Yann Channac
Ingénieur
04 91 32 38 24
yann.channac@atmosud.org
Consulter le site AtmoSud

NOTE TECHNIQUE

ÉVOLUTION DES SULFATES À MARSEILLE 2017-2024

Janvier 2025

SOMMAIRE

Résumé 2
1 Contexte 3
1.1 Baisse du taux de soufre dans les carburants pour navires 3
1.2 Mesures de composés soufrés sur Marseille/Longchamp 3
2 Analyse des données de SO_4^{2-} à Marseille/Longchamp (particules) 4
2.1 Evolution des concentrations en sulfates (SO_4^{2-} sous forme particulaire) 4
2.2 Evolution de la part de sulfate d'ammonium dans les PM2.5 5
2.3 Estimation de la baisse de concentrations de SO_4^{2-} après le changement de réglementation 6
2.3.1 Méthode 1 : moyenne simple sur les périodes avant/après réglementation 6
2.3.2 Méthode 2 : reconstitution de profils saisonniers avant/après réglementation 6
3 Conclusion 7

RESUME

Quel impact de la baisse de soufre du carburant des navires sur la qualité de l'air ?

Pour suivre la quantité de soufre dans l'atmosphère, AtmoSud mesure le dioxyde de soufre (SO_2) qui est un gaz, mais aussi les sulfates (SO_4^{2-}), qui existent sous forme de particules ou de liquides présents dans l'air.

Les niveaux de dioxyde de soufre ont fortement baissé ces 15 dernières années (avec notamment en 2005 l'adoption de carburants désoufrés pour les automobiles) et les concentrations de SO_2 observées actuellement ne permettent pas de voir l'impact du changement de carburant des navires.

En revanche les mesures de sulfates ont permis à AtmoSud d'observer, entre 2017 et 2024, **un abattement de 44 à 45 % des concentrations sur le site de Marseille/Longchamp** depuis la mise en œuvre de la nouvelle réglementation. Sur la même période, les concentrations de PM2.5 observées à Marseille/Longchamp, sont passées de 11.3 µg/m³ avant la réglementation à 9.5 µg/m³ après, soit une baisse de 1.8 µg/m³. La baisse des sulfates d'ammonium est donc responsable de **52% de la baisse des PM2.5** sur ce site, ce qui est très significatif.

Ces résultats concernent la baisse du taux de soufre de 3.5 % à 0.5 % mise en place en 2020, la décision de l'OMI de réduire le taux de soufre à 0.1 % au 1er mai 2025 devrait encore améliorer la situation.

1 CONTEXTE

1.1 Baisse du taux de soufre dans les carburants pour navires

Depuis le 1er janvier 2020, la réglementation de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) impose un taux de soufre maximum dans les carburants marins de 0.5% (contre 3.5% auparavant). L'objectif est de réduire les émissions d'oxydes de soufre par le transport maritime.

1.2 Mesures de composés soufrés sur Marseille/Longchamp

L'origine du soufre dans l'atmosphère est diverse. En région Sud l'activité industrielle constitue la première source d'émission d'oxydes de soufre (SOx), avec 88% du total régional en 2020[1]. Dans l'atmosphère les combustions produisent majoritairement du dioxyde de soufre (SO_2) gazeux qui s'oxyde lentement en sulfate (SO_4^{2-}), sous forme particulaire ou liquide selon les conditions du milieu (principalement sous forme de sulfate d'ammonium $SO_4(NH_3)_2$ ou d'acide sulfurique H_2SO_4)[2].

Depuis de nombreuses années, AtmoSud a équipé son site de Marseille/Longchamp[3] de plusieurs appareils de mesures qui permettent de suivre l'évolution des concentrations des composés soufrés dans une situation de fond, loin des sources d'émissions de ce polluant :

- Dioxyde de soufre (SO_2) – gazeux - depuis janvier 2005
- Sulfate (SO_4^{2-}) – particulaire ou liquide - depuis janvier 2017
- Soufre élémentaire S dans les PM1 – particulaire - depuis janvier 2020

Les concentrations de SO_2 observées actuellement sont faibles, trop proches de la limite de précision de l'analyseur pour permettre de distinguer l'influence du changement de carburant. Les mesures de soufre élémentaire n'ont démarré qu'après le changement de réglementation. En revanche, les mesures de sulfates présents dans les particules permettent d'étudier un éventuel impact de cette nouvelle réglementation sur la qualité de l'air.

Les sulfates sont généralement associés à des ions ammonium dans l'air ambiant. Le sulfate d'ammonium représente 1.375 fois la masse du sulfate seul.

[1] Inventaire des émissions AtmoSud consultable sur https://cigale.atmosud.org/

[2] Ouvrage de la documentation française – Primequal-Predit – Collection Synthèses. Pollution par les particules atmosphériques: état des connaissances et perspectives de recherche. 2005

[3] Mesures en temps réel consultables sur https://www.atmosud.org/

2 ANALYSE DES DONNEES DE SO_4^{2-} À MARSEILLE/LONGCHAMP (PARTICULES)

2.1 Evolution des concentrations en sulfates (SO_4^{2-} sous forme particulaire)

Les sulfates sont mesurés par un analyseur ACSM (Spectromètre de masse qui analyse la fraction organique des particules en ligne). Le fonctionnement de cet analyseur de laboratoire est soumis à des contraintes importantes. En conséquence, le taux de disponibilité des données horaires varie selon les années, comme présenté dans le tableau ci-dessous :

Année	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024*
Taux de disponibilité (%)	73	74	26	81	51	93	76	45

*Remarque : toutes les données 2024 utilisées dans ce document correspondent à une année partielle, jusqu'au 04/10/24.

Les concentrations de sulfate mesurées à Marseille/Longchamp ont une saisonnalité marquée, avec des niveaux plus importants en été (Figure 1).

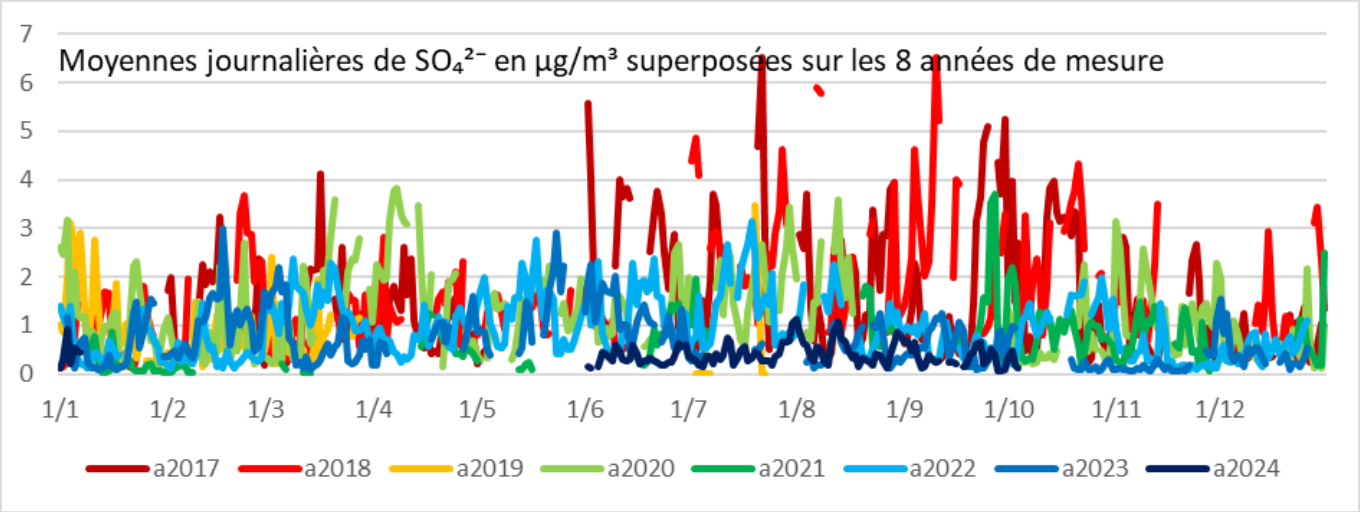

Figure 1 : Moyennes journalières en sulfate (SO_4^{2-}) exprimées en µg/m³ de 2017 à 2024.

2.2 Evolution de la part de sulfate d'ammonium dans les PM2.5

Comme indiqué précédemment, le sulfate est principalement lié à l'ammonium sous la forme $SO_4(NH_3)_2$. La masse de $SO_4(NH_3)_2$ est donc approximativement de 1.35 fois la masse de SO_4^{2-}. La part des sulfates d'ammonium dans les particules fines observées à Marseille a représenté jusqu'à 70 % de la masse totale des PM2.5 observée. Cette part a cependant baissé, de 20-50% en moyenne en 2017-2018, à 10-25% environ en 2022 et 5-15% durant l'été 2024 (Figure 2 et Figure 3).

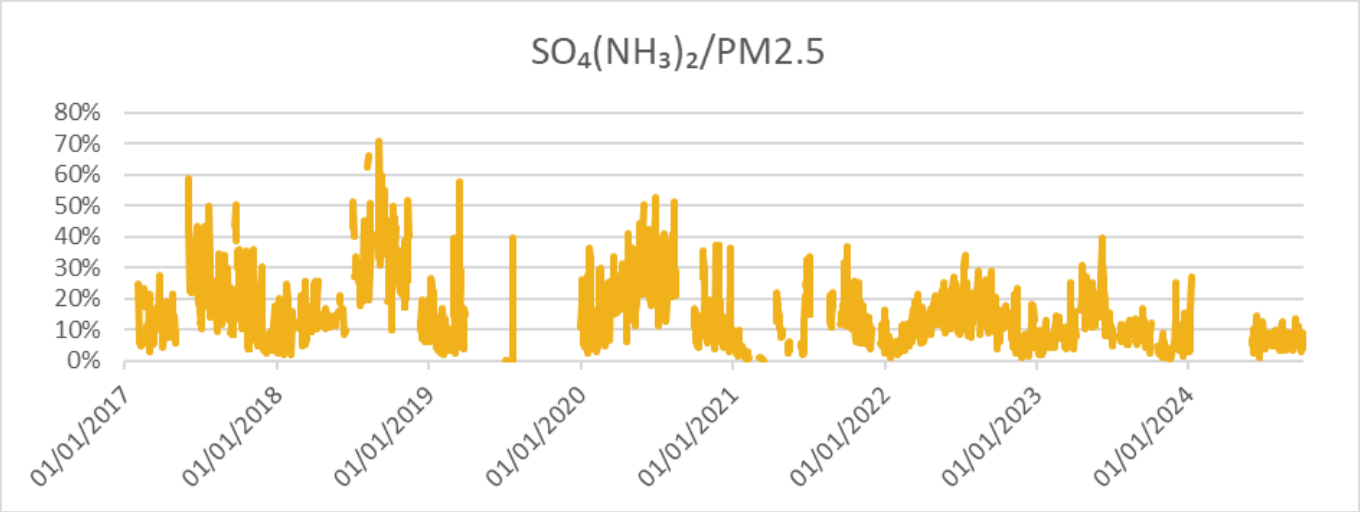

Figure 2 : contribution du sulfate d'ammonium $SO_4(NH_3)_2$ à la concentration en particules fines PM2.5, exprimée en %, de 2017 à 2024

En effet, le SO_4^{2-} continue à baisser progressivement après 2020, plus rapidement que le reste des particules fines (PM2.5).

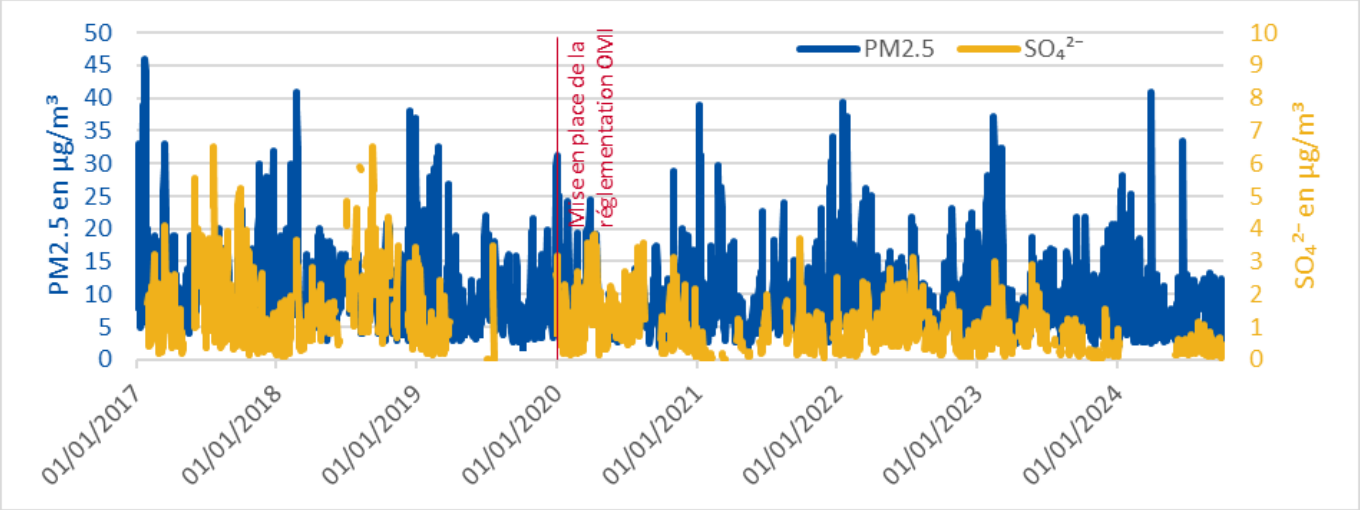

Figure 3 : évolution des concentrations journalières de SO_4^{2-} et de PM2.5 sur le site de Marseille/Longchamp

2.3 Estimation de la baisse de concentrations de SO_4^{2-} après le changement de réglementation

Pour étudier l'évolution des concentrations en sulfate avant et après la nouvelle règlementation entrée en vigueur le 1er janvier 2020 (passage à 0.5 % de soufre dans les carburants marins), deux méthodes ont été utilisées.

2.3.1 Méthode 1 : moyenne simple sur les périodes avant/après réglementation

- Moyenne 2017-2019 : 1.51 µg/m³ (taux de disponibilité 57%)
- Moyenne 2020-2024 : 0.84 µg/m³ (taux de disponibilité 76%)

Le rapport des moyennes des deux périodes est de 0.56, indiquant un abattement de 44%, correspondant à une baisse de 0.67 µg/m³ des sulfates depuis la mise en place de la nouvelle réglementation, soit une baisse estimée de 0.90 µg/m³ des sulfates d'ammonium.

2.3.2 Méthode 2 : reconstitution de profils saisonniers avant/après réglementation

L'utilisation sur plus de deux ans de données permet de limiter l'influence des interruptions de fonctionnement, mais ne permet pas de s'assurer d'une bonne prise en compte de la saisonnalité. La deuxième méthode vise à reconstituer un profil annuel moyen à partir des séries de trois années avant/après réglementation.

Pour chaque période Avant (2017-2019) et Après (2020-2024), on calcule une valeur quotidienne de la manière suivante pour chaque date [JJ/MM] :

- Moyenne de toutes les valeurs horaires de JJ-6/MM à JJ/MM de chaque année utilisée, si le nombre de données disponibles sur la plage considérée est au moins 25% du nombre d'heures total de la plage.
- Exemple pour le 07/01 avant réglementation : moyenne des valeurs horaires du 01/01/2017 au 07/01/2017, du 01/07/2018 au 07/01/2018 et du 01/01/2019 au 07/01/2019, soit 1.31 µg/m³, calculée avec 317 données disponibles sur les 504 heures de la plage, soit 63% de données disponibles.

Les résultats de cette reconstitution donnent :

- Moyenne 2017-2019 : 1.55 µg/m³ (taux de disponibilité 91%)
- Moyenne 2020-2024 : 0.85 µg/m³ (taux de disponibilité 98%)

Le rapport des moyennes des deux périodes reconstituées est de 0.55, indiquant un abattement de 45%, correspondant à une baisse de 0.70 µg/m³ des sulfates depuis la mise en place de la nouvelle réglementation, soit une baisse estimée de 0.94 µg/m³ des sulfates d'ammonium.

La reconstitution de ces profils saisonniers indique un abattement plus important durant les saisons estivales et automnales (Figure 4).

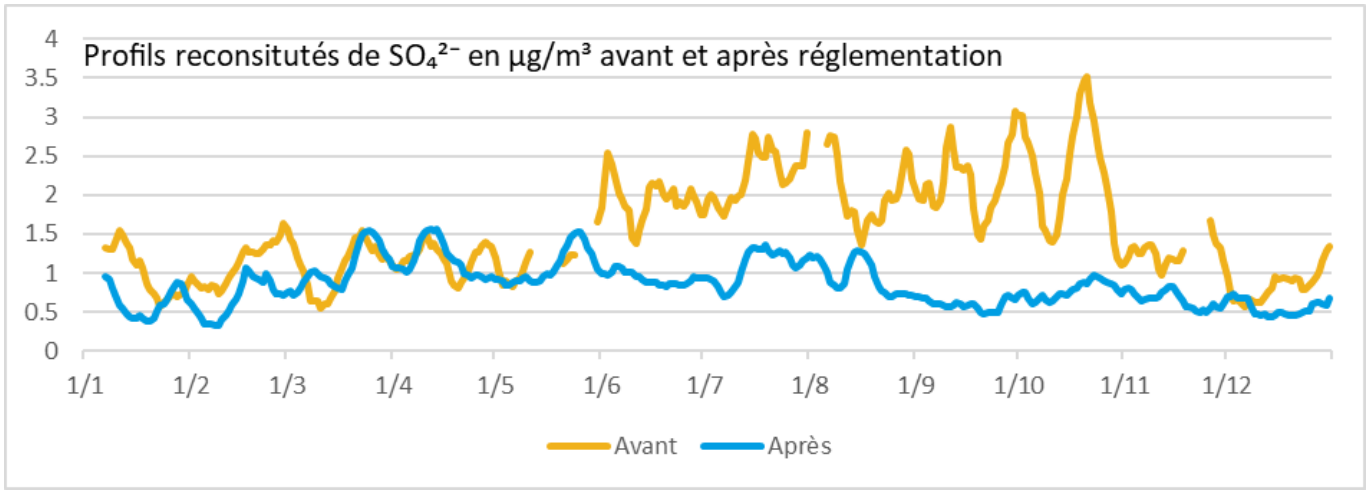

Figure 4 : reconstitution des profils journaliers en sulfate (SO_4^{2-}) exprimés en µg/m³ avant la nouvelle règlementation sur les carburants marins (2017-2019) et après (2020-2024)

3 CONCLUSION

Les deux méthodes donnent des résultats similaires, et montrent un **abattement de 44 à 45 %** des concentrations de sulfates sur le site de Marseille/Longchamp depuis la mise en œuvre de la nouvelle réglementation de l'OMI. Cet abattement correspond à une **baisse de concentrations de 0.67-0.70 µg/m³** environ. Les sulfates étant généralement associés à des ions ammonium dans l'air ambiant, la **baisse de concentration de sulfate d'ammonium peut être estimée à 0.90-0.94 µg/m³.**

Sur la même période, les concentrations de PM2.5 observées à Marseille/Longchamp, sont passées de 11.3 µg/m³ avant la réglementation à 9.5 µg/m³ après, soit une baisse de 1.8 µg/m³. La baisse des sulfates d'ammonium est donc responsable de **52 % de la baisse des PM2.5** sur ce site, ce qui est très significatif.

Rappelons que la baisse des émissions du taux de soufre a un impact pour tous les riverains de la méditerranée, pas seulement à proximité des ports. La décision de l'OMI de réduire le taux de soufre à 0.1 % au 1er mai 2025 devrait encore améliorer la situation (https://www.ineris.fr/fr/ineris/actualites/ecamed-conclusions-etude-faisabilite-technique-mise-oeuvre-zone-reduction).

www.atmosud.org

AtmoSud
Inspirer un air meilleur

A propos d'AtmoSud

Siège social
146 rue Paradis « Le Noilly Paradis »
13294 Marseille Cedex
Tel. 04 91 32 38 00
Fax 04 91 32 38 29
Contact.air@atmosud.org

Etablissement de Martigues
06 Route de la Vierge
13500 Martigues
Tel. 04 42 13 01 20
Fax 04 42 13 01 29

Etablissement de Nice
37 bis avenue Henri Matisse
06200 Nice
Tel. 04 93 18 88 00

SIRET : 324 465 632 00044 – APE – **NAF :** 7120B – **TVA intracommunautaire :** FR 65 324 465 632