

MINÉRAUX INDUSTRIELS-FRANCE
ORGANISATION PROFESSIONNELLE



UNION NATIONALE DES
PRODUCTEURS DE GRANULATS

PLAN D'ÉVALUATION DE LA SILICE CRISTALLINE ALVÉOLAIRE AUTOUR DE CINQ CARRIÈRES

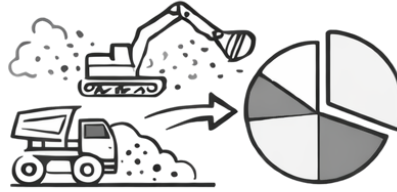


Evaluation & Diagnostic
Impact / Environnement / Santé

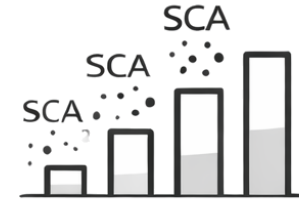
Objectifs



Niveaux de silice en limite du site / zones habitées proches?



Part de l'activité des carrières dans les poussières de silice ?



Proportion de silice selon différentes fractions granulométriques ?



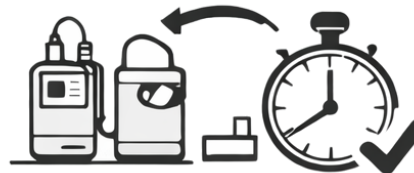
Fraction granulométrique à retenir dans le suivi de la silice



Alternatives métrologiques reconductibles ?



Evaluation du risque pour les populations proches?



Durée des prélèvements à privilégier ?

Sites d'étude



3 sites producteurs de granulats (2 de roches massives et 1 alluvionnaire) sélectionnés en fonction :

- Des caractéristiques du gisement vis-à-vis du risque silice ;
- Du niveau de production ;
- Du risque identifié pour le personnel travaillant dans la carrière ;
- De la localisation des habitations ;
- Des relevés effectués sur les poussières sédimentables en périphérie du site et dans l'environnement de la carrière ;
- Des caractéristiques des installations de traitement des granulats.

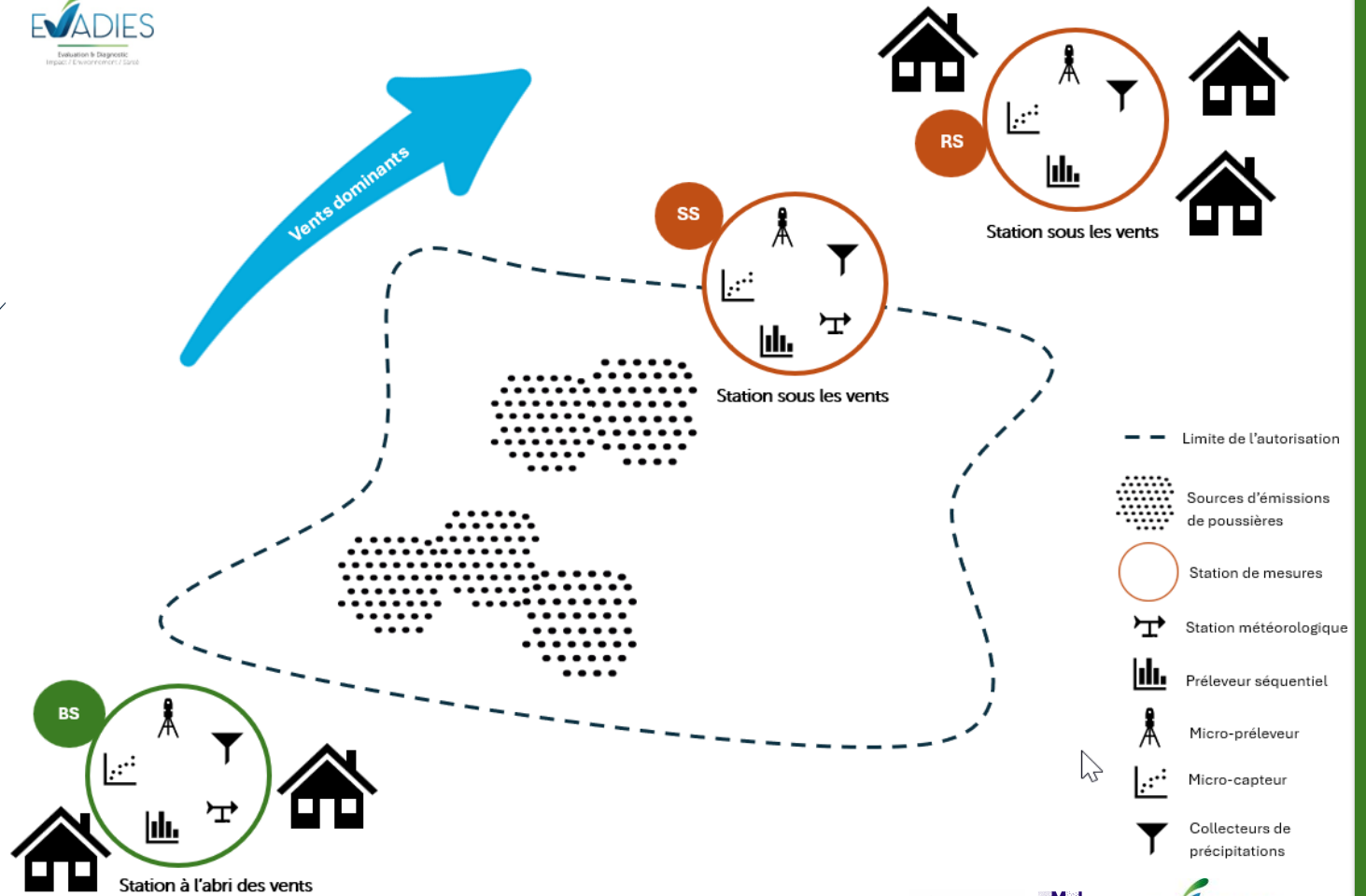


2 sites producteurs de minéraux industriels pour lesquels des mesures issues d'un protocole proche ont été intégrées dans le cadre de leur demande d'autorisation d'extension de l'exploitation.

Outre ces critères, il était aussi nécessaire de sélectionner et d'avoir des exploitants engagés dans la démarche ; l'exploitant étant en partie le garant de la réussite du plan d'évaluation.

Plan d'évaluation

Stratégie de mesure spatiale



Plan d'évaluation

Les appareils de mesures

Station météorologique

Données météorologiques

- Stations sur deux stations
- Vent (vitesse/direction) + pluviométrie
- Indispensable pour : Interprétation des résultats, analyse des sources et transferts

Préleveur séquentiel

Mesures de référence (LECKEL SEQ 47/50)

- Méthode normalisée (NF EN 12341:2023)
- PM10 (tous sites) / PM2,5 (A-C)
- Prélèvements 24 h / hebdomadaires sur **filtres PVC 47 mm**
- Gravimétrie → concentration massique
- DRX → teneur en SCA

Micro-préleveur

Prélèvements alternatifs (MicroVol)

- Sites A-C (en parallèle des méthodes de référence)
- Faible débit (3 L/min), intégration sur 14 jours
- PM10 / PM2,5 sur filtres PVC
- Gravimétrie → concentration massique
- DRX → teneur en SCA

Micro-capteur

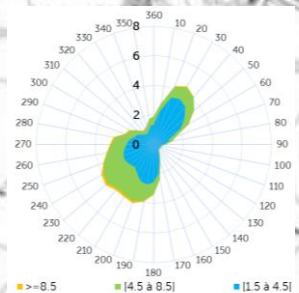
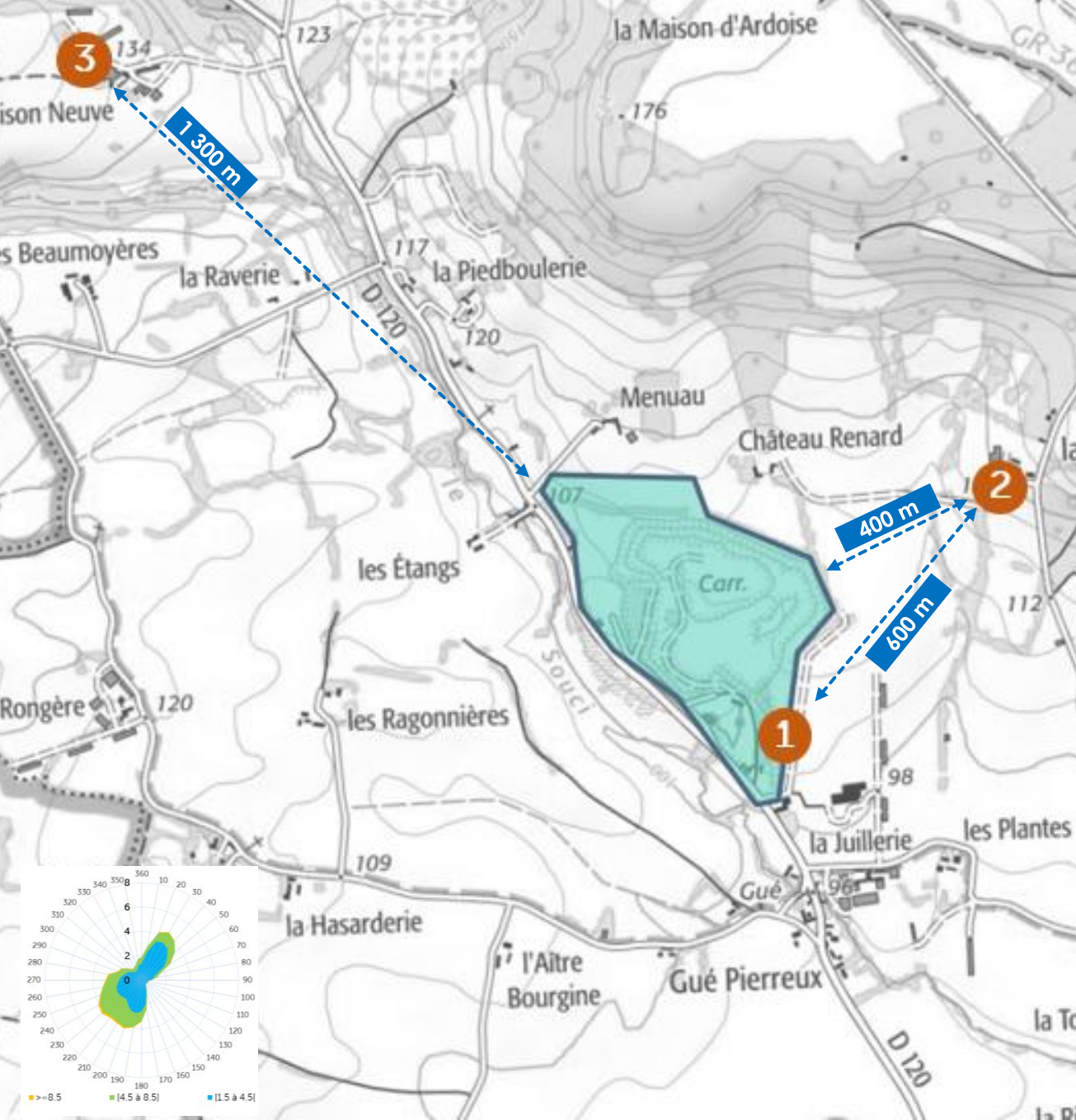
Mesures en continu (micro-capteurs NEMO)

- Déployés sur les sites A-C
- Mesures en temps réel PM10 / PM2,5 (optique)
- Données haute fréquence (GSM / Wi-Fi)
- Alimentation solaire
- Permet : Variabilité fine des concentrations, identification des pics liés à l'activité, influence des conditions météorologiques

Collecteurs de précipitations

Retombées atmosphériques

- Tous sites – méthode normalisée (NF X43-014)
- Collecte sur 28 jours
- Apporte : Flux de dépôts, complément aux mesures en suspension, lien avec le suivi réglementaire



Fréquence d'échantillonnage définie sur la base de plusieurs paramètres clés :

- Objectifs de quantification des particules fines (PM10, PM2,5) et de la silice cristalline alvéolaire (SCA) ;
- Exigences réglementaires en matière de représentativité temporelle ;
- Performances analytiques attendues (volume d'air, limite de quantification, faisabilité analytique) ;
- Type d'équipement utilisé (débit, capacité de filtration, autonomie).

Études sur la silice : analyse spécifique des filtres journaliers afin d'évaluer l'impact des conditions météorologiques et des activités du site, ainsi que la faisabilité de la mesure à court terme de la silice cristalline alvéolaire.

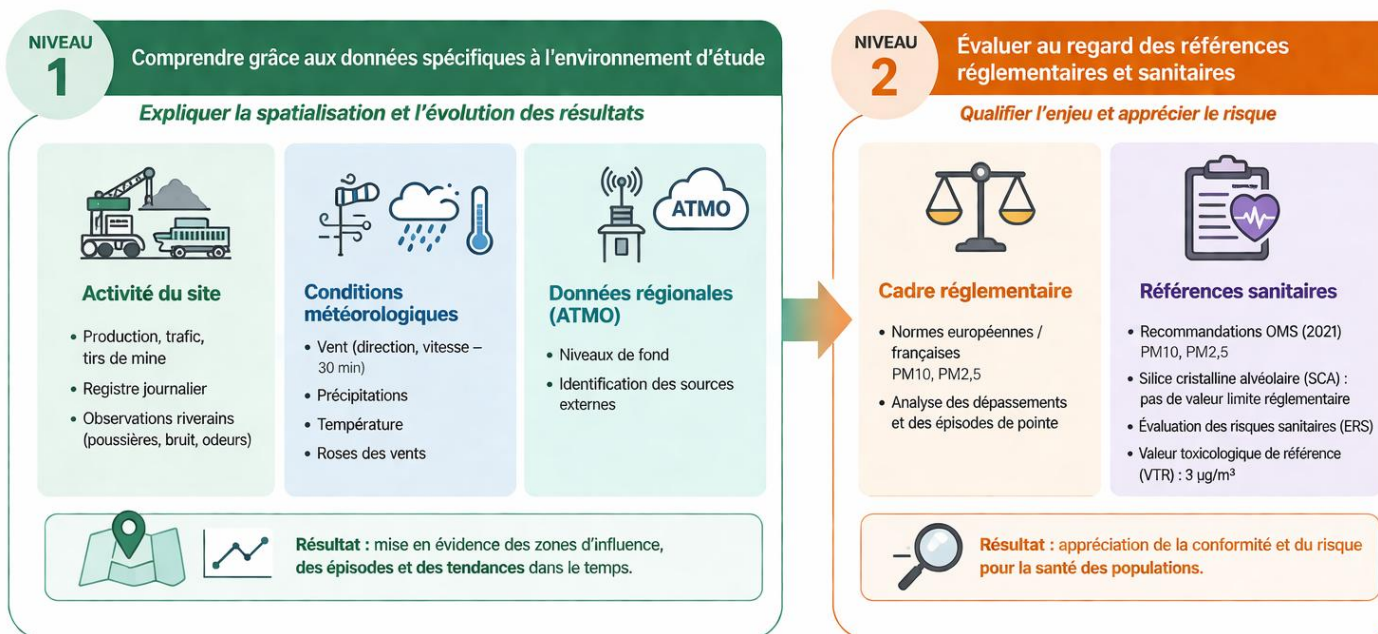
Un suivi spécifique des opérations de tir a été réalisé sur trois sites, avec des mesures effectuées avant, pendant et après les tirs sur des périodes de 1 à 2 heures.

	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E
Période de surveillance	Ete 2020 et hiver 2021	Automne 2020 et Printemps 2021	Hiver 2021 et Été 2021	Été 2019 et Hiver 2020	Automne 2018 et Printemps 2020
Nombre de jours de mesures des poussières (deux campagnes)	68 jours, incluant 26 mesures journalières et 6 semaines de mesures hebdomadaires	56 jours, incluant 28 mesures journalières et 4 semaines de mesures hebdomadaires	56 jours, incluant 28 mesures journalières et 4 semaines de mesures hebdomadaires	56 jours de mesures journalières	42 jours de mesures journalières
Couverture annuelle des mesures de poussières	18.6 %	15.3 %	15.3 %	15.3 %	11.5 %
Nombre de jours de mesures de la SCA (deux campagnes)	53 jours, incluant 11 mesures journalières et 6 semaines de mesures hebdomadaires	38 jours, incluant 10 mesures journalières et 4 semaines de mesures hebdomadaires	38 jours, incluant 10 mesures journalières et 4 semaines de mesures hebdomadaires	26 jours de mesures journalières	13 jours de mesures journalières
Couverture annuelle des mesures de SCA	14.5 %	10.4 %	10.4 %	7.1 %	3.6 %

Interprétation

Interprétation en deux niveaux

Du contexte local aux références sanitaires et réglementaires



Une interprétation robuste =
données locales pour comprendre, références pour évaluer.

Principaux résultats PM

Polluant	Périodicité	Type de norme	Norme en vigueur		Norme révisée adoptée pour 2030	Dépassements autorisés	Valeurs guides de l'OMS (2021)
PM _{2,5}	Annuelle	Valeur limite	25 µg/m ³	↘	10 µg/m ³	-	5 µg/m ³
	24h	Valeur limite	pas de norme	↓	25 µg/m ³	18 fois/an	15 µg/m ³
PM ₁₀	Annuelle	Valeur limite	40 µg/m ³	↘	20 µg/m ³	-	15 µg/m ³
	24h	Valeur limite	50 µg/m ³	↘	45 µg/m ³	18 fois/an	45 µg/m ³

Source : CITEPA

PM10 :

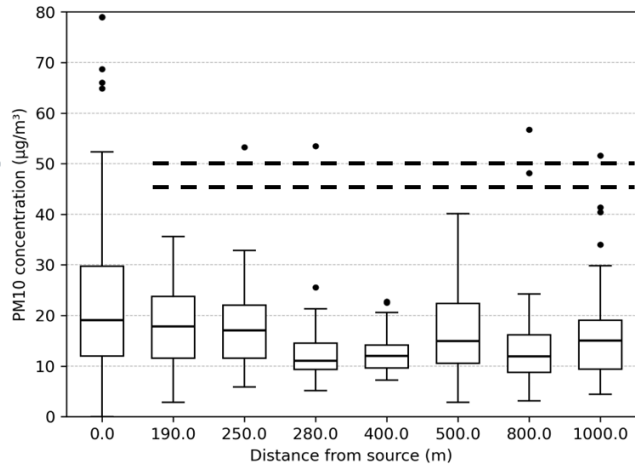
- Concentrations moyennes : 14 à 18 µg/m³ (sous les valeurs réglementaires et proches de l'OMS) ;
- Concentrations journalières maximales : 23 à 57 µg/m³ ;
- Dépassements occasionnels du seuil réglementaire (50 µg/m³) et de la valeur guide OMS (45 µg/m³) (moyennes journalières) majoritairement en lien avec des épisodes régionales ou survenant en dehors des périodes d'activité ;
- Niveaux légèrement plus élevés aux stations résidentielles sous les vents.

PM2,5 :

- Concentrations moyennes : 5 à 7 µg/m³ (sous les valeurs réglementaires et proches de l'OMS) ;
- Concentrations journalières maximales : 14 à 28 µg/m³ ;
- Dépassements occasionnels de la valeur guide OMS (15 µg/m³) (moyenne journalière) majoritairement en lien avec des épisodes régionales ou survenant en dehors des périodes d'activité ;
- Faible variabilité entre les stations, pas de tendance spatiale.

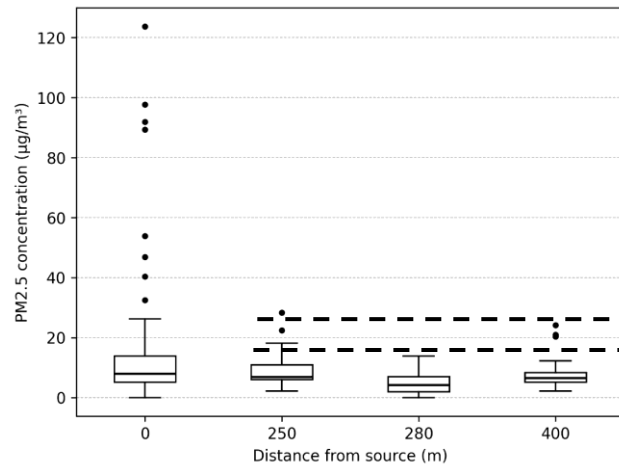
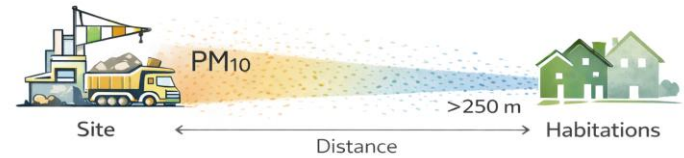
👉 Impact limité de la carrière chez les riverains, contribution dominante du bruit de fond

Évolution des concentrations en fonction de la distance sous les vents dominants



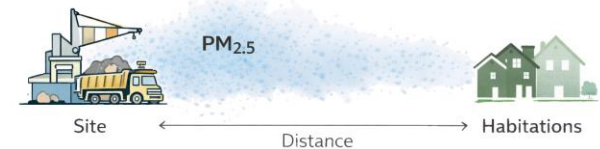
Gradient d'impact sous vents dominants

- Impact plus élevé à proximité de la carrière
- Décroissance rapide avec la distance
- Stabilisation au-delà de 250 m



Profil plus diffus des concentrations

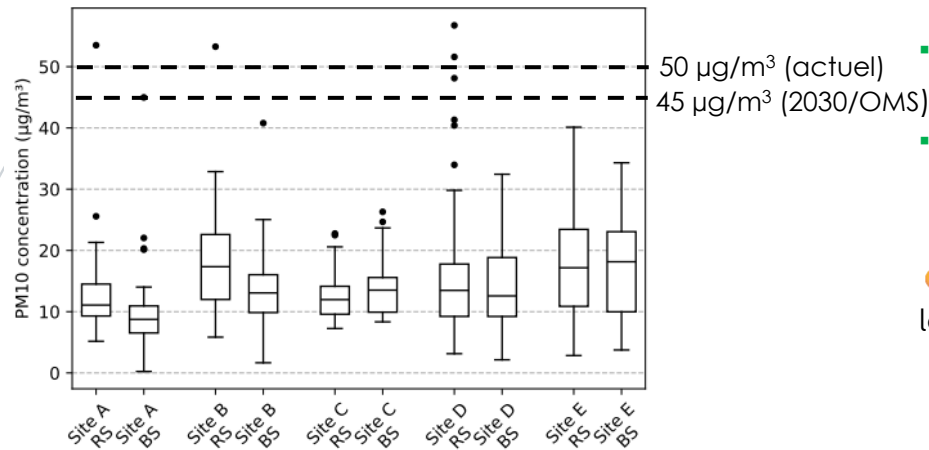
Influence plus faible de la carrière



Tendances confirmées par des tests statistiques

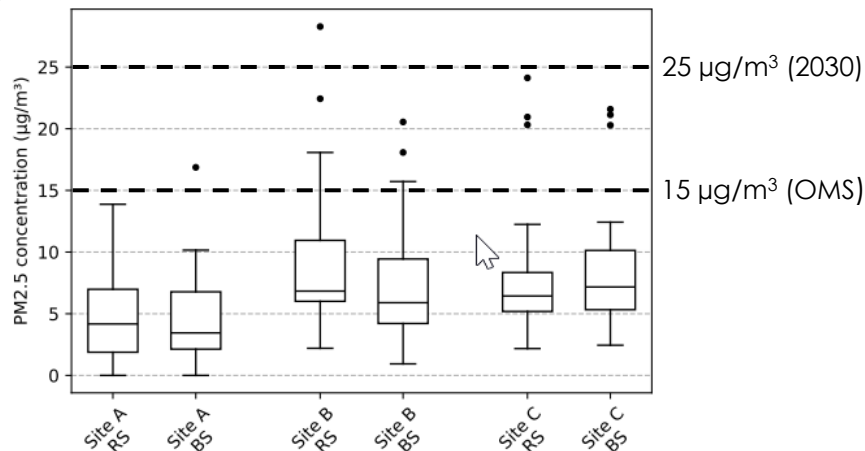
Principaux résultats PM

Analyse comparative des concentrations entre les sites riverains



- Niveaux plus élevés sous les vents (RS) pour les sites A et B
- Pas de différence nette pour les autres sites

👉 Influence dépend des conditions locales



- Différences limitées entre les stations situées sous et à l'abri des vents dominants
- Absence de distinction nette entre les types de stations

👉 Fort recouvrement des concentrations mesurées

Tendances confirmées par des tests statistiques

Principaux résultats SCA

PM10 :

- Moyenne des concentrations en SCA variant de 0,32 à 1,11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aux stations résidentielles sous les vents ;
- 0,14 à 0,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à l'abri des vents dominants ;
- Avec des valeurs de risque comprises entre 0,11 et 0,37.

PM2,5 :

- Les concentrations sont plus faibles, comprises entre 0,06 et 0,22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;
- Avec des valeurs de risque comprises entre 0,02 et 0,07.

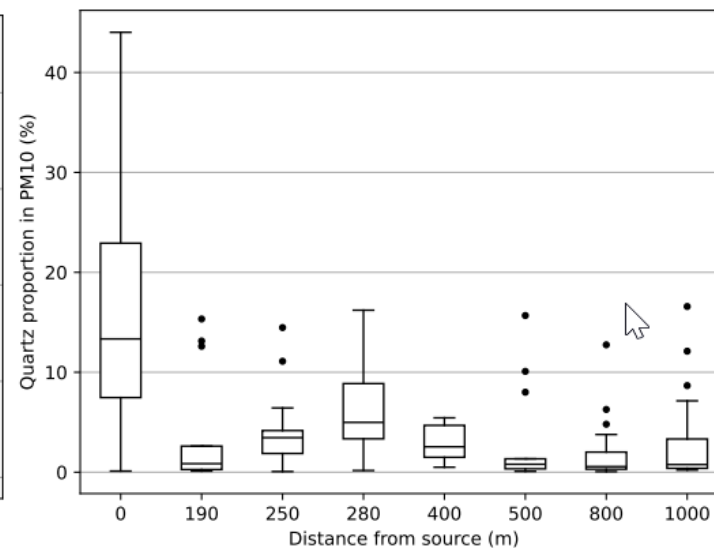
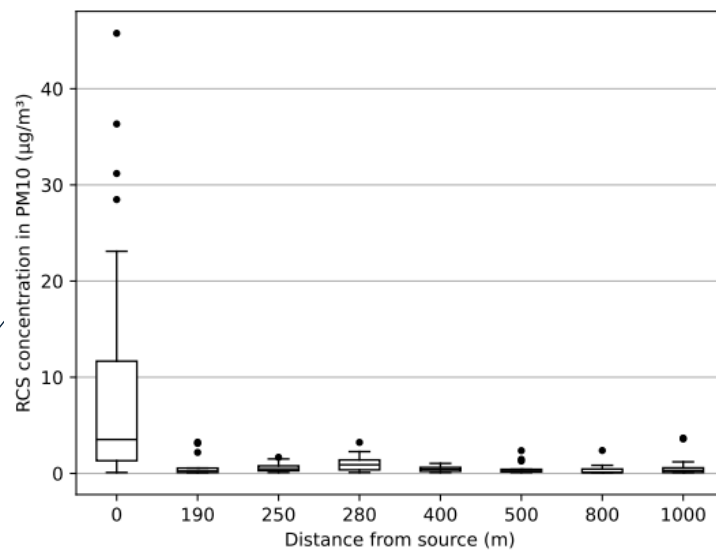
👉 Évaluation des risques (QD) < 1 pour l'ensemble des situations ⇒ absence de risque chronique démontré dans le cadre de cette étude

👉 Risque sanitaire très faible lié à la silice

👉 Situation rassurante pour les populations riveraines

Principaux résultats SCA

Évolution des concentrations et de la composition en SCA en fonction de la distance sous les vents dominants (PM10)



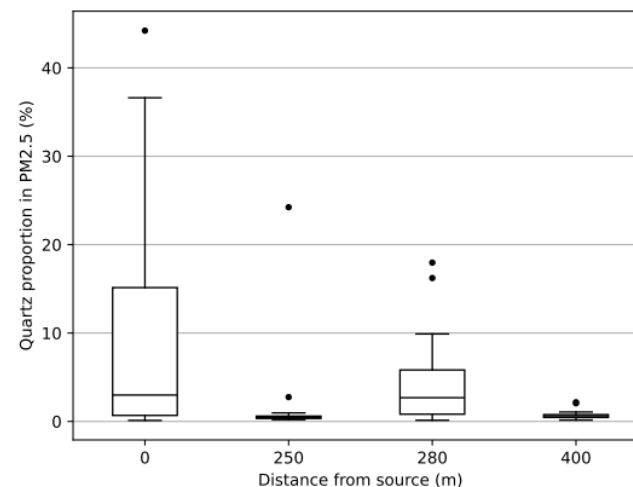
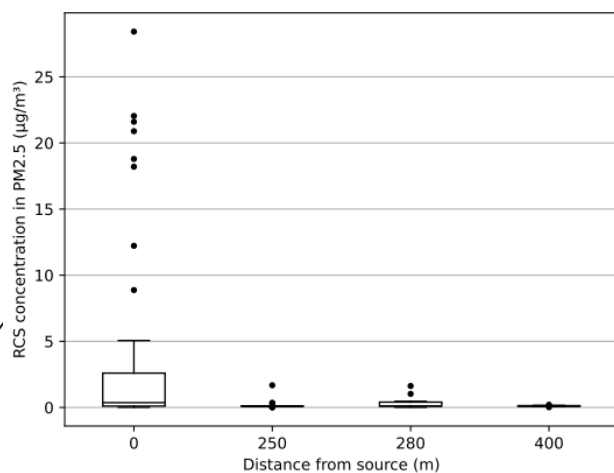
- Niveaux plus élevés à proximité de la source
- Diminution rapide avec la distance avec une stabilisation vers 400 m
- Diminution de la proportion de quartz

👉 Signature de proximité de la carrière

Tendances confirmées par des tests statistiques

Principaux résultats SCA

Évolution des concentrations et de la composition en SCA en fonction de la distance sous les vents dominants (PM_{2,5})

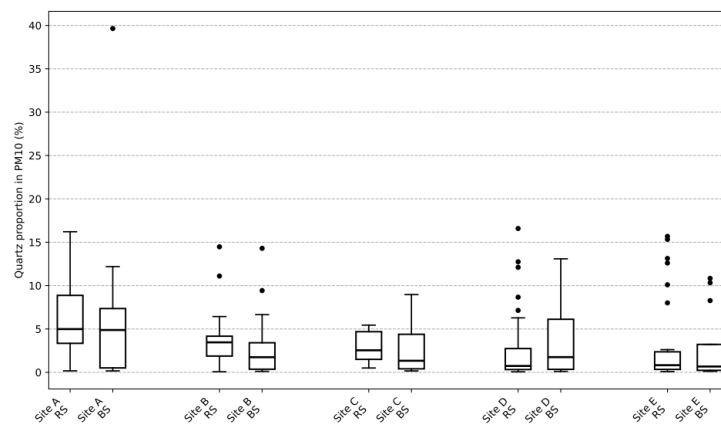
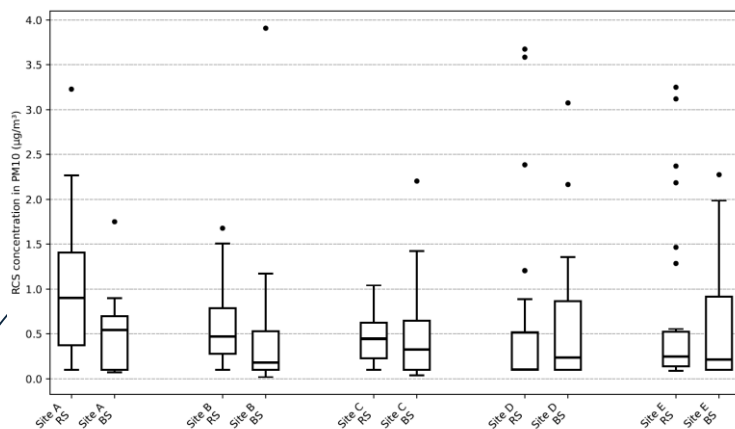


- Diminution avec la distance
- Proportion de quartz stable
- 👉 Influence du bruit de fond

Tendances confirmées par des tests statistiques

Principaux résultats SCA

Analyse comparative des concentrations entre les sites riverains (PM10)

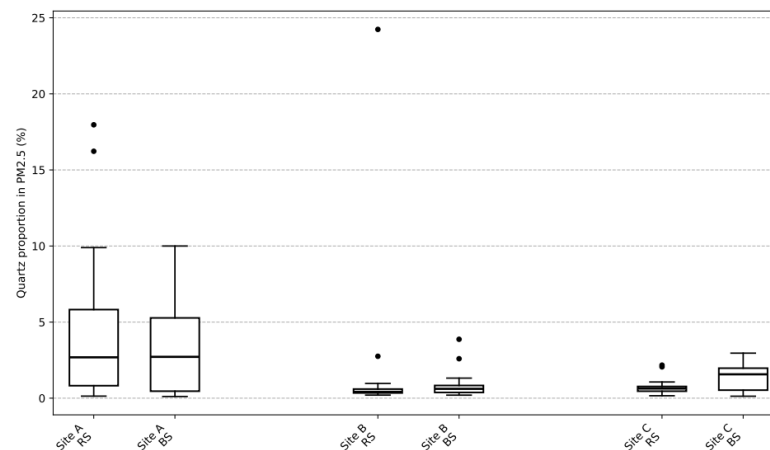
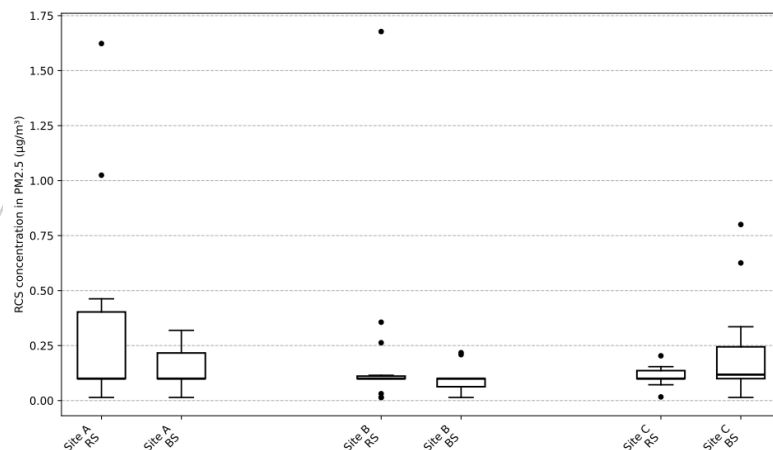


- Pas de différences entre les stations
- Composition similaire
- 👉 Absence de signature spécifique

Tendances confirmées par des tests statistiques

Principaux résultats SCA

Analyse comparative des concentrations entre les sites riverains (PM_{2,5})



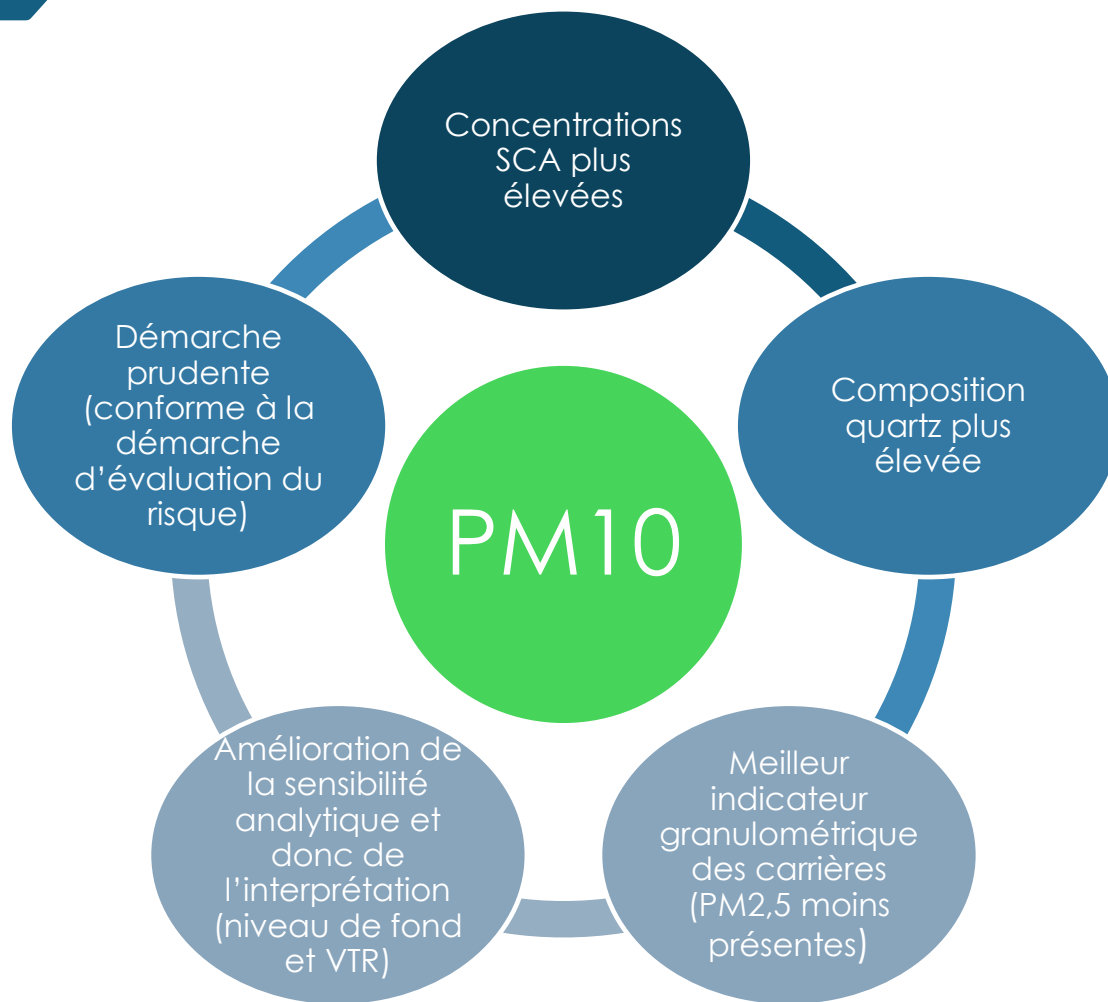
- Niveaux similaires entre les deux types de stations
- Composition homogène

👉 Influence dominante du bruit de fond

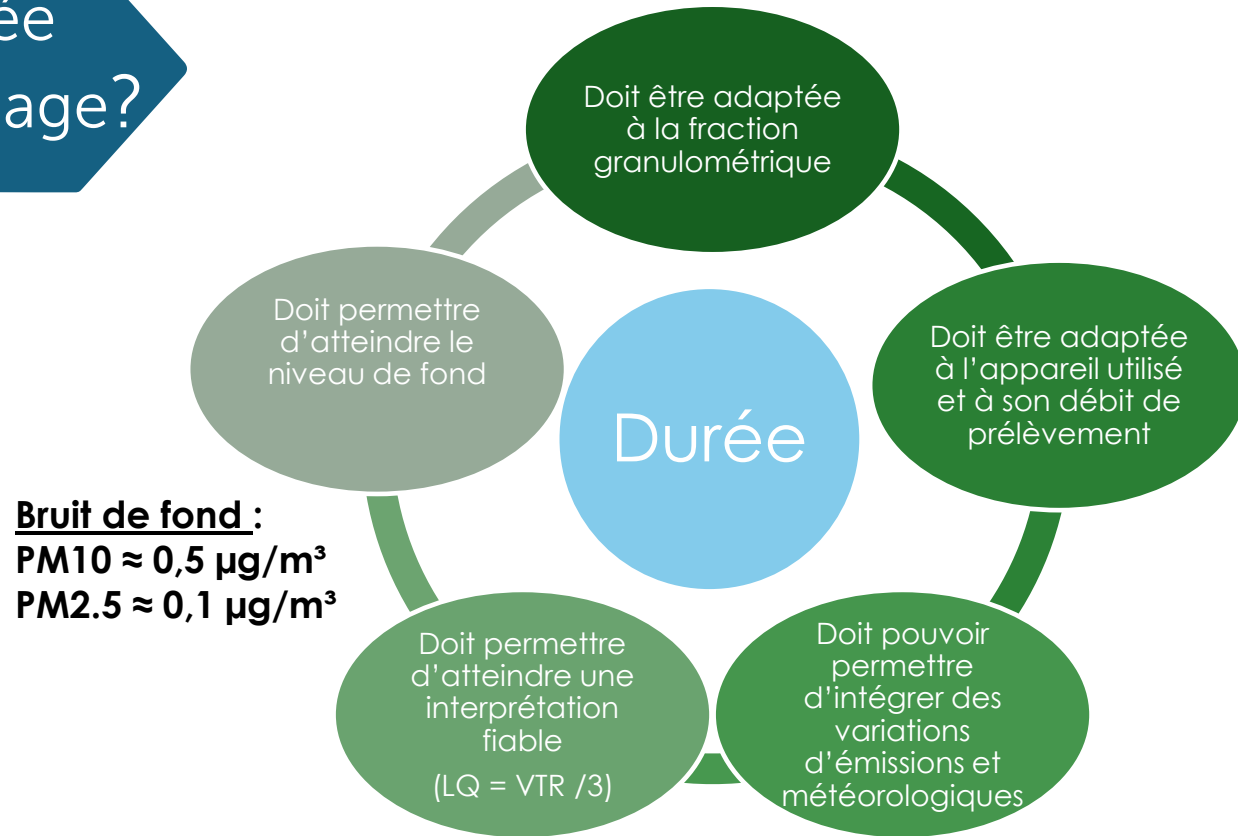
Tendances confirmées par des tests statistiques

Quelle fraction /surveillance de la SCA?



La PM10 pour une démarche pertinente du suivi de la SCA



Quelle durée d'échantillonnage?



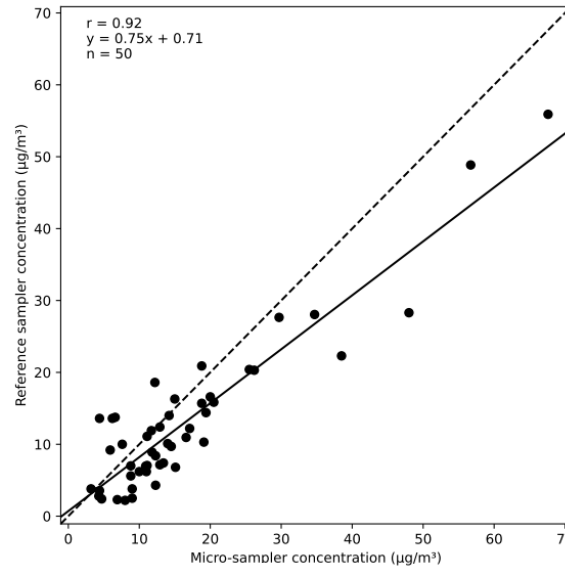
Bruit de fond :
 $PM_{10} \approx 0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$
 $PM_{2,5} \approx 0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Fraction suivie	Préleveur séquentiel (1,0 - 2,3 m ³ /h)		Micro-préleveur (3 - 10 L/min)	
	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{2,5}
 Débit	1,0 - 2,3 m ³ /h		3 - 10 L/min	
 Durée pour atteindre le niveau de fond	3,5 - 8 h ($\approx 0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	17,5 - 40 h ($\approx 0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	13 - 44 h ($\approx 0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	67 - 222 h ($\approx 0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

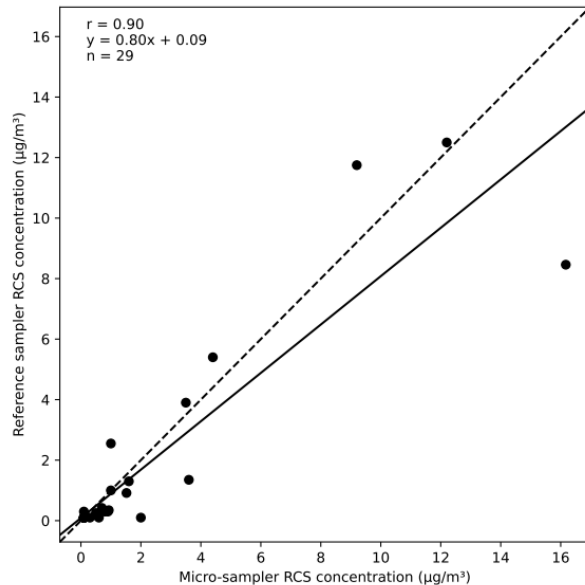
Alternatives métrologiques

?

Micro-préleveur/préleveur séquentiel



- Bonne concordance globale entre les deux appareils
- Forte corrélation pour les mesures de particules et de silice
- Micro-préleveur tend à mesurer des concentrations plus élevées



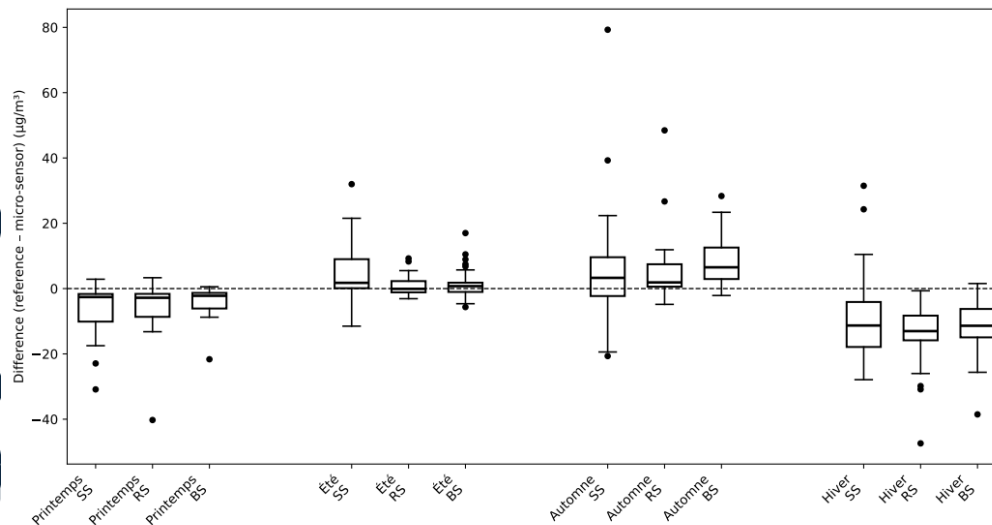
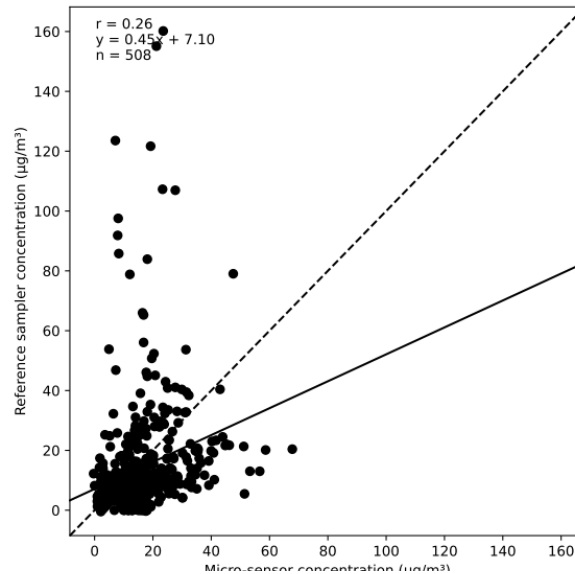
- Biais systématique, plus marqué à proximité des sources d'émission
- La surestimation augmente avec la concentration (micro-préleveur)

👉 Outil alternatif utilisable pour une évaluation quantitative réglementaire. Son coût réduit permet de disposer d'un nombre plus important de points de contrôle

Alternatives météorologiques

?

Micro-capteur/préleveur séquentiel



Forte valeur opérationnelle

- Mesures continues → compréhension fine de la variabilité
- Détection d'événements ponctuels

Absence d'équivalence avec la méthode de référence

- Corrélation très faible
- Différences statistiquement significatives

Biais importants

- Surestimation en hiver et sous-estimation en été
- Forte dépendance aux conditions (météo, environnement)

Limites métrologiques

- Sensibilité à l'humidité
- Dysfonctionnements / pertes de données
- Sous-estimation en atmosphère chargée

👉 Outil complémentaire d'interprétation, mais non utilisable pour une évaluation quantitative réglementaire

Niveaux globalement faibles (PM10 et PM2,5) au niveau des populations (conformes aux bruits de fond)

Absence de risque sanitaire chronique (silice)

Gradient spatial :

- Diminution avec la distance ;
- Stabilisation vers ~250–300 m.

PM10 :

- Indicateur des émissions de la carrière ;
- Impact localisé.

PM2,5 :

- Faible variabilité spatiale ;
- Influence dominante du bruit de fond.

Résultats cohérents avec la littérature (CEREGE; EMCAIR)

Impact limité des carrières sur la qualité de l'air dans les zones riveraines

Retour aux niveaux de fond vers ~250–300 m 🖱️ référence opérationnelle pour l'aménagement et les procédures d'autorisation

Utilisation dans les processus réglementaires :

- Cadre pour l'évaluation de l'exposition à la SCA ;
- Données qui permettent de répondre à demande de surveillance des poussières (en se référant uniquement à l'étude).

Micro-échantillonneurs :

- Adaptés à une surveillance allégée en contexte de faible exposition ;
- Son coût plus réduit permet de disposer d'un nombre plus important de points de contrôle ;
- A condition de respecter les durées de prélèvement et les exigences de LQ.

Attention 🖱️ Les résultats doivent être adaptés aux conditions locales (matériaux, pratiques, contexte environnemental)

Nombre limité de sites (n = 5)

Couverture temporelle limitée à deux campagnes

Micro-capteurs:

- Sensibles aux conditions environnementales (humidité, température, poussières) ;
- Différences systématiques par rapport aux méthodes de référence ;
- Adaptés au suivi des tendances, mais non à un usage réglementaire sans calibration.

Fractions granulométriques :

- Mesures limitées aux PM10 et PM2,5 en raison des référentiels environnemental et normatif.

Référence toxicologique :

- Basée sur une valeur unique non harmonisée (Office of Environmental Health Hazard Assessment)