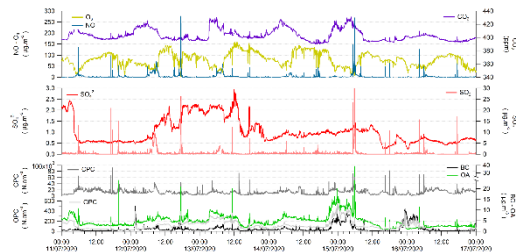
Instrument	Measured Quantity	Size Range	Flow	Time resolution	Point			
Particulate phase					PEB	MAJ	LONG	VERN
HR-ToF-AMS High Resolution - Time of Flight - Aerosol Mass Spectrometer	Size-resolved aerosol chemical composition	30 nm – 600 nm (D_{aero})	0.08 L.min ⁻¹	1 min	X			
ACSM	Size-resolved aerosol chemical composition	< 1 µm					X	
MAAP 5012 Multi Angle Absorption Photometer	Black carbon particle mass concentration	< 1 µm	1 m ³ .h ⁻¹	30 s	X			
AE33 Aethalometer	Black carbon particle mass concentration	< 1 µm				(X)	X	
OPC GRIMM 1.109 Optical Particle Counter based on light scattering cross section	Particle size distribution based on light scattering cross section	0.25 µm – 32 µm (D_{opt})	1.2 L.min ⁻¹	1 min	X	X		
CPC TSI 3776 Condensation Particle Counter	Particle number	2.5 nm – 3 µm	1.5 L.min ⁻¹	1 s	X	(X)	X	
SMPS 3936 with CPC 3775 - Classifier 3080 and Long DMA Scanning Mobility Particle Sizer	Particle size distribution based on electrical mobility	15 nm – 660 nm (D_{mob})	0.3 L.min ⁻¹	2 min	X	X	X	
Xact Energy Dispersive X-Ray Fluorescence : EDXRF	Metals composition	< 1 µm	16.7 L.min ⁻¹	15-30 min	X		X	
FIDAS	Mass concentration PM	1 µm – 2.5 µm – 10 µm					X	X
High volume 150mm diameter quartz fiber filters (Pall-Gelman 2500 QAT-UP)	HAP	< 1 µm	30 m ³ .h ⁻¹	24 h	X			
Gasphase								
PTR-ToF-MS Proton Transfert Reaction - Time of Flight - Mass Spectrometer	Volatils Organics Compounds	N/A	0.15 L.min ⁻¹	10 s	X			
Environnement SA AF21 UV Fluorescence Analyzer	SO ₂	N/A	0.42 L.min ⁻¹	1 min	X	X	X	X
API 200E Chemiluminescence analyze	NO _x , NO, NO ₂	N/A	0.5 L.min ⁻¹	10 s	X	X	X	X
API 400E UV absorption analyzer	O ₃	N/A	0.8 L.min ⁻¹	10 s	X	X	X	
CRDS – PICARRO G2401 Cavity Ring Down Spectrometer	CO ₂ , CO, NH ₄ and H ₂ O mixing ratio	N/A	0.4 L/min	5 s	X			
TD/GC/FID Chromatotec (1) C6-C16 VOC TD/GC/2FID Perkin (1) C2C12 VOC	Volatils Organics Compounds	N/A			X		X	

Objectif 2 : Identification de profil(s) de source(s)

Site(s) de mesures à la source



Time series



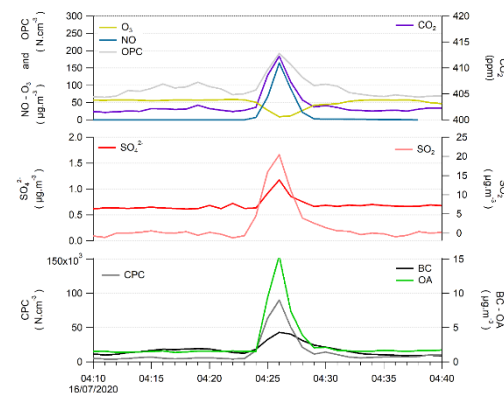
Données AIS

- Arrivée / Départ
- Trajectoire du bateau

Données météorologiques

⇒ Identification des pics associés aux bateaux

⇒ Identification du bateau

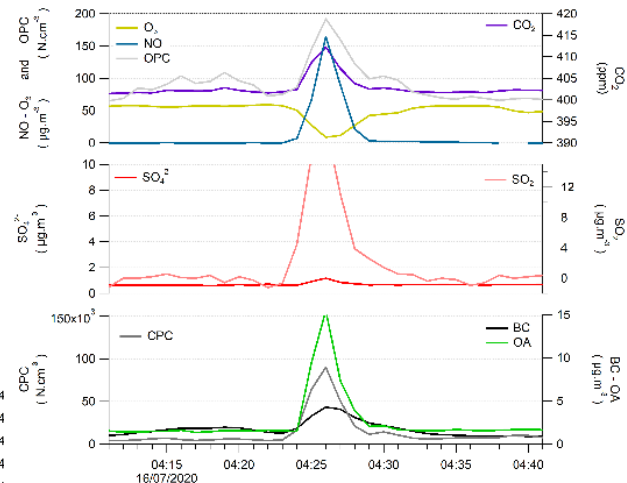
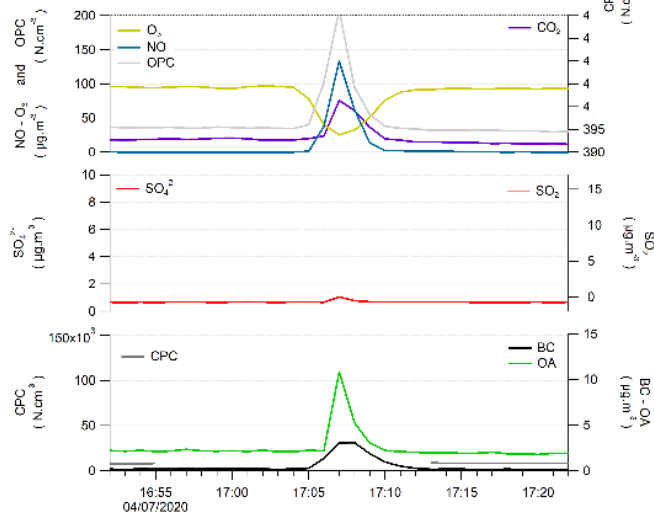
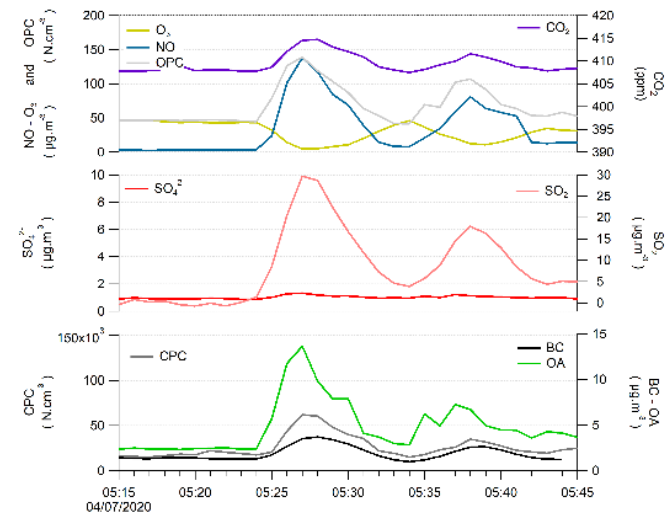


41 pics identifiés clairement – campagne C4

Principalement des ferries

Ship type	Number of plumes	Average of maximum peaks ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Passenger	37	27
Tanker	3	3
Cargo	1	22
Total général	41	16

Passenger : 41 peaks



$$EF_x = \frac{\int_E^G ([x]_G - [x]_G) \cdot dt}{\left(\int_E^G ([CO_2]_G - [CO_2]_G) \cdot dt \right) \cdot \frac{M_C}{M_{CO_2}}} \cdot w_c$$

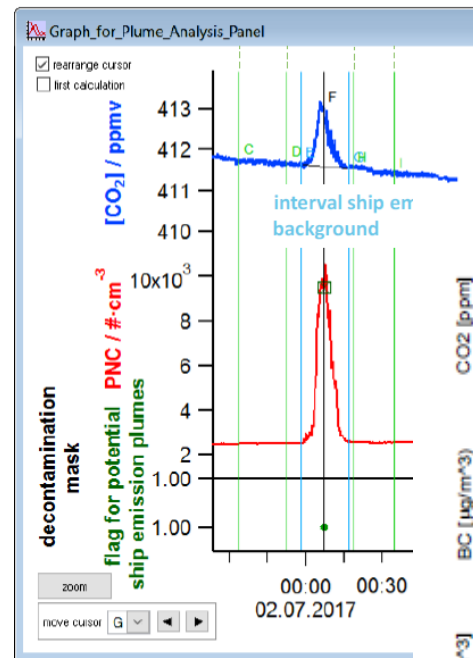
- $[x]$ Concentration du polluant considéré ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)
- $\frac{M_C}{M_{CO_2}}$ Fraction massique de carbone dans le CO_2
- w_c Fraction massique de carbone dans le fuel marin

(Jezek et al., 2015 - Celik et al., 2020)

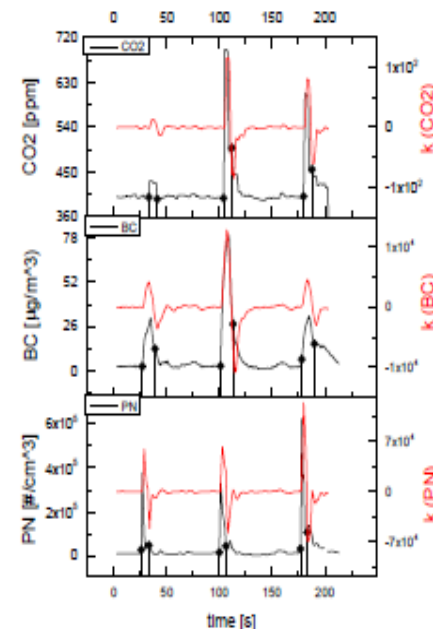
⇒ **Calcul de l'aire sous la courbe en déduisant le background**

- Pour chaque polluant et chaque pic
- $41 \cdot 15 = 615$ aires à calculer

⇒ **Automatisation en cours d'étude pour éviter la subjectivité**



(Celik et al., 2020)

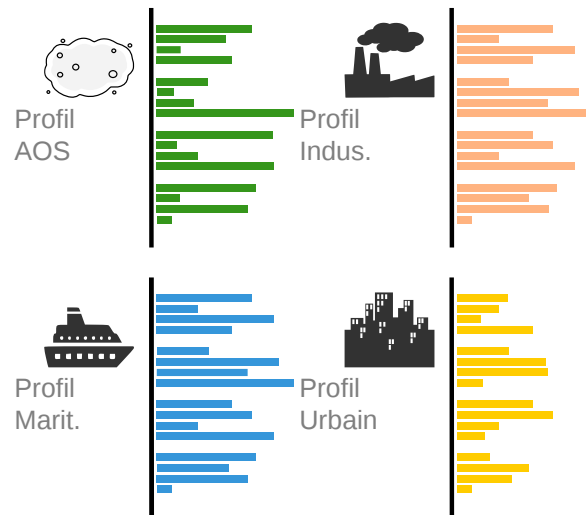


(Jezek et al., 2015)

Objectif 3 : Contribution des émissions maritimes sur la qualité de l'air

Site de mesures du fond urbain
"Marseille - Longchamp"

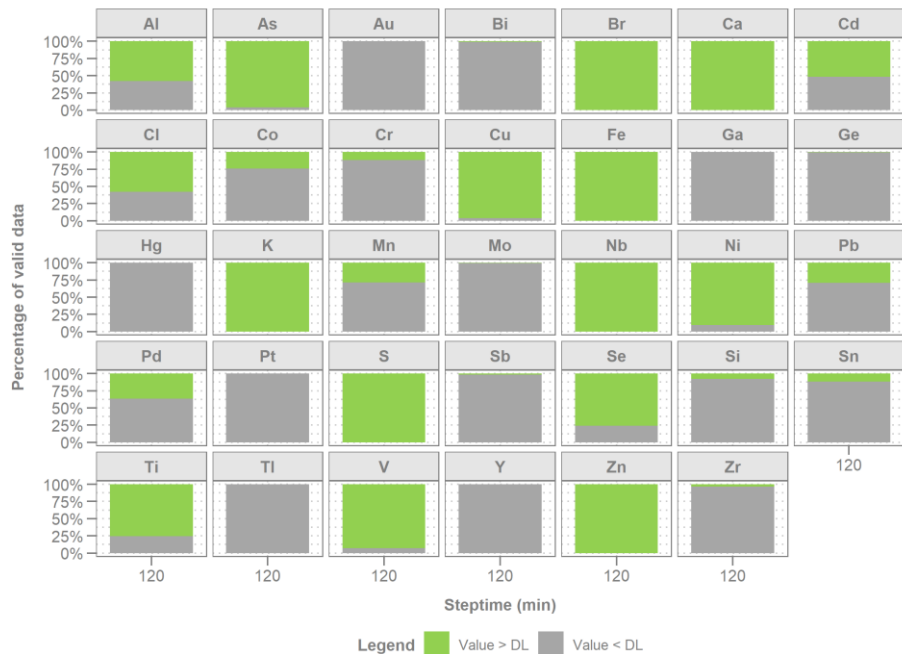
IDENTIFICATION DES SOURCES



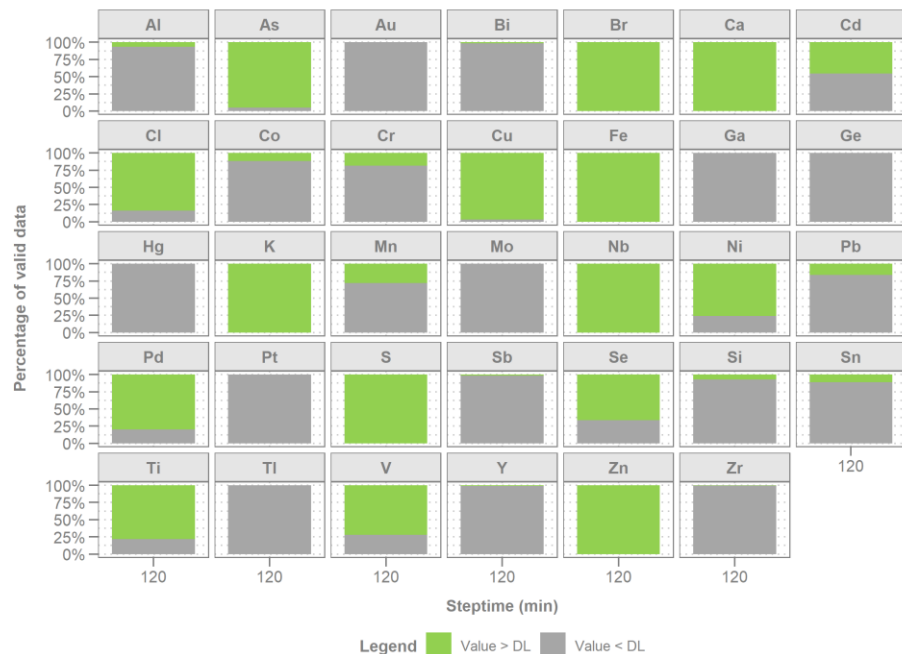
CONTRIBUTION DES SOURCES



Summer 2019

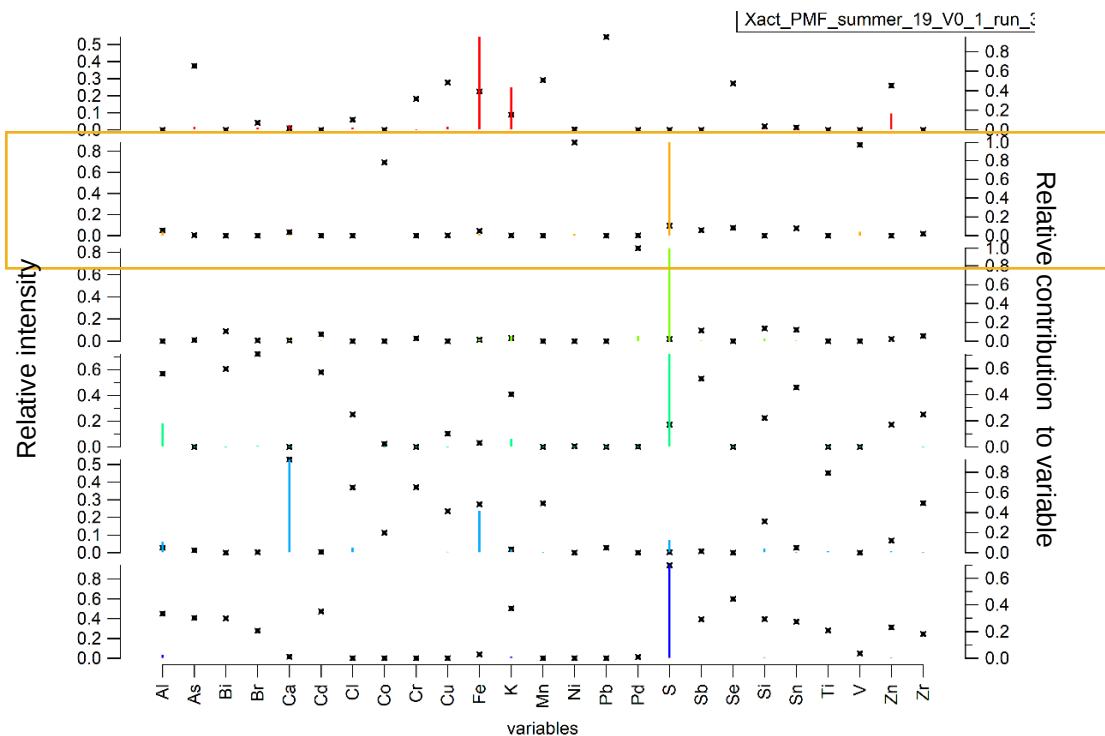


Summer 2020



⇒ 22 métaux étudiés parmi les 35 métaux mesurées

⇒ Liste métaux étudié : As, Br, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Pb, Se, Sn, Ti, V, Zn ,Al, Cl, Pd, S, (Si)



=> Shipping



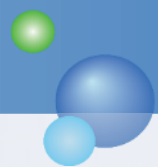
Campagnes été 2021

- Campagne du projet PAREA : juin 2021
- Campagne du projet SCIPPER : juillet 2021

Etablissement des profils des sources et des facteurs d'émissions

Déconvolution des sources (PMF)

- Quelle matrice d'incertitude utilisée ?
- Quelles contraintes choisir ?



MERCI DE VOTRE ATTENTION

Remerciement à :



Horizon 2020

- Aardenne**, J. V., Colette, A., Degraeuwe, B., Hammingh, P., Viana, M., De Vlieger, I., & European Environment Agency. (2013). The impact of international shipping on European air quality and climate forcing (European Environment Agency). Publications Office of the European Union. <http://dx.publications.europa.eu/10.2800/75763>
- Corbett**, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V., & Lauer, A. (2007). Mortality from Ship Emissions : A Global Assessment. Environmental Science & Technology, 41(24), 8512-8518. <https://doi.org/10.1021/es071686z>
- Desquilbet**, L. (2020). Practical guide for the statistical validation of measurement methods : Repeatability, reproducibility, and concordance. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02103716>
- Kasbadji Merzouk**, N., Merzouk, M., & Benyoucef, B. (2007). Profil vertical de la vitesse du vent dans la basse couche limite atmosphérique. In J.-J. BEZIAN (Éd.), JITH 2007 (p. 5p.). ENSTIMAC. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00167271>
- Martinez**, A. (2019). Contribution des composés organiques volatils (COVs) provenant des émissions des véhicules aux aérosols organiques secondaires (AOS) et à la pollution urbaine [Thesis, Lyon]. <http://www.theses.fr/2019LYSE1041>
- Pandolfi**, M., Gonzalez-Castanedo, Y., Alastuey, A., de la Rosa, J. D., Mantilla, E., de la Campa, A. S., Querol, X., Pey, J., Amato, F., & Moreno, T. (2011). Source apportionment of PM10 and PM2.5 at multiple sites in the strait of Gibraltar by PMF: Impact of shipping emissions. Environmental Science and Pollution Research, 18(2), 260-269. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0373-4>
- Sofiev**, M., Winebrake, J. J., Johansson, L., Carr, E. W., Prank, M., Soares, J., Vira, J., Kouznetsov, R., Jalkanen, J.-P., & Corbett, J. J. (2018). Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs. Nature Communications, 9(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02774-9>