

Particules issues de carrières



Caractériser et évaluer l'exposition aux particules issues de carrière en région PACA

1ère partie Campagnes de mesures

Partenaires scientifiques :

**CEREGE
AirPACA**

**Financeurs :
ARS PACA
DREAL PACA
UNICEM**



Particules issues de carrières

SOMMAIRE

I La problématique et le projet	7
II Sites et matériels de prélèvement	10
II.1 Carrière Bronzo-Perasso (Marseille)	10
II.2 Carrière GSM (Salon)	12
III Les conditions météorologiques	15
III.1 Les précipitations	15
III.2 Le vent	16
IV Les Particules sédimentables	18
IV.1 Carrière Bronzo-Perasso, Marseille	18
IV.2 Carrière GSM, Salon-de-Provence	20
V Les Particules inhalables (PM)	22
V.1 Carrière Bronzo-Perasso, Marseille	22
V.2 Carrière GSM, Salon de Provence	25
V.3 Le rapport PM2.5/PM10	29
V.4 Variations horaires	30
V.5 Relation Particules sédimentables – PM10	33
VI Conclusion et perspectives	35

Liste des figures et tableaux

<i>Figure 1 : Localisation de la carrière Bronzo-Perasso (Marseille)</i>	10
<i>Figure 2 : Localisation des sites de prélèvements, carrière Bronzo-Perasso</i>	10
<i>Figure 3 : Localisation de la carrière GSM, Salon de Provence</i>	13
<i>Figure 4 : Localisation des sites de prélèvements, carrière GSM</i>	14
<i>Figure 5 : Pluviométrie lors des deux campagnes sur la carrière Bronzo-Perasso</i>	16
<i>Figure 6 : Pluviométrie lors des deux campagnes sur la carrière GSM</i>	16
<i>Figure 7 : Rose des vents pour les deux campagnes, carrière Bronzo-Perasso</i>	17
<i>Figure 8 : Roses des vents pour les deux campagnes, carrière GSM</i>	17
<i>Figure 9 : Flux de particules sédimentables, carrière Bronzo-Perasso</i>	17
<i>Figure 10 : Flux net de particules sédimentables sur le site Proximité PRSE1, carrière Bronzo-Perasso</i>	19
<i>Figure 11 : Relation proportion de Quartz – proportion de Calcite pour les prélèvements de particules sédimentables de la carrière Bronzo-Perasso.</i>	19
<i>Figure 12 : Flux de particules sédimentables, carrière Bronzo-Perasso</i>	20
<i>Figure 13 : Rose des vents lors de la semaine du 12 au 19 Mars 2013, carrière GSM</i>	20
<i>Figure 14 : Rose des vents lors de la semaine du 5 au 12 Mars 2013, carrière GSM</i>	21
<i>Figure 15 : Relation proportion de Quartz – proportion de Calcite pour les prélèvements de particules sédimentables de la carrière GSM.</i>	22
<i>Figure 16 : Évolution des PM10 lors de la campagne d'été, carrière Bronzo-Perasso</i>	22
<i>Figure 17: Évolution des PM10 lors de la campagne d'hiver, carrière Bronzo-Perasso</i>	23
<i>Figure 18 : Évolution des PM2.5 lors de la campagne d'été, carrière Bronzo-Perasso</i>	24
<i>Figure 19: Évolution des PM2.5 lors de la campagne d'hiver, carrière Bronzo-Perasso</i>	24
<i>Figure 20: Évolution des PM10 durant la campagne d'hiver, carrière GSM</i>	26
<i>Figure 21: Évolution des PM10 durant la campagne d'été, carrière GSM</i>	26
<i>Figure 22: Relation vitesse moyenne du vent – concentration PM10 sur le site PRSE6 pour la campagne d'hiver, carrière GSM</i>	27
<i>Figure 23 : Relation des PM10 entre la station de Salon et le site PRSE5, campagne hiver, carrière GSM</i>	27
<i>Figure 24 : Relation entre concentration de PM10 pour les deux sites PRSE6 et PRSE 7, carrière GSM</i>	28
<i>Figure 25 : Concentration en PM2.5 pour la campagne d'hiver, carrière GSM</i>	28
<i>Figure 26 : Concentration en PM2.5 pour la campagne d'été, carrière GSM</i>	29
<i>Figure 27 : Relation PM10 – rapport PM2.5/PM10 (en haut carrière GSM,</i>	30

<i>en bas carrière Bronzo-Perasso)</i>	
<i>Figure 28 : Exemple d'évolution quart-horaire des concentrations en PM10 au cours d'une journée d'activité de la carrière GSM</i>	31
<i>Figure 29 : Exemple d'évolution quart-horaire des concentrations en PM10 au cours d'un samedi, carrière GSM</i>	31
<i>Figure 30 : Évolution de la direction du vent et de la concentration en PM10 pour le Mercredi 6 Mars 2013 sur le site PRSE4, carrière GSM</i>	32
<i>Figure 31 : Évolution de la direction du vent et de la concentration en PM10 pour le Jeudi 14 Mars 2013 sur les sites PRSE4 et PRSE6, carrière GSM</i>	32
<i>Figure 32 : Évolution de la direction du vent et de la concentration en PM10 pour le Vendredi 8 Mars 2013 sur le site PRSE4, carrière GSM</i>	33
<i>Figure 33 : Relation flux de particules sédimentables – concentration en PM10 pour la carrière de Ste Marthe</i>	34
<i>Figure 34 : Relation flux de particules sédimentables – concentration en PM10 pour la carrière de Salon</i>	34
<i>Tableau I : Coordonnées des sites de prélèvements, carrière Bronzo-Perasso</i>	11
<i>Tableau II : Équipements de la campagne Été, carrière Bronzo-Perasso</i>	11
<i>Tableau III : Équipements de la campagne Hiver, carrière Bronzo-Perasso</i>	12
<i>Tableau IV : Coordonnées des sites de prélèvements, carrière GSM</i>	13
<i>Tableau V : Équipements de la campagne Hiver, carrière GSM</i>	14
<i>Tableau VI : Équipements de la campagne Été, carrière GSM</i>	15
<i>Tableau VII: Moyennes des concentrations en PM10 et PM2.5 lors des deux campagnes, carrière Bronzo-Perasso</i>	23
<i>Tableau VIII: Moyennes des concentrations en PM10 et PM2.5 lors des deux campagnes, carrière GSM</i>	25

Particules issues de carrières

I La problématique et le projet

La région PACA est une des régions de France qui présente les niveaux de pollution atmosphériques particulières les plus élevées, avec de nombreux dépassements des niveaux réglementaires. Les sources principales sont assez classiques :

- les activités industrielles
- le trafic routier.
- le chauffage urbain (en particulier le chauffage au bois)

En 2012, une révision des Plans de Protection de l'Atmosphère (PPA), concernant les Bouches du Rhône, les Alpes-Maritimes ainsi que les agglomérations d'Avignon et Toulon, a été entreprise par les Services de l'État.

Dans le PPA des Bouches du Rhône, approuvé par le Préfet en 2013, figurent plusieurs fiches-actions visant à réduire les émissions de particules émises par les différents secteurs d'activité. Parmi ces actions, certaines concernent le secteur des carrières et portent sur la réduction des émissions diffuses (action réglementaire 1.2) ou sur une meilleure connaissance de ces émissions (action d'accompagnement 21). Le même type d'actions existent pour les PPA de Toulon et des Alpes-Maritimes. Conjointement, en 2012, des arrêtés préfectoraux ont imposé aux carrières ayant une production supérieure à 150 00 t, la mise en place d'un réseau de mesure des poussières diffuses par plaquette (réseau qui généralement existait déjà) avec des seuils à 1 g/m².j au 1er Janvier 2013, puis 0,5 g/m².j au 1er Janvier 2014. Les mêmes arrêtés demandaient également aux carrières de procéder à une évaluation de leurs émissions de PM₁₀ à partir de la méthode AP-42 de l'US EPA.

En région PACA, les carrières sont une activité importante¹. En 2012, 29 millions de tonnes de matériaux ont été extraites du sous-sol de la région (carrières et gravières) dont 35 % dans les Bouches du Rhône, 23 % dans le Var et 18% dans les Alpes Maritimes. Pour l'essentiel, ces matériaux sont du calcaire, mais sont également exploités des sables siliceux dans le Vaucluse, le Var et les Alpes-Maritimes, du porphyre dans le Var et des matériaux argileux dans le Var et le Vaucluse. A 75%, ces matériaux sont destinés à la production de granulats.

A ce jour, il n'y a eu que très peu de données sur la quantification ou la caractérisation des poussières émises par les carrières.

- Les exploitants sont soumis à une auto surveillance des émissions de particules sédimentables mais ne font aucune mesure concernant les PM₁₀ et PM_{2.5}.

D'après le cadastre d'émission, réalisé par Atmo PACA en 2007, cette activité générerait 4000 t de poussières par an, représentant environ 10 % des poussières émises par l'ensemble des activités recensées et se répartissant en 45% de PM_{2.5}, 64% de PM₁₀ et 36 % de particules supérieures à 10 µm. Dans le cadre du PPA des Bouches du Rhône, les carrières sont considérées comme contribuant à 12 % des PM₁₀ et des PM_{2.5} (respectivement 35% et 48% du secteur Industries-Traitement des déchets). Ce serait donc une source non négligeable, qui présente la caractéristique d'être essentiellement une source diffuse, donc difficile à mesurer à l'émission.

¹ http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=502

Les seules mesures de PM10 existantes sont celles effectuées par le CEREGE en 2007 autour d'une carrière du Var, en milieu rural, indiquant des concentrations de 16 à 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, à comparer à des concentrations de 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en milieu urbain, à Toulon, à la même période.

D'une façon générale, en terme d'impact sanitaire, ces particules fines ne présentent pas de toxicité chimique particulière mais elles sont, comme pour toute fraction alvéolaire, handicapantes pour les personnes fragiles, sujettes à l'asthme, à des insuffisances respiratoires ou cardio-vasculaires. En terme d'impact environnemental, outre les gênes visuelles (éventuellement dangereuses au voisinage de voies routières importantes), elles peuvent avoir un impact sur les cultures situées à proximité (baisse des rendements agricoles par diminution de la photosynthèse). Enfin, ces poussières peuvent participer à l'élévation générale des niveaux de pollution environnementale, contribuant ainsi aux dépassements des niveaux réglementaires dans le voisinage des carrières.

Il est apparu très rapidement aux différentes parties prenantes (DREAL, ARS, UNICEM) que, d'une part, pour pouvoir évaluer le bien-fondé des mesures réglementaires prises et, d'autre part, pour pouvoir faire des évaluations fiables des émissions et des expositions des populations riveraines, il était indispensable d'avoir des mesures réelles des concentrations de poussières au voisinage des carrières ainsi que des facteurs d'émission correctement déterminés.

Dans ce contexte, AirPACA et le CEREGE (UMR 7330 CNRS-AMU) ont proposé de mesurer, quantifier et caractériser les émissions des trois classes de particules (sédimentables, PM10 et PM2.5) autour des sites d'extraction choisis en fonction du type de matière première, de la topographie et des conditions météorologiques ainsi que de la présence de populations riveraines plus ou moins importante. A partir de ces mesures de terrain, pourront être modéliser et évaluer la dispersion des particules autour des carrières, conduisant ainsi à une évaluation objective de l'exposition des populations riveraines. Ces mesures permettront également de vérifier que les facteurs d'émission théoriques utilisés dans la méthode AP-42 sont bien réalistes et adaptés aux carrières françaises.

Le projet a été co-financé par la DREAL PACA, l'ARS PACA (dans le cadre du PRSE2) et l'UNICEM.

Deux carrières ont été équipées. Les principaux critères de choix ont été :

- la proximité de zones urbanisées ;
- la nature de la roche ;
- la taille de la carrière ;
- la situation topographique ;
- la présence ou non de dispositifs d'abattement ;
- les contraintes logistiques (électricité, sécurité) et l'implication de l'exploitant.

Après appel à candidature de l'UNICEM auprès de ses membres, deux carrières exploitant du calcaire massif ont été sélectionnées : une à Marseille et une à Salon de Provence

Sur chaque carrière choisie, ont été effectuées deux campagnes d'un mois chacune (hiver et été) avec trois sites de prélèvement :

- un site en amont de la carrière par rapport au vent dominant, pour mesurer le bruit de fond ;
- un site dans la carrière, pour mesurer les émissions de celle-ci ;
- un site, en aval de la carrière par rapport aux vents dominants, en zone urbaine ou péri-urbaine, pour évaluer l'impact sur la population riveraine.

Les prélèvements ont concerné les trois fractions : sédimentables (pas de temps hebdomadaire ou bi-hebdomadaire), PM10 et PM2.5 (pas de temps quotidien).

La fraction sédimentable a été prélevée par des systèmes de jauge (type jauge Owen). Les PM10 et PM2.5 ont été prélevées sur filtre téflon par des préleveurs bas-débit automatiques. De façon plus ponctuelle, des mesures de granulométrie des particules ont également été effectuées par utilisation de compteurs et des néphélomètres de l'UNICEM.

Les mesures de terrain ont porté :

- sur la quantification des particules (flux en $g/m^2/j$ pour les particules sédimentables, $\mu g/m^3$ pour les PM10 et PM2.5) ;
- sur une qualification minéralogique (recherche des phases caractéristiques de l'émetteur) par DRX et Microscopie électronique à balayage ;

Les comparaisons entre les sites de prélèvements, ainsi qu'avec les stations des réseaux de surveillance, ont permis de mesurer la contribution des émissions des carrières à leur environnement.

Les résultats sur les PM10 et PM2.5 ont également alimenté les modèles de dispersion et d'exposition développés par AirPACA, ainsi que l'exercice de validation de la méthode AP-42.

II Sites et matériels de prélèvements

II.1 Carrière Bronzo-Perasso (Marseille)

La carrière Bronzo-Perasso se localise dans le quartier de Ste Marthe, dans la partie Nord de Marseille (Fig. 1). A la limite de la zone urbaine, elle est située à flanc de colline et profondément encaissée. Orientée approximativement Nord-Sud, elle présente un « exutoire » étroit, susceptible de canaliser la sortie des poussières. Le tonnage annuel extrait est d'environ 500 000 t par an.

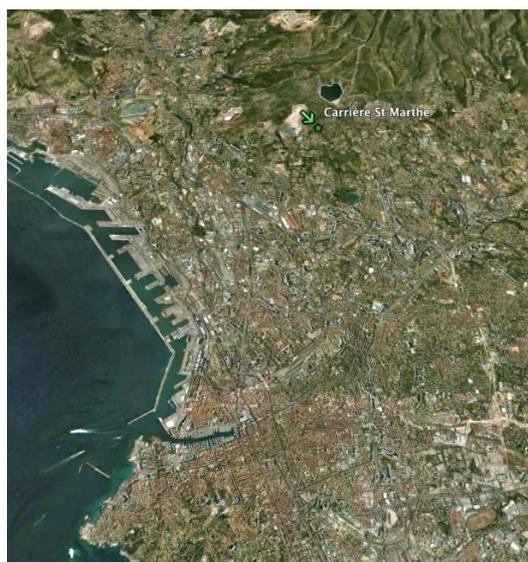


Figure 1 : Localisation de la carrière Bronzo-Perasso (Marseille)



Figure 2 : Localisation des sites de prélèvements, carrière Bronzo-Perasso

Particules issues de carrières

Sur cette carrière, trois sites de prélèvements ont été instrumentés (Tab. I et Fig. 2) :
 PRSE1 : proximité, à l'exutoire sud de la carrière
 PRSE2 : site de fond, au bord du bassin du Vallon Dol, en amont, au Nord-Est de la carrière
 PRSE3 : site « exposition », à la limite de la zone urbaine (Tennis de Tour-Sainte), en aval, environ 600m au Sud de la carrière

		Lat (N)	Long (E)
PRSE1	Carrière, proximité	43,35327	5,39155
PRSE2	Vallon Dol, amont	43,36230	5,40418
PRSE3	Tennis, aval	43,34798	5,39310

Tableau I : Coordonnées des sites de prélèvements, carrière Bronzo-Perasso

Une campagne a eu lieu en Juillet 2012 et l'autre en Novembre-Décembre 2012. Les tableaux II et III précisent les différents équipements en place sur chaque site pour les deux campagnes. Un certain nombre de problèmes techniques sont survenus pendant ces deux campagnes, entraînant parfois des séries de mesure discontinues.

	PRSE1	PRSE2	PRSE3
	Carrière	Amont	Aval
	Carrière	Vallon Dol	Tennis
PM10	Partisol 2025 Du 01/06 au 01/07	Partisol 2025 Du 01/06 au 01/07	Teom Du 01/06 au 01/07
PM2.5	Partisol 2025 Du 03/07 au 27/07	Partisol 2000 Du 01/06 au 13/07	Partisol 2025 Du 01/06 au 01/07
PS	sec/humide Du 01/06 au 27/07	total Du 01/06 au 13/07	total Du 01/06 au 01/07
Néphélomètre PM2.5	Depuis le 27/06		

Tableau II : Équipements de la campagne Été, carrière Bronzo-Perasso

Particules issues de carrières

	PRSE1	PRSE2	PRSE3
	Carrière	Amont	Aval
	Carrière	Vallon Dol	Tennis
PM10	Partisol 2025	Teom	Partisol 2025
	Du 21/11 au 18/12	Du 05/11/au 18/12	Du 07/11 au 07/12
PM2.5	Partisol 2025		Partisol 2025
	Du 05/11 au 19/11		Du 05/11 au 07/12
PS	sec/humide	total	total
	Du 05/11 au 18/12	Du 05/11 au 08/12	Du 05/11 au 08/12
Néphélomètre PM2.5	Du 06/11 au 17/12	Du 05/11 au 17/12	
	Du 20/11 au 10/12		
PDR	10	Du 20/11 au 24/11	
	2.5	Du 29/11 au 10/12	
	1		

Tableau III : Équipements de la campagne Hiver, carrière Bronzo-Perasso

II.2 Carrière GSM (Salon)

La carrière GSM de Salon de Provence se situe au Sud de la ville en limite Est de la base aérienne (Fig. 3). Le relief est totalement plat, entraînant une forte influence du Mistral. Les premières habitations sont à environ 500 m au Nord de l'exploitation. Au NE se trouve une centrale à béton et au SE une zone artisanale. La production autorisée est de 400 000 t par an. Cette carrière se caractérise par la présence dans sa partie sud d'une zone d'exploitation de blocs rocheux métriques dont la manipulation entraîne une émission importante de poussière.

Sur cette carrière, quatre sites ont été instrumentés (Tab . IV et Fig. 4) :

- PRSE 4 : proximité, au centre de l'exploitation, à côté du poste de commande
- PRSE 5 : amont, fond, jardin de l'ancien propriétaire à l'angle NO de la carrière
- PRSE 6 : aval, bordure Sud, face à la zone de blocs
- PRSE 7 : aval lointain, zone artisanale au SE, à environ 700 m du site de proximité.



Figure 3 : Localisation de la carrière GSM, Salon de Provence

		Lat (N)	Long (E)
PRSE4	Carrière	43,62003	5,12769
PRSE5	Amont	43,62113	5.12478
PRSE6	Aval	43,61743	5,13116
PRSE7	Aval lointain	43,61629	5,13528

Tableau IV : Coordonnées des sites de prélèvements, carrière GSM

Une campagne a eu lieu en Mars 2013 et l'autre en Juin 2013. Les tableaux V et VI précisent les différents équipements en place sur chaque site pour les deux campagnes. Un certain nombre de problèmes techniques sont survenus pendant ces deux campagnes, entraînant parfois des séries de mesure discontinues.

Particules issues de carrières



Figure 4 : Localisation des sites de prélèvements, carrière GSM

	PRSE4 Carrière	PRSE5 Amont	PRSE6 Aval	PRSE 7 Aval lointain
PM10	Partisol 2025 Du 6/03/13 au 8/04/13	Partisol 2025 Du 6/03/13 au 8/04/13	Partisol 2025 Du 8/03/13 au 6/04/13	Teom Du 30/03/13 au 6/04/13
PM2.5	Partisol 2025 Du 7/03/13 au 8/04/13			
PS	sec/humide DU 5/03/13 au 9/04/13	total DU 5/03/13 au 9/04/13	total DU 5/03/13 au 9/04/13	
PDR 10	Du 5/03/13 au 4/04/13	Du 5/03/13 au 4/04/13 Nb interruptions	Du 7/03/13 au 9/04/13	

Tableau V : Équipements de la campagne Hiver, carrière GSM

	PRSE4 Carrière	PRSE5 Amont	PRSE6 Aval	PRSE 7 Aval lointain
PM10	Partisol 2025 Du 5/6/13 au 14/6/13 et du 26/6/13 au 4/7/13		Partisol 2025 Du 5/6/13 au 4/7/13	Teom Du 5/6/13 au 4/7/13
PM2.5	Partisol 2025 Du 13/6/13 au 4/7/13			
PS	sec/humide Du 4/6/13 au 5/7/13		total Du 4/6/13 au 5/7/13	total Du 4/6/13 au 5/7/13

Tableau VI : Équipements de la campagne Été, carrière GSM

III Les conditions météorologiques

Nous ne disposons pas de station météo pour la campagne été de la carrière Bronzo-Perasso (Marseille). Ce sont donc les données de la station Météo-France de Marignane qui ont été utilisées pour le vent et celles de la station Météo-France de Ste Marthe. Pour la campagne hiver, ce sont les données de la station météo UNICEM, installée sur le site de fond.

Pour la carrière GSM (Salon), les données proviennent de la station Météo-France de Salon, installée sur la base aérienne, juste à côté de la carrière.

III.1 Les précipitations

Pour la carrière Bronzo-Perasso, deux épisodes orageux ont eu lieu le 11 Juin et le 1er Juillet (Fig. 5). En hiver, il n'y a eu qu'un seul épisode pluvieux important du 26 au 28 Novembre 2012.

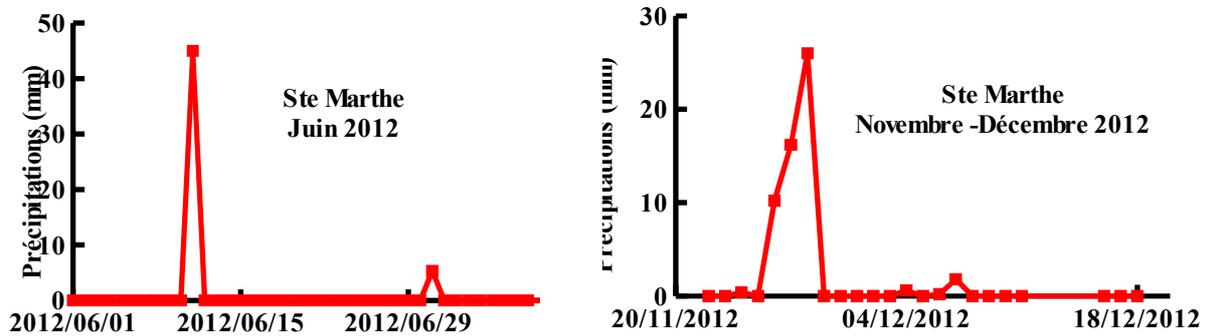


Figure 5 : Pluviométrie lors des deux campagnes sur la carrière Bronzo-Perasso

La campagne hiver de Salon est beaucoup plus humide avec environ un jour de pluie sur deux (Fig. 6). En été, un seul épisode orageux important les 8 et 9 Juin.

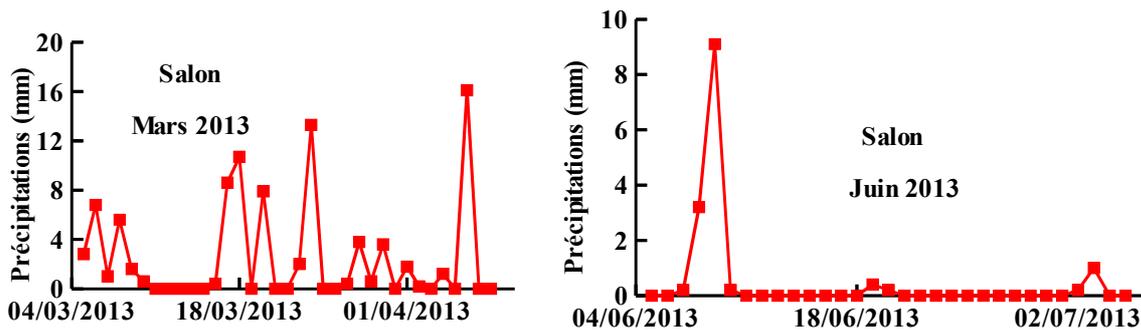


Figure 6 : Pluviométrie lors des deux campagnes sur la carrière GSM

III. 2 Le vent

En Juin 2012, sur la carrière de Ste Marthe, le vent était principalement de secteur NO (7 à 8% entre N310 et N330) avec des fréquences de l'ordre de 3 à 5% sur les secteurs N140, N190 et N260 (Fig. 7). En hiver, le secteur N310-N330 est plus présent (12 à 13%), avec une petite participation des secteurs N80 et N140. Les vitesses maximales sur une heure ont été de 44 km/h le 4 Juin et de 76 km/h le 29 Novembre.

Particules issues de carrières

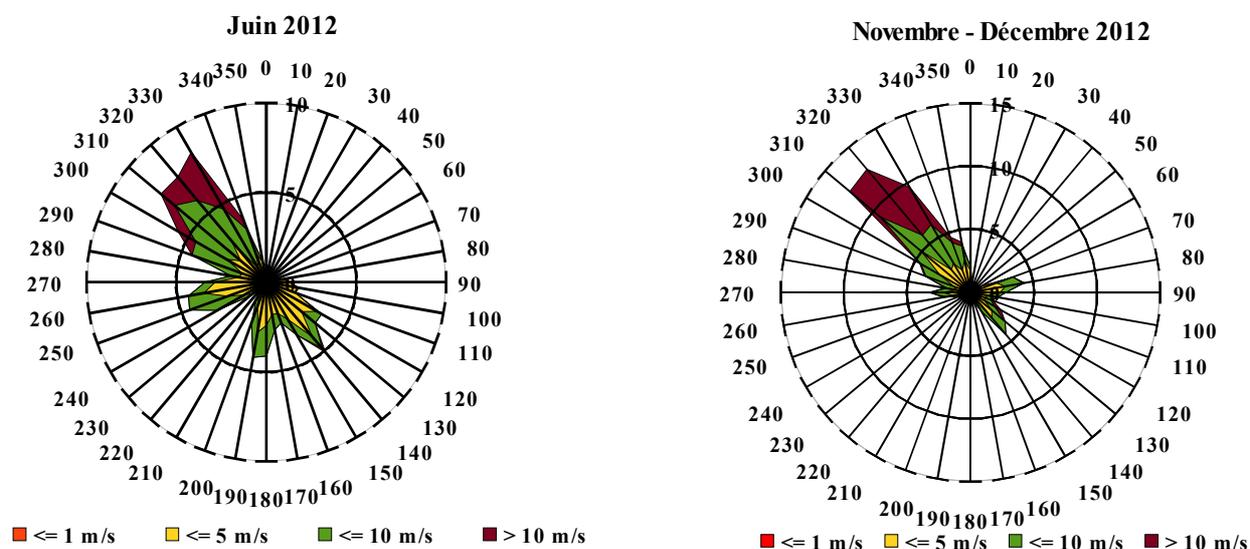


Figure 7 : Rose des vents pour les deux campagnes, carrière Bronzo-Perasso

Pour Salon, le secteur N330 est également le plus important (11% en Mars et 13% en Juin), avec un très fort épisode de vent d'Est en Mars 2013 et un épisode non négligeable de vent de SO en Juin 2013 (Fig. 8). Les vitesses maximales horaires ont été de 72 km/h le 20 Mars et de 54 km/h le 24 Juin.

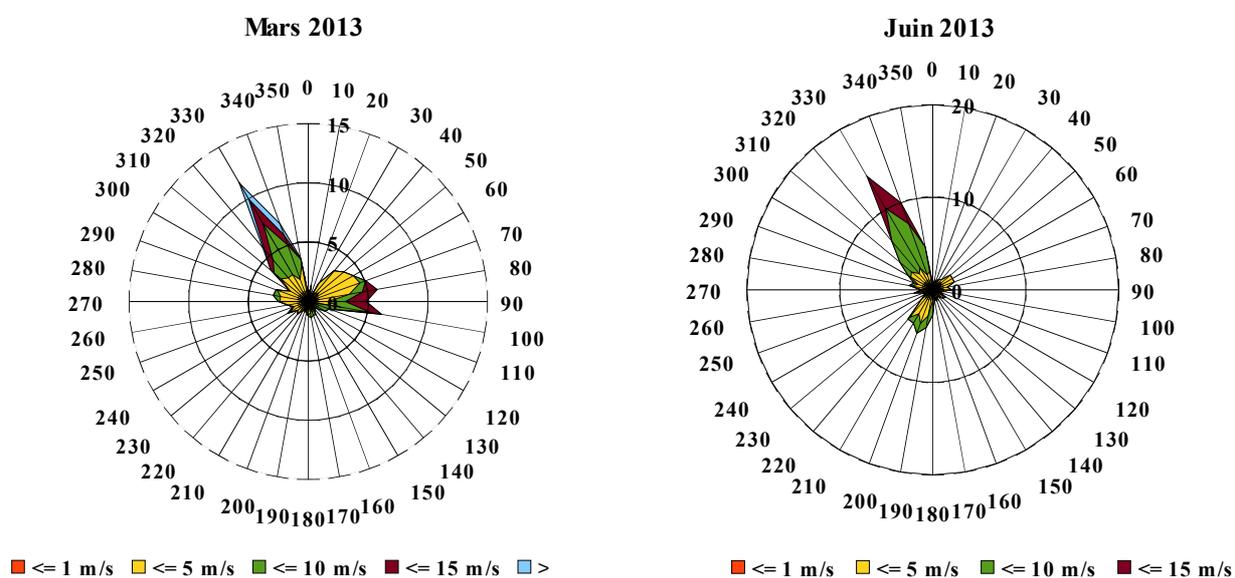


Figure 8 : Roses des vents pour les deux campagnes, carrière GSM

IV Les Particules Sédimentables

Sur les sites de carrières (PRSE1 et PRSE4), les particules sédimentables (PS) ont été recueillies avec un préleveur MTX, permettant la distinction dépôt sec / dépôt humide. Sur les autres sites, elles ont été récupérées à l'aide de « jauge » constituée d'un entonnoir et d'une bouteille. Le pas de prélèvement normal était d'une semaine. En absence de pluie, les préleveurs étaient lavés à l'eau MQ pour récupérer les particules. Après une première filtration à 150 μm , pour éliminer les débris végétaux et animaux, les prélèvements étaient filtrés sur des filtres en cellulose 0,45 μm (pour analyse chimique) et polycarbonate 0,40 μm (pour analyses minéralogiques et études MEB). Les flux de particules, exprimées en $\text{g}/\text{m}^2/\text{j}$, ont été calculés à partir des pesées des filtres, avant et après filtration.

IV.1 Carrière Bronzo-Perasso, Marseille

Pour les deux campagnes, les flux de PS sur les sites Amont (PRSE2) et Aval (PRSE3) sont quasi-identiques et en général faibles (de 0,01 à 0,03 $\text{g}/\text{m}^2/\text{j}$) (Fig. 9 et 10). Les deux seules valeurs élevées (22/06 et 06/07), présentes pour les deux sites, sont liées à des entrées de poussières sahariennes.

Les flux mesurés sur le site Carrière (PRSE1) sont nettement plus élevées, d'un facteur 5 à 10 hors épisodes sahariens, pouvant atteindre 0,4 $\text{g}/\text{m}^2/\text{j}$ soit 12 $\text{g}/\text{m}^2/\text{mois}$.

Il ne semble donc pas y avoir d'influence des émissions de la carrière sur les sites de fond et d'exposition, en ce qui concerne les particules sédimentables.

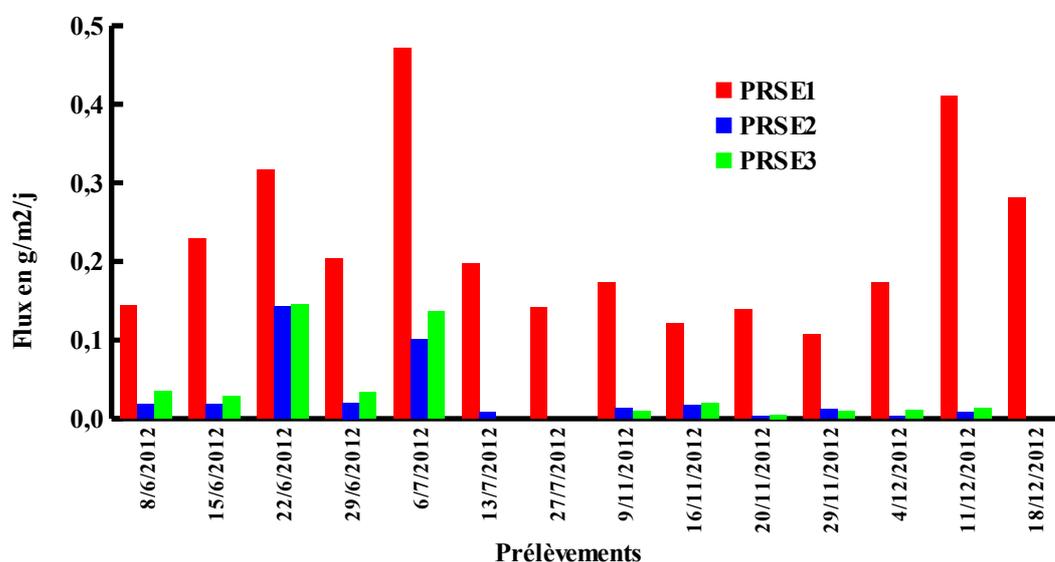


Figure 9 : Flux de particules sédimentables, carrière Bronzo-Perasso

Particules issues de carrières

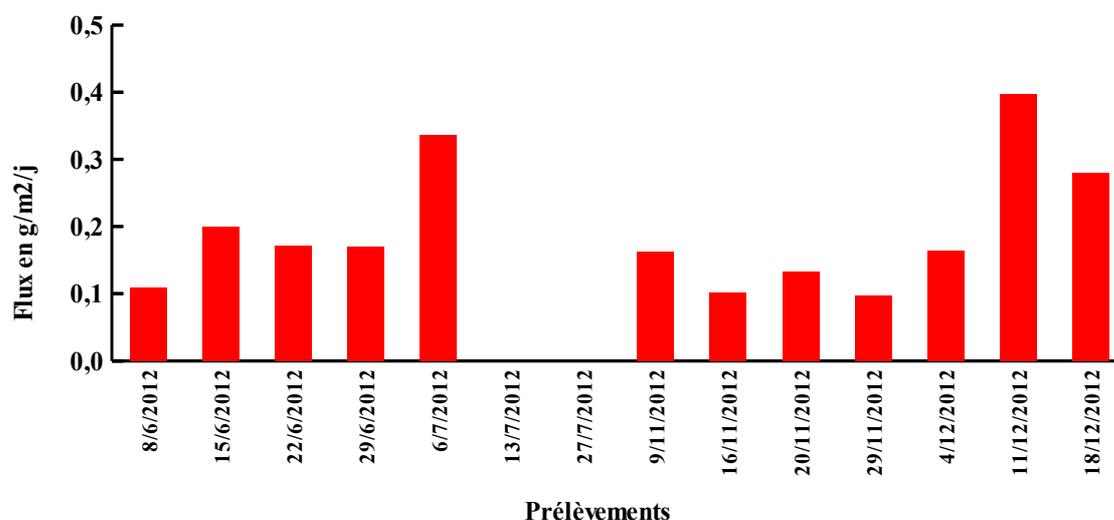


Figure 10 : Flux net de particules sédimentables sur le site Carrière PRSE1, carrière Bronzo-Perasso

L'étude minéralogique montre la présence de Quartz, Calcite et Dolomite comme phases principales. Globalement, la teneur en Calcite diminue du site carrière au site Amont via le site Aval (Fig. 11). Pour le site Carrière, il n'y a que très peu de différences entre les prélèvements secs et les prélèvements humides. Les prélèvements du site Carrière présentant les plus basses teneurs en Calcite sont ceux marqués par des entrées sahariennes et caractérisées par la présence de Palygorskite. Les sites Amont et Aval sont également plus riches en minéraux argileux, reflétant l'influence du ré-entrainement de particules de sol.

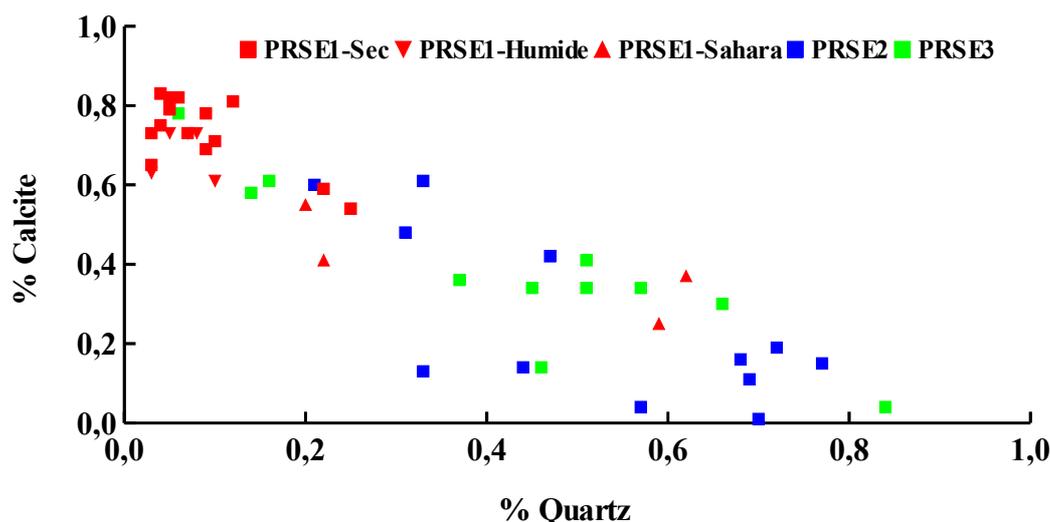


Figure 11 : Relation proportion de Quartz – proportion de Calcite pour les prélèvements de particules sédimentables de la carrière Bronzo-Perasso.

IV.2 Carrière GSM Salon-de-Provence

Les flux de PS sur le site Carrière PRSE4 sont toujours très élevés (au dessus de $1\text{g/m}^2/\text{j}$) (Fig. 12). Ceci est bien sur du à la position très centrale du site dans la carrière, juste à côté des stocks de granulats.

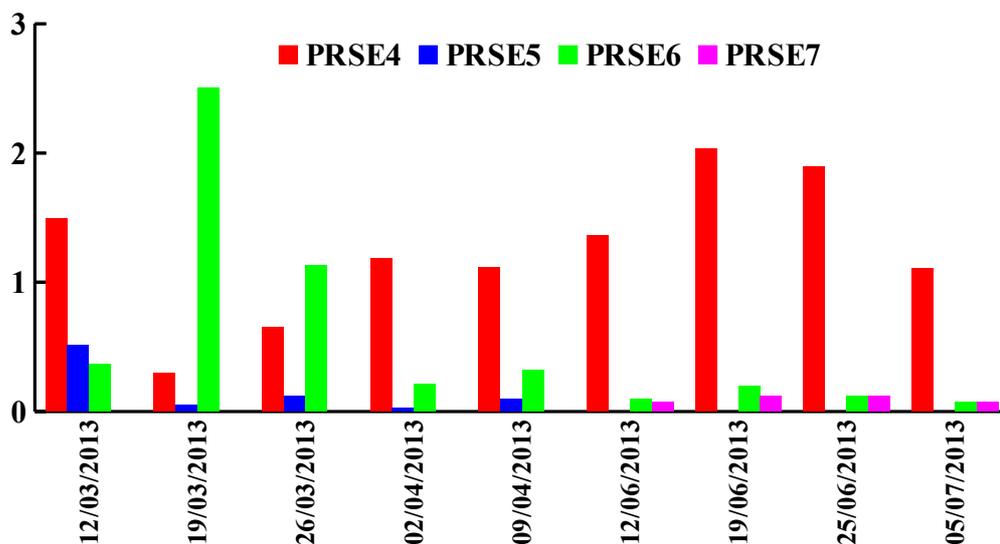


Figure 12 : Flux de particules sédimentables, carrière Bronzo-Perasso

Le site Aval PRSE6 présente également des valeurs élevées, notamment sur les semaines 2 et 3 de la campagne d'hiver. Ces valeurs peuvent être mises directement en relation avec les directions et vitesses du vent lors de ces deux prélèvements (Fig. 13). Dans ces situations, le site PRSE6 est plus exposé que le site PRSE4

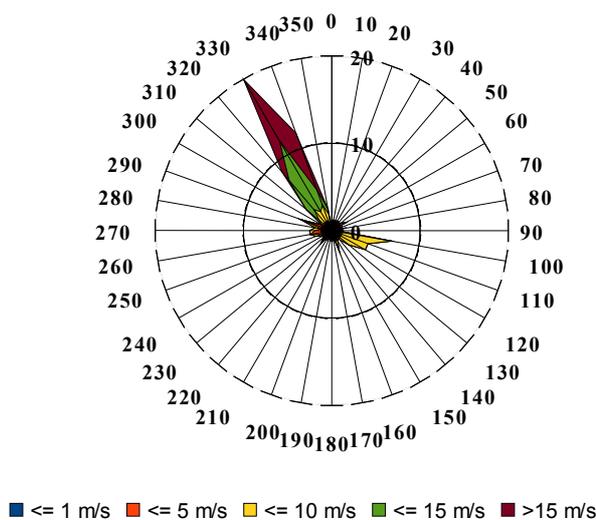


Figure 13 : Rose des vents lors de la semaine du 12 au 19 Mars 2013, carrière GSM

Le site Amont PRSE5 présente les valeurs les plus faibles, sauf la première semaine avec un flux de $0,52 \text{ g/m}^2/\text{j}$, plus élevé que pour le site PRSE6. Cela s'explique par un très fort épisode de vent d'Est (Fig. 14), exposant ce site aux émissions de la carrière et également à celles du trafic entre la carrière et la centrale à béton, située au NE.

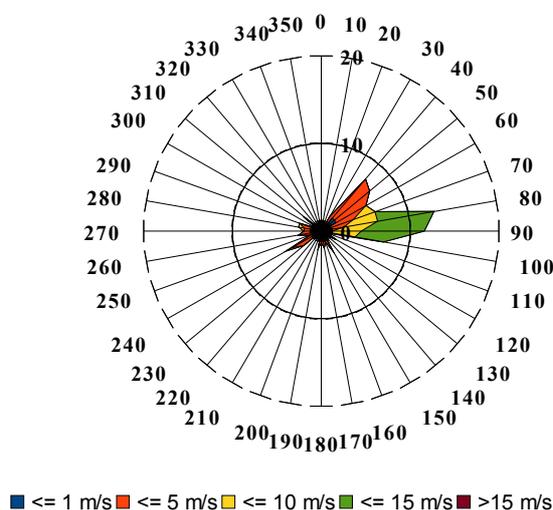


Figure 14 : Rose des vents lors de la semaine du 5 au 12 Mars 2013, carrière GSM

Le site Aval lointain PRSE7, prélevé uniquement en été et le plus éloigné, présente toujours des valeurs faibles, inférieures ou égales à celle de PRSE6. Comme pour la carrière de Ste Marthe, c'est en été que les flux sont les plus importants, en relation avec les conditions climatiques (moins de pluie, plus de vent).

Sur le plan minéralogique, les résultats sont similaires à ceux de la carrière de Ste Marthe : le site PRSE4, dans la carrière, présente les plus forts pourcentage de Calcite et les plus faibles en Quartz, alors qu'à l'inverse, le site Amont PRSE5 est le plus riche en Quartz et le plus pauvre en Calcite. Seul, le prélèvement de la deuxième semaine, par vent d'Est fort, est proche de celui de la carrière pour la même semaine. Le site Aval PRSE6 (bordure sud) est très voisin du site PRSE4, alors que le site Aval lointain PRSE7 est intermédiaire entre la carrière et le fond.

Trois prélèvements sortent un peu de la règle :

- pour le site Amont PRSE5, le prélèvement de la première semaine de mars est nettement plus riche en Calcite, en accord avec l'épisode de vent d'Est de cette semaine ;
- pour la même raison, le premier prélèvement du site Aval PRSE6 est plus riche en Quartz et en Dolomite
- enfin, le prélèvement humide du site Carrière PRSE4 pour la troisième semaine de Juin est plus pauvre en Calcite et plus riche en Quartz car il prend en compte un épisode saharien, visible via la Palygorskite pour les deux autres sites.

Particules issues de carrières

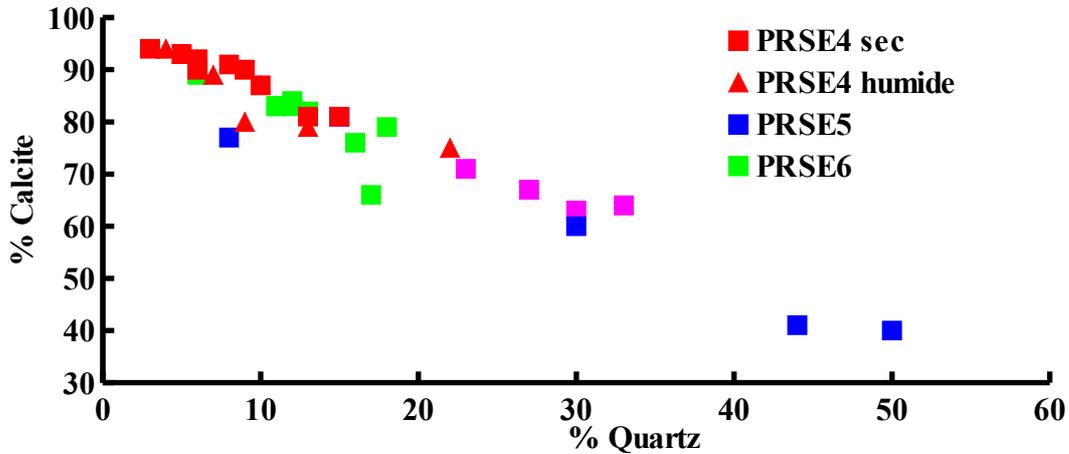


Figure 15 : Relation proportion de Quartz – proportion de Calcite pour les prélèvements de particules sédimentables de la carrière GSM.

En conclusion, les particules sédimentables sont importantes dans les carrières, mais n'en sortent quasiment pas, même par vent fort. En fonction du contraste géologique entre la roche exploitée et son environnement, il est possible d'évaluer la contribution de la carrière dans ce type de particules

V Les Particules inhalables (PM)

V.1 Carrière Bronzo-Perasso, Marseille

Les PM10 ont été mesurées sur les trois sites par Partisol (mesure 24 h) ou par TEOM (mesure 15 mn) et les résultats seront comparés avec ceux de la station de fond urbaine Marseille 5 Avenues du réseau AirPACA (Fig. 16, 17 et Tab. VII).

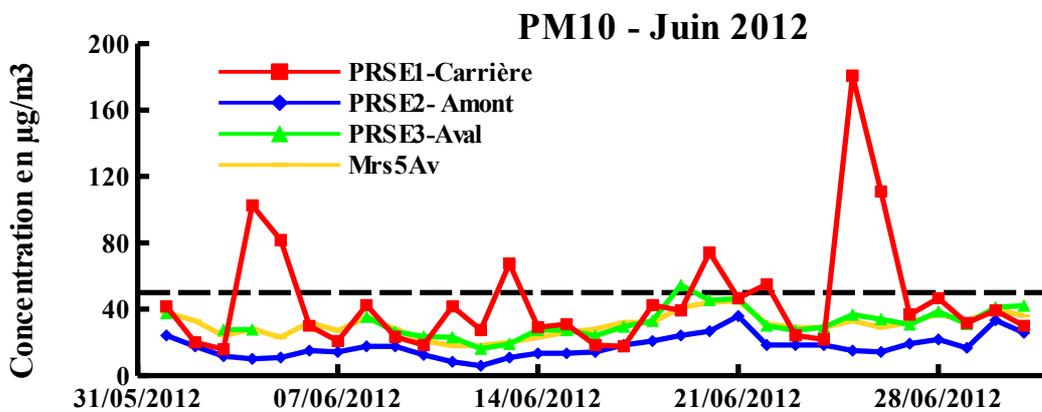


Figure 16 : Évolution des PM10 lors de la campagne d'été, carrière Bronzo-Perasso

Pour la campagne d'été, les valeurs pour les sites Amont et Aval évoluent de façon quasi-parallèle et sont étroitement corrélées à celles de la station urbaine de fond Marseille-5 Avenues. Une seule journée (le 19 Juin pour le site d'exposition) dépasse la valeur limite de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sur le site Carrière, les variations d'un jour à l'autre sont beaucoup plus importantes et 7 journées dépassent la valeur de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec un maximum à $181 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le 25 Juin.

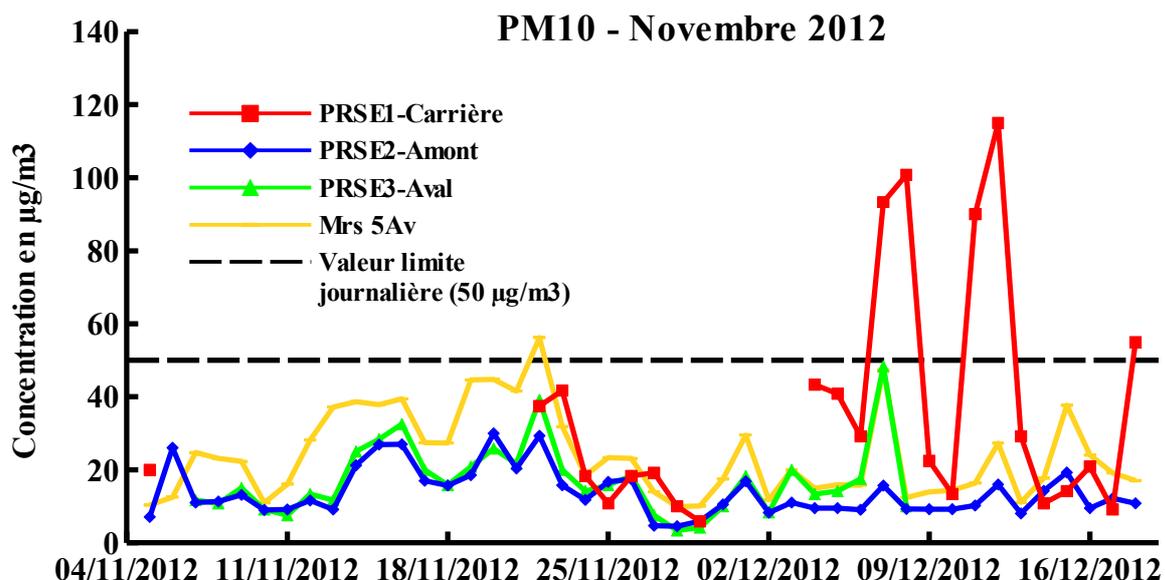


Figure 17: Évolution des PM10 lors de la campagne d'hiver, carrière Bronzo-Perasso

La situation est identique pour la campagne d'hiver, avec cependant des valeurs maximales plus faibles pour le site Carrière, peut-être du fait des conditions climatiques (ainsi que, malheureusement, du fait de l'absence de données pour environ la moitié de la campagne).

		PRSE1-Carrière	PRSE2- Amont	PRSE3-Aval	Mrs5Av
PM10	Juin	45	18	24	23
	Décembre	36	14	17	24
PM2.5	Juin	9		10	11
	Décembre	9		10	15

Tableau VII: Moyennes des concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PM10 et PM2.5 lors des deux campagnes, carrière Bronzo-Perasso

Suite à une panne de préleveur, les PM2.5 n'ont pas pu être mesurées en Juin 2012 sur le site Carrière. Cela n'a pu se faire qu'au mois de Juillet (Fig. 18). On dispose donc des données PM2.5 pour le site Aval en Juin et pour le site Carrière en Juillet. Ces valeurs ont été comparées à celles de la station urbaine de fond Marseille-5Avenues pour la même période.

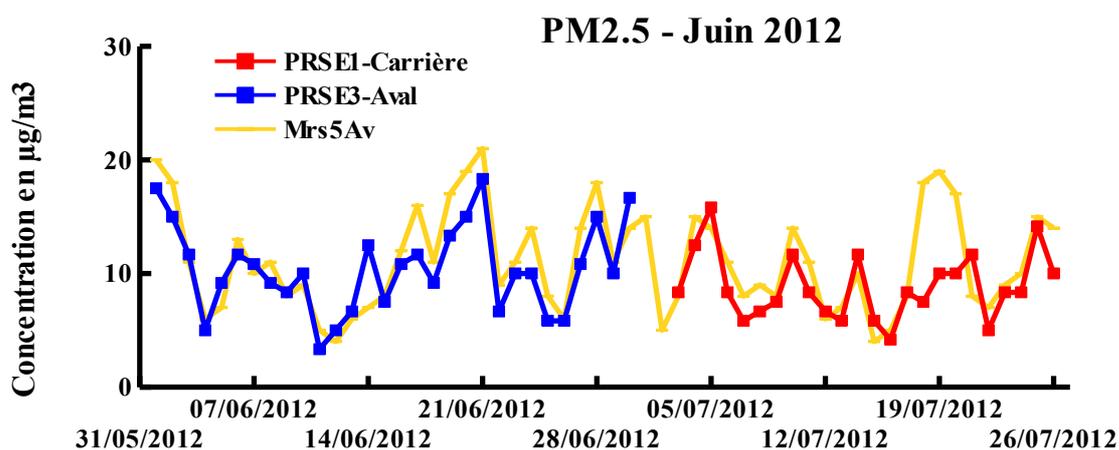


Figure 18 : Évolution des PM2.5 lors de la campagne d'été, carrière Bronzo-Perasso

Pour les deux sites, les concentrations en PM2.5 sont identiques à celles mesurées sur le site de fond urbain pour la même période. Le site Carrière ne semble donc pas enregistrer d'émissions de PM2.5, tout au moins distinguable du bruit de fond local.

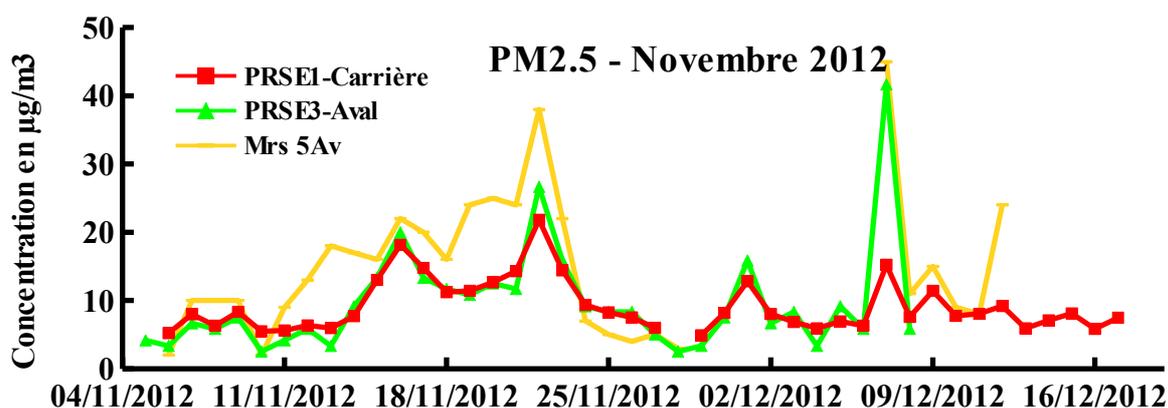


Figure 19: Évolution des PM2.5 lors de la campagne d'hiver, carrière Bronzo-Perasso

La campagne d'hiver montre des résultats similaires avec des concentrations en PM2.5 sur les sites Carrières et Aval quasi-identiques et souvent inférieures à celles de la station de

fond urbain (Fig. 19). Seule, la journée du 7 Décembre présente un pic à plus de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les stations Aval et urbaine, pic peu visible pour le site Carrière

V.2 Carrière GSM, Salon de Provence

Les PM10 ont été mesurées sur les trois sites par Partisol (mesure 24 h) ou par TEOM (mesure 15 mn) et les résultats seront comparés avec ceux de la station urbaine Salon de Provence du réseau AirPACA (Tab. VIII). Durant la campagne hiver, les PM10 ont été mesurées sur les sites PRSE4, PRSE5, PRSE6 et partiellement sur PRSE7 ; pour la campagne été, les mesures ont eu lieu sur PRSE4, PRSE6 et PRSE7.

		PRSE4- Carrière	PRSE5- Amont	PRSE6-Aval	PRSE7-Aval lointain	Salon
PM10	Mars	80	26	63	33	27
	Juin	101		56	45	26
PM2.5	Mars	17				
	Juin	15				

Tableau VIII: Moyennes des concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PM10 et PM2.5 lors des deux campagnes, carrière GSM

Durant les deux campagnes, le site Carrière PRSE4 présentent des valeurs de PM10 très variables et pouvant atteindre 374 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (le 29 Mars 2013). Pour la campagne hiver, 16 journées dépassent la valeur limite de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Fig. 20) et 12 pendant la campagne été (10 journées manquantes) (Fig. 21). Il n'y a pas de relation entre concentration en PM et vitesse moyenne ou maximale du vent ces jours-là.

Le site de Aval PRSE6 atteint lui aussi des valeurs de concentration très élevées, avec un maximum à 454 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ le 14 Mars 2013. Il y a 7 jours de dépassement en Mars et 9 en Juin 2013. S'il n'y a pas globalement de relation concentration – vitesse du vent, on constate cependant, que pour la campagne d'hiver, dès que les concentrations en PM10 dépassent 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, elles sont reliées à la vitesse du vent (vitesse moyenne ou vitesse maximale) (Fig. 22). Ce n'est pas vrai pour la campagne d'été.

Les PM10 n'ont été mesurées sur le site Amont PRSE5 que pendant la campagne d'hiver. Les concentrations sont globalement bien corrélées avec celles de la station urbaine de Salon (Fig. 23). Les valeurs discordantes correspondent à des journées à vent d'Est dominant.

Particules issues de carrières

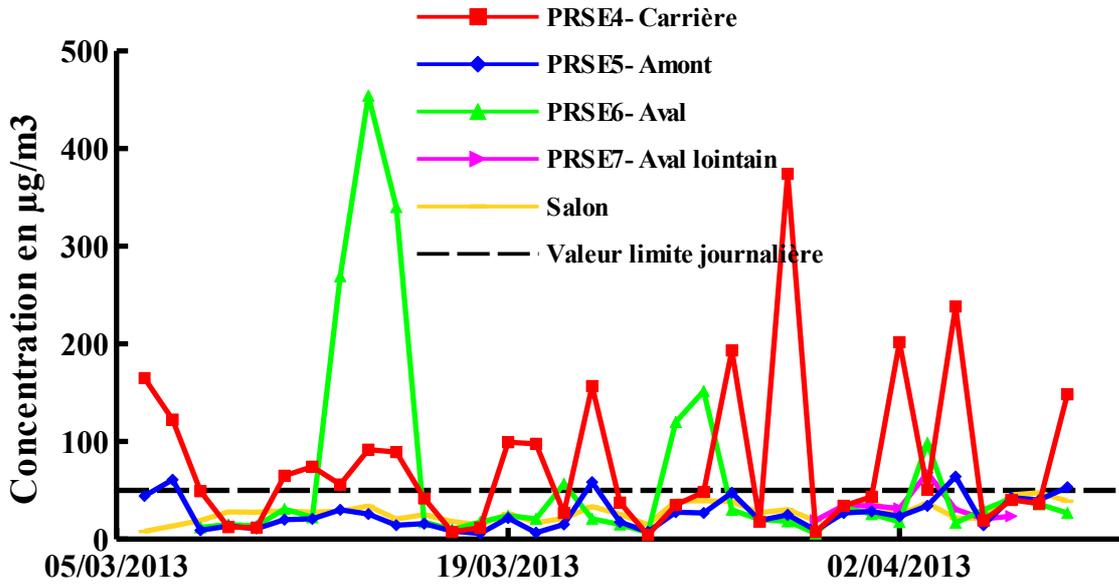


Figure 20: Évolution des PM10 durant la campagne d'hiver, carrière GSM

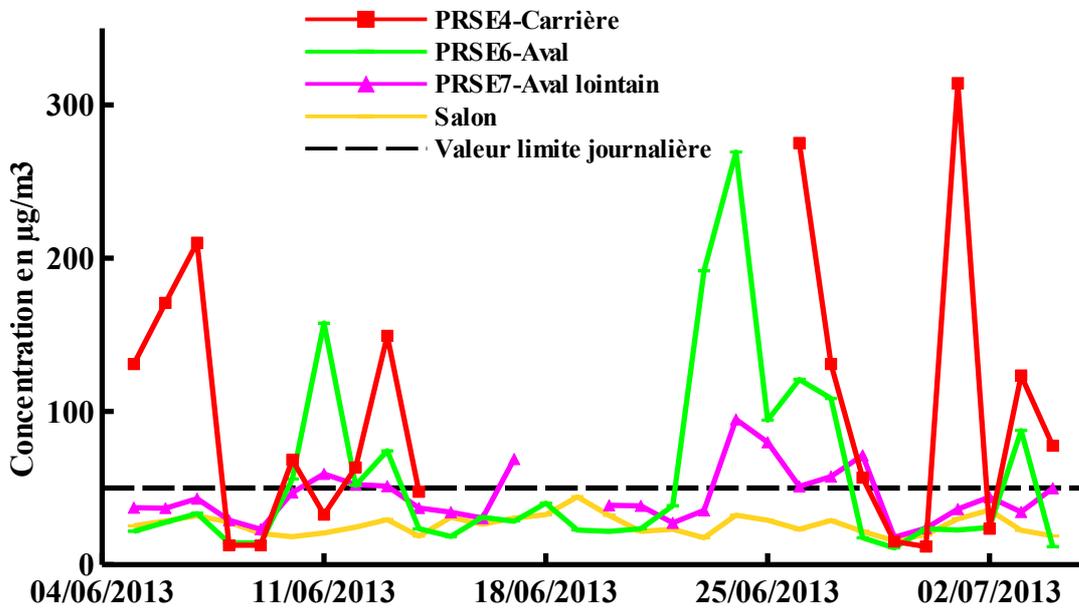


Figure 21: Évolution des PM10 durant la campagne d'été, carrière GSM

Particules issues de carrières

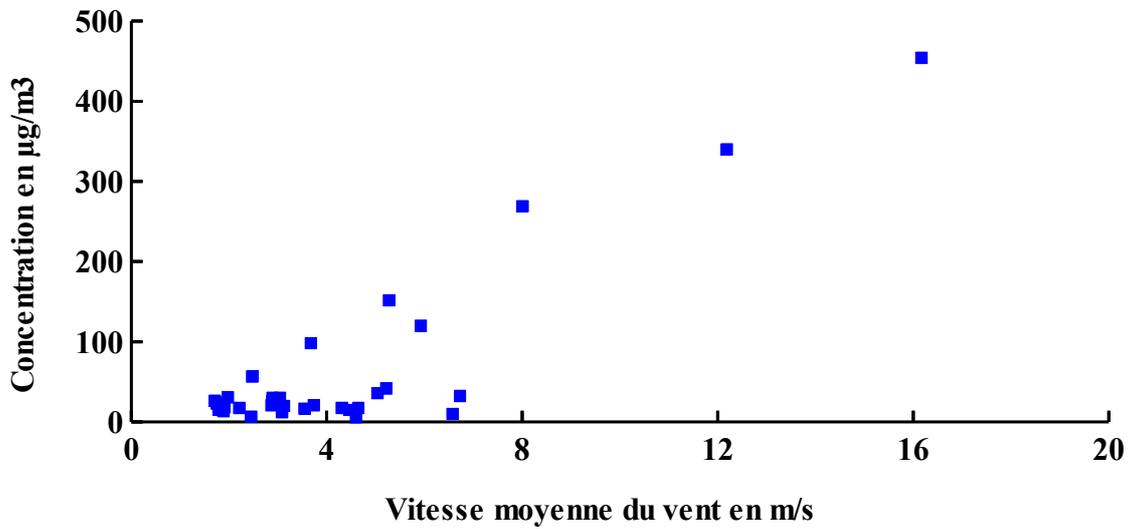


Figure 22: Relation vitesse moyenne du vent – concentration PM10 sur le site PRSE6 pour la campagne d'hiver, carrière GSM

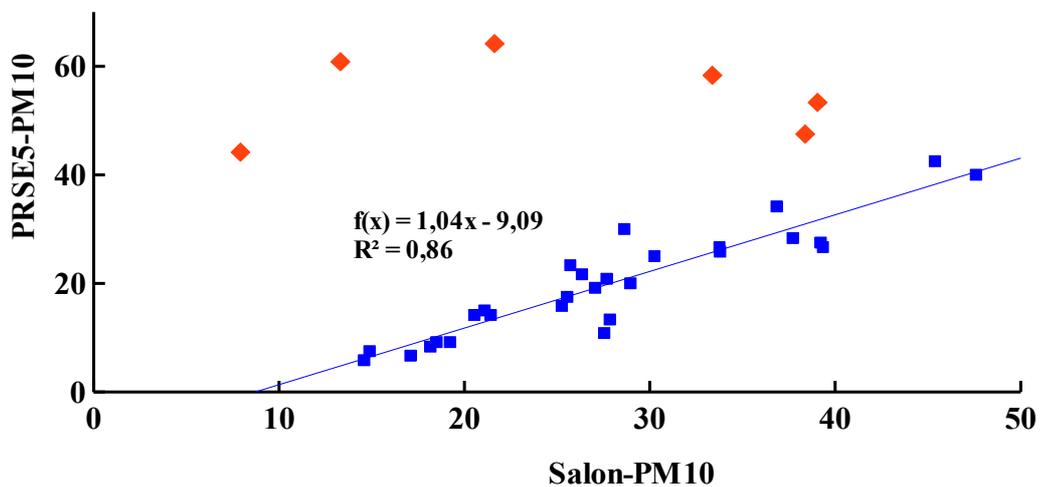


Figure 23 : Relation des PM10 entre la station de Salon et le site PRSE5, campagne hiver, carrière GSM

Pour le site Aval lointain PRSE7, le plus éloigné, les concentrations en PM10 présentent quelques dépassements de la valeur de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, donc certains semblent en relation avec ceux du site PRSE6. Globalement, il existe une relation entre les concentrations de

PM10 entre ces deux sites, relation indiquant l'existence d'une contribution de la carrière aux concentrations en PM10 sur quelques centaines de mètre sous le vent dominant (Fig. 24)

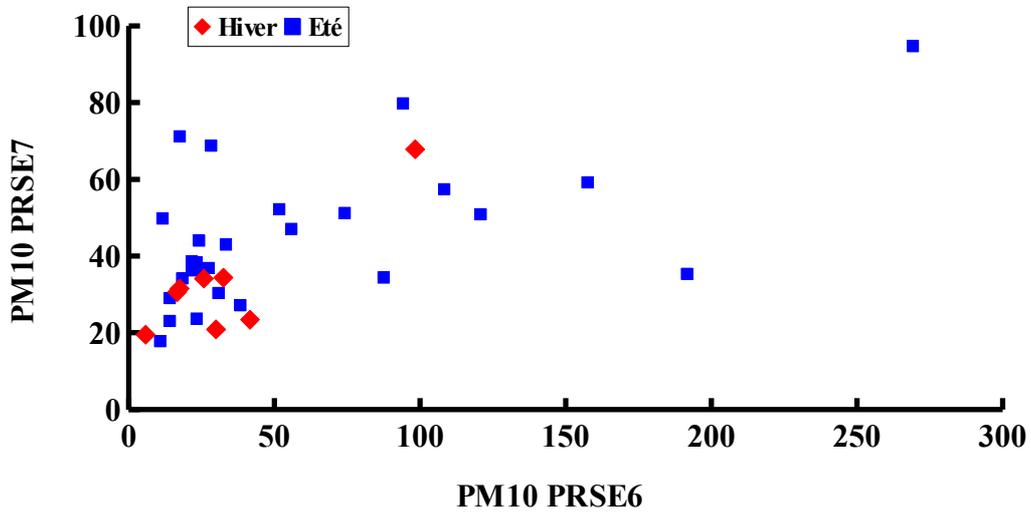


Figure 24 : Relation entre concentration de PM10 pour les deux sites PRSE6 et PRSE 7, carrière GSM

Les PM2.5 n'ont été mesurées que sur le site interne à la carrière PRSE4 (Fig. 25 et 26).

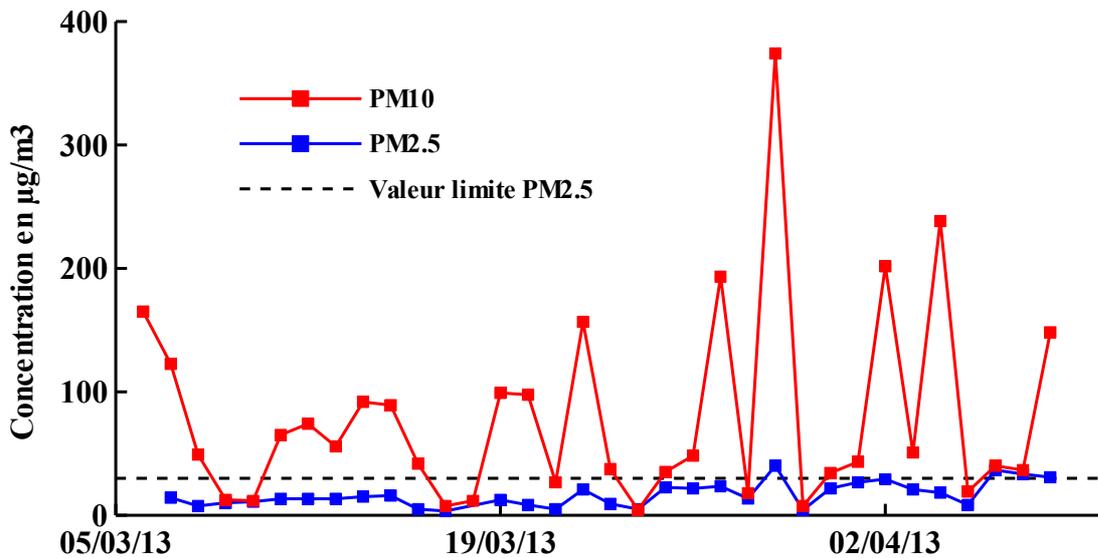


Figure 25 : Concentration en PM2.5 pour la campagne d'hiver, carrière GSM

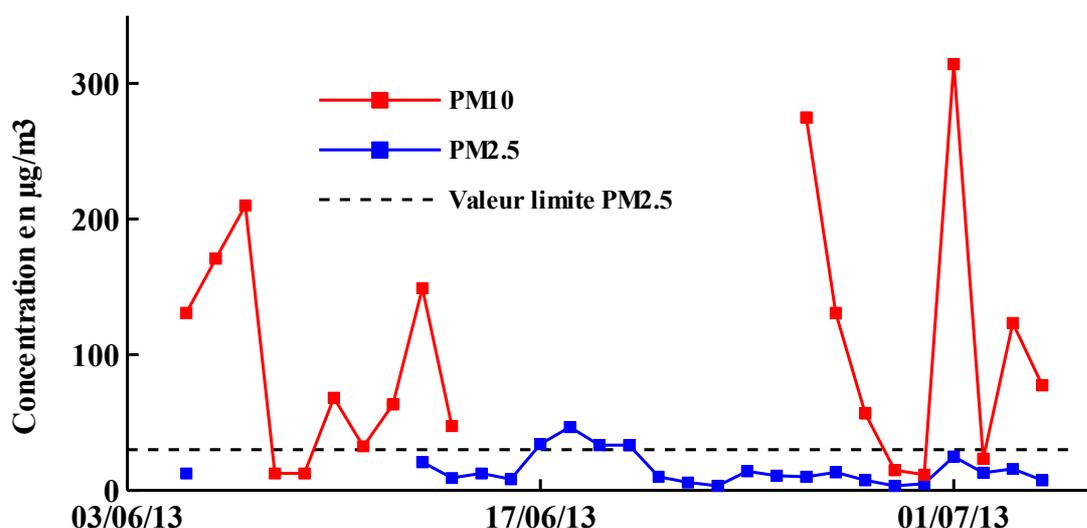


Figure 26 : Concentration en PM2.5 pour la campagne d'été, carrière GSM

Comme pour la carrière Bronzo-Perasso, les valeurs de concentration sont assez faibles et régulières. Il n'y a que 4 dépassements de la valeur de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour chaque campagne.

Si, pour les deux carrières, les concentrations en PM10 sont élevées et dépassent souvent les valeurs limites environnementales, les concentrations en PM2.5 sont faibles et ne se distinguent pas du bruit de fond local.

V.3 Le rapport PM2.5/PM10

Le rapport PM2.5/PM10 peut donner des indications sur les sources de particules. En milieu urbain, dominé par le trafic routier et le chauffage au bois, ce rapport est classiquement de l'ordre de 0,7 à 0,8. En milieu rural, où les sources sont plus « naturelles », il peut descendre à 0,4 ou moins.

Pour chaque site étudié et chaque campagne, les concentrations en PM10 varient beaucoup d'un jour à l'autre, alors que celles de PM2.5 sont relativement stables. De ce fait, le rapport PM2.5/PM10 varie lui aussi avec une assez grande amplitude. Cependant, la relation entre la concentration en PM10 et ce rapport paraît intéressante.

Pour les deux carrières et l'ensemble des prélèvements, toutes les concentrations (sauf une) en PM10 supérieures à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ présentent un rapport inférieur à 0,25. A l'inverse, toutes les valeurs de concentrations en PM10 inférieures à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (sauf 8) ont un rapport PM2.5/PM10 supérieur à 0,25.

Il apparaît donc que tous les dépassements de concentration des PM10 de la valeur de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont dus à la fraction grossière, c'est à dire à la fraction comprise entre 2,5 et $10 \mu\text{m}$.

Il n'y a par contre aucune relation entre ce rapport et la vitesse moyenne ou maximale du vent.

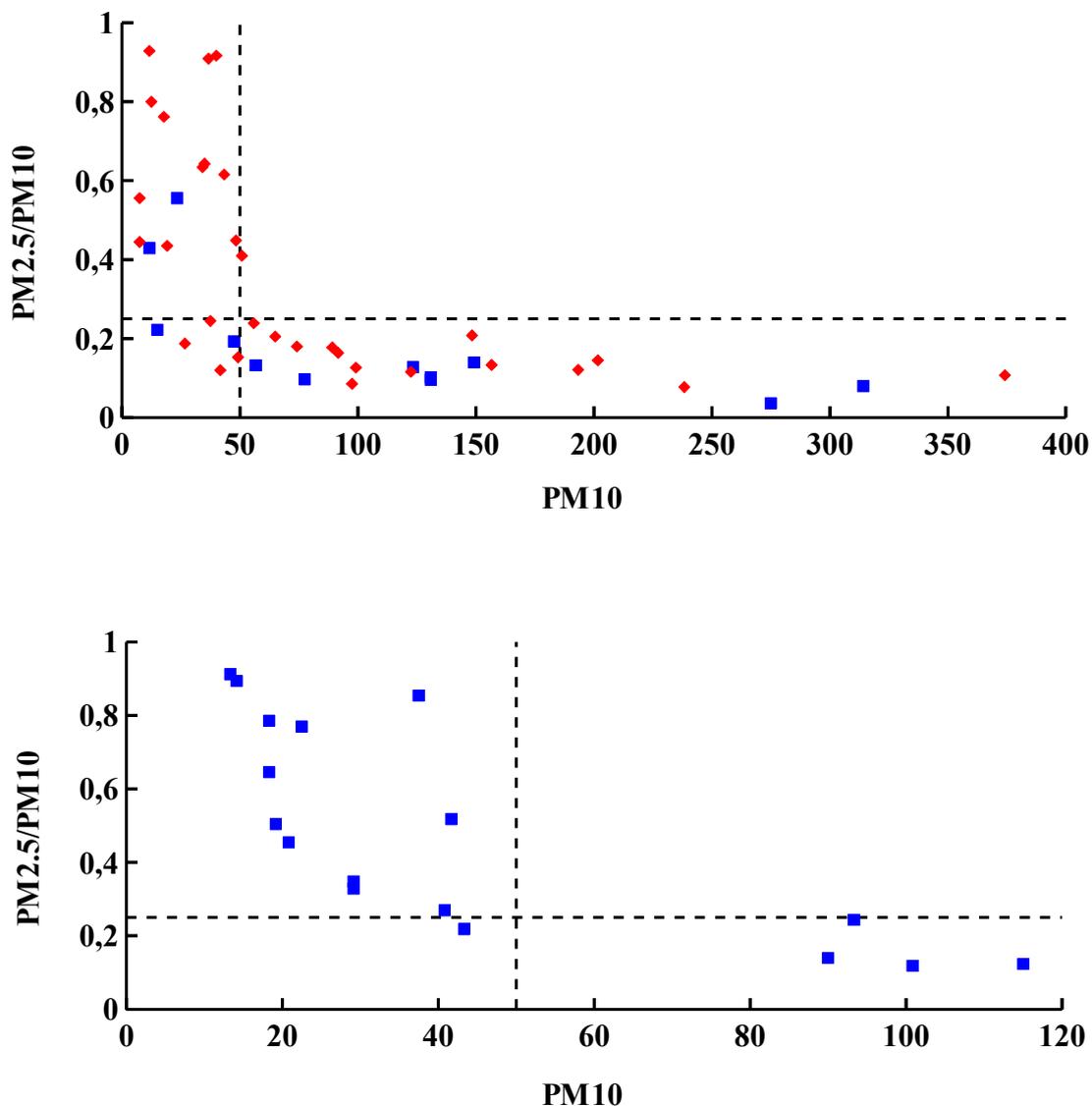


Figure 27 : Relation PM10 – rapport PM2.5/PM10 (en haut carrière GSM, en bas carrière Bronzo-Perasso)

V.4 Variations horaires

Durant la campagne de Mars 2013 sur la carrière GSM de Salon-de-Provence, nous avons pu mettre en place des compteurs de particules à pas de temps 15 mn permettant de mesurer les concentrations en PM10 au long de la journée sur les trois sites.

Les jours de travail de la carrière présentent, pour le site PRSE4, des profils très semblables : valeur constante durant la nuit, brusque augmentation entre 7 et 8 h du matin, variation importante au cours de la journée et retour assez brutal à la concentration de nuit entre 14 et 16h (Fig. 28). Ces variations semblent directement liées à l'activité de la carrière. Les deux autres sites présentent des profils assez plats ou dépendant des conditions de vent.

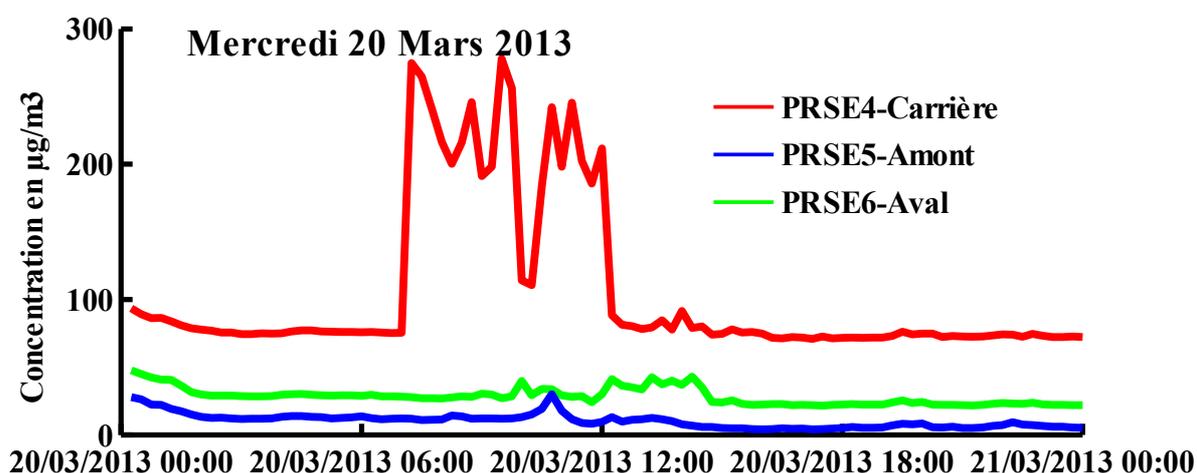


Figure 28 : Exemple d'évolution quart-horaire des concentrations en PM10 au cours d'une journée d'activité de la carrière GSM

Par contre, l'ensemble des samedi et dimanche (à l'exception du Samedi 30 Mars) présentent des profils plats, similaires sur les trois sites, se distinguant uniquement par leur niveau moyen (Fig. 29).

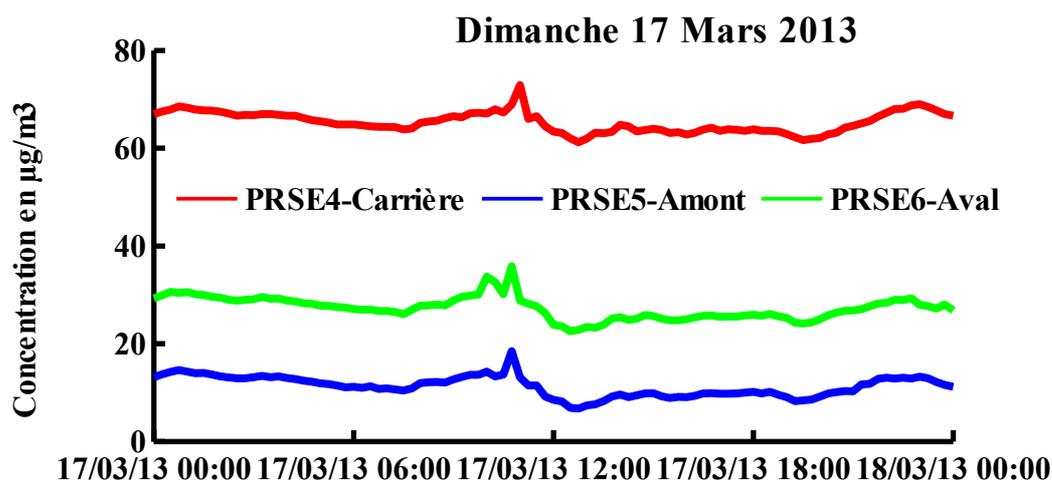


Figure 29 : Exemple d'évolution quart-horaire des concentrations en PM10 au cours d'un dimanche, carrière GSM

Le rôle du vent sur l'exposition des sites de mesures se voit très bien sur certaines journées.

Le Mercredi 6 Mars est une journée de vent d'Est constant assez fort (vitesse moyenne à 10 m/s). Le site Carrière PRSE 4 est directement exposé aux particules provenant des stocks de granulats (Fig. 30).

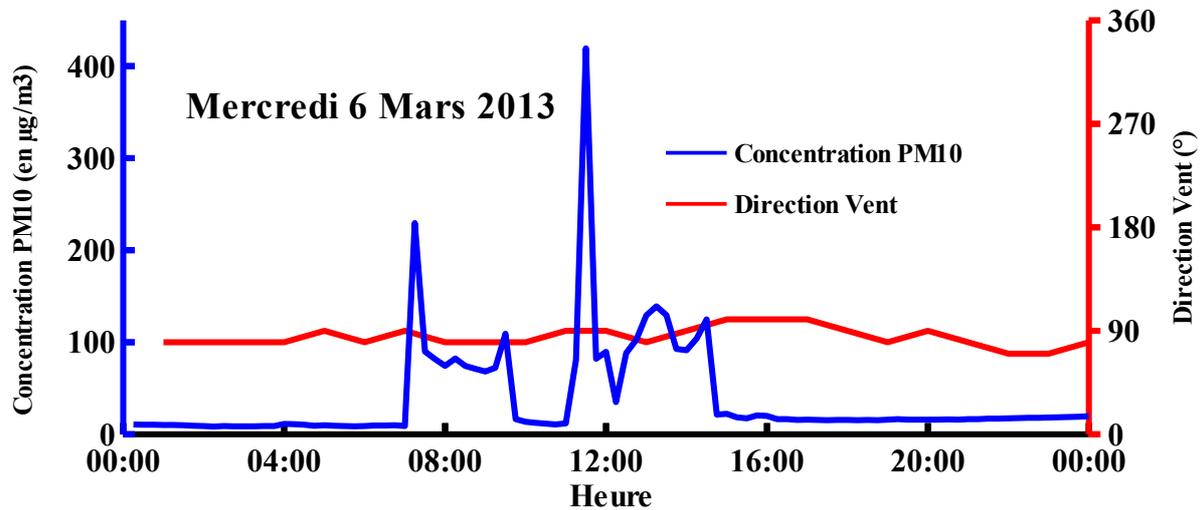


Figure 30 : Évolution de la direction du vent et de la concentration en PM10 pour le Mercredi 6 Mars 2013 sur le site PRSE4, carrière GSM

Le Jeudi 14 Mars, le vent est de secteur N350, très fort (vitesse moyenne 16 m/s). Le site carrière PRSE4 est alors peu exposé aux émissions de la carrière mais par contre, le site Aval PRSE6 l'est beaucoup (Fig. 31).

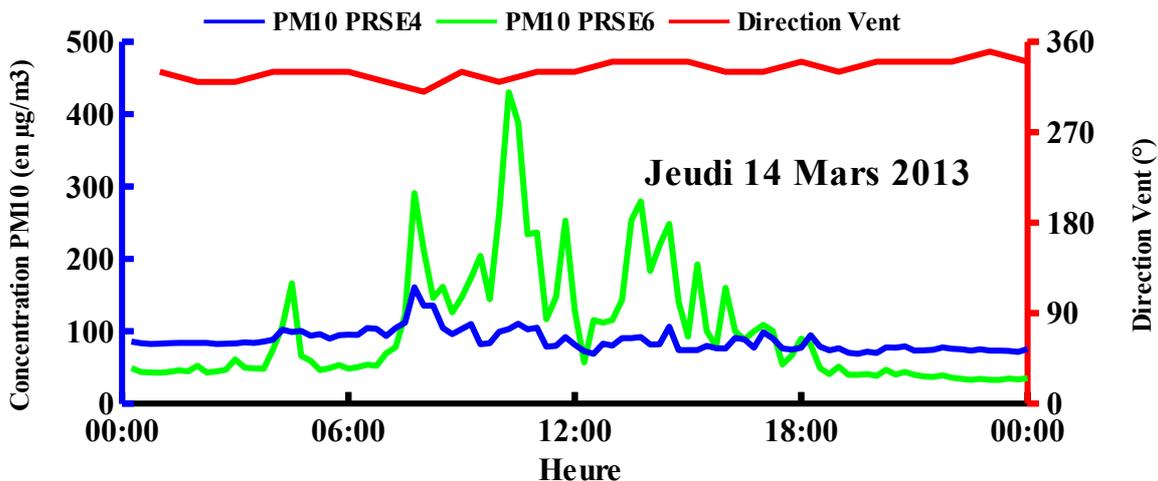


Figure 31 : Évolution de la direction du vent et de la concentration en PM10 pour le Jeudi 14 Mars 2013 sur les sites PRSE4 et PRSE6, carrière GSM

Le Vendredi 8 Mars, le vent est de secteur Est jusqu'à 9h du matin, puis passe assez rapidement à un secteur Ouest. Le site Carrière PRSE4 est alors exposé aux stocks de granulat le matin puis n'est plus soumis aux émissions de la carrière à partir de 9h (Fig. 32).

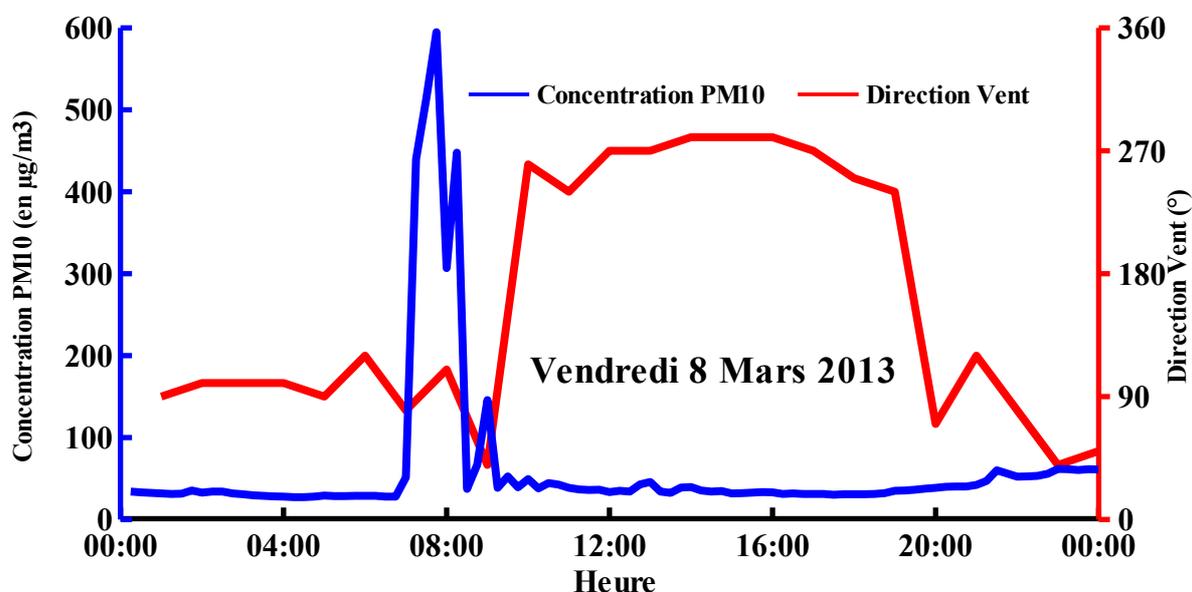


Figure 32 : Évolution de la direction du vent et de la concentration en PM10 pour le Vendredi 8 Mars 2013 sur le site PRSE4, carrière GSM

V.5 Relation Particules sédimentables - PM10

L'ensemble des carrières disposent d'un réseau de plaquettes permettant de mesurer en routine les flux de particules sédimentables dans leur voisinage. Dans un proche avenir, ces plaquettes seront remplacées par des jauges, similaires à celles utilisées dans cette étude.

Au delà de l'aspect réglementaire de ces mesures, il peut être intéressant de regarder si elle peuvent donner une indication sur les concentrations en PM10, mesures plus lourdes et plus onéreuses à mettre en place que celles des particules sédimentables.

Pour les deux carrières étudiées, nous avons examiné la relation entre le flux de particules sédimentables (en g/m²/j) et la concentration en PM10 (en µg/m³).

Pour la carrière de Sainte-Marthe (Fig. 33), il existe une légère relation positive entre les deux variables si on prend en compte l'ensemble des sites et des campagnes. Cependant, l'examen site par site et campagne par campagne montre que cette relation n'existe pas, notamment pour les faibles flux de particules sédimentables. Seule, la campagne hiver sur le site Carrière PRSE1 montre une relation positive, mais nous ne disposons que de 3 concentrations de PM10 pour 7 semaines de prélèvement.

Pour la carrière de Salon (Fig. 34), la situation est similaire : apparente relation pour l'ensemble des mesures et pas de relation pour chaque site pris individuellement.

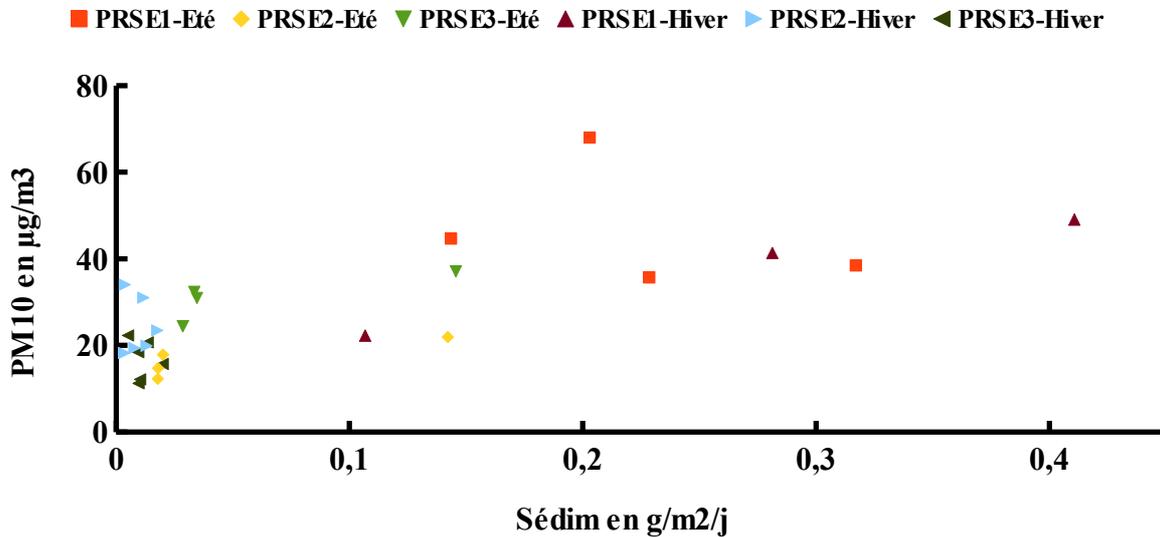


Figure 33 : Relation flux de particules sédimentables – concentration en PM10 pour la carrière de Ste Marthe

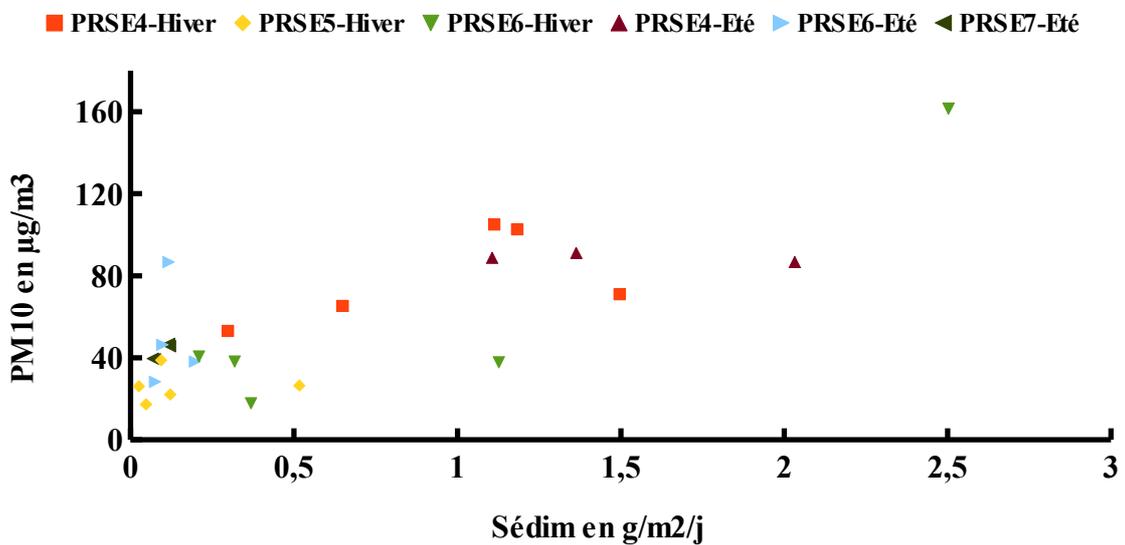


Figure 34 : Relation flux de particules sédimentables – concentration en PM10 pour la carrière de Salon

Ces comparaisons sont cependant entachées d'un certain nombre de biais :

- les mesures de particules sédimentables sont faites sur un pas de temps hebdomadaire, alors que celle de PM10 sont la moyenne de valeurs journalières ;
- les fortes vitesses de vent ont une influence sur les mesures de PM10 car le diamètre théorique de coupure des préleveurs n'est plus assuré lorsque le vent atteint des vitesses supérieures à 30 km/h ; le préleveur capte alors de particules plus grosses dont la taille approche celle des particules sédimentables.

Il serait intéressant d'une part de faire des mesures des deux types de particule sur le même pas de temps et d'autre part, d'étudier le spectre granulométrique des particules sédimentables.

VI Conclusion sur les campagnes de mesure

Les deux campagnes effectuées sur les deux carrières ont mis en exergue les résultats principaux suivants :

- **les flux de particules sédimentables (grosses particules), très importants à l'intérieur des carrières, diminuent très vite lorsque l'on s'éloigne de celles-ci.**
- **les émissions de PM10, à l'intérieur des carrières, sont importantes, les concentrations dépassant très souvent les valeurs limites environnementales ; ces concentrations décroissent très rapidement à l'extérieur de la carrière et rejoignent le bruit de fond après 2 à 300 m.**
- **il ne semble pas y avoir d'émission de PM2.5 à l'intérieur des carrières ou, tout au moins, à un niveau de concentration non détectable par rapport au bruit de fond. La proportion de PM2.5 dans les émissions produites par les activités d'une carrière est faible et ne dépasse apparemment pas 25% des émissions de PM10. Ce résultat expérimental est en accord avec le résultat théorique de 17% calculé par le CITEPA dans le cadre de l'application de la méthodologie AP-42 (EPA).**
- **l'exportation des émissions en dehors de la carrière (et donc l'éventuelle exposition des populations) est fortement dépendante de la topographie de l'exploitation et des conditions météorologiques**

Si de nouvelles campagnes de mesure devaient être entreprises, elles pourraient porter sur les points suivants :

- carrières sur d'autres types de roche (massif, meubles sèches ou humides, ...) ou d'activité (recyclage)
- autres conditions climatiques (en terme de vent et pluviométrie)

Particules issues de carrières

- mesures individualisées en fonction des points d'émission dans la carrière (tir de mine, concassage, stocks, pistes, ...)
- mesures en fonction des conditions d'abattage (concernant l'efficacité de l'arrosage, le facteur communément adopté mériterait pour le moins d'être vérifié).