

[🔗 Consulter le site AtmoSud](#)

## DOSSIER THÉMATIQUE

### L'OZONE EN 5 POINTS

Septembre 2023

#### SOMMAIRE

La région Sud, région la plus touchée de France par les épisodes de pollution à l'ozone.....	2
1 L'Ozone : un gaz bon ou mauvais ? .....	3
2 La formation de l'ozone en basse atmosphère .....	4
3 Les conditions météorologiques favorables à la photochimie .....	8
4 Au delà de l'ozone, les oxydants .....	10
5 Dynamique journalière d'un épisode de pollution : le 23/08/2023 .....	12
Bibliographie .....	13

#### Contact

Rédaction : Yann CHANNAC – Sonia OPPO

## LA REGION SUD, REGION LA PLUS TOUCHEE DE FRANCE PAR LES EPISODES DE POLLUTION A L'OZONE

La région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur est la région en France où s'observent les concentrations moyennes les plus élevées et le plus grand nombre d'épisodes de pollution à l'ozone. C'est également l'une des régions d'Europe les plus touchées par cette pollution. Du fait de l'apport de la troposphère libre continentale, les concentrations moyennes d'ozone sont relativement homogènes sur la région avec des niveaux proches de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Valeur Cible pour la protection de la santé) : 87% du territoire et 76% de la population de la région étaient concernés par un dépassement de ce seuil en 2022.

Les niveaux moyens les plus élevés sont répartis suivant une bande qui ceinture le centre des Bouches-du-Rhône, le Vaucluse, le sud des Alpes de Haute-Provence et le département du Var (Figure 1). C'est également dans cette zone, essentiellement rurale, que s'observe le plus grand nombre de dépassements du seuil d'information-recommandations ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne horaire). Enfin, il s'agit du secteur géographique qui reçoit les masses d'air polluées, émises essentiellement par le pôle industriel de Marseille-Berre, et qui viennent s'ajouter à la pollution locale et continentale, en particulier en période estivale.

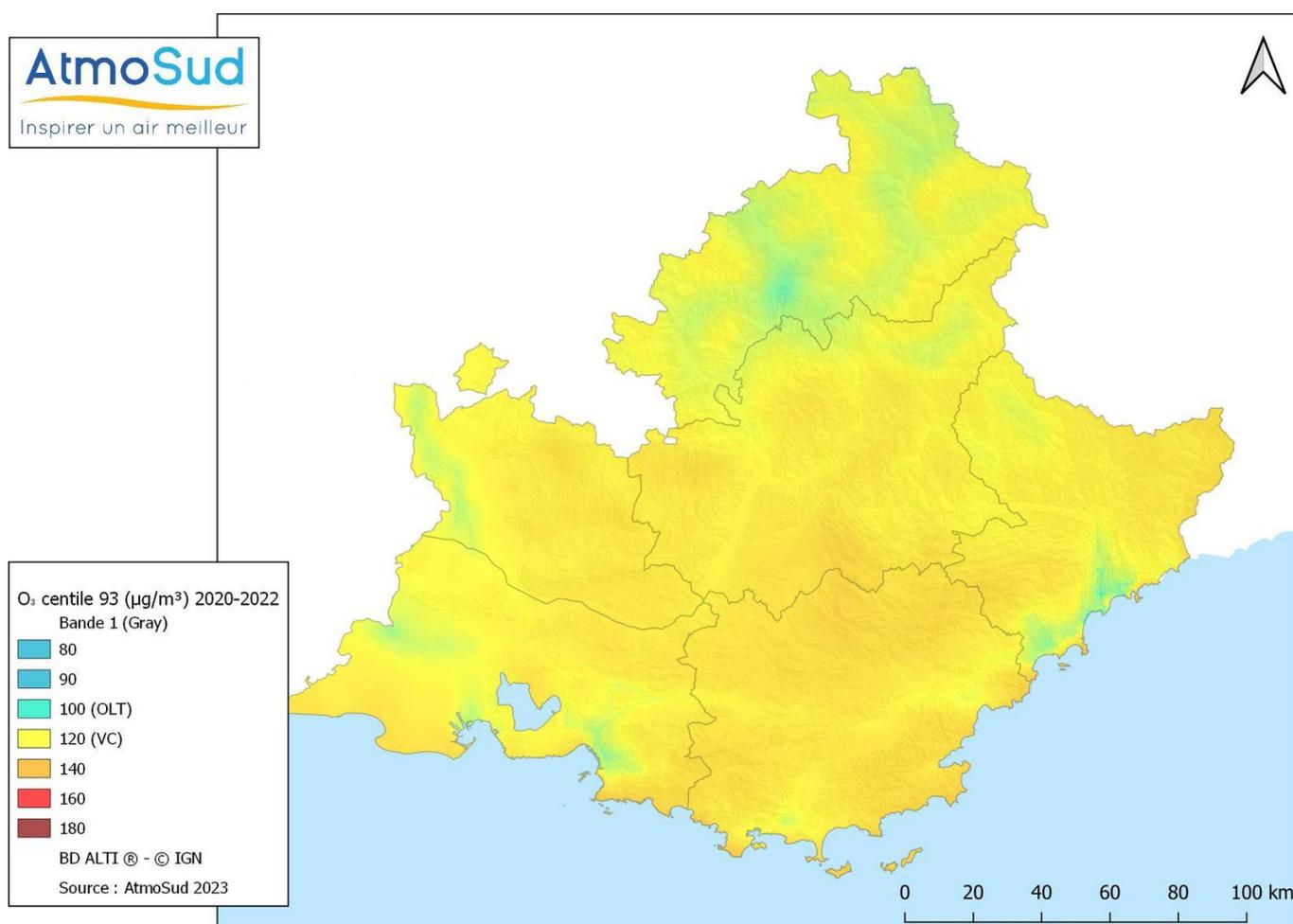


Figure 1 : Cartographie de l'ozone sur la région Sud (centile 93 des maximums journaliers des moyennes 8h, moyenne 2020-2022)

Le centile 93 des maximums journaliers des moyennes sur 8h correspond au 25<sup>e</sup> maximum journalier le plus élevé dans l'année. La valeur cible européenne autorise 25 jours de dépassement du seuil  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en maximum journalier des moyennes sur 8h (en moyenne sur 3 ans). Une valeur de centile 93 supérieure à  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  signifie donc un dépassement de la valeur cible.

# 1 L'OZONE : UN GAZ BON OU MAUVAIS ?

L'ozone est une molécule composée d'oxygène ( $O_3$ ) qui se trouve naturellement dans l'atmosphère terrestre (Figure 2) :

- au niveau de la stratosphère, où il constitue la « couche d'ozone » ;
- dans la troposphère, où il est un des produits de la pollution photochimique au niveau du sol.

Selon l'altitude à laquelle il se trouve, l'ozone n'a pas les mêmes impacts sur l'Homme et son environnement.

## ► L'ozone stratosphérique ou le « bon ozone » de la couche d'ozone

L'ozone stratosphérique se trouve dans la stratosphère, généralement entre 10 et 50 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre. Il forme la couche d'ozone et joue un rôle crucial en protégeant la vie sur Terre en absorbant une grande partie des rayons ultraviolets (UV) du soleil, en particulier les rayons UV-C et une grande partie des rayons UV-B. Cette absorption est vitale car les rayons UV peuvent être très nocifs pour les organismes vivants, y compris les êtres humains, s'ils y sont exposés en excès.

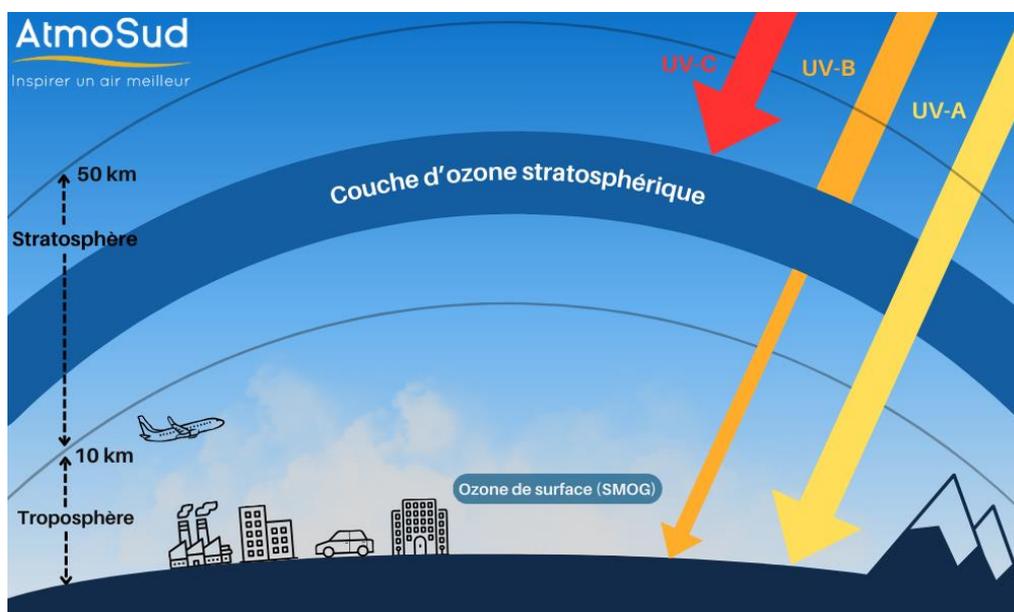


Figure 2 : Ozone stratosphérique et ozone troposphérique

## ► L'ozone troposphérique ou le « mauvais ozone » produit de la pollution photochimique

La troposphère est la couche la plus basse de l'atmosphère, située de la surface de la Terre jusqu'à environ 10 kilomètres d'altitude. Au niveau du sol, la concentration d'ozone est naturellement faible. Cependant, les polluants issus des activités humaines, sous l'effet du rayonnement solaire, produisent un « smog », un nuage de pollution photochimique, qui contient notamment de l'ozone (Figure 3). Ce gaz est nocif pour la santé [1] et induit chaque année des coûts importants du fait de son impact sanitaire mais également de son impact sur les cultures [2]. De plus, ce polluant secondaire est un gaz à effet de serre avec un forçage radiatif de  $0.35 \text{ W/m}^2$ , ayant un impact démontré sur le changement climatique [3].

Au niveau continental, cette pollution se traduit par une augmentation globale du niveau de fond troposphérique en ozone depuis plus d'un siècle [4]. En Europe, la concentration estivale diurne dans la troposphère libre (vers 2 km d'altitude) est ainsi passée de 20 à  $100 \mu\text{g/m}^3$  entre le début et la fin du XXe siècle [5].

Au niveau local, durant la période estivale, cette pollution se traduit par des pics d'ozone observés en périphérie des centres d'activités majeurs (métropoles, zones industrielles).



Figure 3 : Exemple de smog photochimique à Marseille lors d'un pic de pollution à l'ozone. Pour en savoir plus : [https://youtu.be/Ktj\\_J7sDm6U](https://youtu.be/Ktj_J7sDm6U)

## 2 LA FORMATION DE L'OZONE EN BASSE ATMOSPHERE

À basse altitude, l'ozone est formé par réaction chimique entre le rayonnement solaire et des polluants précurseurs émis localement comme les oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>) et les composés organiques volatils (COV). L'ozone est ainsi un « traceur » de la pollution photochimique, mais celle-ci ne se limite pas à l'ozone, d'autres polluants oxydants sont produits en même temps que l'ozone (peroxydes, aérosols organiques secondaires, nitrates organiques...).

### ► Cycle de l'ozone

Les réactions photochimiques déclenchées par l'effet du rayonnement solaire sur les polluants précurseurs sont appelées dans la Figure 4 qui intègre les processus cycliques démontrés par Chapman (1930) [6].

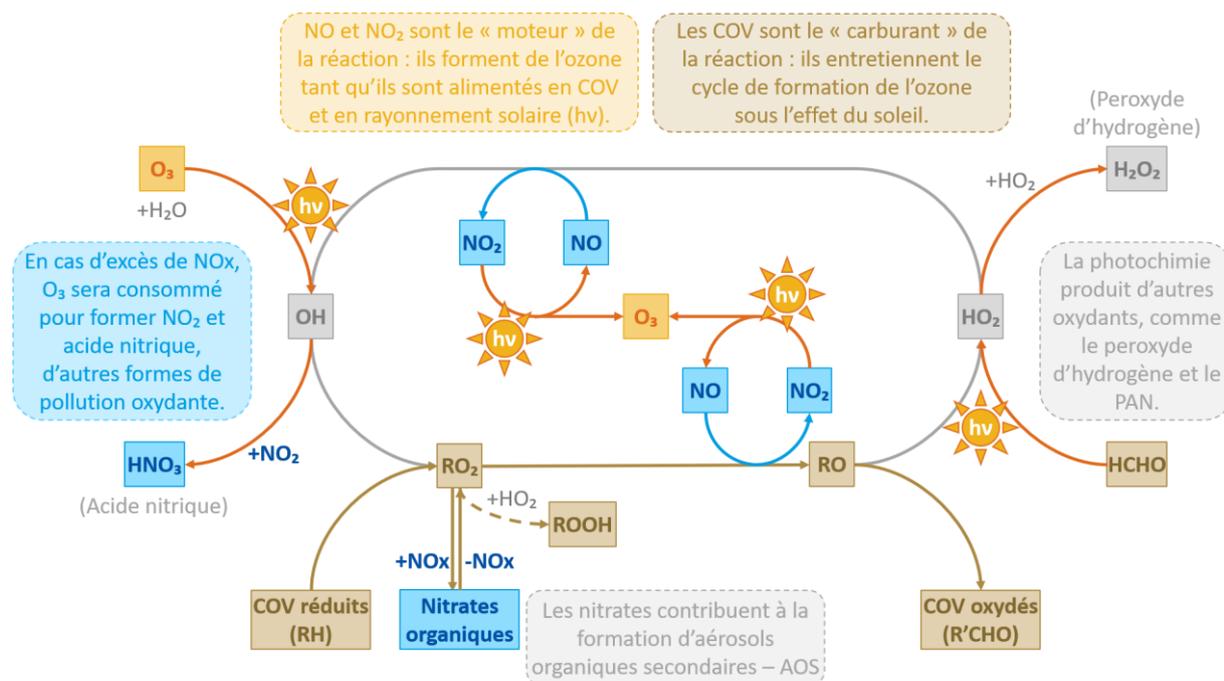


Figure 4 : Cycle de l'ozone (AtmoSud, 2021, [7] d'après Camredon et Aumont, 2007 [8])

Les conditions de formation de l'ozone sont également contrôlées par la concentration relative en NO<sub>x</sub> et COV de l'atmosphère (Figure 5). Dans le cas où les NO<sub>x</sub> sont fortement excédentaires par rapport aux COV, la concentration d'ozone sera moindre que dans la situation inverse. En effet, en cas d'excès de NO<sub>x</sub>, une partie de l'ozone va être

consommée au fur et à mesure de sa production dans d'autres réactions chimiques. Notamment, le NO va être converti plus rapidement en NO<sub>2</sub>, et le NO<sub>2</sub> va être converti en acide nitrique et nitrates organiques (aérosols organiques secondaires AOS). Ainsi, une concentration d'ozone plus faible à proximité des sources de pollution ne signifie pas que la pollution est moins importante, mais plutôt qu'elle est répartie sous des formes chimiques différentes.

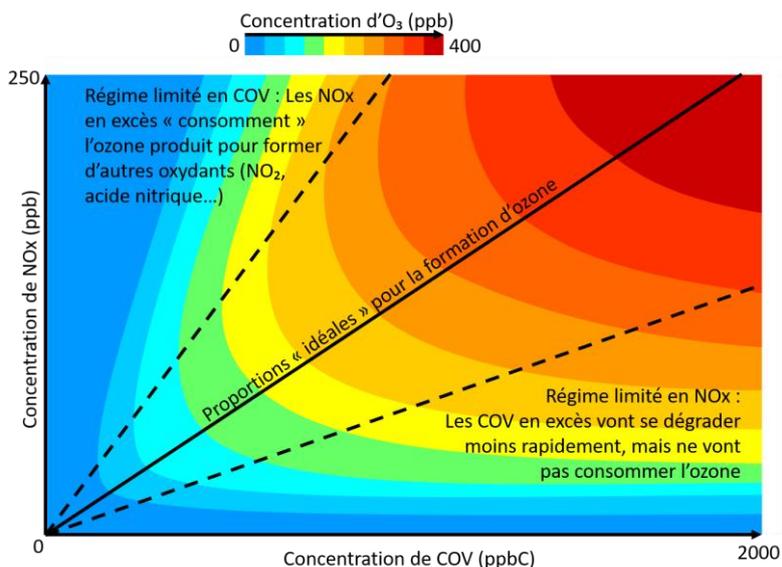


Figure 5 : Formation de l'ozone selon différentes proportions de NO<sub>2</sub> et de COV (Source : AtmoSud 2021 [6])

### ► Un inventaire des émissions régional pour identifier les sources de polluants et les leviers d'actions

Un inventaire des émissions atmosphériques est réalisé chaque année par AtmoSud pour mettre à jour l'état des connaissances sur le territoire régional (Figure 6). L'évolution et la répartition sectorielle des précurseurs d'ozone comme les NOx et les COV sont notamment surveillés afin de communiquer sur les leviers d'action pour améliorer la qualité de l'air. De plus, ces émissions sont également intégrées dans les modèles de prévision de la qualité de l'air d'AtmoSud afin d'être au plus proche des dynamiques physico-chimiques régionales.

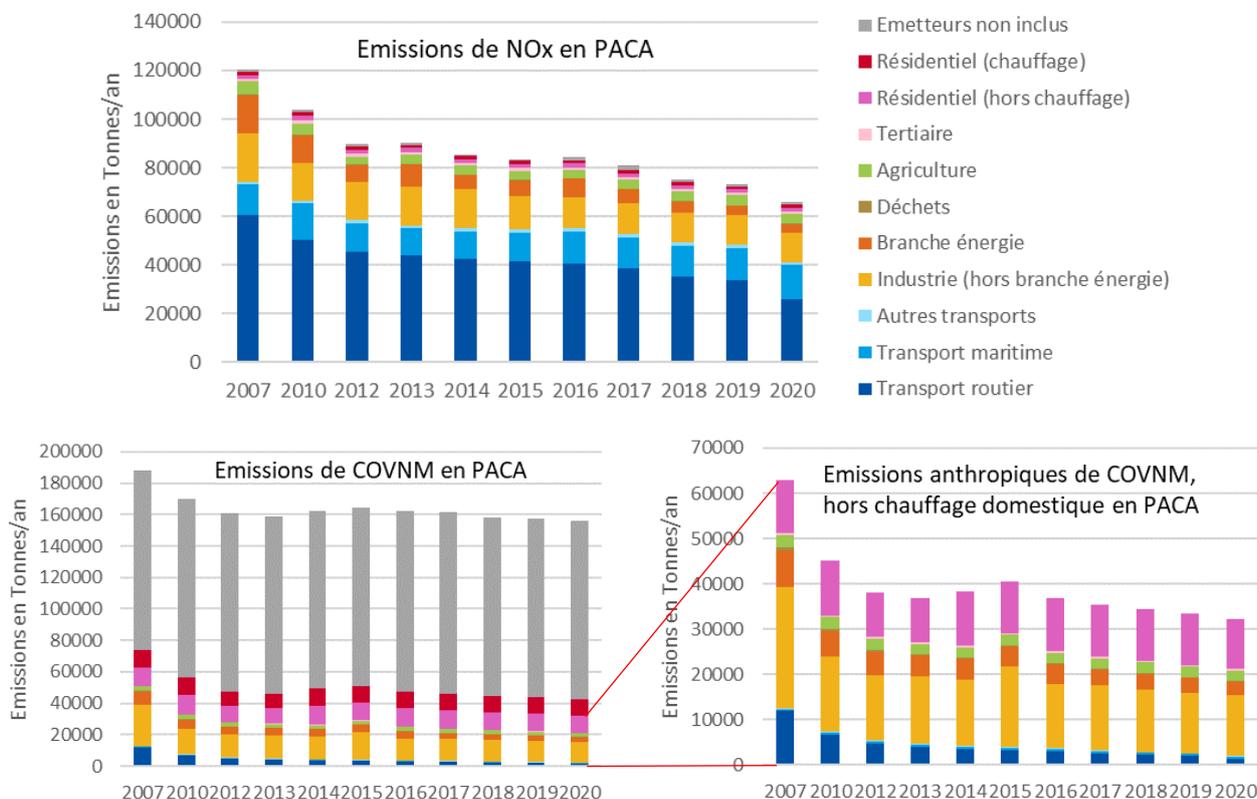


Figure 6 : Émissions de NOx et de COVNM en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Source : CIGALE 2023). Les émissions de COVNM du chauffage domestique sont exclues de l'analyse ci-dessous dans la mesure où ces émissions, hivernales, ne contribuent pas aux pics d'ozone observés en été.

### Les émissions de NOx

Les émissions d'oxydes d'azote sont généralement en baisse sur la région : -46% en 13 ans (Figure 6). Le trafic routier représente près de la moitié des émissions (46%) en 2019 (avant la pandémie), malgré une baisse de -44%.

Le transport maritime représente la deuxième source d'émissions de NOx (18%) en 2019. Ces émissions ont augmenté de 5% depuis 2007, et sont localisées dans les principaux ports, en premier lieu celui de Marseille/Fos. Les émissions industrielles sont la troisième source (16%), malgré une baisse de -39%. La production d'énergie est passée en 4<sup>ème</sup> place des secteurs émetteurs (6%) : une baisse de -74% des émissions de NOx de ce secteur est enregistrée depuis 2007.

### Les émissions de COV

La végétation naturelle est la principale source d'émissions de composés organiques volatils non méthaniques en région Sud : 72% (cf. Figure 6 ci-dessus). Cette part est stable sur les dernières années. Les émissions anthropiques hors chauffage domestique, elles, sont en baisse sur la région : -47% entre 2007 et 2019.

L'industrie représente 40% des émissions anthropiques hors chauffage de la région, suivi du secteur résidentiel (34%), de la production d'énergie (10%) et du transport routier (6%). Le secteur résidentiel (hors chauffage) n'a réduit ses émissions que de -3% entre 2007 et 2019, tandis que les autres secteurs principaux ont connu des baisses plus fortes : -50% pour l'industrie, -60% pour la production d'énergie, -84% pour le transport routier... En 12 ans, le secteur résidentiel est passé de 19% à 34% du total des émissions anthropiques hors chauffage, tandis que le secteur routier est passé de 19% à 6% de ces émissions.

**Réduire les épisodes de pollution à l'ozone, et réduire de fait l'exposition des populations à l'ensemble des polluants de la photochimie, passe par une réduction des émissions des polluants précurseurs NOx et COV.**

**Ainsi la plupart des activités humaines sont concernées par les actions à mener, en premier lieu l'industrie, l'automobile, le secteur résidentiel et le transport maritime.**

#### ► Un observatoire qui s'appuie sur la mesure et la modélisation

AtmoSud peut également compter sur une métrologie de pointe pour suivre l'évolution des concentrations avec (Figure 7) :

- 50 sites fixes/ 20 sites mobiles ;
- 420 analyseurs ;
- 4 000 opérations de maintenance et d'étalonnage ;
- 15 000 analyses effectuées en laboratoire ;
- 1 600 pesées gravimétriques par an ;
- 75 micro-capteurs.

**Pour suivre l'évolution de la photochimie locale, et rendre compte au mieux de l'exposition des populations, AtmoSud, en sa qualité d'observatoire, mesure en continu la formation d'ozone sur le territoire régional notamment grâce à un réseau de surveillance des COV autour des zones industrielles, des NOx dans les zones urbaines et à proximité des axes de transport (routiers, maritimes et aérien) et de l'ozone, en zone urbaine et péri-urbaine mais également rurale.**

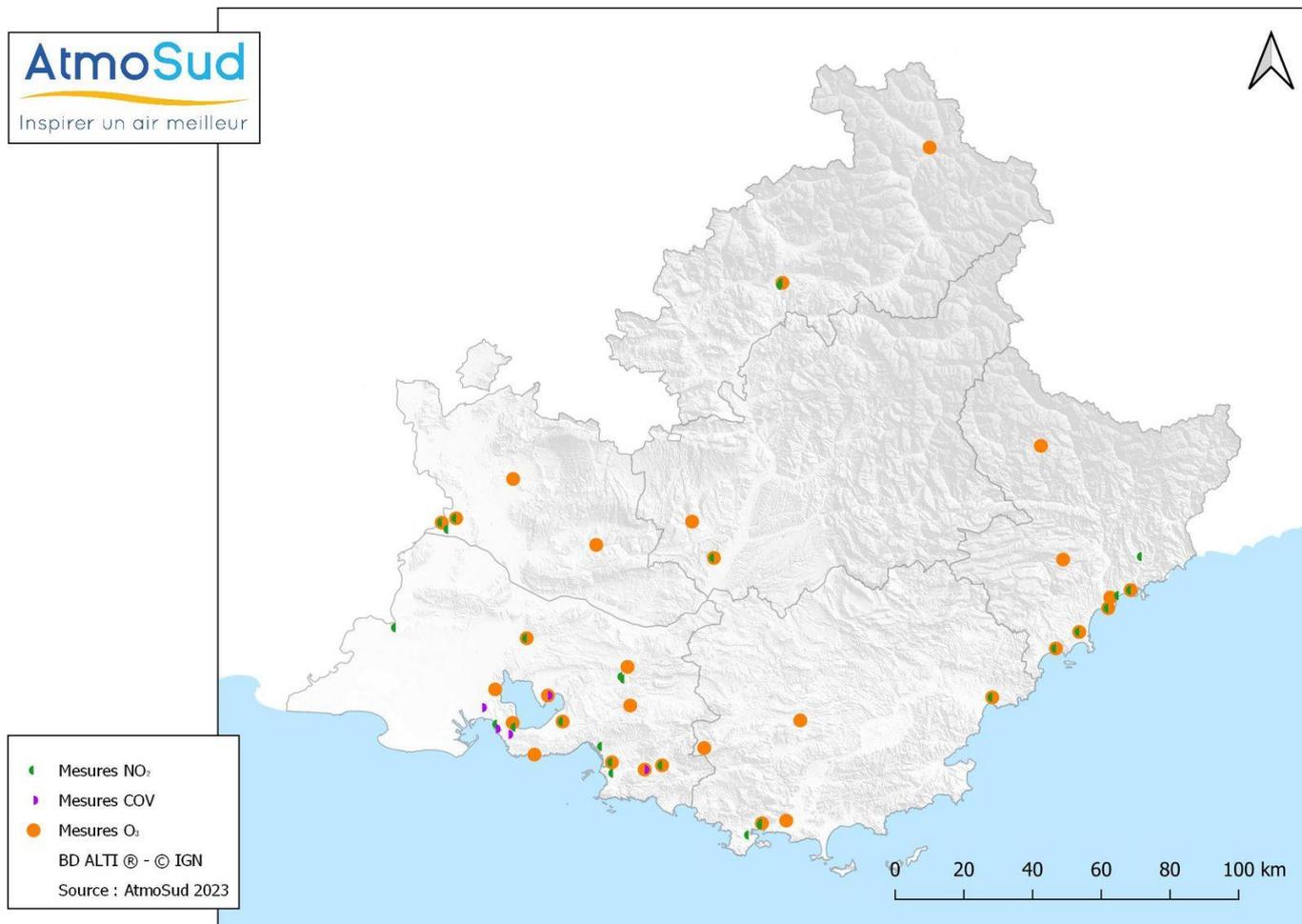


Figure 7 : Les mesures permanentes d’ozone et de ses précurseurs au sein du réseau de surveillance géré par AtmoSud

### ► Ozone des villes / ozone des champs : un exemple de formation de pic d’ozone dans différentes typologies de territoire

La production journalière d’ozone est conditionnée par la dynamique des émissions des polluants précurseurs (NOx et COV) qui sont généralement émis en ville ou à proximité des sites industriels.

À titre d’exemple, la dynamique des concentrations des polluants pour différents sites de la région Sud au cours de la journée du 23 août 2023 est représentée sur la Figure 8. Le matin, les émissions de précurseurs en ville (ici Marseille et la Penne-sur-Huveaune) vont contribuer quelques heures plus tard à la production d’ozone en périphérie (Aix-en-Provence) puis en milieu rural (Observatoire de Haute-Provence), sous l’effet des déplacements des masses d’air pilotées en été, par le régime de brise en situation anticyclonique.

Concentrations horaires en toluène à la Penne-sur-Huveaune, en NO<sub>2</sub> à Marseille et en O<sub>3</sub> à l'Observatoire de Haute-Provence et à Aix-en-Provence le 23 août 2023

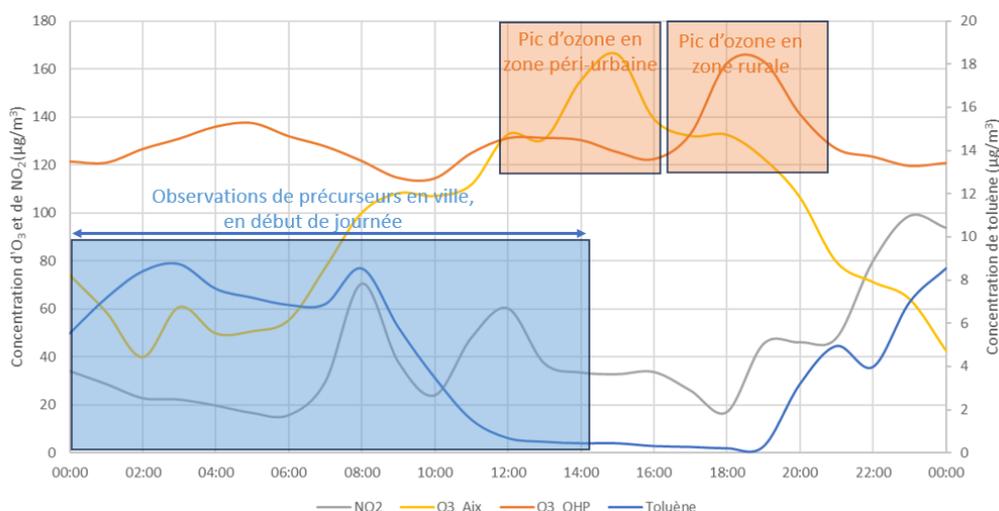


Figure 8 : Évolution de la pollution photochimique entre les zones urbaines, périurbaines et rurales

### 3 LES CONDITIONS METEOROLOGIQUES FAVORABLES A LA PHOTOCHEMIE

- Quelles sont les conditions météorologiques favorisant le début et la persistance de ce type d'épisode de pollution ?

Des températures élevées associées à un fort ensoleillement vont catalyser les réactions photochimiques dans l'atmosphère et augmenter les concentrations d'ozone notamment. C'est souvent la présence d'une **influence anticyclonique** qui persiste sur une partie de la France qui est à l'origine des températures chaudes, du ciel dégagé mais également de l'absence de vent.



Figure 9 : Concentration de pollution dans les basses couches de l'atmosphère le matin

Avec la baisse progressive des émissions de polluants précurseurs d'ozone, ces pics de pollution sont de plus en plus dépendants d'épisodes d'émissions exceptionnels : il y a 20 ans, les émissions polluantes continues sur l'année étaient suffisantes pour que la météo soit le principal facteur de variation du smog photochimique.

**Aujourd'hui, en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, ces pics ne se déclenchent que lorsqu'une activité industrielle conduit à une émission de précurseurs plus élevée que la normale et en concomitance avec un épisode de forte chaleur.**

- La dynamique de la couche limite atmosphérique

Durant la journée, la chaleur renvoyée par le sol réchauffe l'air au niveau du sol. L'air chaud, plus léger, remonte tout en perdant progressivement de sa chaleur, jusqu'à atteindre un point d'équilibre. La hauteur de ce point d'équilibre varie en fonction des conditions météorologiques, mais se situe en général entre 1000 et 1500m au-dessus de la plaine.

Ces échanges entraînent un brassage de la masse d'air dans toute la couche convective (Figure 10). À la tombée de

la nuit, le sol se refroidit et cesse de réchauffer la masse d'air. En l'absence de vent, la masse d'air se stabilise proche du sol. Le brassage s'arrête, et les polluants présents au niveau du sol ne vont plus migrer que par simple diffusion locale. Ils vont donc avoir tendance à se concentrer autour des points d'émission. En été, les polluants précurseurs s'accumulent sous ce plafond, et l'ozone est consommé plus rapidement pour former d'autres espèces oxydantes. Au-dessus de cette couche stable, la couche résiduelle se mélange lentement avec la troposphère libre (par diffusion également). Les concentrations de polluants s'homogénéisent entre la couche résiduelle et la troposphère libre, permettant le transfert de polluants entre les deux (particules et ozone notamment).

Les éléments de relief dépassant de la plaine (montagne, cheminée de grande hauteur) peuvent dépasser de la couche stable la nuit. Des mesures de pollution sur ces points l'altitude vont avoir une dynamique nocturne très différente de celles faites en plaine, avec notamment des niveaux d'ozone qui restent plus proches du niveau de fond de la troposphère libre.

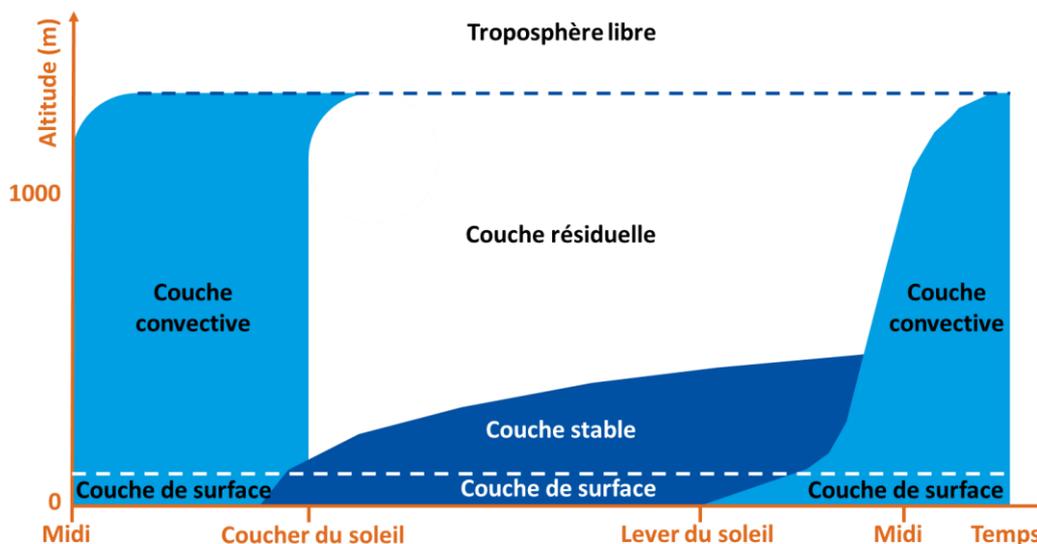


Figure 10 : Cycle jour-nuit de la couche limite atmosphérique (Source : AtmoSud)

### ► Le régime des brises thermiques en été : comment ça marche ?

En période estivale, l'inversion des régimes des brises littorales est un phénomène central lors des épisodes de pollution, puisqu'il alimente le réservoir des précurseurs pour la formation d'ozone mais entraîne une accumulation des autres polluants (particules fines, poussières désertiques, composés organiques volatils...).

La **brise de terre**, vent faible à proximité des côtes disperse les polluants émis dans les installations industrielles vers la mer (Figure 11). Au cours de la nuit et début de matinée : la terre se refroidit plus vite que la mer (1), la masse d'air chaude est au-dessus de la mer et s'élève (2), laissant place à un air plus froid venant de la terre (3). La brise de terre se met ainsi en place. Ces masses d'air polluées sont le lieu de réactions chimiques induisant des polluants transformés comme des aérosols secondaires.

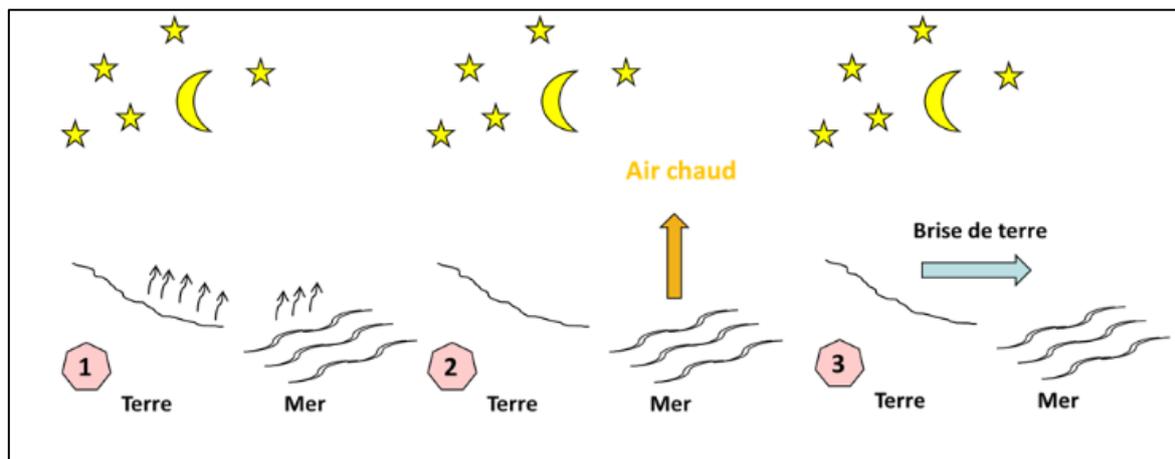


Figure 11 : Schéma représentant la formation de la brise de terre

La brise de mer va ramener les masses d'air vers le littoral, apportant en partie avec elles, les polluants transformés (Figure 12). Au cours de la matinée, la terre se réchauffe plus vite que la mer (1). La masse d'air au-dessus de la terre étant plus chaude, elle s'élève générant ainsi un courant ascendant (2). Cet air est alors remplacé par de l'air plus froid provenant de la mer (3).

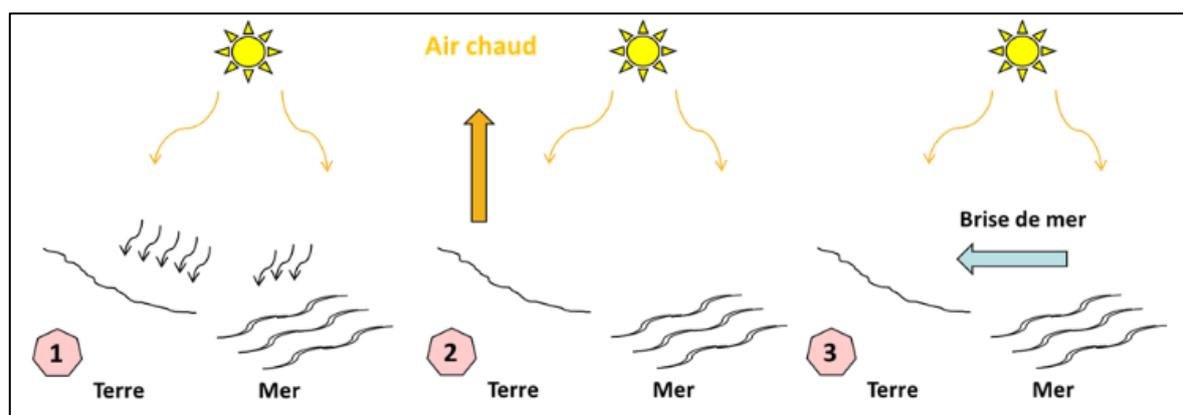


Figure 12 : Schéma représentant la formation de la brise de mer

## 4 AU DELA DE L'OZONE : LES OXYDANTS

La pollution photochimique et les aérosols sont deux aspects importants de la pollution atmosphérique qui ont un impact sur la qualité de l'air et la santé humaine, souvent interconnectés dans les processus atmosphériques.

La pollution photochimique et les aérosols sont souvent liés dans le contexte de la qualité de l'air urbain. Les réactions photochimiques qui produisent de l'ozone troposphérique peuvent également générer des particules fines (PM2.5) et d'autres aérosols secondaires [8], contribuant ainsi à la détérioration de la qualité de l'air et à des problèmes de santé. **L'ozone seul, en particulier près des sources, n'est donc pas un indicateur suffisant de cette pollution.**

Certains de ces composés intermédiaires peuvent réagir entre eux ou avec d'autres constituants de l'air ambiant pour former des particules fines (PM2.5) et des aérosols secondaires. Ces particules peuvent être composées de sulfates, de nitrates, de composés organiques et d'autres substances.

La formation des PUF (Particules Ultrafines < 100 nm) et l'accumulation des PM2.5 (particules fines) dans l'atmosphère résulte de processus distincts mais interconnectés qui contribuent à la pollution atmosphérique [10]. Les PUF sont ainsi émises par les activités humaines (phénomène de combustion, industrie...) mais également par phénomène de nucléation/condensation de certains gaz, suivant le continuum suivant :

- **Émissions de précurseurs** : Les PUF se forment généralement à partir de précurseurs gazeux émis dans l'atmosphère. Ces précurseurs comprennent souvent des gaz (oxydes d'azote NOx) et des composés organiques volatils (COV) émis par des sources telles que les véhicules automobiles, les industries, les processus de combustion, les réactions chimiques naturelles, etc.
- **Processus de nucléation** : Pendant la nucléation, les précurseurs se condensent pour former des agrégats de particules extrêmement petites, souvent appelés "nuclei de condensation" ou "nuclei d'aérosol". Ces nuclei sont des PUF potentielles.
- **Croissance des particules** : Les nuclei de condensation continuent de croître en taille en adsorbant d'autres molécules gazeuses ou en coagulant avec d'autres particules. Ce processus de croissance conduit à la formation de PUF de taille plus importante.

Au cours de l'épisode de pollution photochimique d'août 2023, les niveaux de PUF (Figure 13) restent comparables d'un jour à l'autre car les phénomènes processus de nucléation/coagulation ont limité leur accumulation.

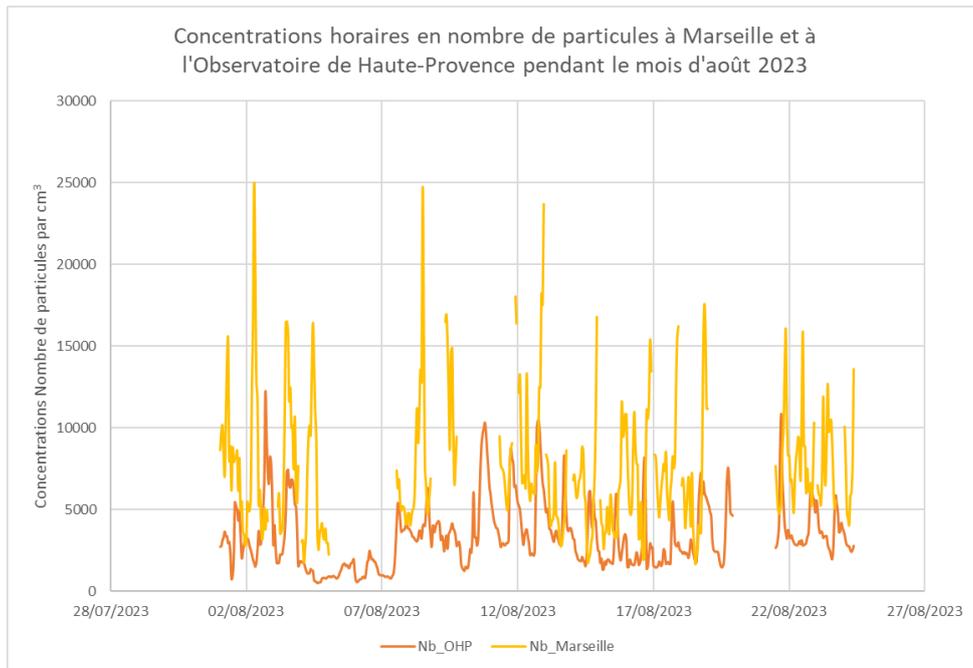


Figure 13 : Évolution du nombre de particules fines à Marseille et l'Observatoire de Haute-Provence pendant le mois d'août 2023

En revanche, ces phénomènes physiques de nucléation, condensation et coagulation qui entrent en jeu pour faire grossir les particules (passage des PUF au particules fines), ont entraîné une augmentation du niveau de fond à partir du 15 août 2023 des concentrations de PM2.5 (Figure 14).

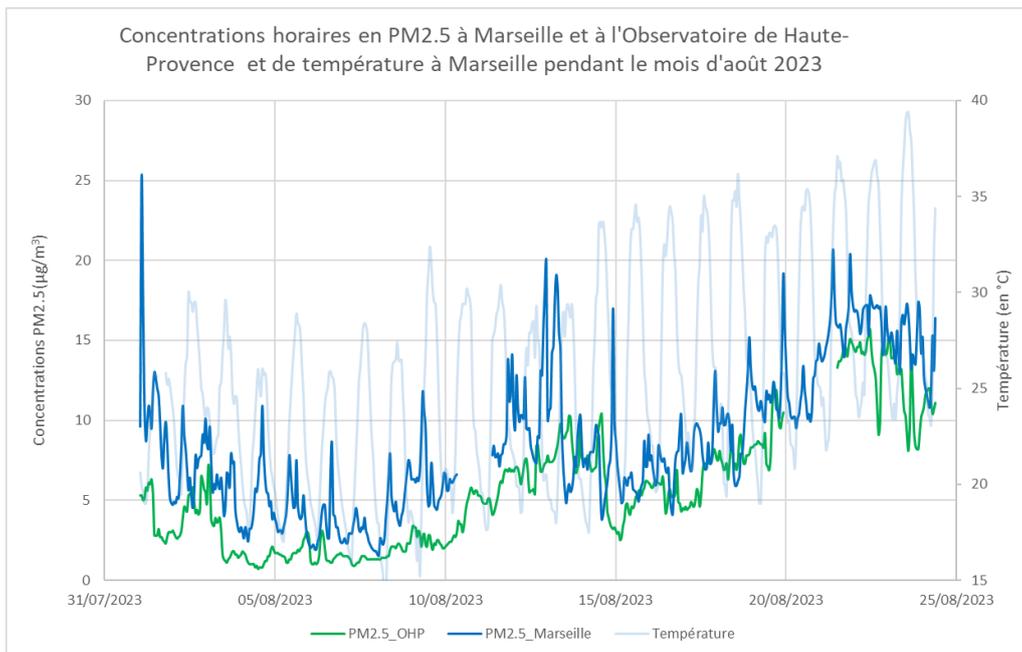


Figure 14 : Évolution des concentrations en PM2.5 à Marseille et à l'Observatoire de Haute-Provence et du profil de température à Marseille

**En plus de l’ozone, la photochimie va générer notamment des particules. Ces particules, ultrafines lors de leur formation, vont grossir avec le temps en s’agréant et en adsorbant à leur surface d’autres polluants. Elles vont progressivement se convertir en PM2.5, puis éventuellement en PM10 avant de sédimenter au sol. Durant tout leur cycle de vie, ces particules augmentent ainsi l’impact sanitaire global de la photochimie.**

## 5 DYNAMIQUE JOURNALIERE D'UN EPISODE DE POLLUTION : LE 23/08/2023

Un épisode de pollution à l'ozone a eu lieu entre le 20 et le 24 août 2023. Cet épisode a été favorisé par la canicule qui a sévit sur notre territoire à partir du 14 août 2023. La dynamique de cet épisode de pollution est typique. Son évolution au cours de la journée a pu être prévue par les outils de modélisation développés par AtmoSud (Figure 15).

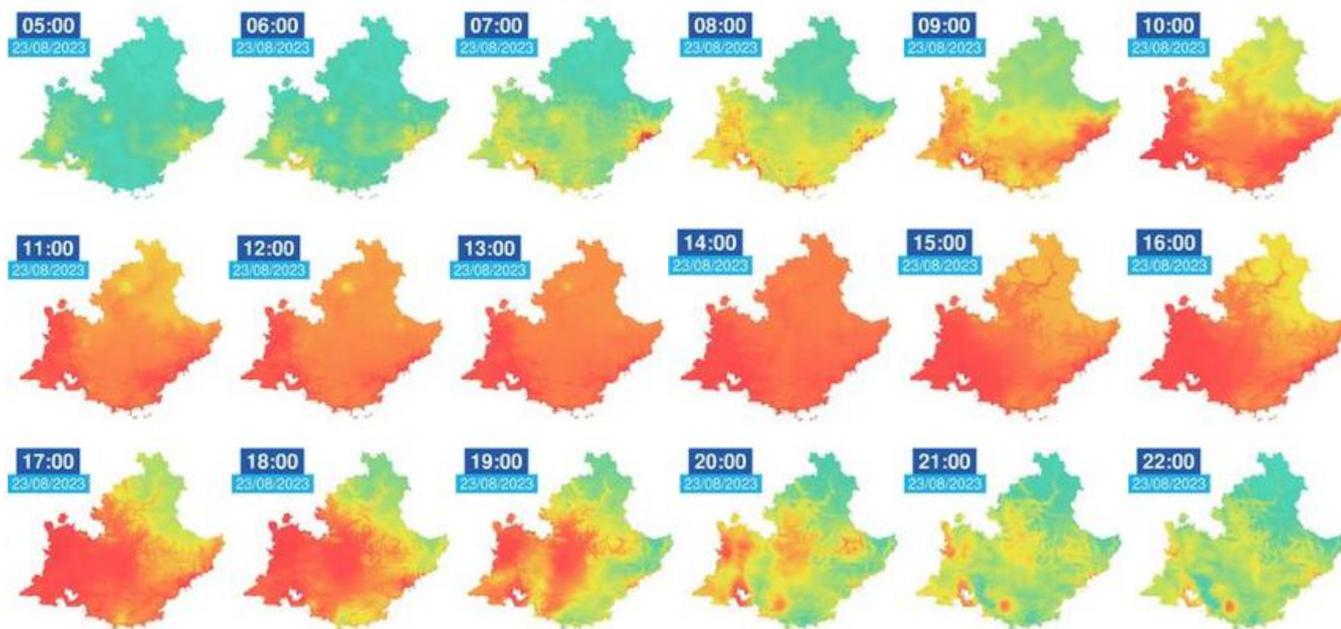


Figure 15 : Chronologie du pic d'ozone du 23/08/2023 (indice ICAIRh, source AtmoSud)

Lors d'un épisode de pollution photochimique, la qualité de l'air se dégrade tout au long de la matinée, d'abord autour des grandes agglomérations (ouest de la région et la bande côtière), pour s'étendre dès le milieu de la matinée sur l'ensemble de la région. Elle devient mauvaise en fin de matinée. L'amélioration commence en fin d'après-midi par les zones alpines mais la situation restant mauvaise sur l'ouest de la région jusqu'en début de soirée.

**Les cartes ICAIRh sont produites chaque jour pour avoir une information sur la qualité de l'air. L'indice ICAIRh cumule à ce jour 4 polluants (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, PM10 et PM2.5) permettant d'avoir une indication des effets cumulés de ces polluants.**

**Ces cartes horaires permettent de suivre la dynamique de formation d'ozone (jusqu'à 24h de prévision) et permet ainsi de pouvoir adapter ses comportements lors d'épisodes de pollution notamment.**

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] OMS. Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. World Health Organization, 2005
- [2] Les dossiers de l'INERIS, Pollution atmosphérique à l'ozone : Décryptage, septembre 2020
- [3] Stevenson, D. S. et al. Tropospheric ozone changes, radiative forcing and attribution to emissions in the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP). *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 3063–3085 (2013)
- [4] Ziemke, J. R., Oman, L. D., Strode, S. A., Douglass, A. R., Olsen, M. A., McPeters, R. D., Bhartia, P. K., Froidevaux, L., Labow, G. J., Witte, J. C., Thompson, A. M., Haffner, D. P., Kramarova, N. A., Frith, S. M., Huang, L.-K., Jaross, G. R., Seftor, C. J., Deland, M. T., and Taylor, S. L.: Trends in global tropospheric ozone inferred from a composite record of TOMS/OMI/MLS/OMPS satellite measurements and the MERRA-2 GMI simulation, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 3257–3269, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3257-2019>, 2019
- [5] Académie des sciences, L'évolution de l'ozone atmosphérique, juin 2015
- [6] Sydney Chapman, A Theory of Upper-Atmospheric Ozone, *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, 1930
- [7] AtmoSud (2021). Ozone et COV en région Sud - juin 2021
- [8] Marie Camredon, B. Aumont (2007). L'ozone troposphérique : production/consommation et régimes chimiques DOI:10.4267/POLLUTION-ATMOSPHERIQUE.1404
- [9] Jean-Marc Brignon. Les effets environnementaux des particules. *Pollution atmosphérique : climat, santé, société*, 2003, 177, pp.91-102
- [10] S. Zhang, Alexandre Thomasson, B. Mesbah, Pierre-Yves Guernion, F. Pin, *et al.* La surveillance des particules ultrafines en France. 31. Congrès Français sur les Aérosols (CFA 2018), Jan 2018, Paris, France. ineris-01863325



[www.atmosud.org](http://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](mailto:Contact.air@atmosud.org)

#### Etablissement de Martigues

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

#### Etablissement de Nive

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