



Pollution atmosphérique et santé: potentiel oxydant des particules atmosphériques

11 Décembre 2025

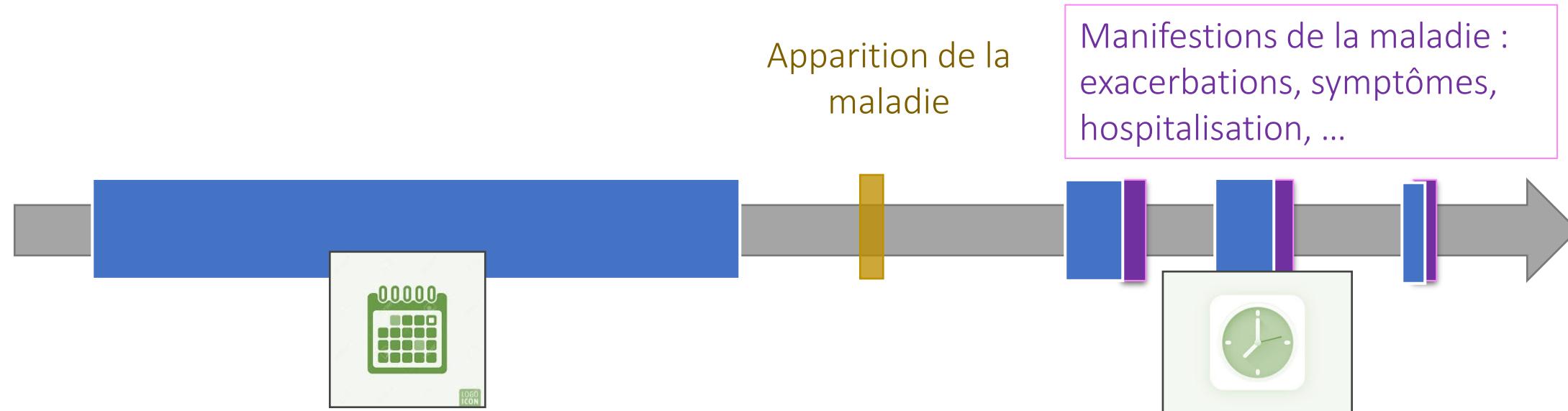
Gaelle.uzu@univ-grenoble-alpes.fr

Directrice de recherche à l'institut des Géosciences de l'environnement,
Grenoble

+ Equipe IGE: C.Tassel, A.Marsal, E. Di Antonio, R. El Azzouzi, S. Darfeuil, JL.,
Jaffrezo



Pollution de l'air : exposition à court et long terme et effets sur la santé



Expositions répétées et continues tout au long de la vie avant l'apparition de la maladie

Effets long-terme/chroniques de l'exposition sur le développement de la maladie

Apparition de la maladie

Manifestations de la maladie : exacerbations, symptômes, hospitalisation, ...

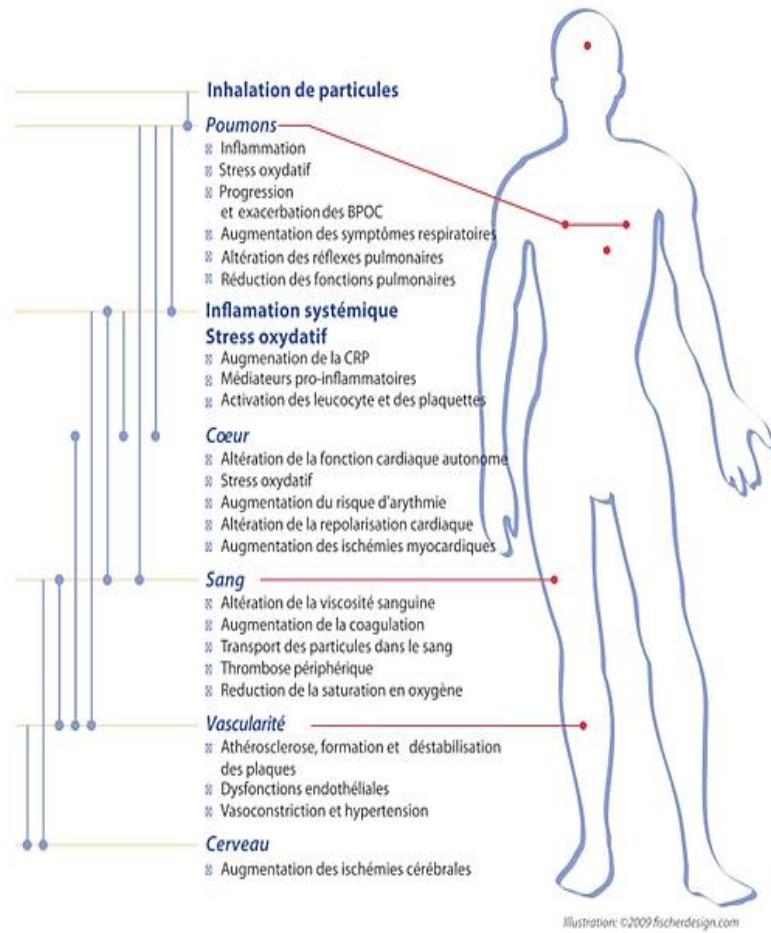
Exposition des heures, jours ou semaines avant les symptômes/exacerbations

Effets court-terme/aigus de l'exposition sur l'expression d'une maladie préexistante

Pollution de l'air et santé

40 000

personnes décèdent chaque année de la pollution de l'air en France



Airparif, d'après Pope & dockery, 2006

La pollution atmosphérique n'est pas un choix de mode de vie, mais implique une exposition environnementale involontaire et omniprésente qui peut toucher 100 % de la population, quel que soit le groupe d'âge concerné.

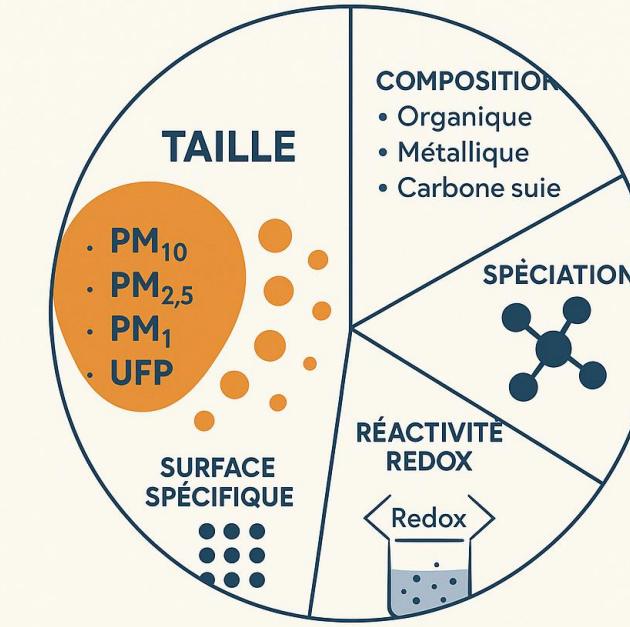
Réglementation actuelle UE et exposition aux PM

Les PM_{2,5/10} responsables de 75-90% of la mortalité prématuée attribuable à la pollution de l'air
Pas d'effet seuil

Polluant	Périodicité	Type de norme	Norme en vigueur	Norme révisée adoptée pour 2030
PM _{2,5}	Annuelle	Valeur limite	25 µg/m ³	10 µg/m ³
	24h	Valeur limite	pas de norme	25 µg/m ³
PM ₁₀	Annuelle	Valeur limite	40 µg/m ³	20 µg/m ³
	24h	Valeur limite	50 µg/m ³	45 µg/m ³

La toxicité des PM dépend de nombreux paramètres

PHYSICO-CHIMIQUES DES PARTICULES



[PM] peu adaptée à la prédition événements de santé court terme (Who 2013)

La masse n'est très certainement pas le meilleur outil pour estimer les effets sanitaires,

Potentiel oxydant et directive 2024/2881/CE

- La directive européenne 2008 relative à la qualité de l'air a été révisée en 2022 et adoptée en octobre 2024.



Article 10: Monitoring supersites

1. *Each Member State shall establish at least **one monitoring supersite per 10 million inhabitants** at an urban background location. Member States that have fewer than 10 million inhabitants shall establish at least one monitoring supersite at an urban background location.*

.....

5. *Measurements at all monitoring supersites at urban background locations shall include fixed or indicative measurements of BC, ammoniac, size distribution of **ultrafine particles** and **particulate matter oxidative potential***

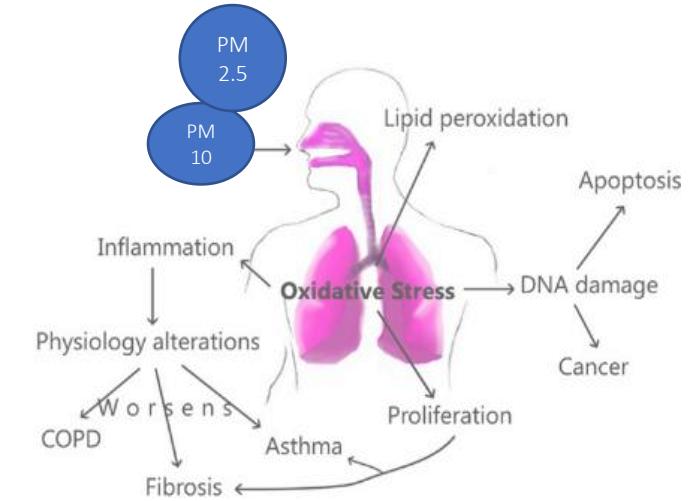
- La création de ces supersites conduira à la production de séries temporelles de ces nouvelles variables pour leur couplage avec des données de santé

Comment améliorer l'évaluation de l'exposition sanitaire?



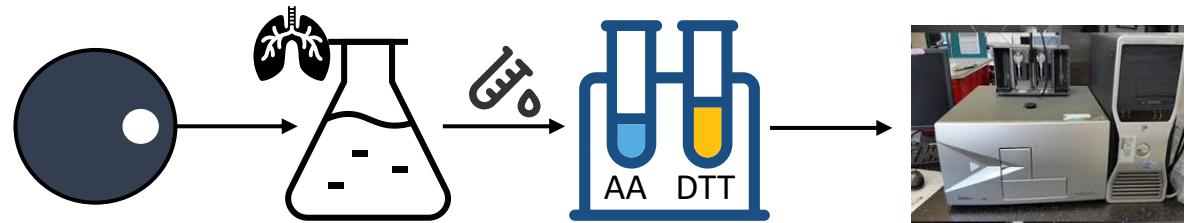
Un nouvel indicateur : LE POTENTIEL OXYDANT

- PM portent/induisent des espèces réactives de l'oxygène (ROS) qui déséquilibrent le milieu pulmonaire => stress oxydatif
- Capacité intrinsèque des particules à induire un stress oxydant
- Stress oxydant est un des mécanismes majeurs de toxicité
- Pertinent pour les effets aigus des aérosols (*Daellenbach, Uzu, Nature, 2020*)



Mesure

- Quantité d'antioxydant consommée par les PM
- Offline à partir de filtres atmosphériques
- Analyse par spectrophotométrie
- Acellulaire, non invasif, peu cher
- Intégratif des propriétés de taille, composition
- IGE: pionnier en France et EU, plus large base de données connue en EU



OP_m (nmol min⁻¹μg⁻¹): Intrinsic OP of 1μg PM

OP_v (nmol min⁻¹m⁻³): PM-derived OP per m⁻³ of air

Axes de recherches sur le potentiel qui vont être favorisés par la mise en place des super sites

But:

- Validation du PO comme une métrique pertinente de l'exposition sanitaire aux particules atmosphériques

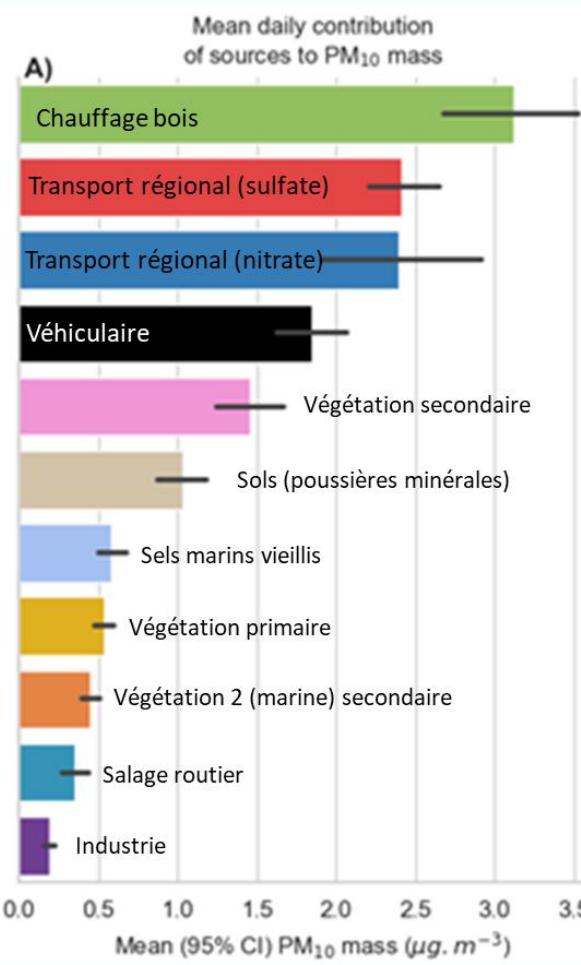




QQ Résultats PO-Sources Supersites Frenes

MobilAir

Concentration massique PM₁₀

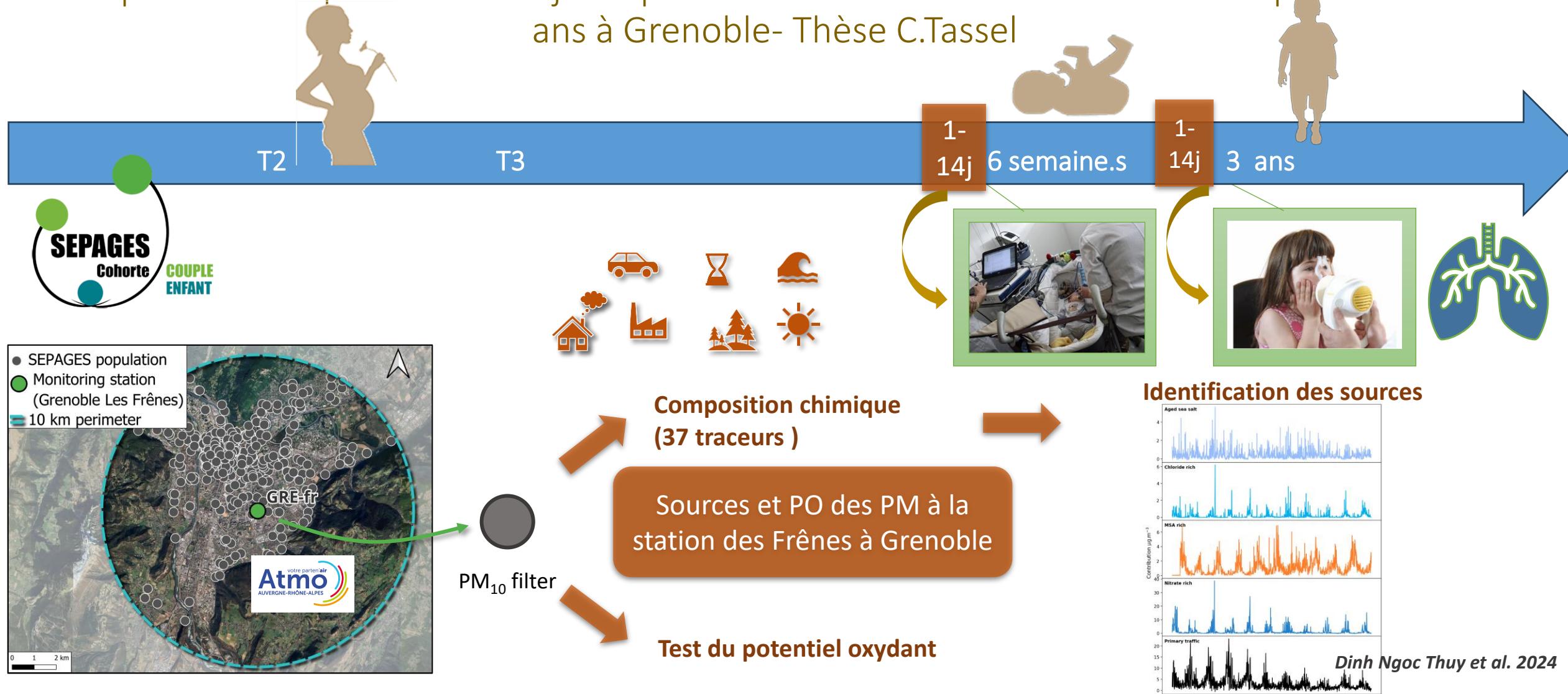


2 métriques de l'exposition comparées pour les 3 sites moyennées

- Concentration PM: 4 sources majeures
 - PO : Chauffage bois et traffic routier sont les deux sources les plus oxydantes.
 - Autre étude européenne: Importance du trafic et des émissions diffuses (freins)
 - Vision très différente des sources en fonction de la métrique utilisée
- ➔ Pour faire diminuer les concentrations massiques et les niveaux de PO, les **sources cibles** sont le **chauffage au bois non performant et le véhiculaire**

Quelques résultats PO-santé utilisant des supersites

Exposition aux particules des jours précédents les mesures de fonction respiratoire à 3 ans à Grenoble- Thèse C.Tassel



Principales sources des particules associées à la fonction ventilatoire des enfants?

	Exposure	6 weeks	3 years		Exposure	6 weeks	3 years
	Primary traffic	⊖	⊖		Total PM_{10}	⊖	⊕
	Industrial	⊖	⊖		OP_m^{AA}	⊖	⊖
	Biomass burning	⊖	⊖		OP_m^{DTT}	⊖	⊖
	Nitrate rich	⊖	⊕		OP_v^{AA}	⊖	⊖
	Chloride rich	⊖	⊖		OP_v^{DTT}	⊖	⊖
	Sulfate rich	⊖	⊖		Thermal inversions	-	⊖
	Mineral dust	⊖	⊕				
	Aged sea salt	⊖	⊖				
	MSA rich	⊖	⊖				
	Primary biogenic	⊖	⊖				

⊖ Tendance pour un effet délétère

⊕ Tendance pour un effet protecteur

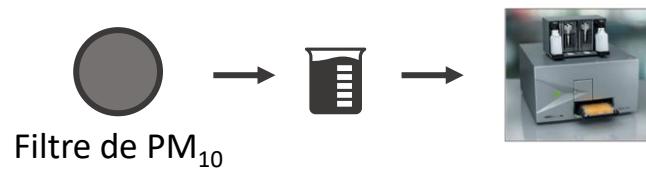
⊖ Pas de tendance

Article

Oxidative potential of atmospheric particles in Europe and exposure scenarios

nature

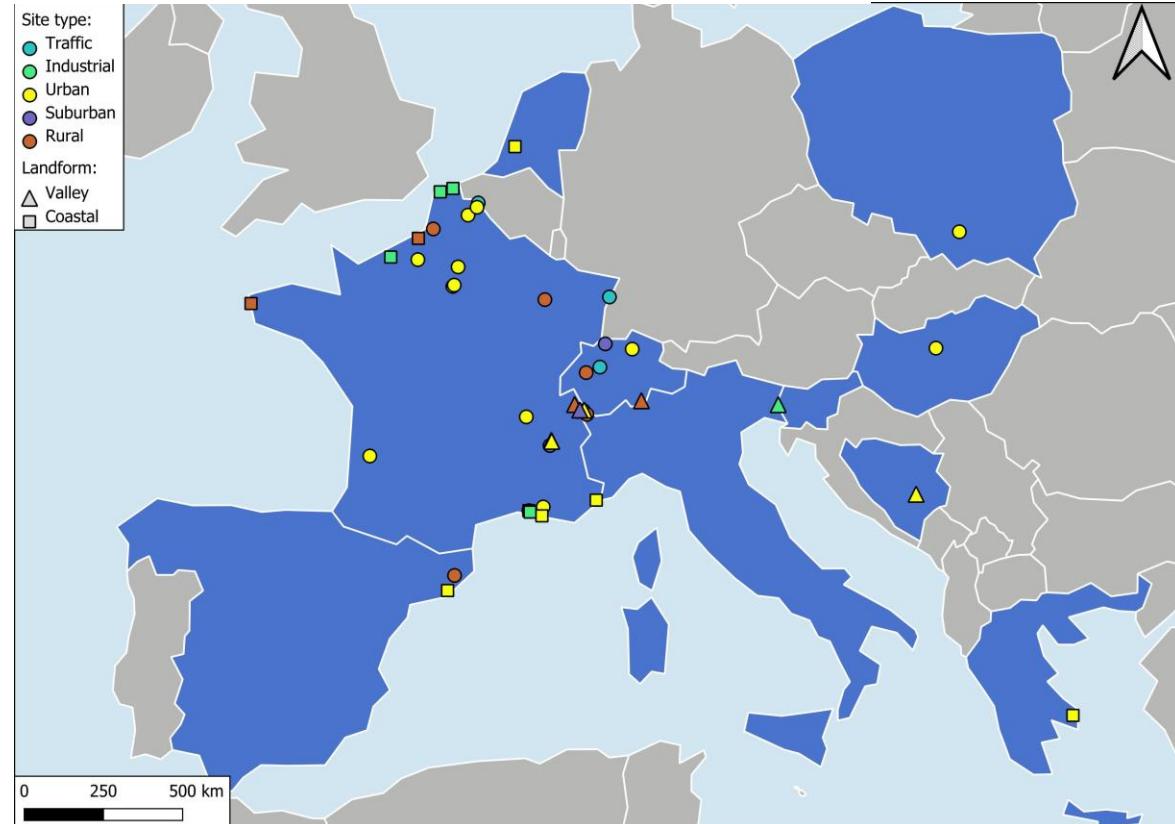
- **Potentiel oxidant (PO)** : capacité intrinsèque des PM à générer du **stress oxydatif**



43 sites → ~11,500 échantillons, 10 pays,
5 types d'environnement

2 tests de PO (AA and DTT) → protocoles homogènes

3 tailles de PM → PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁

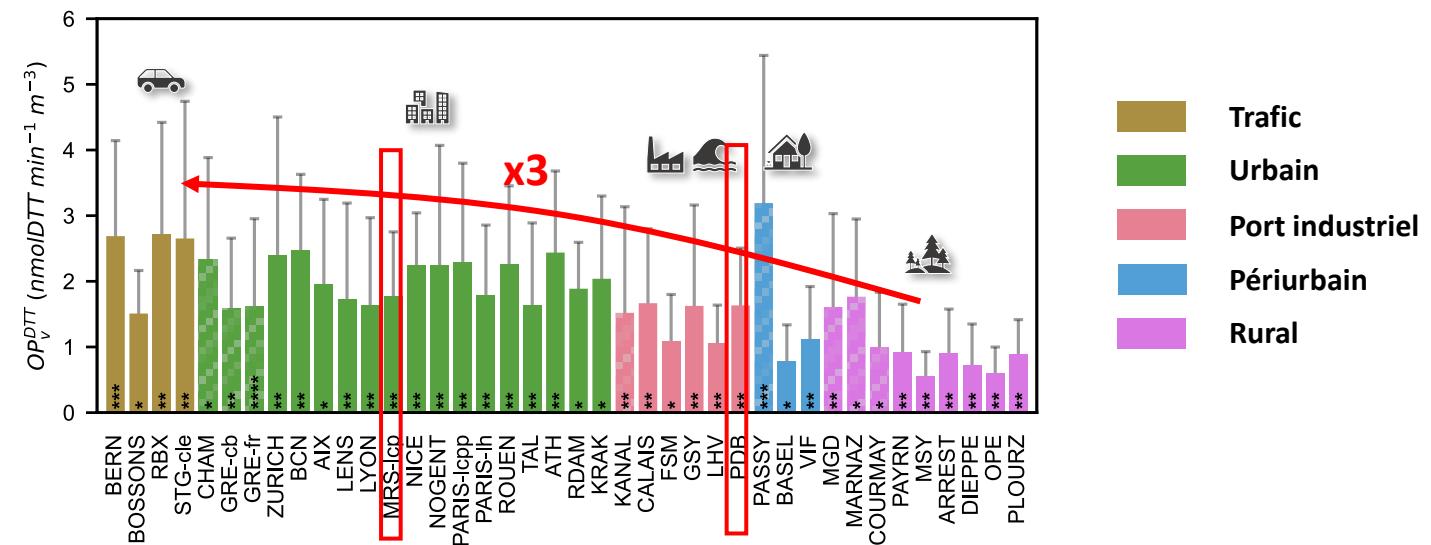


Oxidative potential of atmospheric particles in Europe and exposure scenarios

Quelle est la valeur ajoutée du PO ?



Variabilité spatiale du PO



Oxidative potential of atmospheric particles in Europe and exposure scenarios

Quelle est la valeur ajoutée du PO ?



Variabilité spatiale du PO

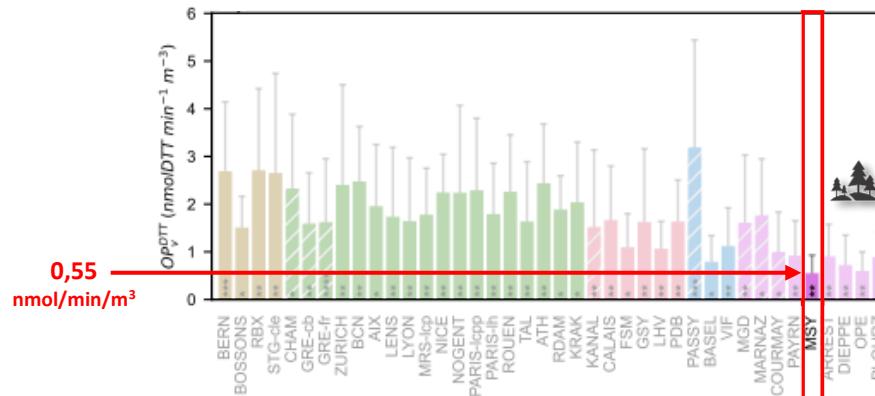
→ Le PO moyen varie fortement en fonction du type d'environnement et des sources locales spécifiques

Comment fixer des valeurs limites de PO ?



Scénarios d'exposition au PO

↔ EQIS



Extended Data Table. 2 | Description of the OP_v^{DTT} exposure scenarios selected

OP exposure scenarios	Description of OP exposure scenarios	PM size	OP _{ref}
1 Low urbanization scenario	Mean OP _v level in the urban station with the lowest OP _v level, i.e. GRE-cb for PM ₁₀ and PARIS-lh for PM _{2.5}	PM ₁₀ PM _{2.5}	1.60 0.80
2 Intermediate scenario	Mean OP _v level in the rural station with the highest OP _v level, i.e. PAYRN for both PM ₁₀ and PM _{2.5}	PM ₁₀ PM _{2.5}	0.92 0.61
3 Low anthropogenic pollution scenario	Mean OP _v level in all rural areas	PM ₁₀ PM _{2.5}	0.80 0.52
4 Very low anthropogenic pollution scenario	Mean OP _v level in the rural station with the lowest OP _v level, i.e. MSY for both PM ₁₀ and PM _{2.5}	PM ₁₀ PM _{2.5}	0.55 0.44

OP_{ref}, OP_v^{DTT} reference value (nmolmin⁻¹ m⁻³).

Oxidative potential of atmospheric particles in Europe and exposure scenarios

Quelle est la valeur ajoutée du PO ?



Variabilité spatiale du PO

- Le PO moyen varie fortement en fonction du type d'environnement et des sources locales spécifiques

Comment fixer des valeurs limites de PO ?



Scénarios d'exposition au PO

↔ EQIS

- Valeurs de PO de référence basées sur les observations dans les sites peu pollués en l'absence de relation dose-réponse pour le PO

Comment réduire efficacement l'exposition humaine au PO ?



Stratégies de réduction ciblant des sources spécifiques

Oxidative potential of atmospheric particles in Europe and exposure scenarios

Quelle est la valeur ajoutée du PO ?



Variabilité spatiale du PO

→ Le PO moyen varie fortement en fonction du type d'environnement et des sources locales spécifiques

Comment fixer des valeurs limites de PO ?



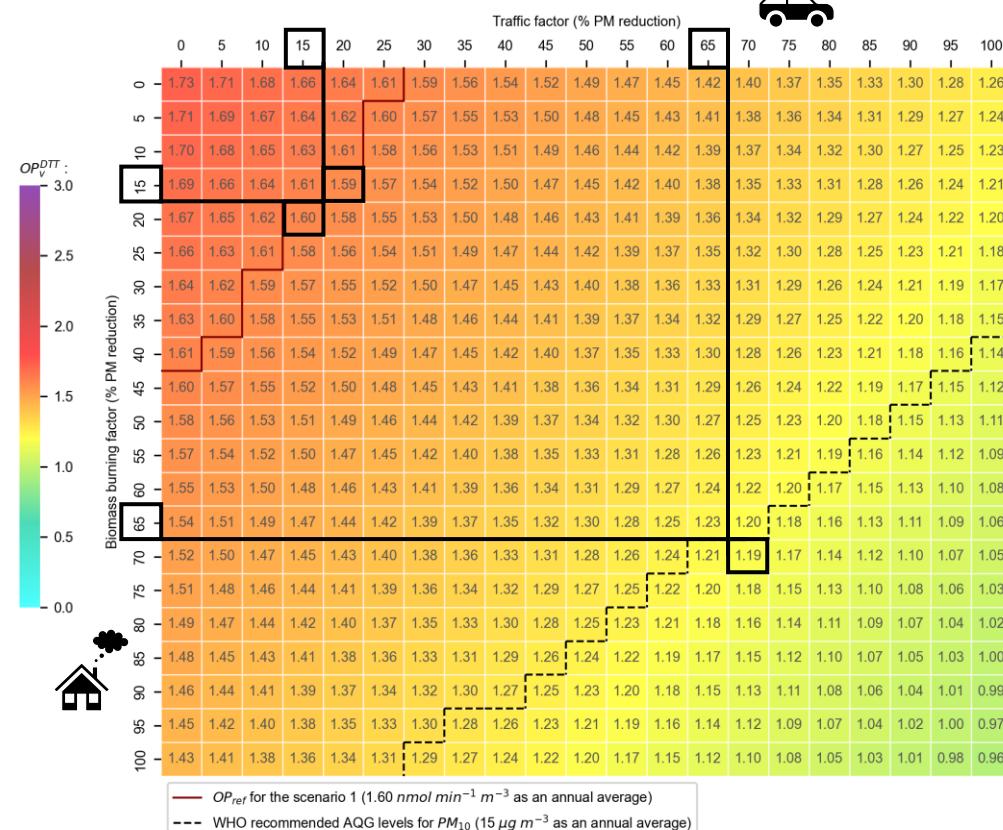
Scénarios d'exposition

→ Valeurs de PO de référence basées sur les observations dans les sites peu pollués

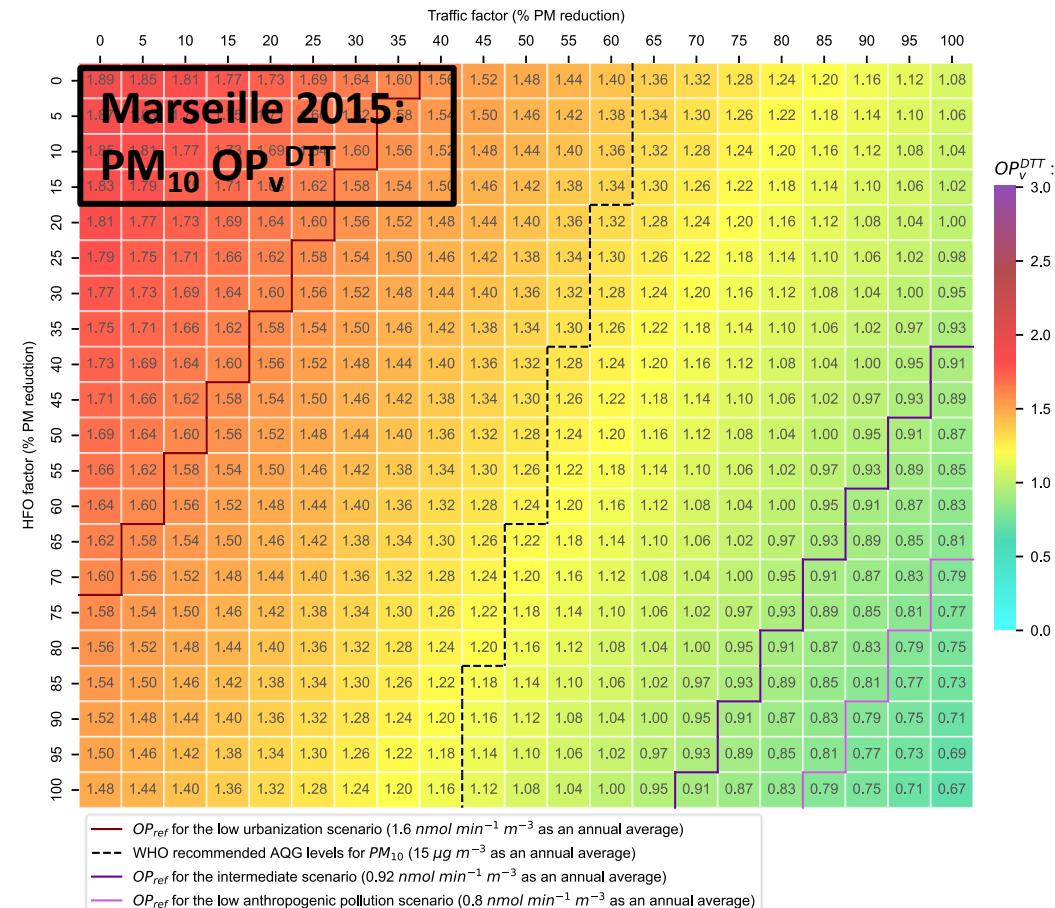
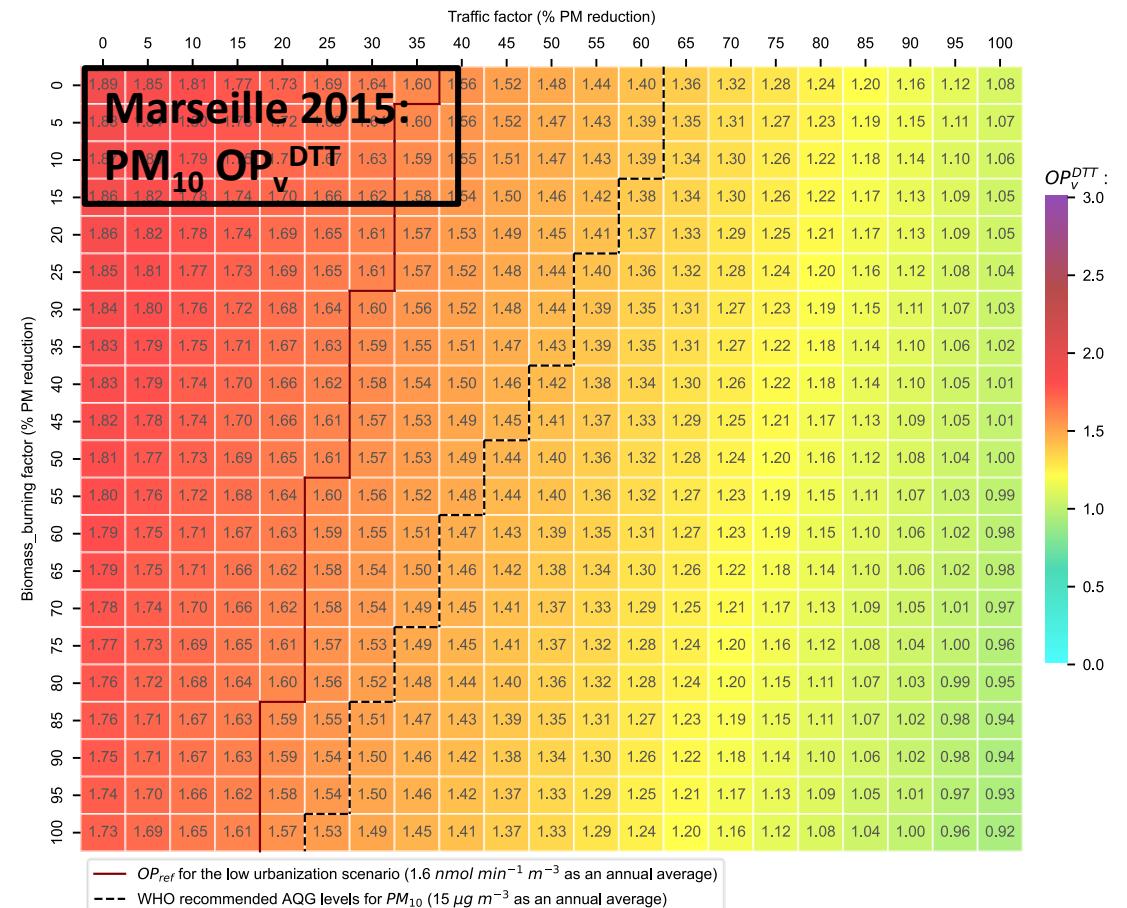
Comment réduire efficacement l'exposition humaine au PO ?



Stratégies de réduction



Marseille-LCP et sources oxydantes

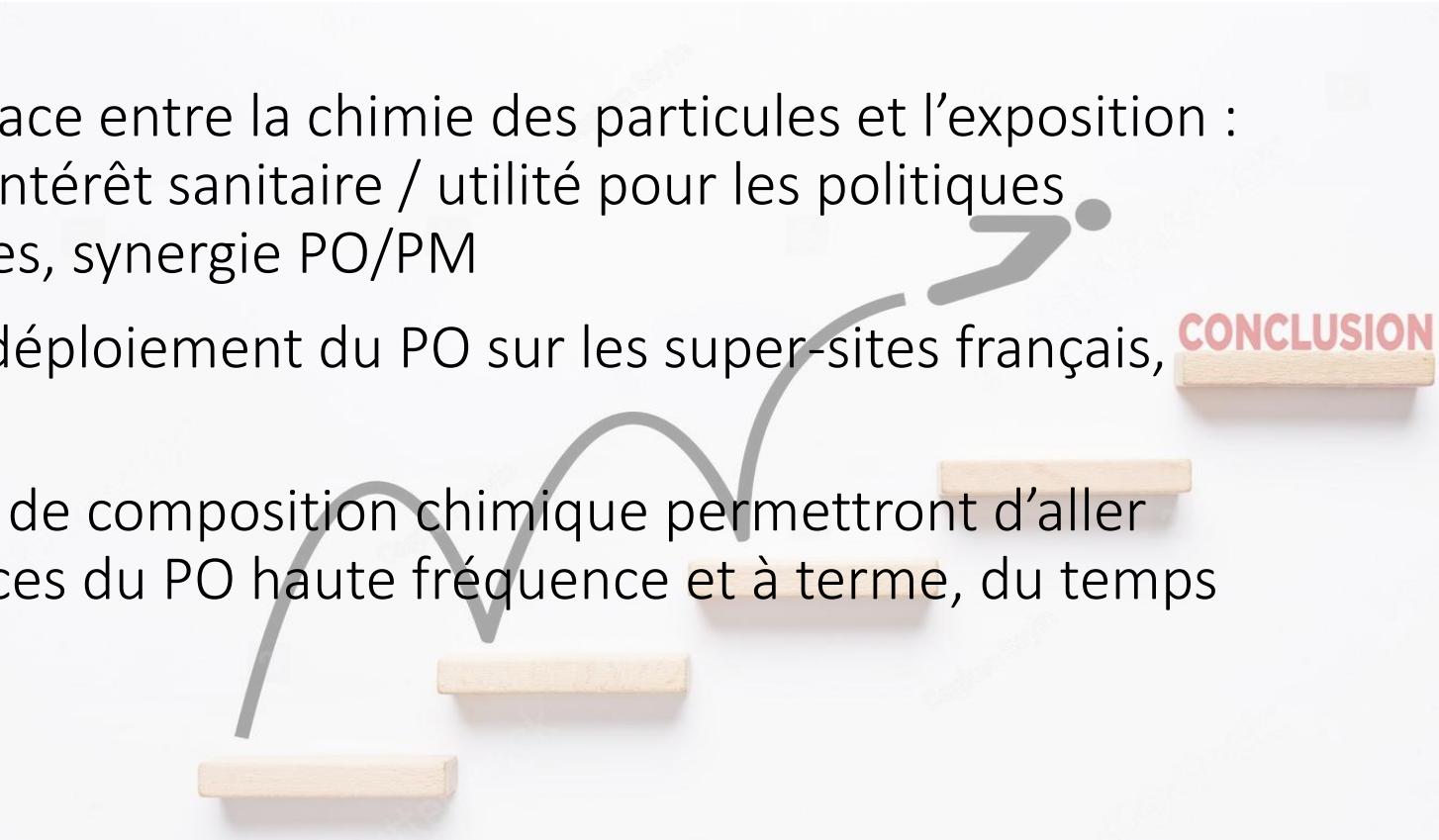


→ Sources oxydantes : traffic > HFO (shipping/industrie) > chauffage bois

→ Une grande marge de manœuvre avec ces 3 sources pour atteindre des valeurs basses de PO DTT Tassel et al., 2025

Conclusions

- L'établissement des super sites instrumentés européens va favoriser les études épidémiologiques sur les impacts sanitaires de la pollution atmosphériques intégrant de multiples paramètres qui iront au-delà des couplages PM/santé classiques
- Le potentiel oxydant est à l'interface entre la chimie des particules et l'exposition : il permet de cibler les sources d'intérêt sanitaire / utilité pour les politiques publiques / réductions plus ciblées, synergie PO/PM
- Marseille-LCP site pilote pour le déploiement du PO sur les super-sites français, projet OPUS-ADEME 2025-2028
- A Marseille, les données en ligne de composition chimique permettront d'aller vers une déconvolution des sources du PO haute fréquence et à terme, du temps réel.

CONCLUSION