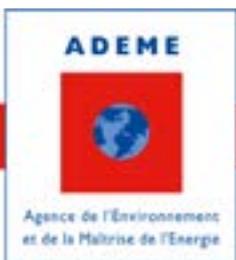


Avril
2018

EMISSIONS DES POUSSIÈRES DES CARRIÈRES DANS L’AIR

Etude des émissions de poussières
autour de quatre carrières de granulats
dans trois régions françaises.

RAPPORT FINAL



En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

L'Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction (UNICEM) tient à remercier d'abord les entreprises adhérentes qui se sont engagées dans ce programme d'étude expérimentale et qui ont bien voulu mobiliser leurs équipes pour accueillir, sur leurs sites, les scientifiques et techniciens de la qualité de l'air. Elle remercie chaleureusement les associations agréées de la qualité de l'air des régions Bretagne, Hauts-de-France et Pays de la Loire pour les travaux menés durant les trois années de l'étude. Un grand merci au CITEPA, l'INERIS, l'Institut Chypriote de la qualité de l'air et à l'ADEME pour leur expertise et leur accompagnement tout au long du programme. Merci aux étudiants et enseignants de l'Université du Littoral de la Côte d'Opale (ULCO) qui ont participé au dépouillement de la première campagne de mesures sur le bassin de Marquise, ainsi qu'à l'ingénieur-stagiaire qui a rassemblé les données d'exploitation pendant la campagne estivale en Pays de la Loire tout en essayant de faire fonctionner les micro-capteurs. Merci à l'entreprise TERA de s'être prêtée de cette prise au teste des micro-capteurs en carrière en assurant le meilleur soutien technique pour le déroulement des essais.

L'UNICEM remercie particulièrement les membres du comité de pilotage :

- E. Fiani, D. Vermaut (ADEME)
- O. Cesbron (Air BREIZH)
- A. Anquez, N. Dufour, R. Gimeno, S. Vermeesch (ATMO Haut de France)
- C. Lemaire (Air Pays de la Loire)
- N. Taieb, L. Nicco (CITEPA)
- B. Brouard-Foster, F. Gautier (INERIS)
- J. Sciare (LSCE/The Cyprus Institute)
- Y. Adam, F. Bio Beri, D. Collonge, M. Hiblot, J-P. Queros, A. Vasseur, S. Rimey, N. Ziamni (UNICEM)
- C. Corlay, F. Habasque, A. Herbel, Y. Legout, S. Lebreton (UNICEM Bretagne)
- Y. Boraccino, C. Foquet, A-E. Coubel, M. Huszak, P. Leclerc, O. Poulain, F. Quehen, V. Ribard (UNICEM Haut de France)
- D. Buckel, B. Gardeton, J-M. Hellier, Y. Huiban, E. Torlasco (UNICEM Pays de la Loire)
- J-P. Estacaille (SFIC)
- A. Specq, V. Perrouchet, J.Gnamien (Université du Littoral de la Côte d'Opale – Calais)
- C. Jeanne (ICAM- Nantes)

CITATION DE CE RAPPORT

Cesbron O. (Air BREIZH), Anquez A., Dufour N., Gimeno R., Vermeesch S. (ATMO Haut de France), Lemaire C. (Air Pays de la Loire), Nicco L., Taieb N., (CITEPA), Sciare J. (LSCE/The Cyprus Institute), Adam Y., Bio Beri F., Collonge D. (UNICEM) 2018, Emissions des poussières des carrières dans l'air - Etude des émissions de poussières autour de quatre carrières de granulats dans trois régions françaises. 272 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1581C0026

Étude réalisée UNPG, ATMO Hauts-de-France, Air Pays de la Loire, Air Breizh, CITEPA, The Cyprus Institut LSCE pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : UNPG

Appel à projet de recherche : CORTEA

Coordination technique - ADEME : FIANI Emmanuel, VERMAUT Denis

Direction/Service : Service Entreprises et Dynamiques Industrielles,
Direction Productions et Energies Durables



TABLE DES MATIERES

Résumé.....	6
1. Contexte et objectif du programme.....	7
1.1. Contexte environnemental et enjeux économiques et sociétaux	8
1.2. Positionnement du programme	8
1.3. L'état de l'art	10
1.4. Objectifs du programme et caractère novateur du projet	17
2. Choix des sites et méthodologie	17
2.1. Choix des sites	17
2.2. Méthodologie	18
2.3. Plan d'expérience	19
2.3.1. Implantation des points de mesures et de prélèvements.....	19
2.3.2. Enregistrements spécifiques dans les carrières	21
2.3.3. La modélisation.....	21
2.3.4. Présentation des techniques d'analyse chimique des aérosols	21
3. Résultats	24
3.1. ATMO Hauts-de-France (Bassin de Marquise- carrières A et B)	24
3.1.1. Bilan métrologique.....	24
3.1.2. Contexte météorologique.....	25
3.1.3. Épisodes de pollution en région	27
3.1.4. Exploitation des résultats de mesures	30
3.1.5. Bilan métrologique.....	30
3.1.6. Repères réglementaires	30
3.1.7. Les particules en suspension (PM10).....	31
3.1.8. Analyse chimique des particules	71
3.1.9. Conclusions et interprétations pour le Bassin de Marquise	86
3.2. Modélisations Bassin de Marquise.....	88
3.2.1. Paramètre de la modélisation	88
3.2.2. Comparaison modèle / mesure.....	95
3.2.3. Résultats de l'étude de modélisation.....	99
3.2.4. Conclusion et perspectives	106
3.3. Air Pays de la Loire (Carrière E).....	107
3.3.1. Bilan métrologique.....	107
3.3.2. Contexte météorologique.....	107
3.3.3. Épisodes de pollution en région durant les campagnes de mesures	111
3.3.4. Analyse descriptive des données de mesures	111
3.3.5. Analyse approfondie de quelques épisodes en Pays de la Loire	120
3.3.6. Analyse chimique des particules en Pays de la Loire	128
3.3.7. Conclusions et enseignements en Pays de la Loire	139



3.4.	Air Breizh (Carrière H)	140
3.4.1.	Bilan métrologique	140
3.4.2.	Contexte météorologique	141
3.4.3.	Episode de pollution régionale	146
3.4.4.	Analyse descriptive des résultats	147
3.4.5.	Analyse approfondie des résultats	165
3.4.6.	Analyse chimique BRETAGNE	179
3.4.7.	Conclusions et enseignement en BRETAGNE	192
3.5.	Essais microcapteurs	193
3.5.1.	Cadre et objectif de l'essai	193
3.5.2.	Méthodes et moyens mis en œuvre	193
3.5.3.	Déroulement des mesures	194
3.5.4.	Localisation des stations de mesures	194
3.5.5.	Conditions d'exposition des stations de mesures	197
3.5.6.	Comparaison des résultats entre micro-capteurs et stations de référence	197
3.5.7.	Bilan	204
3.6.	Poussières sédimentables (dépôts atmosphériques)	204
3.6.1.	Recherche de corrélation entre poussières sédimentables et PM10	205
3.6.2.	Recherche de corrélation entre poussières sédimentables et PM2.5	208
3.6.3.	Granulométrie des poussières sédimentables en carrières	208
3.6.4.	Dépôts atmosphériques : un peu de théorie	215
3.6.5.	Dépôts atmosphériques et particules en suspension : conclusion	220
3.7.	Facteurs d'émission	221
3.7.1.	Inventaire national des émissions atmosphériques	221
3.7.2.	Outil d'aide à la déclaration des émissions–GEREP	222
3.7.3.	L'apport des connaissances EMCAIR dans l'amélioration des facteurs d'émission	227
4.	Synthèse générale et conclusions	233
4.1.	Amélioration des connaissances	233
4.2.	Amélioration des techniques de mesure :	237
4.3.	Techniques de réduction des émissions	239
4.4.	Amélioration de la communication	239
5.	Perspectives	240
6.	Bibliographie	242
7.	Annexes	247
7.1.	Présentation des acteurs du programme	247
7.2.	Management du programme	247
7.3.	Données sites : journaux d'exploitation, évaluations GEREP, enregistrements des concentrations, analyses chimiques	248
7.4.	Le schéma chimique « Generic Reaction Set (GRS) »	248



7.5. Informations techniques pour les analyses chimiques des particules	250
Index des tableaux et figures	256
Sigles et acronymes	268
Glossaire	270



Résumé

Dans un contexte de politique publique renforcée sur la qualité de l'air, l'industrie extractive, encore trop souvent associée à l'image d'une activité fortement génératrice de poussières, a souhaité améliorer ses connaissances sur le niveau réel des émissions atmosphériques des carrières en lançant un programme d'études "EMCAIR" – Emissions des Carrières dans l'Air. Suivant une même méthodologie, il regroupe trois séries de deux mois de campagnes de mesures dans des conditions climatiques différentes de 2015 à 2017, autour de trois ensembles de carrières dans trois régions françaises dans le but d'en cerner les caractéristiques communes à travers : les suivis des particules en suspension (PM10 et PM2,5) et des dépôts atmosphériques en fonction des conditions météorologiques et d'exploitation des carrières concernées. La méthode consiste à enregistrer, par des mesures en ligne et des analyses chimiques intégrées, l'empreinte de la carrière et d'en suivre l'influence en champ proche (400 à 2500 m) en disposant d'au moins un site de référence (hors influence de la carrière).

Cette approche a été réalisée par des experts de la mesure et du contrôle de la qualité de l'air pour chacune des régions (les AASQAs), de la chimie des particules (LSCE/Chyprus Institut) et de l'inventaire des émissions (CITEPA) sous la coordination du syndicat professionnel de l'industrie des granulats (UNPG).

Principaux résultats :

- les stations situées dans les carrières, à proximité des sources d'émissions, enregistrent logiquement les plus forts taux de dépôts, comme les plus fortes concentrations en PM avec une empreinte chimique caractéristique de la roche exploitée en fonction de l'activité dans la carrière et des conditions météorologiques ; les carrières produisent majoritairement des PM10, peu de PM2,5 avec un ratio PM2,5/PM10 évoluant typiquement en dessous de 0,20 ; le fait que les carrières enregistrent les dépôts les plus importants, souligne qu'elles fonctionnent également comme puits des particules qu'elles produisent;
- les stations en champ proche enregistrent une influence limitée, souvent non décelable en dépôts atmosphériques, visible en concentrations de PM10 au moment de certains épisodes (pics d'émission), mais le plus souvent déterminable par la chimie ou l'évolution du rapport PM2,5/PM10 ; influence non visible en concentrations de PM2,5, uniquement décelable par la chimie des particules;
- le bilan des analyses chimiques permet (par la méthode dite de Lenschow) de quantifier cette empreinte dans une fourchette exprimant le supplément de particules en suspension pouvant être relevé en champ proche sous influence par rapport à celui qui est hors influence.
- la granulométrie des poussières sédimentables est large (0,1 à 250 µm) ; leur mobilisation peut remettre en suspension des fractions de PM10 et de PM2,5;
- des corrélations entre dépôts et particules en suspension : existent pour les PM10 clairement liées à la configuration de chaque site ; les poussières sédimentables suivent la tendance des PM10 des carrières.

Une modélisation de dispersion des émissions de PM10 des carrières du bassin de Marquise a été réalisée par ATMO Hauts-de-France sur le modèle ADMS-Urban à partir des potentiels d'émissions estimés par l'outil GEREP et des données d'inventaire régional pour les sources d'émission hors carrières. Cet exercice s'est montré concluant et semble donc confirmer la pertinence de la méthodologie proposée par le CITEPA, tout au moins pour les facteurs d'émission de PM10.

- pour les TSP (poussières totales en suspension), les essais de mesures directes n'ont pas abouti ; cependant, de manière indirecte, les résultats des mesures permettent de comprendre qu'au-delà de quelques mètres d'une source (hors influence météorologique) les TSP en carrière sont des PM10 puisque les particules supérieures ont sédimenté et donc ne sont plus en suspension.

- des tests de micro-capteurs optiques pouvant assurer une télésurveillance instantanée des PM10 et PM2,5 ont été réalisées à l'occasion de certaines des campagnes sur 3 des 4 carrières, mais les résultats n'ont pas été concluants.

La revue des publications internationales sur les sujets abordés par EMCAIR montre une grande convergence de résultats : importance de facteurs d'émission robustes évalués localement ; modélisation ADMS applicable aux carrières avec de bons recoupements ; des sources d'émission en carrière très localisées avec une dispersion le plus souvent en panaches dont l'influence reste limitée.

Les rapports d'étape qui détaillent les enregistrements de chaque campagne sont publiés localement par les AASQAs.



Abstract

In the context of public policies related to air quality, the extractive (quarry) industry still suffers from a reputation associated with activities that generate a lot of atmospheric dust. The EMCAIR project (Emissions from Quarries in the Air) aims at improving our knowledge on real-world air emissions from quarrying activities and quantify their impacts in the vicinity of the extraction sites. Three representative quarries were studied in the framework of EMCAIR using a similar and well-defined experimental strategy targeting on-line/off-line measurements of EU regulated PM_{2.5}/PM₁₀ and their chemical characterization. Summer and winter intensive (1-month) field campaigns were performed for each quarry to better infer the driving role of meteorological conditions on ambient PM concentrations and their influence on dispersion processes and deposition (dry/wet) mechanisms. The overall methodology deployed within EMCAIR consisted in identifying a specific chemical fingerprint of the atmospheric dust emitted by the quarry in order to evaluate accurately its impact on PM levels in the surrounding area (receptor sites located within 400 to 2,500m distance from quarry).

This project, led and coordinated by the trade union of the Aggregate Industry (UNPG/UNICEM), gathered three accredited French Air Quality monitoring networks for the field campaigns, scientific experts in the chemical characterization of PM (from France and Cyprus), and the national (French) operator in emission inventories (CITEPA).

The main results are summarized as follows:

- Sampling sites located within quarries (e.g. close to emission sources) logically recorded the highest atmospheric dust deposition rates, and the highest concentrations of PM with a chemical fingerprint strongly impacted by the extracted stones of quarry;
- Atmospheric emissions of dust from quarries were mainly found in PM₁₀, and to a much less extent in PM_{2.5} with a typical PM_{2.5}/PM₁₀ ratio evolving below 0.250
- Receptor sites located (upwind/downwind) at distances in the range 400 to 2,500m from the quarry were poorly impacted, with often not detectable amount in atmospheric dust deposition from the quarry, non-detectable (on-line) PM_{2.5}, and detectable (on-line) PM₁₀ concentrations originating from the quarry for time limited periods.
- PM chemical analyses performed on weekly integrated filter samples, the derived quarry chemical fingerprints and the use of the "Lenschow" methodology made possible to quantify with high accuracy the low amount of PM from quarry recorded at the receptor sites
- The granulometry of deposited dust (sampled at different locations within the quarries) was measured experimentally and reported a large range (from 0.1 to 250 µm equivalent diameter); a small fraction of which was in the PM₁₀ and PM_{2.5} fractions;
- Correlations were found between dry deposition mass (fluxes) and suspended particles (PM₁₀) for each quarry

Atmospheric dispersion modelling of PM₁₀ emissions from one quarry has been performed by ATMO Hauts-de-France using the ADMS-Urban model based on emission potentials estimated by the GEREP tool and regional inventory data for emission sources outside the quarry. This simulation proved to be conclusive and seemed to confirm the relevance of the methodology proposed by CITEPA, at least for PM₁₀ emission factors.

For TSP (total suspended particulate), direct measurement tests have not been successful due to the complexity inherent to the quantitative collection of atmospheric aerosols larger than 10µm diameter; however, our results suggest that beyond few tens of metres far from a source point, quarry TSPs are mostly PM₁₀.

Optical microsensors capable to provide instant monitoring of PM₁₀ and PM_{2.5} were tested for some of the campaigns, but the results were not conclusive.

The international review of technical publications tackled by EMCAIR shows the large convergence of the results: importance of the sturdy emission factor linked to a local assessment ADMS model applicable in quarries with a good cross-checking; emission sources in quarries are very localized with plume dispersions which the influence remains restricted.

The detailed results for each of the regional sites treated are the subject of progress reports by geographic sector and by theme.

1. Contexte et objectif du programme

Depuis l'année 2000, le bilan annuel de la qualité de l'air en France montre que, malgré une tendance globale à l'amélioration pour les principaux polluants, demeurent de profondes disparités sur le

territoire national avec des épisodes de pollution significatifs. Les seuils réglementaires ne sont pas respectés et des épisodes de pollution restent récurrents sur certaines régions, à tel point que la Commission européenne menace notre pays – avec huit autres comme l’Allemagne, l’Italie, l’Espagne notamment – de la Cour de justice de l’UE si aucune action immédiate n’est présentée.

Il est donc majeur pour le secteur de l’industrie extractive et tout particulièrement l’industrie du granulat, encore trop souvent associée à l’image d’une activité fortement génératrice de poussières, de montrer comment est géré aujourd’hui ce risque et quels sont les niveaux réels des émissions dans l’air.

1.1. Contexte environnemental et enjeux économiques et sociétaux

Compte tenu de son impact sur la santé, notamment par l’exposition aux particules (maladies cardio-respiratoires, cancers), la réduction drastique de la pollution atmosphérique est devenue un objectif majeur et urgent pour l’ensemble des pays. Au niveau international, des plafonds d’émissions pour certains polluants sont fixés dans le cadre du protocole de Göteborg (LRTAP), dans le cadre de la convention de Genève. Ce protocole a été révisé en 2012 et fixe des objectifs de réduction des émissions de certains polluants à horizon 2020, par rapport aux émissions de 2005. Au niveau européen, la directive (EU) 2008/50 du 21 mai 2008 a défini et fixé des objectifs concernant la qualité de l’air ambiant, afin d’éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs pour la santé humaine et pour l’environnement dans son ensemble ; elle a notamment fixé des valeurs limites pour les PM10 : 40µg/m³ en moyenne annuelle et 50µg/m³ en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 35 fois par année civile. Plus récemment la directive (EU) 2016/2284 du 16 décembre 2016 a précisé des objectifs de réduction des émissions de certains polluants comme les PM2,5, par rapport aux émissions de 2005, pour les horizons 2020 et 2030, en intégrant les objectifs du Protocole de Göteborg.

Dans les faits, les normes fixées par la première directive restent encore difficiles à être appliquées et la France en est un exemple avec des épisodes de pollutions malgré la mise en place d’un certain nombre d’actions comme :

- Le Comité Interministériel de la Qualité de l’Air (CIQA),
- La révision complète des Plans de Protection de l’Air (PPA) institués en 1996 par la loi sur l’Air et l’Utilisation Rationnelle de l’Energie (LAURE).
- Les Plans Régionaux Santé Environnement (PRSE) définissant des objectifs pluriannuels avec mise en œuvre de plans d’actions stratégiques.
- Les Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) créés par les lois Grenelle I et Grenelle II (Article 68[1]) déclinent aux échelles régionales une partie du contenu de la législation européenne sur le climat et l’énergie, en remplaçant les Plans Régionaux pour la Qualité de l’Air (PRQA) ;
- La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) adoptée en 2015 participe à la mise en place de nouvelles mesures pour améliorer la qualité de l’air en faisant évoluer les Plans Climat Énergie Territoriaux (PCET) en Plan Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET).
- Le Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PREPA du 10 mai 2017).
- Des procédures d’urgence pour anticiper, par actions préfectorales, les épisodes de pollution persistants (PM10, ozone,) et maintenir des niveaux de polluants en deçà des seuils réglementaires (arrêté du 26 mars 2014, complété par ceux du 7 avril et 26 août 2016).

1.2. Positionnement du programme

Les carrières en France

Une carrière est une zone d’extraction de substances minérales qui ne sont ni métalliques (minerais), ni carbonées (charbon, pétrole, etc.) Deux familles sont généralement distinguées : celle des roches massives (calcaires, éruptives) pour laquelle les étapes de réduction sont les plus complètes avec notamment du minage à l’explosif, et celle des roches meubles (alluvions, sables, etc) pour laquelle ces étapes peuvent être réduites à un classement granulaire.

Pour l’environnement, les carrières sont régies par la réglementation des Installations Classées pour la Protection de l’Environnement (ICPE), sous le régime de l’autorisation préfectorale avec évaluation environnementale.



L'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG) est l'organisation professionnelle qui regroupe la majorité des entreprises qui produisent des granulats (sable, graviers) en France. Après avoir touché son plus bas niveau depuis des décennies en 2015 avec 327,6 Mt dont 36 % de roches meubles et 56 % de roches massives, le solde représentant les recyclés, 2016 a enregistré une petite reprise avec 330,1 (+0,8%). 2017 a confirmé cette lente reprise.

On dénombrait en 2010, environ 2616 carrières de granulats : 1261 sites de carrières alluvionnaires, 769 sites de carrières de roches calcaires et 586 sites de carrières de roches éruptives.

Qu'ils soient issus de roches massives ou meubles, les étapes de production des granulats sont les suivantes :

- Une phase d'extraction qui fait suite à la découverte du gisement ;
- Une phase d'acheminement entre le gisement et l'installation de traitement ;
- Une phase de traitement comprenant principalement les opérations de concassage, criblage et lavage éventuel,
- Des opérations de stockages généralement avant la commercialisation ;
- Le réaménagement (agricole, forestier, écologique, etc.) en s'efforçant de le coordonner à l'exploitation lorsque le gisement le permet.

Les émissions de poussières en carrières

En carrière, les émissions de poussières peuvent être classées de différentes manières.

D'abord, distinguer celles directement liées à l'activité industrielle pendant les heures d'ouverture du site de celles corrélées aux phénomènes d'érosion éolienne :

- Les émissions sporadiques ou ponctuelles (par exemple émissions provoquées par les tirs de mines, le déchargement des tombereaux, etc.) ;
- Les émissions semi-permanentes sur la période de fonctionnement (par exemple les émissions produites durant la foration, la circulation des véhicules sur les routes et pistes, les déstockages) ;
- Les émissions permanentes sur la période de fonctionnement (celles produites par les installations de broyage, concassage et criblage) ;
- Les émissions fugitives liées à la conjonction de certaines conditions climatiques (vent + sol sec + présence de fines minérales) comme les envols d'éléments fins depuis les stocks à l'air libre (qui se produisent indépendamment du fonctionnement ou non du site).

Ensuite, intégrer que l'empoussièremement en carrière et en périphérie est influencé par différents facteurs :

- Ceux favorisant la formation des poussières : la nature de la roche (friabilité, dessiccation), le type d'exploitation (roche massive, roche meuble), les modes de fabrication des granulats (concasseurs, cribles, etc.)
- Ceux influençant la dispersion des poussières : granulométrie, conditions météorologiques (vent, sécheresse, précipitations), implantation géographique du site, méthode d'exploitation et organisation spatiale de la carrière et des installations de traitement.

L'exploitation des carrières est régie par l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994. L'article 19 de cet arrêté qui regroupe les prescriptions spécifiques aux poussières a été actualisé par l'arrêté du 30 septembre 2016. Relevons en particulier :

« Les exploitants de carrières, à l'exception de celles exploitées en eau, dont la production annuelle est supérieure à 150 000 tonnes établissent un plan de surveillance des émissions de poussières. Ce plan décrit notamment les zones d'émission de poussières, leur importance respective, les conditions météorologiques et topographiques sur le site, le choix de la localisation des stations de mesure ainsi que leur nombre. Le plan de surveillance est tenu à la disposition de l'inspection des installations classées »

La nature des activités exercées place ce secteur industriel de l'industrie minérale directement dans le champ d'application des nouvelles orientations législatives et réglementaires dans la mesure où cette activité présente encore l'image traditionnelle d'un secteur générant de grandes quantités de poussières susceptibles d'impacter la qualité de l'air (voir § 3.6.1 inventaire national des émissions.)



Par ailleurs, plusieurs éléments complémentaires contribuent également à ce que ce secteur soit directement concerné. Parmi eux rappelons :

- Le passage du RGIE (Règlement général des industries extractives) au code du travail depuis le 01/01/2014 pour l'empoussiérement des lieux de travail ;
- L'obligation de renseigner dans le cadre de la déclaration GEREPA les données relatives aux émissions de polluants dans l'air, l'eau, le sol et les déchets des installations classées soumises à autorisation et à enregistrement. Pour réaliser cette évaluation le MEDDE a chargé le CITEPA de réaliser avec la participation des professions concernées une grille d'évaluation des émissions dans l'air basée sur les facteurs d'émissions de l'AP42-US-EPA ;
- L'abaissement des seuils de perception de la TGAP pour les émissions de particules dans l'air depuis la loi de finance de 2013 ;
- Les récentes évolutions sur l'évaluation des risques sanitaires dans les projets soumis à l'évaluation environnementale.
- La décision au niveau des instances européennes de faire évoluer le classement des procédés émetteurs de silice cristalline des risques chimiques ACD - agent chimique dangereux – aux risques dits CMR, c'est à dire cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction.

Or à ce jour, il n'y a eu que très peu d'études et donc très peu de données sur la quantification et la caractérisation en champ proche des émissions de particules émises par les carrières et leurs installations.

Ces connaissances sont limitées à l'application de l'arrêté ministériel du 22/09/1994 avec les suivis des retombées de poussières atmosphériques en périphérie de leur site d'exploitation et le contrôle des émissions canalisées (en TSP et depuis janvier 2018 en PM10). A l'heure actuelle, les concentrations atmosphériques des particules émises par les carrières dans les fractions PM10 et PM 2,5 ne sont généralement abordé que dans le volet des risques sanitaires des études d'impact. D'où un manque **important d'informations permettant de cadrer l'influence réelle, en champ proche, des émissions de poussières issues de l'industrie extractive.**

Positionnement d'EMCAIR par rapport aux axes thématiques du programme CORTEA :

Le programme EMCAIR intervient dans le secteur de l'industrie minérale (INDUSTRIE - section E de l'appel à projet CORTEA) et plus particulièrement les procédés de fabrication.

Comme expliqué plus haut, les carrières et leurs installations de premier traitement relèvent de la réglementation des ICPE mais ne sont ni couvertes par la directive IED, ni par des BREF, même si quelques règlements font déjà référence au concept du recours aux meilleures techniques disponibles.

Notons toutefois qu'au niveau européen, il existe un BREF sur la gestion des déchets de l'industrie extractive en cours de révision dans lequel les carrières de toute nature risqueraient d'être concernées à terme. L'analyse de ce projet de BREF par rapport aux émissions dans l'air permet d'identifier des méthodes applicables aux carrières de granulats : elles restent toutefois très générales et appuyées sur des retours d'informations relevant plutôt des secteurs miniers qui présentent d'autres problématiques.

Les enseignements issus du programme expérimental EMCAIR alimenteront éventuellement un projet d'application aux carrières en France. En effet une meilleure connaissance des émissions dans l'air des poussières minérales permettrait d'améliorer la gestion de cet impact environnemental.

1.3. L'état de l'art

Travaux sur les facteurs d'émission

Depuis 2011, l'UNPG s'est emparée du sujet des facteurs d'émission afin de préparer les professionnels à mieux anticiper les contraintes auxquelles ils doivent faire face.

→ Les démarches ont débuté avec le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique) pour affiner les facteurs d'émission nationaux (FE) représentatifs de l'activité extractive dans le cadre de l'**inventaire national des émissions polluantes**. Ce travail s'est appuyé en particulier sur la méthode mise au point pour « Environmental Protection Agency » (US EPA) dite AP-42 avec leur base de données. Remarquons que celle-ci est de plus en plus partagée au niveau international (Royaume-Uni, Allemagne, Belgique et Québec), comme le montrent les récentes



publications sur la modélisation (cf. § suivant « Facteurs d'émission et de modélisation » Cette première approche a permis d'actualiser les facteurs d'émissions nationaux (voir § 3.6.1) :

- En schématisant l'activité extractive et de première transformation en cinq étapes principales : forage-minage, transport entre extraction et traitement, installations de traitement, mise en stocks et érosion éolienne.
- En intégrant des paramètres pertinents qui influent sur les émissions (conditions climatiques locales, volumes de production, moyens mis en œuvre pour la réduction des émissions, etc.)

Ce travail s'est appuyé sur la connaissance statistique des pratiques déployées par la profession sur la base d'un échantillon représentatif des différents types d'exploitation que l'on rencontre en France. A défaut de données disponibles ou représentatives pour certains aspects, le CITEPA a dû retenir des hypothèses majorantes.

En prolongement, une deuxième action a été conduite pour mieux répondre aux obligations de la déclaration annuelle des émissions polluantes (**GEREP**) : réalisation d'un **outil de calcul** simple et validé (tableur au format Excel) à disposition des industriels **pour estimer le potentiel des émissions de poussières dans l'air pour les carrières et installations de premier traitement**. Un guide pour renseigner le dispositif GEREP a d'ailleurs été rédigé avec le Ministère, le CITEPA, l'UNICEM et l'ATILH. Ces documents, régulièrement actualisés sont mis à disposition sur le portail de déclaration GEREP.

Autres travaux sur la méthodologie d'évaluation des émissions

Face aux besoins d'évaluation des émissions diffuses dans l'air, d'autres secteurs industriels ont entrepris des travaux. Ainsi, dans les activités de manutention de minerais et combustibles, on peut citer :

- L'étude réalisée par (ARMINES, 2008) sur la quantification des émissions diffuses, domaine qui reste aujourd'hui très délicat. Les travaux menés et présentés visent à améliorer les modèles existants basés sur des facteurs d'émissions proposés par l'EPA. L'étude propose notamment une approche expérimentale pour évaluer les vitesses d'envols des particules en fonction de leur nature (charbon dans l'étude). De tels travaux pourraient, avec les densités des minéraux rencontrés en carrière de granulats, permettre d'améliorer les estimations dans l'outil GEREP de l'érosion éolienne (voir § 3.7).
- Au plan normatif la norme NF EN 15445 permet de caractériser les sources fugitives de poussières diffuses fines et grossières dans les installations et zones industrielles.

Travaux sur la modélisation

De nombreuses publications ont été consultées sur la modélisation car les outils de calcul se développant, ces outils sont de plus en plus employés pour décrire les situations rencontrées en particulier dans le domaine de l'air et des pollutions par diverses activités (Air Pollution XIX-2011). Naturellement, la modélisation en milieu urbain fait l'objet de très nombreux développements puisque c'est le lieu où se focalisent les enjeux pour la population ; nous avons identifié des revues critiques qui rassemblent les caractéristiques des modèles les plus fréquemment rencontrés, leur architecture et leur fonctionnement pour aider à comprendre leurs domaines d'application pour les aérosols (modèles de dispersion des particules en milieux urbains – Ecole des Mines de Douai).

Plus spécifique aux industries extractives, nous avons consulté une publication de Stephen SILVESTER, Ian LOWNDES, Joseph DOCX, Sam KINGMAN (Déc 2006) qui tente de démontrer l'intérêt d'une modélisation basée sur une approche lagrangienne (MFN) avec une caractérisation précise des sources d'émissions et une prise en compte des turbulences et des écoulements secondaires typiques des carrières. L'étude est basée sur la topographie d'une extraction de calcaire située dans le Derbyshire (Royaume-Uni). Les travaux débouchent sur des simulations d'émissions en utilisant deux types de modèles (une approche lagrangienne MFN et une approche de panache gaussien). Le cas du transport interne par dumper est étudié en détail et le schéma suivant en explicite les résultats, soulignant qu'à 30 mètres de la source, on ne relève plus qu'environ 20% des concentrations de départ.



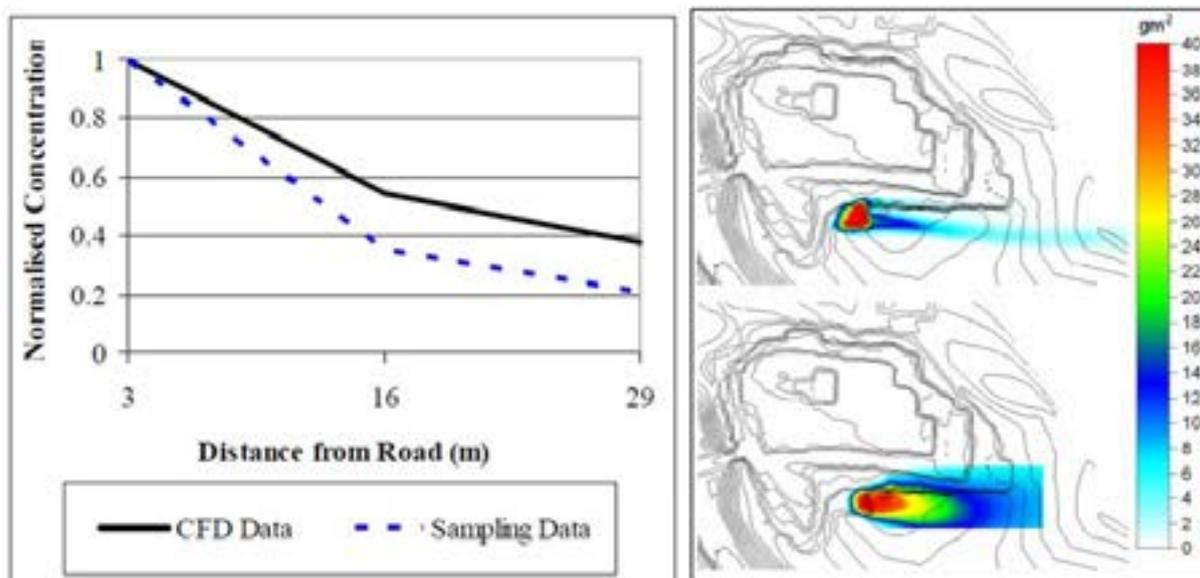


Figure 1 : Comparaison entre modélisation MFN (CFD en Anglais) et mesures dans le cas d'un dumper sur piste de carrière (à gauche) ; comparaison de deux types de modèles pour un même tir de mines (méthode lagrangienne MFN en haut et méthode gaussienne en bas sur le graphique - Stephen SILVESTER Ian LOWNDES Joseph DOCX Sam-KINGMAN

L'autre source en carrière que constitue le tir de mines est également étudiée. L'étude montre que l'approche gaussienne donnerait une représentation plus large de la dispersion des émissions dans le contexte topographique d'une carrière.

Une thèse récente (Suzanne Oudwater- sept 2017) présente la caractérisation des sources d'émissions du poste foration dans une carrière de pierre de taille en Finlande. Là encore on relève que les concentrations mesurées de manière méthodique pour proposer une modélisation de cette source dans la carrière évoluent avec une courbe de décroissance en fonction de l'éloignement : la figure ci-dessous montre qu'à 20 m de la source, la concentration ne représente plus que 14% de la concentration d'origine. L'objectif de cette étude était de déterminer si un modèle pouvait prédire la dispersion de la poussière dans la carrière en champ proche. Le modèle prédit la concentration horaire moyenne de PM_{10} sur une distance de 5 mètres jusqu'à 60 mètres de la source de forage

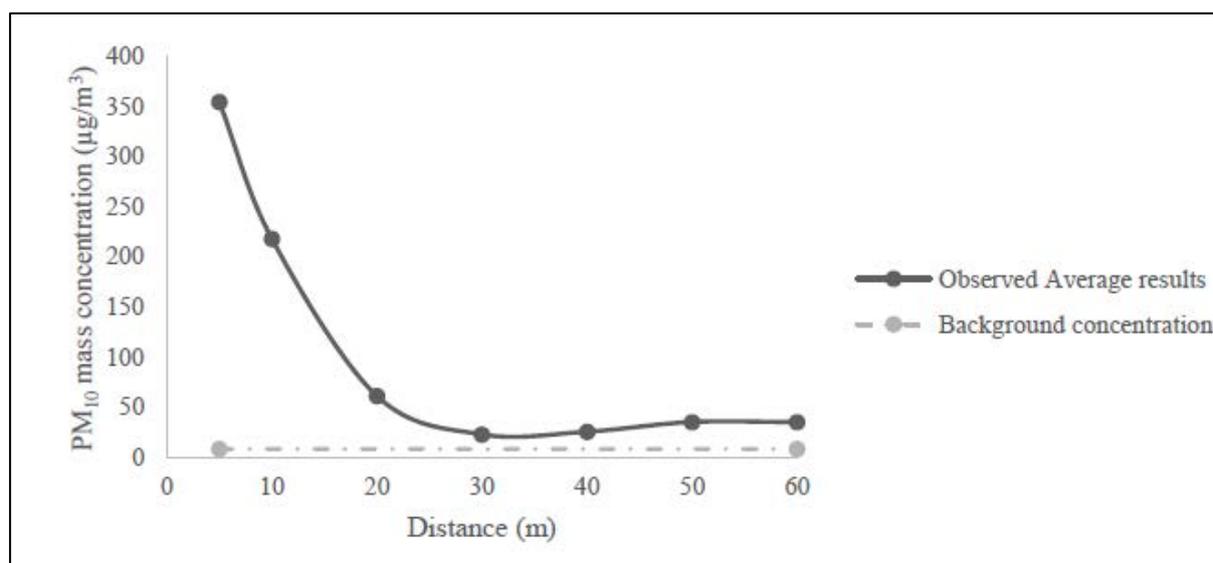


Figure 2 : évolution de la concentration PM_{10} en fonction de la distance par rapport à la source (foration) Suzanne Oudwater- sept 2017-

Comportement des aérosols

Afin d'aborder les phénomènes de dépôts de particules avec plus de précision, des recherches bibliographiques ont été réalisées ; nous avons ainsi noté que de nombreux travaux ont été entrepris notamment dans le cadre des phénomènes de retombées atmosphériques radioactives (Institut de Emissions des poussières des carrières dans l'air : EMCAIR | **PAGE 12**

Radioprotection et de Sureté Nucléaire). Au-delà de la compréhension des notions élémentaires de physique des aérosols par la description des mécanismes qui gouvernent leur comportement dans l'atmosphère, ces documents présentent aussi des applications pratiques précieuses pour les cas rencontrés dans les industries extractives (conduits de prélèvements, cas de la filtration, cas du dépôt dans les voies respiratoires, transport dans l'environnement).

Au plan expérimental, nous avons consulté la thèse de Pierre DAMAY Avril 2010 qui présente une méthode pour évaluer la vitesse des dépôts secs des aérosols en milieu naturel. Comprendre comment la granulométrie des particules (ici fines à ultra-fines), les paramètres micro-météorologiques et les types de couvert peuvent interagir sur les dépôts. Des mesures directes de la vitesse de dépôt sec des aérosols (V_d), à travers des mesures expérimentales in-situ sont développées. L'originalité de la méthode est le calcul des flux de dépôt par corrélation turbulente pour des aérosols atmosphériques sous différentes conditions et sur différents couverts (maïs, herbe, sol nu) pour l'exploitant d'une carrière, de tels développements scientifiques soulignent le rôle que les zones périphériques des installations et extraction peuvent jouer par la végétation qui peut y être implantée.

Impact des aérosols

De nombreux aspects environnementaux sont aujourd'hui développés dans les publications. Nous avons d'abord noté des cours très complets qui permettent de cadrer les phénomènes (INRA, Ecole des Ponts, ENS, etc.) Parmi les publications, l'influence des dépôts secs et humides sur le développement des végétaux est de plus en plus étudiée (nov 2011 Santosh Kumar Prajapati),

Au plan sanitaire, certaines régions du monde sont très exposées. Ainsi une étude des universités de Liège-Namur montre l'impact des particules issues des déserts africains à l'échelle mondiale (Florence de Longueville, Sabine Henry, Pierre Ozer université de Liège et de Namur). Ainsi, en Mauritanie, aux portes du désert doit-on enregistrer des pics de concentrations en PM10 dont les moyennes journalières vont très souvent au-delà des $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aboutissant à des moyennes annuelles évoluant entre 60 et $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Certains pays comme la Palestine, pourtant exposés à d'autres problématiques, engagent des actions pour faire prendre conscience aux acteurs économiques des carrières et industries de transformation des impacts des poussières sur l'agriculture et le maintien de la biodiversité locale (Tahseen Sayara, Yamen Hamdan, Rezq Basheer-Salimia – Resources and Environment 2016).

Facteurs d'émission et modélisation

Une publication sur l'importance de disposer de facteurs d'émission pertinents pour représenter les émissions des carrières, souligne le développement de l'emploi des données de l'US-APE 42 pour les carrières (Journal of Environmental Protection, 2016, n° 7, pp. 467-472). Le but des travaux était d'aboutir à une meilleure représentation par des facteurs d'émission robustes à partir d'un suivi des émissions de poussières et des données météorologiques sur un site de carrière de roche meuble(UK) sur une durée de 2 ans. L'objectif de l'étude était d'améliorer la prévision en recalculant les niveaux de concentrations à partir du suivi des émissions de poussières autour de sources connues. Des analyseurs directionnels de poussières ont été utilisés sur 8 localisations dans et autour du site, et les données météo ont été enregistrées à partir d'une station installée sur site. Le modèle utilisé est ADMS (Air quality Modelling Software) ; les facteurs d'émission sont ceux de l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA) et de l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (US-EPA, AP 42).



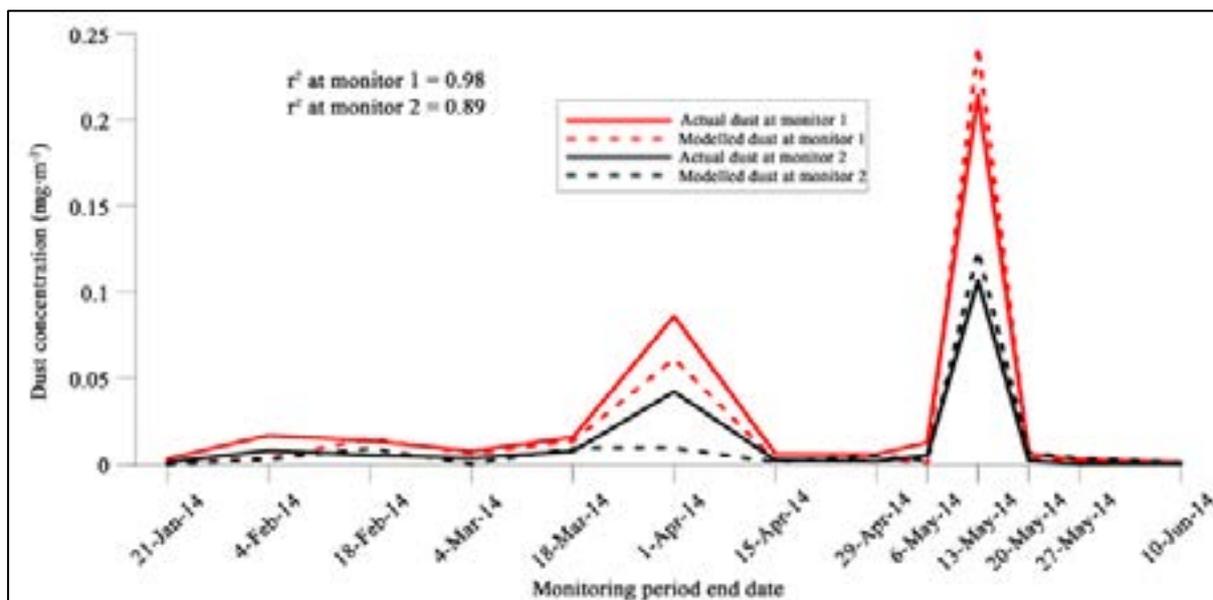


Figure 3 : comparaison des concentrations calculées par différents modèles avec les valeurs issues des suivis en carrière John Bruce, Jim Smith, Hugh Datson, Mike Fowler- 2016

La comparaison des prévisions obtenues par le modèle de dispersion en utilisant les facteurs d'émissions disponibles dans la littérature avec les concentrations en poussières mesurées sur le site en 3 points représentatifs (en limite de la carrière, à 100 m et à 200 m au-delà de la limite) ne sont pas pertinents : par exemple en limite de carrière la concentration moyenne mesurée est de $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alors que la modélisation aboutit à une moyenne de $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Une nouvelle comparaison sur la même période en adaptant les facteurs d'émission aux conditions locales (par la méthode US-APE 42) permet d'obtenir des prévisions de concentrations à partir du modèle ayant une meilleure corrélation (cf figure) avec les valeurs mesurées pour les points situés hors des limites de la carrière notamment lors des pics de concentration. Pour le pic maximal observé lors de la période considérée le modèle aboutit à une concentration de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alors que la valeur mesurée est de $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Techniques de mesures en carrières

Le LIDAR (LIght Detection And Ranging) permet un suivi in situ dans des plans horizontaux ou verticaux. Une publication de 2006 (université de Californie) présente l'expérimentation réalisée dans une carrière de sables et graviers pour évaluer les émissions diffuses de poussières. Des relations entre concentrations et composition chimique (teneur en quartz) ont pu être faites pour déboucher sur des facteurs d'émissions journaliers 65 à 110 kg de PM_{10} (dont 10 à 30 kg de quartz) pour le transport interne, 2 – $4 \text{ kg}/\text{t}$ en PM_{10} (dont 0.5 – 1 kg de quartz/t) pour le poste de chargement des granulats par bateau. Le LIDAR identifie également des panaches jusqu'à 30 m de haut. La grande majorité des particules PM_{10} (quartz associés) se situe dans des panaches évoluant de 10 à 25 m de hauteur, panaches déclinant avec la distance par rapport aux sources en carrière. L'étude conclue à la pertinence de cette technique pour décrire la distribution spatiale des émissions diffuses avec de bons ratios de corrélation entre concentrations et teneur en quartz.



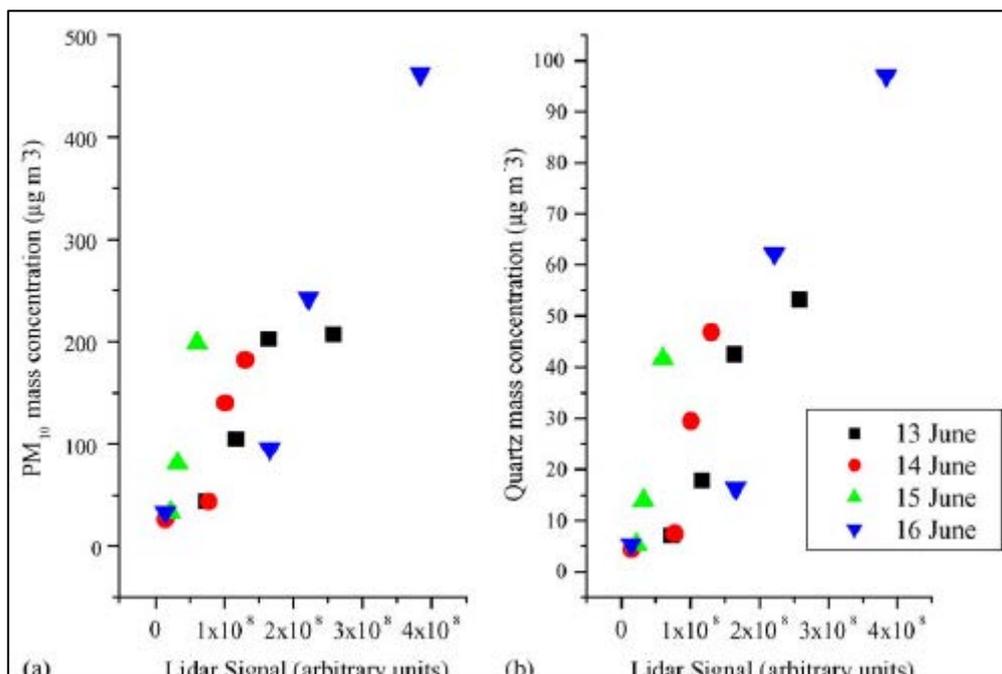


Figure 4 : relations entre signal LIDAR concentrations et teneur en quartz des PM10 en carrière de sables et graviers (Krystyna Trzepla-Nabaglo a, Ryoji Shiraki b, Britt A. Holm Janv 2006)

Une publication de Mining Engineering a retenu notre attention pour l'approche méthodologique qui a permis dans une carrière de granite de caractériser les performances d'une nouvelle cabine de pilotage du poste primaire. L'étude avait également pour objectif de déterminer les dispositifs les plus impactant sur les performances de la nouvelle cabine de pilotage (niveaux de pressurisation, équipements de filtration, gestion de la recirculation d'air, étanchéité). La qualité de l'étanchéité est le facteur prépondérant conditionnant l'efficacité de la pressurisation et la recirculation de l'air filtré influe très positivement sur l'assainissement de l'air. Les enregistreurs utilisés travaillent sur six coupures de 0,3, 0,5 µm, 0,7 µm, 1,0 µm, 3,0 µm et 5,0 µm. La figure suivante qui présente l'importance de l'atténuation des pics de concentration en PM5 relevés à proximité de la source pourra être rapprochée de certains enregistrements réalisés en carrière en PM2,5, comme la station implantée en carrière A non loin du poste primaire.

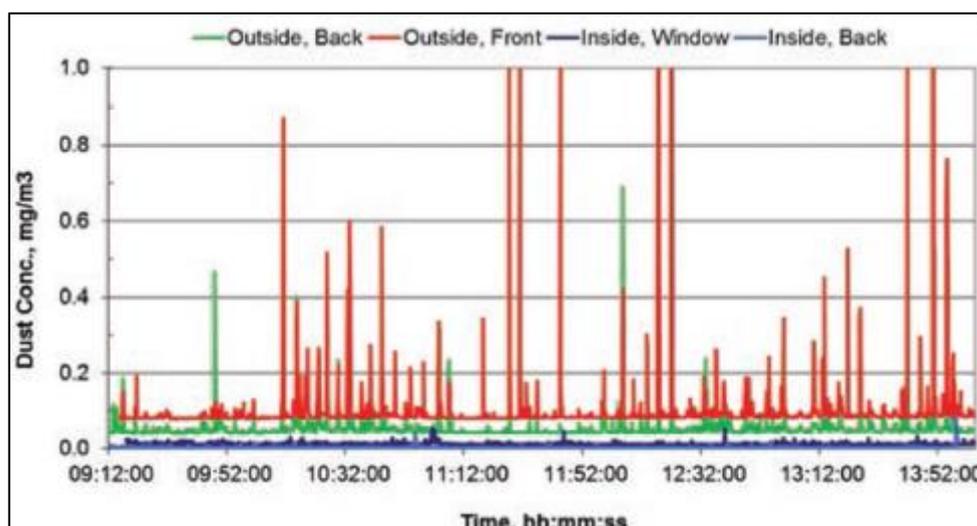


Figure 5 : évolution des concentrations (PM5) en extérieur et à l'intérieur d'une cabine de contrôle sur un poste de concassage primaire en carrière de granite (USA National Institute for Occupational Safety and Health– 2016)

Etude expérimentale sur sites

Dans le sud de la France en 2012, la DREAL PACA et l'ARS en association avec les producteurs de granulats locaux (UNICEM PACA) avait confié à l'association agréée de surveillance pour la qualité

de l'air **Air PACA** et au laboratoire **CNRS-CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des géosciences de l'Environnement)** une étude expérimentale (PACA, 2014). **Le but était d'améliorer les connaissances sur les émissions de poussières issues des carrières** qui, très approximativement à l'époque avaient été estimées entre 10 et 15 % des particules émises dans l'air dans cette région (Cadastre d'émission des pollutions atmosphériques – ATMO PACA 2007). Cette étude s'est appuyée sur 2 sites exploitant des gisements calcaires relativement comparables en termes de production, de gisement, de contexte géographique et climatologique.

Elle a reposé sur :

- Deux campagnes de mesures d'un mois par site (avec 3 points de mesure : amont, aval et dans la carrière) à des périodes différentes de l'année selon une stratégie similaire de positionnement des postes de mesures sur les fractions en suspension PM10 et PM2,5 ainsi que sur les fractions sédimentaires des poussières ;
- Sur une qualification minéralogique (recherche des phases caractéristiques des sources d'émissions),
- Sur une modélisation du champ de dispersion des émissions de poussières en utilisant le modèle de dispersion ADMS-URBAN1. L'objectif était de comparer les données issues du modèle (alimenté par le facteur d'émission national estimé par le CITEPA-guide OMINEA) avec les valeurs mesurées sur le terrain (voir rapport (ATMO-PACA, 2016)).

Les principaux enseignements de cette étude ont été les suivants :

- Pour les deux carrières étudiées : l'impact relatif à la qualité de l'air est limité aux abords des carrières. L'impact géographique est restreint.
- Les carrières semblent se caractériser par des émissions de poussières grossières majoritaires avec des proportions de PM10 et PM2,5 en cohérence avec l'approche des facteurs d'émission menée par le CITEPA (24% en PM10 et 4% en PM2,5) ;
- De forts gradients de concentrations en PM10 et PM2,5 sont observés et modélisés de part et d'autre des limites des deux carrières. L'influence de l'activité industrielle est située dans la zone des 200 m aux abords des deux carrières investiguées. L'exposition des populations riveraines des deux carrières étudiées semblent réduite après la zone des 200m.
- Une concentration en particules PM10 et PM2,5 toujours inférieure aux valeurs limites réglementaires dans l'environnement périphérique d'une carrière.
- Les concentrations modélisées avec ADMS et avec le facteur d'émission national du CITEPA avant la révision de la méthodologie (2010) et après la révision de la méthodologie basé sur l'AP42 ne permettent pas de reproduire les observations en proximité des carrières.

Cette étude a permis de commencer à mieux comprendre la typologie des émissions des carrières en mettant en évidence **la nécessité d'affiner les facteurs d'émission par des mesures complémentaires dans différents scénarii**. Il convient de noter que l'outil GEREP permettant d'estimer des facteurs d'émission à l'échelle d'une carrière n'était pas disponible lors de la réalisation de cette première étude. Le facteur d'émission national utilisé alors n'était pas destiné à être mise en œuvre à une échelle plus fine que le territoire national car il n'intègre pas la spécificité d'une carrière puisqu'il correspond à une moyenne des carrières française.

Cette étude a également contribué à actualiser les valeurs des émissions des carrières et de leurs premières installations en ramenant à **moins de 5% leurs proportions dans les émissions de poussières totales en suspension (TSP) de la région PACA**. Le tableau ci-après en détaille les valeurs pour les 3 catégories de poussières - poussières totales en suspension (TSP), PM10 et PM2,5 - étant précisé que tous les ans, les années antérieures sont recalculées dans le nouvel inventaire pour pouvoir comparer les émissions d'une année sur l'autre, à méthodologie constante. Ainsi, chaque année les estimations gagnent en précision.

¹ ADMS Urban est une plateforme de modélisation intégrant plusieurs modèles dédiés au calcul des concentrations en polluants dans l'air à l'échelle urbaine. Conçu pour travailler de l'échelle de la rue à celle de l'agglomération, ADMS Urban est un des systèmes de référence pour la quantification de l'exposition des populations aux sources de pollutions urbaines : trafic routier et transports, industrie, résidentiel, tertiaire...



année	TSP	PM10	PM2,5
2007	4,9%	7,3%	1,3%
2010	4,5%	6,9%	1,2%
2012	4,3%	7,3%	1,3%
2013	3,3%	7,1%	1,3%
2014	4,7%	7,4%	1,4%
2015	4,6%	7,5%	1,4%

Tableau 1 : Région PACA - Evolution des émissions des carrières en proportion des émissions totales.

1.4. Objectifs du programme et caractère novateur du projet

Le programme EMCAIR s'inscrit dans la continuité des démarches professionnelles précédemment exposées, **en approfondissant l'approche scientifique de la génération des particules minérales et de leurs dispersions autour des carrières**. Les principaux objectifs sont les suivants :

- **Améliorer les connaissances de l'impact de l'industrie des carrières sur la qualité de l'air** : l'influence de cette activité et les risques associés de pollution de l'air sont encore méconnus et, par voie de conséquence, souvent surévalués. Il s'agit de donner une image plus réaliste des émissions des différentes sources de polluants atmosphériques, notamment les particules PM10 et PM2,5 émises par les carrières et leurs installations de premier traitement ;
- **Affiner les facteurs d'émission** relatifs aux exploitations de granulats. A ce jour certains coefficients nécessitent de meilleures connaissances en conditions réelles ; quantifier par exemple les améliorations générées par la mise en place de nouvelles techniques sur les sites d'exploitation (procédés industriels, équipements spécifiques, etc.) afin de limiter les émissions en particules (PM10 et PM 2,5) ;
- **Améliorer les connaissances sur les modalités de mesures de poussières atmosphériques et la métrologie** ;
- **Optimiser les connaissances sur la granulométrie des particules émises** et leur composition minéralogique en relation avec les gisements exploités (approche du risque silice) ; arriver à déterminer « l'empreinte géochimique » d'un site d'extraction par rapport aux autres activités en matière d'émissions dans l'air ;
- **Définir une méthodologie de mesures** applicable/transposable aux exploitations caractérisées par des sources ponctuelles diffuses en vue d'optimiser l'évaluation des risques sanitaires en périphérie des carrières ;
- **Optimiser la pertinence des modèles de diffusion** (répartition spatiale, concentrations) des poussières à partir d'un milieu émetteur constitué le plus souvent de sources diffuses comme tel est le cas dans les exploitations de carrière ; cet aspect rentrant directement dans le champ d'évaluation des risques environnementaux et sanitaires.

2. Choix des sites et méthodologie

2.1. Choix des sites

L'étude réalisée en PACA a apporté des premières tendances concernant les émissions des carrières et des installations de premier traitement, tendances qu'il s'agit de confirmer ou non dans des contextes **géologiques, climatologiques et industriels différents**. **Le choix des sites pour le programme EMCAIR a cherché à intégrer cette problématique en élargissement la représentativité :**

- Les carrières potentiellement les plus émissives : roches massives en milieu cristallin (éruptif, métamorphique) et calcaire dans un contexte géo-climatique différent de celui de la première étude ;
- Les plus grosses carrières actuellement en activité en France : le bassin de Marquise représente en capacité le premier site français d'extraction avec 4 carrières ;
- Des installations de premier traitement de niveaux d'équipement différents, de conception et d'âge différents ;



- Des conditions d'exploitation différentes et des tailles variées : un site simple peut se révéler plus aisé dans l'interprétation des phénomènes observés ;
- Des conditions climatiques autres que celles de la première étude.

Sont ainsi étudiés dans le programme EMCAIR de septembre 2015 à décembre 2017 : (cf. figure 6)

- Le **bassin de Marquise dans le Pas-de-Calais** qui regroupe 4 carrières et 10 Mt/an de production ; les deux plus importantes sont appareillées ainsi que trois sites en champ proche à l'échelle du bassin. La roche reste calcaire mais le contexte climatique océanique est différent de celui de la première étude;
- Une **carrière de gneiss** (roche métamorphique) en **Pays de la Loire** ; deux autres carrières sont actives également sur le gisement avec 2 Mt/an de production;
- Une **carrière de grès-quartzite en Bretagne** : un contexte plus simple d'un gisement ouvert par un seul exploitant avec des installations récentes ; production annuelle 0,35 Mt.

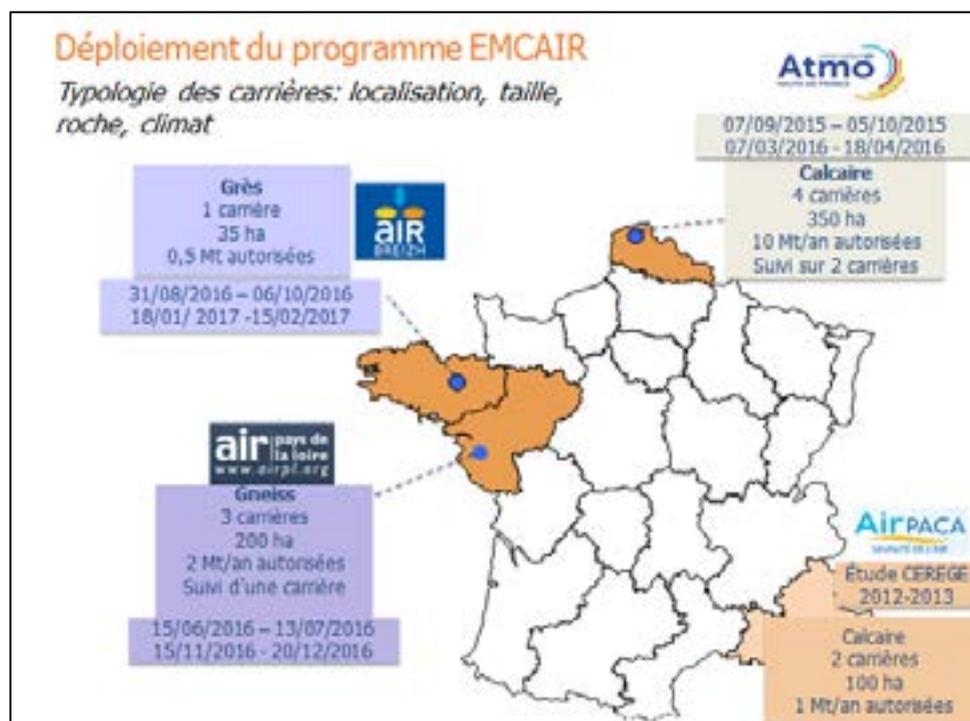


Figure 6 : Localisation des sites d'étude des émissions de poussières des carrières

2.2. Méthodologie

La stratégie de prélèvements qui avait été initiée en PACA est mise en place pour chaque site expérimental retenu prenant en compte :

- L'environnement humain en périphérie de la carrière,
- La position des directions dominantes des vents,
- La répartition interne des différentes zones d'émissions à l'intérieur des carrières.

Deux campagnes par site sont réalisées sur la période 2015 - 2017 : l'une en période estivale, la seconde en période hivernale de manière à apprécier au mieux les effets liés aux caractéristiques climatiques locales.



Site d'étude	Période de mesures
Bassin de Marquise Hauts-de-France	7 septembre au 5 octobre 2015 - 7 mars au 4 avril 2016
Pays de la Loire	15 juin au 13 juillet 2016 - 16 novembre au 14 décembre 2016
Bretagne	7 septembre au 5 octobre 2016 - 11 janvier 2017 au 8 février 2017

Tableau 2 : Périodes de mesures

Les mesures et prélèvements concernent les :

- **Deux fractions de particules en suspension PM10 et PM2,5** comptées et prélevées par différents appareils adaptés à pas continu ou discontinu, fixes ou mobiles. En priorité, les AASQAs ont mis en place des analyseurs et préleveurs agréés par le LCSQA (TEOM – FDMS, PARTISOL) pour la mesure réglementaire de qualité de l'air. D'autres appareils ont aussi été employés en complément (Néphélomètre GRIMM, impacteurs en cascade);
- **La fraction sédimentable** est mesurée par des systèmes de jauge OWEN ; Par ailleurs des prélèvements de poussières sédimentables sont opérés à la source des émissions (concassage, criblage, etc.) pour les deux carrières des Pays de la Loire et Bretagne afin de réaliser l'analyse granulométrique laser (MASTERSIZER).

Le comité de pilotage a souhaité intégrer au programme EMCAIR l'expérimentation de microcapteurs de particules en suspension. Le choix s'est porté sur le modèle e-PM de l'entreprise TERA qui avait fait l'objet d'un premier test sur une carrière de silice avec un recoupement satisfaisant par rapport à un appareil agréé. Compte tenu du contexte, 5 microcapteurs ont été ainsi testés dans des conditions différentes sur 3 carrières aux moments des campagnes de mesures (mars 2016 : carrières B ; juillet 2016 : carrière E ; septembre 2016 : carrière H).

En complément, un échantillonnage des roches exploitées par chacune des carrières a été réalisé afin de faire le lien par des analyses chimiques avec des poussières prélevées aux différents points de mesure (cf. 2.3.4. Techniques d'analyses chimiques).

Durant les campagnes de mesures, les sites ont été **équipés systématiquement d'une station météorologique** afin de suivre les conditions climatiques locales.

Un suivi d'exploitation sur les sites est mis en place sur la base d'un journal de bord de manière à bien identifier sur un pas de temps quotidien les événements intervenus durant la campagne tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du site. Ce suivi s'est également appuyé sur l'enregistrement vidéo continu sur certaines stations de mesures pour optimiser le suivi de l'exploitation.

2.3. Plan d'expérience

2.3.1. Implantation des points de mesures et de prélèvements

Trois points fixes de mesures et de prélèvements répartis de la manière suivante :

- Un point en amont par rapport aux vents dominants saisonniers de la zone carrière;
- Un point en aval de la zone carrière par rapport à cette même direction;
- Un point en carrière (limite ou équivalent). Dans la région du Nord (bassin de Marquise), deux points de ce type sont installés dans deux des 4 carrières du bassin, plus un autre point au niveau du village de Ferques situé entre les deux carrières appariées.



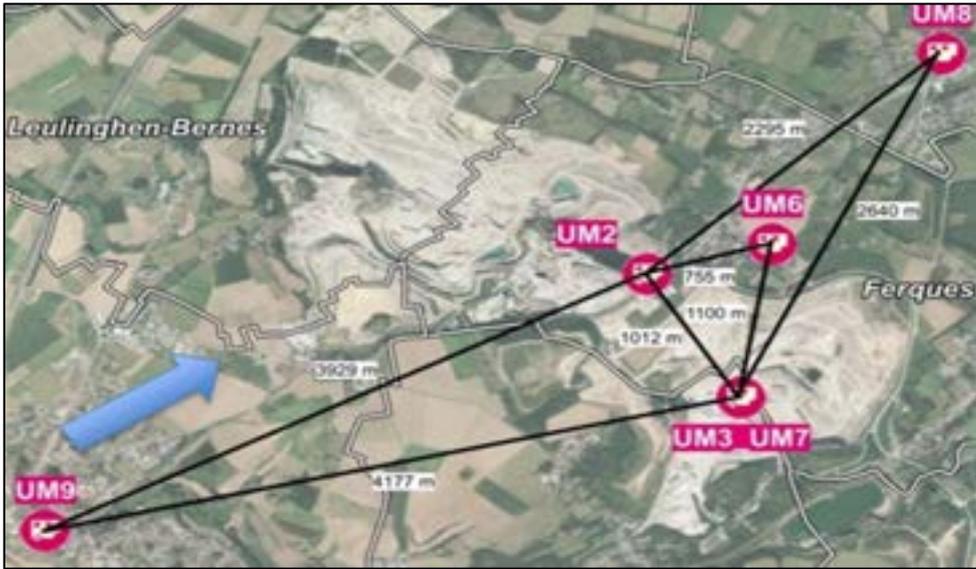


Figure 7 : Points de mesure sur le bassin de Marquise (flèche bleue = vent dominant)



Figure 8 : Points de mesures sur la carrière E des Pays de la Loire (flèche bleue = vent dominant)



Figure 9 : Points de mesures sur la carrière H de Bretagne (flèche bleue = vent dominant)



Cette démarche a eu pour objectifs :

- De tenir compte des périodes extrêmes (sèche-humide) d'une année pouvant en représenter la diversité climatique;
- D'avoir une vision amont/aval par rapport aux vents dominants des concentrations en particules (poussières sédimentables, PM10, PM2,5) avec des références sur les niveaux d'exposition dans l'environnement proche;
- D'enregistrer un suivi des concentrations en particules au plus proche des sources d'émissions au sein de la carrière;
- De disposer d'une vision de la distribution géographique des particules (poussières sédimentables, PM10, PM2,5);
- D'affiner les connaissances sur la part respective des particules émises par les carrières dans des contextes géologiques, topographiques et climatologiques différents, avec diverses méthodes d'exploitation répondant à plusieurs niveaux d'activités.

2.3.2. Enregistrements spécifiques dans les carrières

Pour être en mesure d'interpréter plus précisément les résultats enregistrés au cours des campagnes, un journal d'exploitation de chaque carrière est tenu. Ce suivi d'exploitation est bâti sur le même format d'un tableau Excel en s'appuyant sur la décomposition retenue par le CITEPA pour l'estimation du facteur d'émission des carrières. Cette tâche a été réalisée par l'exploitant, avec l'appui des étudiants, suivant les périodes et les sites. Il comporte les informations journalières relatives :

- À la foration, tirs de mines et extraction (date, localisation, nombre de trous, volume abattu);
- Au transport interne des matériaux bruts vers les installations de traitement (tonnage, horaires, nombre de rotations, arrosage des pistes);
- Aux mouvements de stockage des matériaux;
- Aux installations de traitement (horaires, quantités, type de production, fonctionnement des dispositifs de réduction des poussières, etc);
- Aux sorties de granulats par mode de transport (route, fer).

Pour finir, un état des stocks (quantité, disposition) est enregistré, ainsi que tout dysfonctionnement sur le site au cours de chaque campagne.

2.3.3. La modélisation

Le modèle ADMS Urban est utilisé (comme dans l'étude CEREGE/AIR PACA en PACA).

Le CITEPA interviendra dans le projet à cette étape du projet pour définir les facteurs d'émission à utiliser.

Plusieurs scénarios peuvent être envisagés :

- Des modélisations avec les seules données d'émissions des carrières (sans valeurs de fond) pourront être réalisées afin d'étudier la capacité du modèle à reproduire seul les observations des campagnes;
- Des modélisations avec une valeur de fond (issue des observations du site amont ou autres données disponibles exploitables dans ce sens) qui apporteront des réponses concernant la comparaison entre résultats théoriques et observations.

Ces simulations permettront d'appréhender le « forçage » externe en particules sur le site de la carrière. Il peut arriver, notamment en hiver ou au printemps que les particules mesurées à proximité de la carrière proviennent du brûlage de la biomasse. Il est donc indispensable de confronter les résultats des simulations avec l'analyse chimique réalisée par ailleurs sur les poussières relevées (teneur en lévoglucosan par exemple).

Une analyse statistique des résultats issus de ces modèles sera présentée et comparée aux émissions réelles enregistrées au cours des campagnes.

2.3.4. Présentation des techniques d'analyse chimique des aérosols

Les particules atmosphériques (fractions PM2.5 et PM10) sont, au plan chimique, principalement constituées de matière carbonée (matière organique, carbone suie), d'espèces ioniques et d'oxydes métalliques. Les analyses chimiques envisagées ici vont donc se focaliser sur ces 3 familles.

En concertation avec les AASQAs, nous avons fait le choix d'une collecte des échantillons aérosols sur filtre en quartz (modèle PallFlex, Tissu quartz, 47mm de diamètre). Ce type de filtre est utilisé en routine par les AASQAs pour la surveillance de la composition chimique des PM (programme « sites



ruraux »; directive Européenne sur la qualité de l'air). L'utilisation de ces filtres présente plusieurs avantages :

- L'ensemble des analyses chimiques (ions, carbone, métaux) peut être réalisé sur ces filtres (il suffit donc d'un seul échantillonneur de filtres pour couvrir toutes les mesures chimiques);
- Très faible contamination en ions (dont Ca^{2+}), carbone (OC), et métaux ce qui va permettre des analyses de grande précision (poids faible des « blancs » de terrain);
- Très faible perte de charge (pas de colmatage du filtre même si exposé à de fortes concentrations de poussières).

En revanche, la nature fibreuse de ces filtres ne permet pas une mesure gravimétrique précise. De par sa nature (quartz), il n'est pas possible de quantifier la silice sur ces échantillons.

Nous présentons ci-dessous le circuit suivi par les filtres, de la collecte à l'analyse chimique.

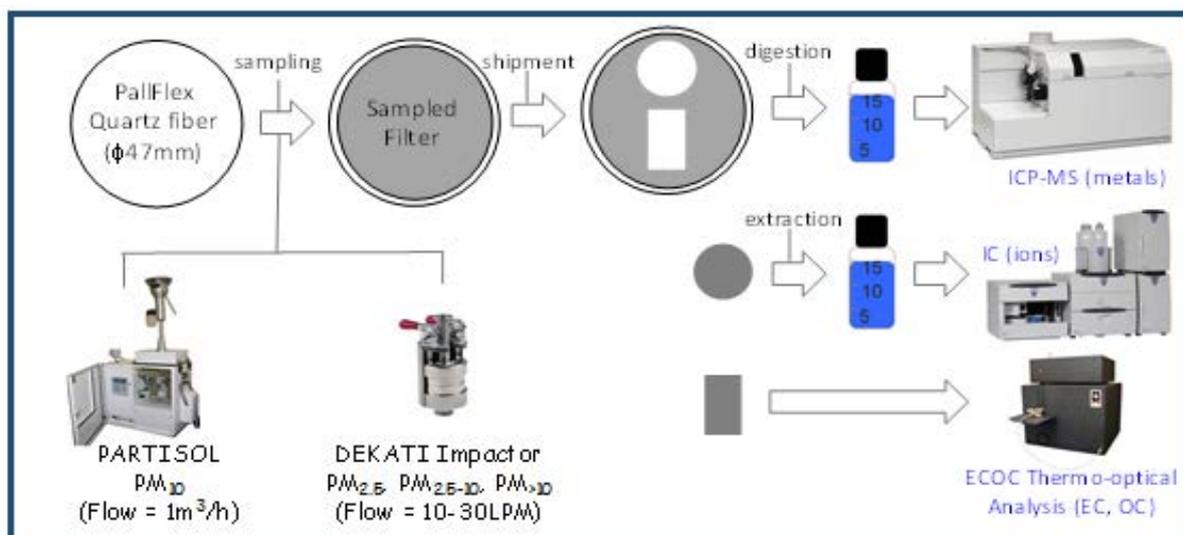


Figure 10 : Circuit d'analyse des échantillons aérosols collectés sur filtres

Les filtres vierges sont placés dans les différents collecteurs (PARTISOL, DEKATI) pour un échantillonnage atmosphérique de 7 jours. Une fois prélevés, ces filtres sont envoyés au laboratoire d'analyse. Ils seront stockés au freezer (-18°C) après découpage en différents morceaux (un pour chaque analyse chimique). Un poinçon de 18mm de diamètre est prélevé sur le filtre pour une extraction en solution aqueuse et analyse ionique. Un poinçon de 1x1.5cm est prélevé sur le filtre pour une analyse directe du carbone (EC, OC) par technique thermo-optique. Le reste du filtre (squelette) est extrait (digéré) en solution acide pour une analyse des métaux par IPC-OES/ICP-MS. Plusieurs filtres non prélevés (blancs) sont analysés suivant le même procédé afin de corriger les résultats d'analyse chimique des artefacts/impuretés présents initialement sur les filtres.

▪ Analyse des ions majeurs par Chromatographie ionique

Les analyses anions/cations sont réalisées par chromatographie ionique (Figure 11) suivant le protocole du Comité Européen de Normalisation (Normalisation C. E., 2011)



Figure 11 : Chromatographe ionique THERMO (Modèle ICS5000) utilisé pour l'analyse ionique des échantillons

Procédure de contrôle de la qualité des mesures ioniques : Le Quality Assurance Science Activity Centre – Americas (QA/SAC-Americas ; (Americas, s.d.) est l'un des 4 centres internationaux dont la mission est d'assurer la qualité des données atmosphériques issues du réseau de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) – Réseau GAW (Global Atmospheric Watch). Le Laboratoire (The Cyprus Institute) en charge des analyses chimiques du projet EMCAIR est accrédité par QA/SAC (laboratoire référence n°700166) et participe à ce titre aux exercices internationaux d'inter-comparaison des mesures ioniques dans l'atmosphère (aérosols, pluies) pour les ions suivants : (Fluoride (F⁻), Chloride (Cl⁻), Nitrate (NO₃⁻), Sulfate (SO₄²⁻), Sodium (Na⁺), Ammonium (NH₄⁺), Potassium (K⁺), Magnésium (Mg²⁺), Calcium (Ca²⁺). Un contrôle qualité supplémentaire est réalisé par :

- L'utilisation de standards de calibration NIST (NIST, s.d.);
 - La vérification de la stabilité du chromatographe ionique (IC) tous les 10 échantillons;
 - La vérification de la neutralité ionique de la solution aqueuse analysée;
 - La neutralisation de l'ammonium par le sulfate/nitrate (dans le cas des aérosols PM2.5).
- **Analyse du carbone élémentaire (EC) et du carbone organique (OC) par instrument thermo-optique**

L'analyse EC-OC est réalisée à partir d'un instrument de mesure thermo-optique (Figure 12) dans lequel est intégré le programme thermique Européen (al, 2010) (voir information en annexe § 7.4).



Figure 12 : Analyseur de carbone par méthode thermo-optique (instrument Sunset Lab) utilisé pour la mesure EC-OC des échantillons

➤ **Procédure de contrôle de la qualité de la mesure carbone** : Ces analyses sont réalisées suivant les recommandations du Comité Européen de Normalisation (Normalisation C. E., Ambient air quality (Pollution,), 2011) qui est une composante de l'Union Européenne (Joint Research Center). Il contribue au développement coordonné et à la mise en place des directives européennes sur la qualité de l'air en Europe. Le Laboratoire (The Cyprus Institute) en charge des analyses chimiques du projet EMCAIR est accrédité par ERLAP pour la mesure EC-OC dans les PM et participe à ce titre aux exercices d'inter-comparaison européens qui ont lieu tous les ans. Un contrôle qualité supplémentaire de la mesure EC-OC est réalisé par : 1) la vérification journalière de la stabilité de la calibration interne en carbone (par standards externe de sucrose), 2) le contrôle des températures du four d'analyse par une sonde externe.

▪ **Analyses des carbohydrates par chromatographie ionique et détection ampérométrique**

➤ **L'analyse des carbohydrates** (levoglucosan, mannosan, galactosan, mannitol, arabitol, inositol, myo-inositol, glucose, mannose, galactose) : est réalisée par IC-PAD suivant le protocole rapporté par (al Y. e., 2015).

➤ **Procédure de contrôle de la qualité de la mesure carbohydrate** : l'INERIS a réalisé en 2013 le premier exercice d'inter-comparaison Européen de la mesure levoglucosan/mannosan/galactosan dans le cadre du projet EU ACTRIS (INERIS, 2013)

Un contrôle qualité supplémentaire est réalisée par :



- L'utilisation de standards de calibration NIST (NIST, s.d.);
- Le contrôle de la stabilité de la calibration tous les 10 échantillons;
- L'étude de corrélations spécifiques (entre par exemple levoglucosan, mannosan, galactosan).

- **Analyses des métaux trace par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) et spectrométrie d'émission optique (ICP-OES)**

L'analyse des 13 métaux (Pb, As, Cu, Cd, Ni, Hg, Cr, Zn, Al, Co, Fe, Mn, V) par ICP-MS (Figure 13) et ICP-OES permet une mesure rapide, stable, et avec des performances analytiques exceptionnelles avec des limites de détection très faibles pour ces éléments trace.



Figure 13 : Spectromètre de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) utilisé pour l'analyse des métaux dans les échantillons

Procédure de contrôle de la qualité de la mesure carbohydate : la qualité des mesures est vérifiée par l'utilisation de matériaux de référence certifiés (MESS-3, GBW 07313 et BCSS-1) avec des rendements d'extraction/analyse sur la gamme 90.0–104.1% pour les 13 métaux analysés. Ces analyses sont aussi validées par des exercices d'inter-comparaison inter-laboratoires (Israël, Espagne, Turquie, France, Grèce) suivant différentes méthodes analytiques (XRF, GF-AAS, ICP-MS etc.). Un contrôle qualité supplémentaire est réalisé par :

- Un contrôle journalier de la calibration des instruments;
- Le contrôle de la stabilité de la calibration tous les 20 échantillons;
- Un contrôle de la répétabilité des résultats d'analyse;
- Les corrélations attendues entre certains éléments (notamment ceux issus de la source crustale ; Al, Ti, Fe, Ca).

- **Equipe technique d'analyse**

Les analyses chimiques sont réalisées par une équipe d'ingénieurs (niveau Master et thèse) avec plus de 5 ans d'expérience sur l'analyse chimique des particules atmosphériques. Le contrôle qualité et l'interprétation des données est réalisé par le Dr. Jean SCIARE (directeur de recherche CNRS, directeur du centre de recherche EEWRC du Cyprus Institute) qui possède près de 20 ans d'expérience dans l'interprétation de ces données chimiques des particules atmosphériques.

3. Résultats

3.1. ATMO Hauts-de-France (Bassin de Marquise- carrières A et B)

3.1.1. Bilan métrologique



Le tableau ci-dessous présente les paramètres mesurés, ainsi que les techniques de mesures employées en fonction des différents sites de mesures

Point de mesures	Hauts de France Bassin de Marquise	Analysesurs automatiques		Granulomètres				Préleveur séquentiel		Préleveur passif	Météo
		Moyen technique : Juges néphométriques et analyseur type BAM ; pas de temps variables selon la météologie		Moyen technique : Denut ;				Moyen technique : Farfalli ;		Moyen technique : Juges Owen ; prélevement manuel	
		PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	Peasse -PM2.5 (µg)	Peasse -PM2.5-PM10 (µg)	Peasse -PM10 (µg)	Analyses physico-chimiques	Peasse PM10 (µg)	Analyses physico-chimiques	Peasse poussières adénomères (nr mg)	
UM9	Marquise	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
UM6	Ferques	X	X						X	X	X
UM8	Landrottehan-le-Nord	X	X	X	X	X	X		X	X	
UM2	Carrière B	X	X	X	X	X	X		X	X	X
UM3/UM7	Carrière A	X	X						X	X	X

Tableau 3 : Equipement des stations de mesures pour les deux campagnes ATMO Hauts de France. Les carrières A et B ont également été équipées de Webcams. En phase 2, des pluviomètres ont été ajoutés sur tous les sites et un Microvol TSP au niveau de la C

3.1.2. Contexte météorologique

Le contexte météorologique peut avoir un impact sur les conditions de dispersion de la pollution atmosphérique.

Certains paramètres favorisent la dispersion et/ou leur lessivage (par exemple la pluie), d'autres au contraire vont favoriser une accumulation des polluants (comme les hautes pressions), ou leur formation (comme l'ensoleillement).

Pour une campagne de mesures de la qualité de l'air ambiant, il est donc important d'étudier les conditions météorologiques dans lesquelles les mesures des polluants ont été effectuées.

		Phase 1		Phase 2	
		Outreau	Sangatte	Outreau	Sangatte
Température (°C)	Moyenne	14,1	13,8	7,4	7,5
	Minimum	7,7	5,3	1,2	-0,1
	Maximum	20,5	18,4	18,6	16,1
Pression atmosphérique (hPa)	Moyenne	1014	-	1014	-
Humidité relative (%)	Moyenne	74	84	75	88

Tableau 4 : conditions météorologiques des campagnes EMCAIR en Hauts de France

Guide de lecture des roses de vents :

Les cellules représentent la vitesse et la direction du vent, et se placent en fonction des 4 points cardinaux représentés par des flèches.

La fréquence de vent est indiquée en pourcentage par les cercles concentriques.

La couleur de la cellule varie en fonction de la vitesse des vents.

Ainsi, plus une cellule sera jaune, plus les vents de ce secteur seront forts ; et plus une cellule sera éloignée du centre, plus les vents de ce secteur seront fréquents.

La direction et la vitesse des vents ont été mesurées plus localement, au niveau de trois des cinq sites de mesures ci-dessous.



Roses de vents obtenues sur l'ensemble de la première phase de mesures (7 septembre – 5 octobre 2015), et roses de vents obtenues sur l'ensemble de la deuxième phase de mesures (7 mars – 5 avril 2016).

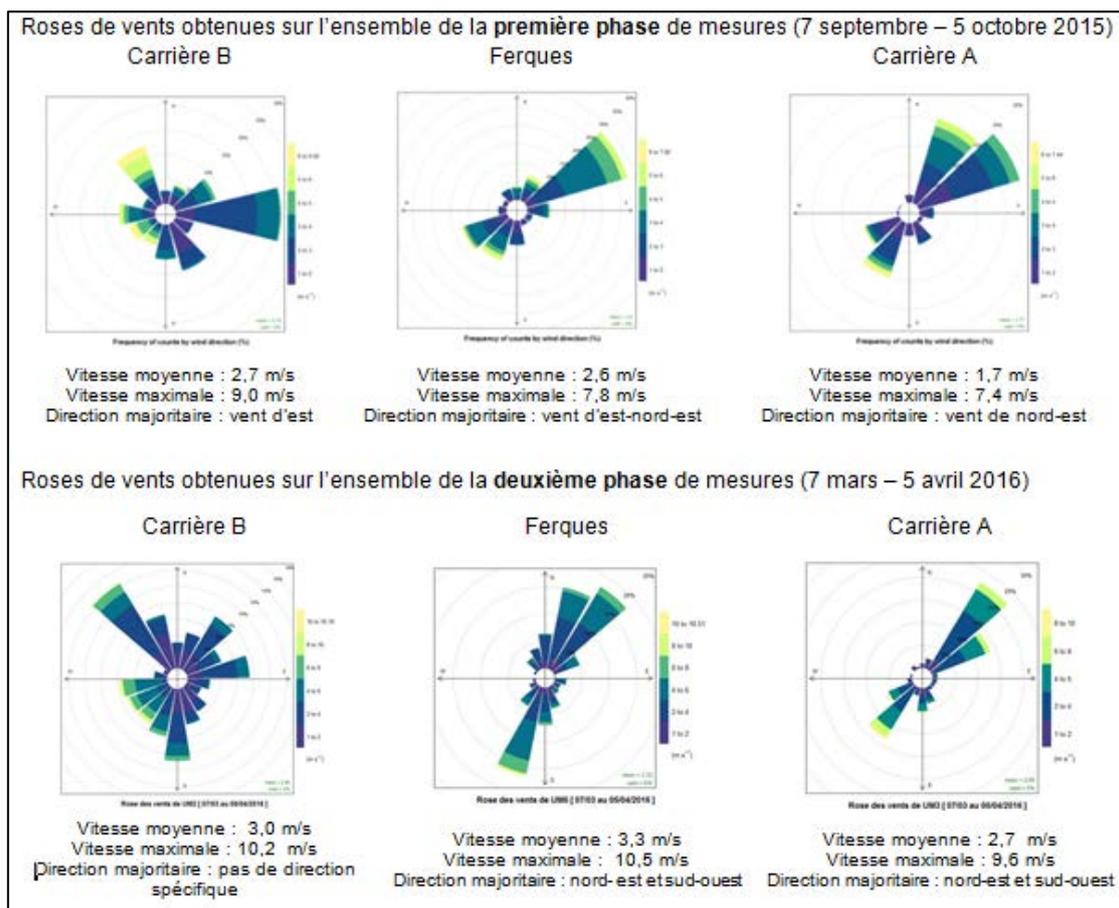


Figure 14 : Rose des vents pour les campagnes EMCAIR dans les Hauts de France

Selon le site de mesure où l'on se trouve, les vents dominants n'ont pas tout à fait la même direction préférentielle. La rose des vents la plus représentative de la météorologie de la région est la rose de la Carrière B : de par l'implantation du site de mesure, celle-ci a bénéficié d'un environnement parfaitement dégagé. Elle est donc représentative des conditions météorologiques de l'ensemble de la zone et peut être appliquée aux autres points de mesures. A contrario, la rose des vents de la Carrière A est représentative d'une météo de proximité, très locale, dans la mesure où le site a été implanté au cœur de la carrière, dans un milieu encaissé.

En phase 1, globalement, les conditions météorologiques ont été changeantes, avec une alternance pluie/éclaircies. La période du 14, 15 et 16 septembre a été marquée par de fortes précipitations en lien avec un passage orageux. En début et fin de phase, les conditions ont été anticycloniques, donc potentiellement plus défavorables à la dispersion des polluants.

En phase 2, la période est marquée par une période sèche du 10 au 23 mars, liée à des conditions anticycloniques observées plus précisément du 10 au 17 mars. Des vents à plus de 100 km/h ont été relevés dans le Boulonnais, le 28 mars, suite au passage de la tempête Jeanne qui a touché toute la bande littorale de la région. Les relevés des pluviomètres installés à la semaine indiquent une moyenne sur la zone d'étude de :

- 6 mm de précipitations du 7 au 14 mars;
- 0,4 mm du 14 au 21 mars;
- 35 mm du 21 au 28 mars;
- 6,3 mm du 28 mars au 4 avril.



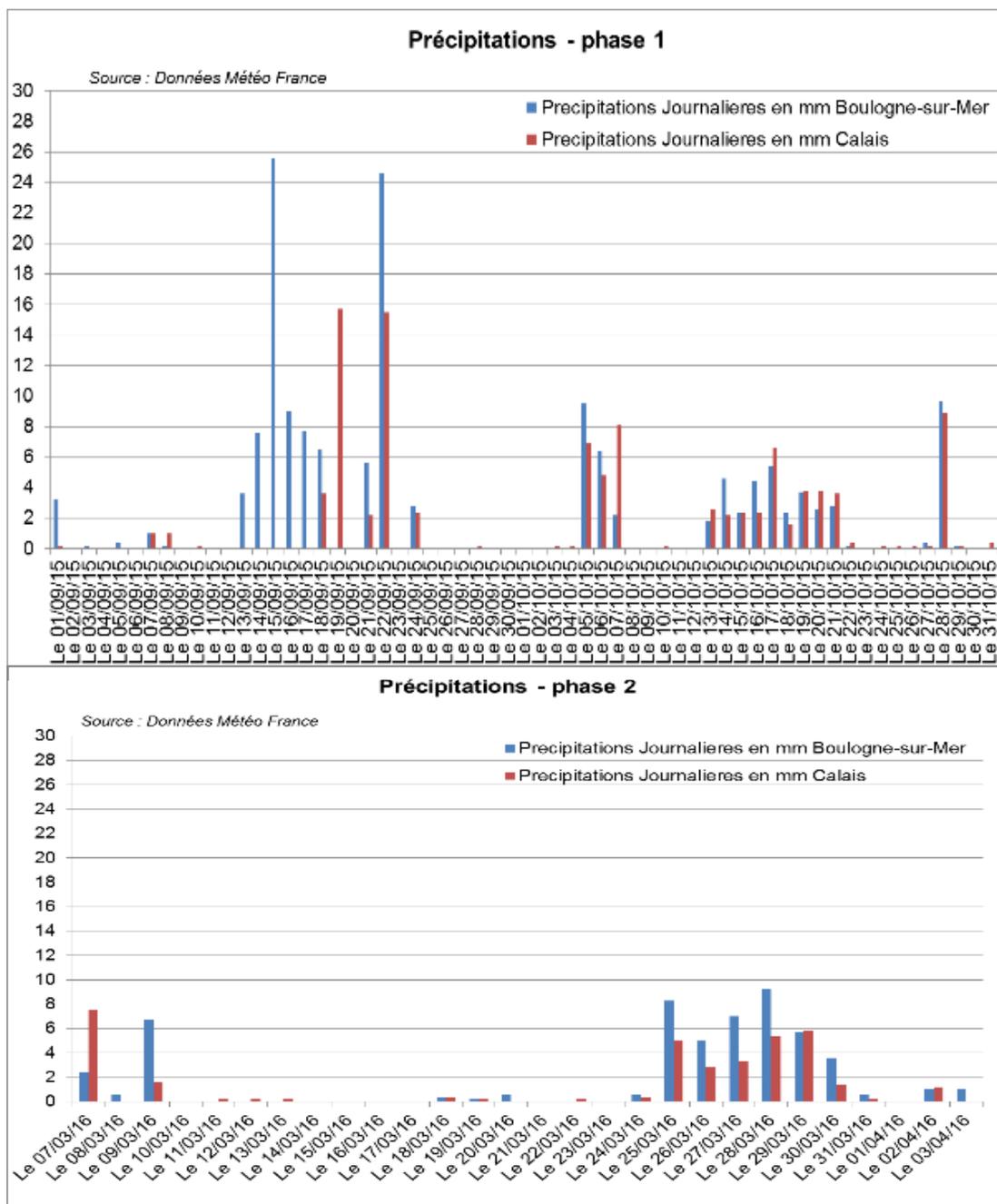


Figure 15 : Cumul des précipitations journalières, données issues des stations Météo France

3.1.3. Épisodes de pollution en région

Un épisode de pollution correspond à une période, où les concentrations de polluants dans l'atmosphère ne respectent pas ou risquent de ne pas respecter les seuils réglementaires (seuil d'information/recommandation et seuil d'alerte) et selon des critères prédéfinis (pourcentage de surface de la zone ou pourcentage de population impactés, niveau réglementaire franchi, durée de l'épisode).

Quatre polluants² sont intégrés dans la procédure de déclenchement d'épisode de pollution de l'air :

- l'Ozone (O₃);

² Les particules fines PM_{2,5} n'entrent pas dans la procédure de déclenchement.



- le Dioxyde d'Azote (NO₂);
- le Dioxyde de Soufre (SO₂);
- les Particules en suspension (PM10).

Caractéristiques des épisodes de pollution

Pour atteindre des niveaux élevés de concentration conditionnant le déclenchement des épisodes de pollution, les critères à réunir sont multiples et varient selon les périodes de l'année. La combinaison de plusieurs des éléments suivants est souvent à l'origine des épisodes :

- mauvaises conditions de dispersion;
- conditions favorables aux transformations chimiques;
- transport transfrontalier ou interrégional de polluants;
- émissions de polluants en région;
- émissions de précurseurs du polluant.

Bilan des épisodes de pollution constatés

Au cours de cette étude, nous avons constaté quelques épisodes de pollution. Durant la première phase de mesure, du 7 septembre au 5 octobre 2015, un seul épisode de pollution a été recensé, dû aux **particules en suspension PM10**, du **3 au 4 octobre** (voir figures 16 et 17). Lors de la deuxième phase de mesure, du 7 mars au 5 avril 2016, un seul épisode a également eu lieu, toujours en raison des niveaux de particules en suspension **PM10**, du **11 au 12 mars 2016** (voir figure 18)

Episode du 3 au 4 octobre 2015

Synthèse météorologique de l'épisode

Les rétro-trajectoires (image ci-contre) indiquent une masse d'air provenant de l'Est de l'Europe pour les deux journées.

Synthèse qualité de l'air

On constate un écart important sur les stations de mesure de la région. Les agglomérations touchées par des dépassements du seuil journalier sont celles de Béthune, Boulogne-sur-Mer, Calais, Dunkerque, Lens, Lille et Saint-Omer. Le site rural de Campagne-les-Bouloonnais est également concerné. Le 4 octobre, les mesures supérieures à 50 µg/m³ se restreignent à la seule agglomération de Lille. Cet épisode a été essentiellement composé de particules fines PM2.5 : la moyenne du rapport PM2.5/PM10 est supérieure à 80% pour les deux journées.

Le bassin de Marquise a ainsi été touché par cet épisode de pollution.



Figure 16 : Rétro-trajectoire pour le 2015.10.04



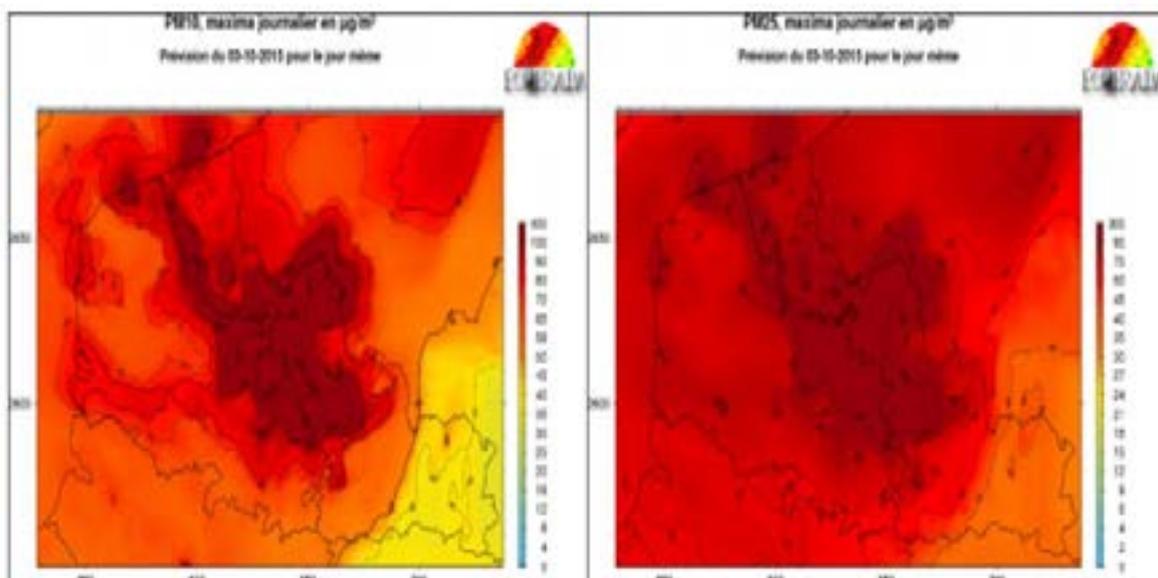


Figure 17 : Cartographie des épisodes de pollution du 3 au 4 octobre 2015

Episode du 11 au 12 mars 2016

Synthèse météorologique de l'épisode

Les rétro-trajectoires indiquent une origine des masses d'air située entre l'Est et le Nord-Est de l'Europe. Elles sont relativement stables au cours des journées et ont circulé majoritairement au niveau du sol les dernières 24 heures.

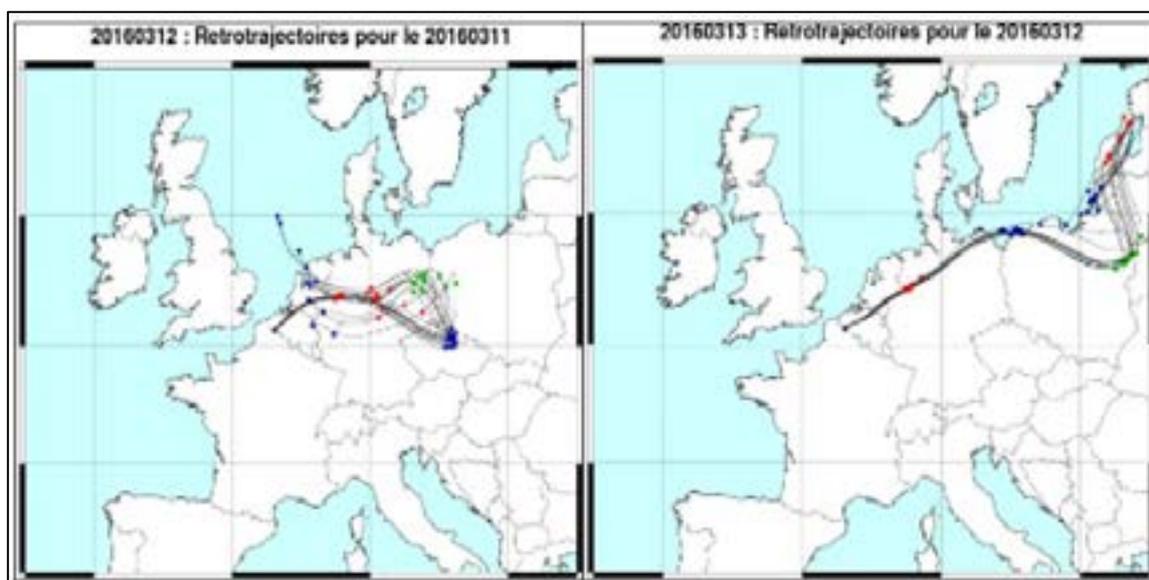


Figure 18 : Trajectoires des épisodes du 11 et 12 mars 2016

Synthèse Qualité de l'air

Le 11 mars, la quasi-totalité des stations dépasse le seuil d'information et de recommandations, seule la station rurale de Cartignies y est inférieure, s'en approchant néanmoins. Les concentrations en PM10 restent supérieures ou proches des 50 µg/m³ horaires tout au long de la journée. Seule la station de Mardyck, de proximité industrielle, dépasse le seuil d'alerte. La hausse du niveau de fond régional combinée aux émissions locales explique ce phénomène isolé. Le niveau moyen des concentrations se maintient plus ou moins durant la journée du 12 mars, sans réel cycle diurne. On constate cependant une diminution des concentrations dans l'après-midi, qui se traduit par une baisse des moyennes journalières.

Au cours du début de journée le 13 mars, les niveaux amorcent une baisse générale : on ne constate plus de stations en dépassement de seuil au terme de la journée.



La fraction volatile augmente nettement entre le 10 et le 11 mars, en doublant sa valeur. Elle reste stable en moyenne durant les journées du 11 et 12 mars, contribuant à hauteur de 50% à la concentration en PM10. Elle diminue le 13 mars.

Les concentrations en PM2.5 enregistrent également une hausse à partir du 10 mars en fin de journée. Elles atteignent leurs valeurs maximales le 11 mars et diminuent légèrement le 12 mars. Leur contribution moyenne aux PM10 est de l'ordre de 85% (entre 79% et 90%) le 11 mars, et s'élève à 89% (entre 86% et 93%) le 12 mars. Les données des éthylomètres disponibles pour les sites de Fives (urbaine) et Roubaix Serres (proximité automobile) ne montrent pas d'élévations significatives des concentrations de particules en suspension issues de la combustion de biomasse ou du trafic.

Cet épisode est donc majoritairement dû à la présence / formation de particules secondaires.

Le bassin de Marquise a été touché lors de cet épisode de pollution.

3.1.4. Exploitation des résultats de mesures

Le dépouillement et l'exploitation des résultats des deux campagnes a été organisée avec les professionnels concernés du bassin de Marquise et en particulier les responsables des deux carrières A et B afin de tenter de recouper les événements enregistrés en fonction des journaux de bord des sites. Signalons que la première campagne a fait également l'objet d'un travail spécifique avec trois étudiants de l'Université de la Côte d'Opale (projet tutoré de Master II) pour lequel ils ont contribué au visionnage des vidéos des carrières et à l'identification des pics significatifs d'envols en carrière.

3.1.5. Bilan métrologique

Les données délivrées par le dispositif de mesures des polluants atmosphériques sont systématiquement validées puis agrégées afin de calculer des paramètres statistiques comparables à la réglementation en vigueur et interpréter rigoureusement la qualité de l'air sur la zone d'étude concernée.

Une fois les données validées, un taux de fonctionnement est calculé pour chaque paramètre mesuré. Il s'agit du pourcentage de données valides d'un appareil de mesures, sur une période définie (année civile, phase de mesures, semaine, etc).

Un taux de fonctionnement inférieur à 85% signifie que la concentration moyenne du polluant n'est pas représentative sur le temps d'exposition (ici équivalent à une phase de mesures). Aucune comparaison avec les valeurs réglementaires du polluant pour l'année de l'étude n'est alors possible.

Dans cette étude tous les taux de fonctionnement sont supérieurs à 85% (Voir le détail des taux de fonctionnement dans le rapport d'étape d'ATMO Hauts de France), les données sont donc exploitables. Les limites de détection (plus petites concentrations pouvant être détectées par les appareils de mesures) pour les polluants étudiés sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Polluants	Limite de détection des analyseurs automatiques ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Particules en suspension PM10	3
Particules fines PM2,5	3

Tableau 5 : Limite de détection des analyseurs automatiques

3.1.6. Repères réglementaires

Pour l'interprétation des données, nous disposons de diverses valeurs réglementaires (valeurs limites, valeurs cibles, objectifs, etc.) en air extérieur. Ces normes sont définies au niveau européen dans des directives, puis sont déclinées en droit français par des décrets ou des arrêtés.



La valeur limite : est un niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble.

La valeur cible : est un niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné, et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble.

L'objectif de qualité (ou objectif à long terme pour l'ozone) : est un niveau à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.

Seuil d'information et de recommandation : niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque de dépassement pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles au sein de la population et qui rend nécessaire l'émission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions

Seuil d'alerte : niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence.

Une procédure interdépartementale d'information et d'alerte du public est instituée en Nord-Pas-de-Calais. Elle organise une série d'actions et de mesures d'urgence afin de réduire les émissions de polluants et à en limiter les effets sur la santé et l'environnement. Cette procédure définit les modalités de déclenchement des actions, basées notamment sur les seuils d'information et l'alerte. Les mesures des campagnes ponctuelles ne sont pas intégrées à cette procédure.

Pour toute comparaison à des valeurs limites annuelles, selon l'annexe I de la directive européenne 2008/50/CE, la période minimale de prise en compte doit être de 14 % de l'année (une mesure journalière aléatoire par semaine répartie uniformément sur l'année, ou 8 semaines réparties uniformément sur l'année). Les valeurs limites, les valeurs cibles et les objectifs de qualité sont disponibles dans le rapport d'étape d'ATMO Hauts de France.

3.1.7. Les particules en suspension (PM10)

a) Sur l'ensemble des sites de la zone d'étude

Evolution des concentrations moyennes horaires

Les données horaires affichées pour les stations fixes correspondent aux moyennes des quatre quarts horaires précédents. Ainsi, la concentration observée à 12h00 correspond à la concentration moyenne des valeurs observées à 11h15, 11h30, 11h45 et 12h00. La réglementation impose que trois données quarts-horaires doivent être valides pour qu'une concentration horaire soit exploitable.

Les sites de la zone d'étude d'EMCAIR Hauts-de-France ont tous disposé de jauges radiométriques (transmission et surveillance radio des données) dont le fonctionnement est basé sur l'absorption de rayonnement bêta et la mesure par variation de fréquence) ; sauf Marquise en phase 1. Pour les jauges, la valeur enregistrée à 12h correspond à la moyenne de ce qui a été relevé entre 10h et 12h. A Marquise en phase 1, un analyseur de type BAM avait été installé : la valeur enregistrée à 12h correspond à la moyenne de ce qui a été relevé de 11h à 12h.



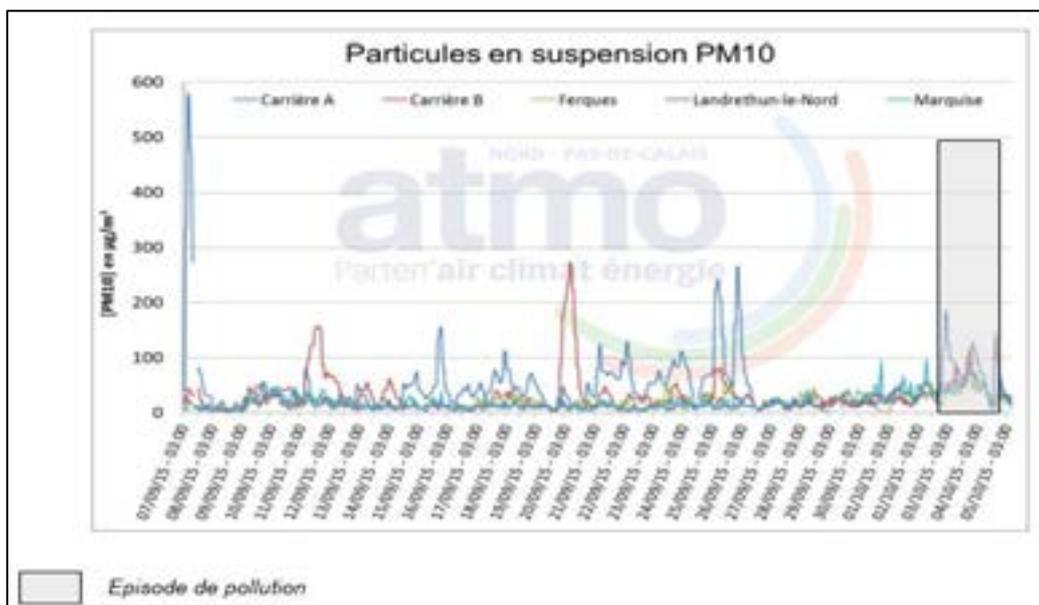


Figure 19 : Concentrations moyennes horaires de PM10 de la phase 1 dans les Hauts de France

Globalement, si l'on compare les concentrations en particules en suspension PM10 observées au niveau des cinq sites de mesures de la zone d'étude, deux sites se distinguent par des niveaux ponctuellement plus élevés : le site de la Carrière B et le site de la Carrière A. Ce constat est conforme à ce que l'on pouvait envisager au vu de l'environnement étudié. Les sites hors carrières ont une évolution similaire dans le même ordre de concentration.

o **Phase 2**

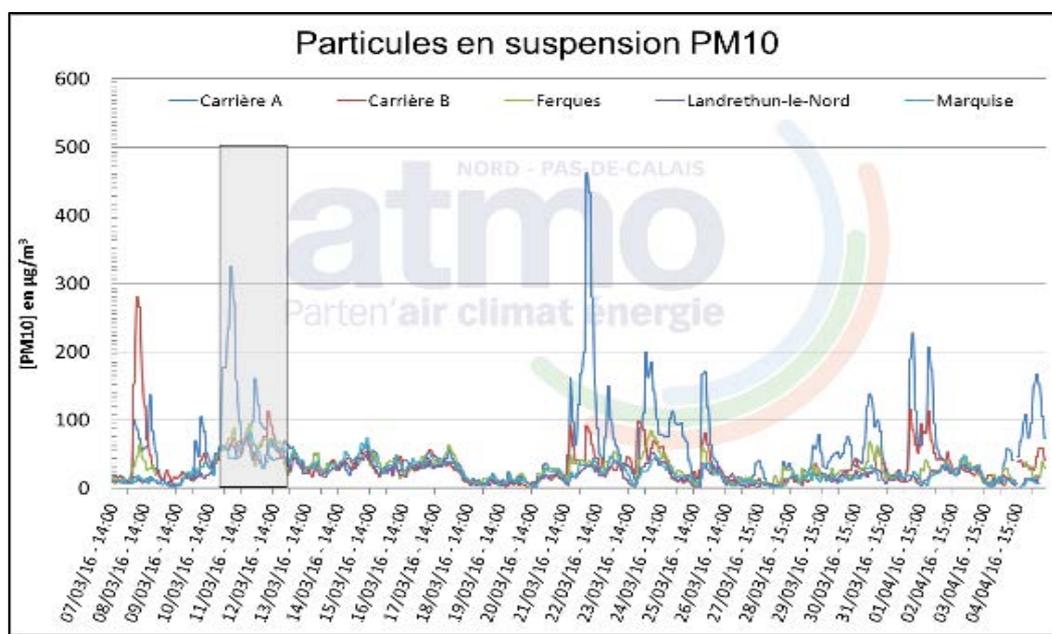


Figure 20 : Concentrations moyennes horaires de PM10 de la phase 2 dans les Hauts de France

Lors de la 2ème phase de mesures, les sites des Carrières A et B se distinguent de nouveau, alors que les sites hors carrières se comportent de manière identique à la première phase.

▪ **Evolution des concentrations journalières**



Cette partie vise à regarder les concentrations journalières obtenues au regard de la directive 2008/50/CE (Annexe VI), laquelle impose de ne pas dépasser les 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière pour les particules PM10 plus de 35 fois par an. Cette réglementation est définie pour des mesures en air ambiant, c'est-à-dire « l'air extérieur de la troposphère, à l'exclusion des lieux de travail tels que définis par la directive 89/654/CEE, auxquels s'appliquent les dispositions en matière de santé et de sécurité au travail et auxquels le public n'a normalement pas accès ». La directive 89/654/CEE ne s'applique cependant pas aux industries extractives : celles-ci dépendent d'une réglementation spécifique définie par l'arrêté du 22 septembre 1994, récemment modifié par un arrêté en date du 30 septembre 2016.

○ Phase 1

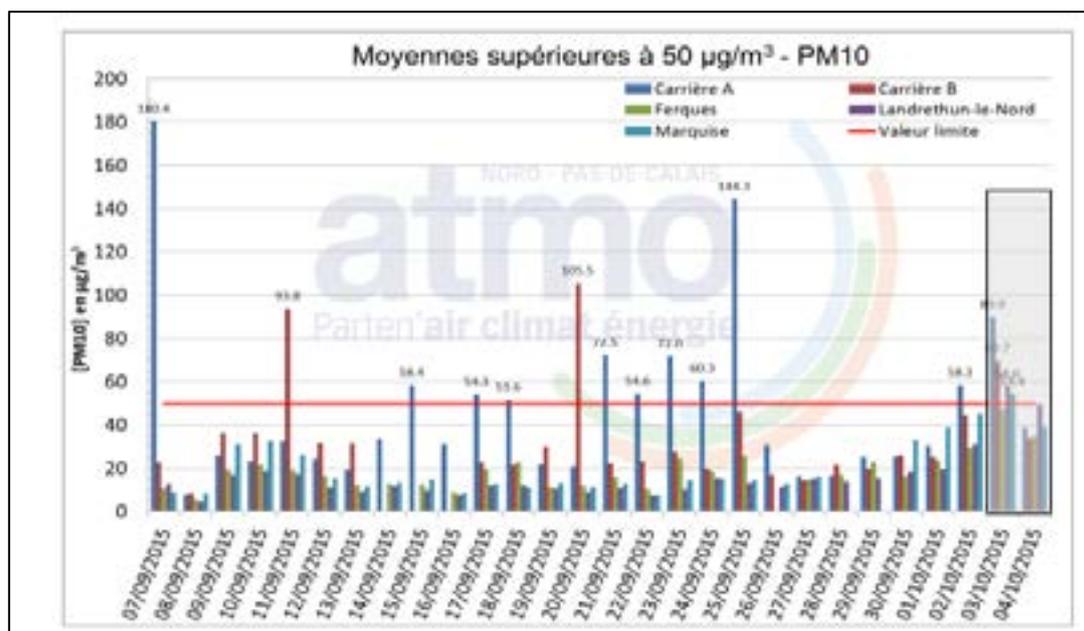


Figure 21 : Evolution des concentrations de PM10 en moyennes journalières de la phase 1 des Hauts de France

Concernant les particules en suspension PM10, en moyenne journalière, la réglementation impose de ne pas dépasser 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ plus de 35 fois par an (valeur limite représentée par la ligne rouge sur le graphe).

Au regard des valeurs journalières obtenues sur les différents sites de mesures, les dépassements ont principalement eu lieu au niveau des sites implantés dans les carrières, de façon aléatoire mais jamais en simultanée sur les deux carrières.

○ Phase 2



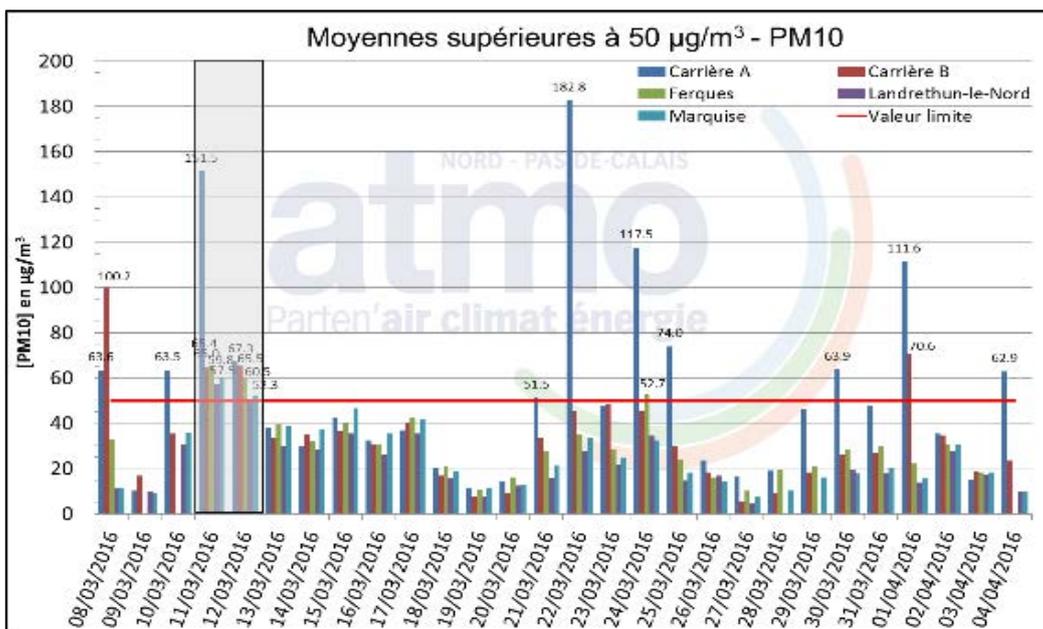


Figure 22 : Evolution des concentrations de PM10 en moyennes journalières de la phase 2 des Hauts de France

Au regard des valeurs journalières obtenues sur les différents sites de mesures, les dépassements ont principalement eu lieu au niveau des sites implantés dans les carrières, de façon aléatoire mais jamais en simultanée sur les deux carrières.

b) Au sein des deux carrières

- Carrière A

Evolution des concentrations moyennes horaires

- o Phase 1

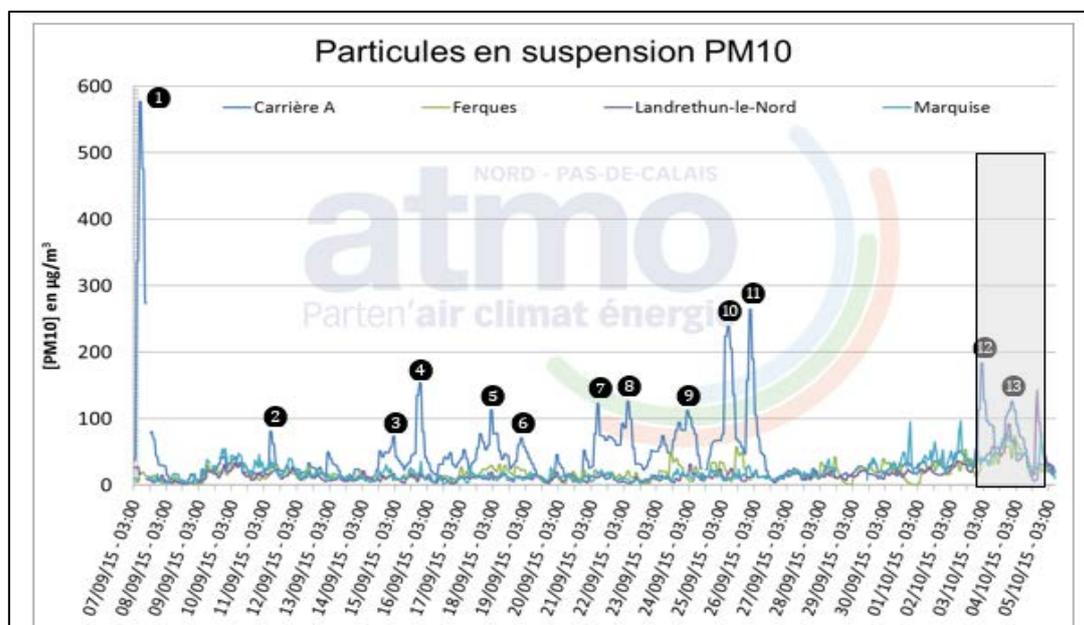


Figure 23 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 1 des Hauts de France

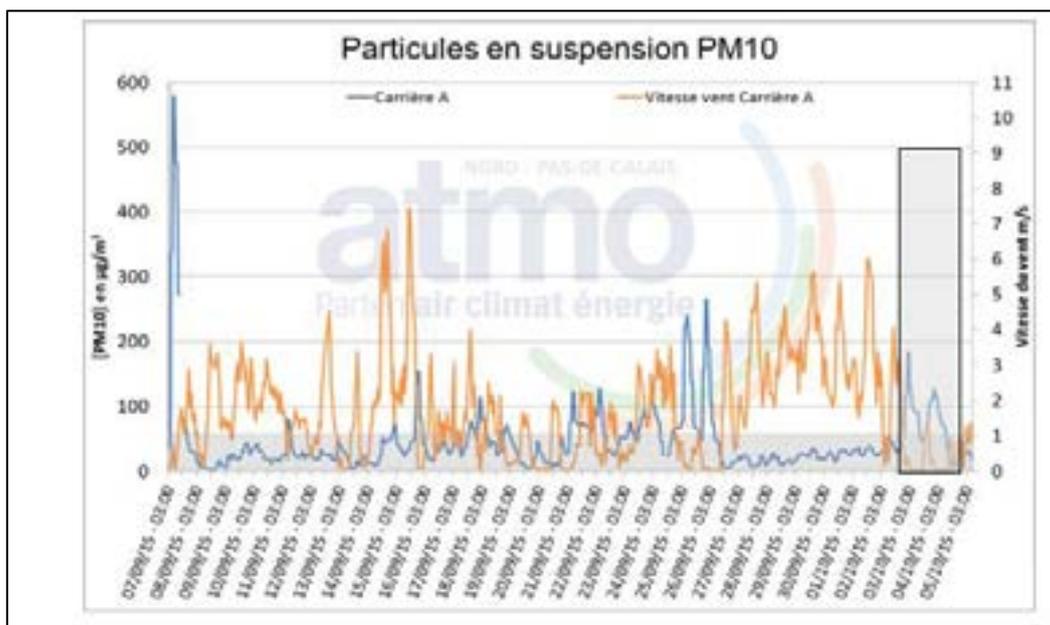


Figure 24 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) et vitesse du vent sur la carrière A - phase 1 Hauts de France

Carrière A – Phase 1			
Pic	Date et heure, démarrage du pic	Evolution concentration PM10 (µg/m ³)	Observation
①	Lundi 7 septembre – 5h00	39,4 → 336 Max à 577,4 à 7h00	Pas de vent
②	11 septembre – 7h00	24,6 → 81	Pas de vent
③	15 septembre – 1h00	73,6	Vent de sud-sud-est, rares averses
④	15 septembre – 19h00	48,2 → 135,1 Max à 153,9 à 21h00	Pas de vent, rares averses
⑤	18 septembre – 1h00	60 → 112,9	Pas de vent
⑥	18 septembre – 21h00	36,2 → 61 Max à 70,7 à 23h00	Pas de vent
⑦	21 septembre – 5h00	28,3 → 71,1 Max à 122,7 à 7h00	Pas de vent, bruine
⑧	22 septembre – 5h00	126,3	Pas de vent
⑨	24 septembre – 1h00	111,7	Vent de sud-ouest, bruine
⑩	25 septembre – 5h00	77,4 → 223,8 Max à 238,9 à 7h00	Pas de vent
⑪	25 septembre – 21h00	47,2 → 157,8 Max à 264,9 à 23h00	Pas de vent
⑫	2 octobre – 21h00	33,5 → 54bMax à 183,8 le 03/10 à 1h00	Pas de vent
⑬	3 octobre – 23h00	125,8	Pas de vent

Tableau 6 : Pics des concentrations PM10 de la phase 1 ATMO Hauts de France – carrière A



○ Phase 2

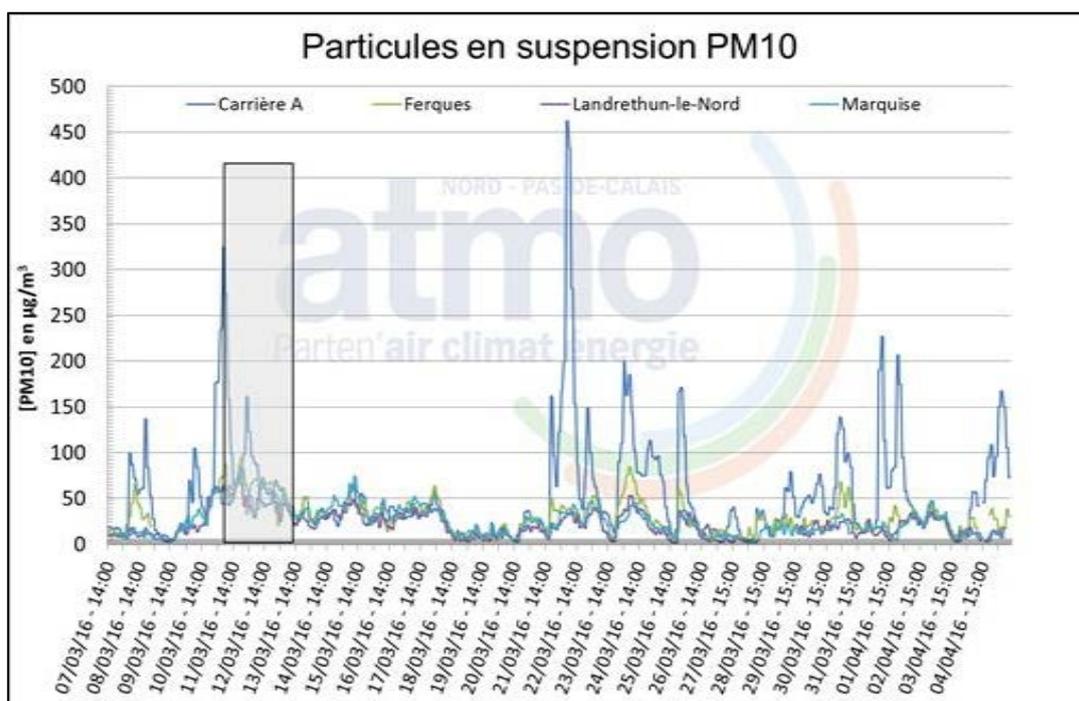


Figure 25 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 2 des Hauts de France –Carrière A

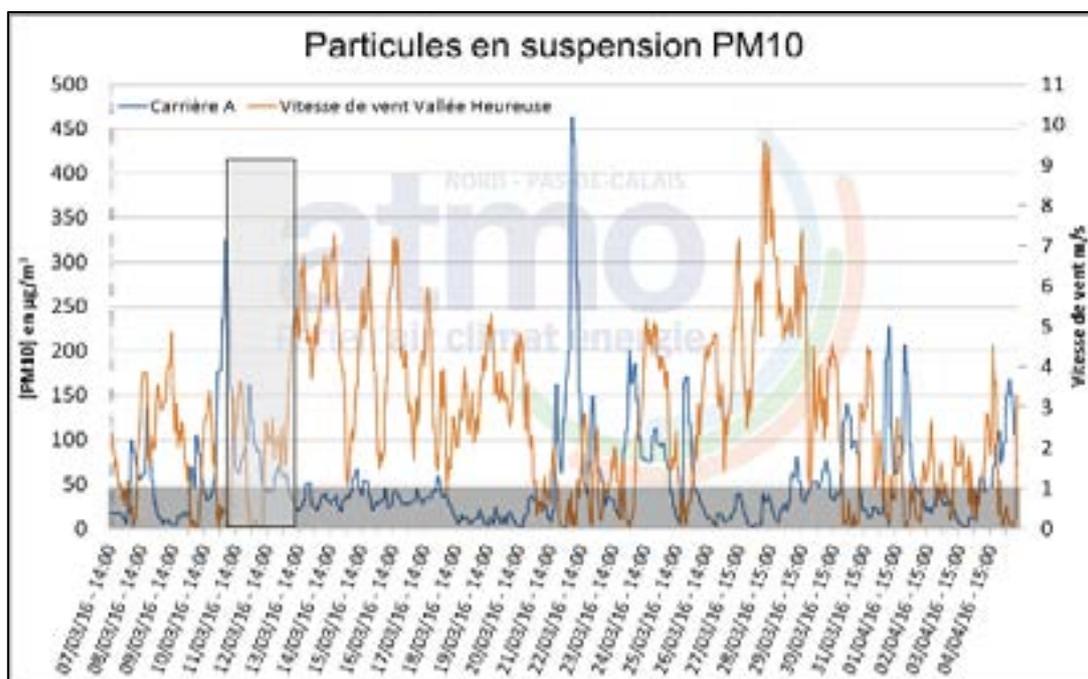


Figure 26 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) et vitesse du vent sur la carrière A - phase 2 Hauts de France



Carrière A – Phase 2			
Pic	Date et heure, démarrage du pic	Evolution concentration PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Observation / Evènement
①	08/03/2016 à 6h00	21.9 → 99.6	Pas de vent
②	08/03/2016 à 18h00	61.2 → 136.5	Vent de sud-ouest
③	10/03/2016 à 04h00	18.8 → 69.5 Max à 104.5 à 8h et 9h	Pas de vent
④	10/03/2016 à 22h00	40.9 → 60.0 Max à 324,9 le 11/03 à 6h00	Pas de vent
⑤	12/03/2016 à minuit	98.3 → 160.8	Pas de vent
⑥	21/03/2016 à 18h00	19.8 → 161.6	Vent d'ouest-sud-ouest
⑦	22/03/2016 à 6h00	200.1 → 462.3	Pas de vent
⑧	22/03/2016 à 20h00	38.0 → 75.1 Max à 149.2 à 22h	Pas de vent
⑨	23/03/2016 à 22h00	30.2 → 89.9 Max à 199.8 le 24/03 à 2h00	Pas de vent
⑩	24/03/2016 à 19h00	75.2 → 103.0 Max à 112.6 à 22h00	Vent de sud-ouest
⑪	25/03/2016 à 20h00	16.2 → 166.5 Max à 170.9 à 22h00	Pas de vent
⑫	29/03/2016 à 7h00	29.7 → 62.1 Max à 79.0 à 11h00	Vent de sud-ouest
⑬	30/03/2016 à 9h00	76.2	Vent de sud-ouest
⑭	30/03/2016 à 21h00	37.9 → 61.6 Max à 138.6 le 31/03 à 1h00	Pas de vent
⑮	01/04/2016 à 7h00	26.0 → 227.1	Pas de vent
⑯	01/04/2016 à 21h00	206.2	Pas de vent
⑰	04/04/2016 à 17h00	45.9 → 69.4 Max à 108.2 à 21h	Vent de sud-ouest
⑱	05/04/2016 à 3h00	96.1 → 150.7 Max à 167.2 à 5h00	Pas de vent

Tableau 7 : Pics des concentrations PM10 de la phase 2 ATMO Hauts de France – Carrière A

L'analyse des pics de concentrations en PM10 relevé au niveau de la Carrière A, que ce soit lors de la phase 1 ou lors de la phase 2, dégage deux tendances :

- La majeure partie des pics de pollution a été relevée par vent négligeable, ou par vent de sud-ouest. Par ailleurs, les graphes reprenant les concentrations en PM10 en fonction de la vitesse du vent montrent une anti-corrélation presque parfaite tout au long de chacune des deux phases de mesures : lorsque la vitesse du vent s'élève, les concentrations diminuent et à l'inverse, lorsque la vitesse du vent est au plus faible, des pics de concentrations en particules sont alors observés.
- La majeure partie des pics de pollution ne s'observe qu'au niveau de la Carrière A, sans que les sites de mesures périurbains ne soient influencés (stabilité des niveaux mesurés). Il existe cependant, ponctuellement, des hausses de concentrations simultanées au niveau du site de Ferques et de la Carrière A, en l'absence de vent (Ferques est le site de mesures périurbain le plus proche des carrières, situé à environ 1100 mètres de la carrière A et 750 mètres de la Carrière B).

Ce qui signifie que pour la plupart des pics de pollution aux particules PM10 observés sur ces deux sites, l'influence est d'origine locale. Les poussières sont propres à l'activité de la carrière et on peut



supposer qu'elles ne se dispersent pas au-delà d'un rayon de deux kilomètres aux alentours (cf. carte implantation des sites), pas de hausse visible à Landrethun-le-Nord situé à 2300m de B et 2600 m de A).

En ce qui concerne l'activité de la Carrière A, il n'y a pas eu de défaillance particulière ou d'organisation de production inhabituelle lors des phases de mesures, si ce n'est le 4 avril 2016, où un impact possible du concasseur primaire a pu se ressentir sur la qualité de l'air en lien avec un abattage de poussière défaillant ce jour-là.

- Carrière B

Evolution des concentrations moyennes horaires

o Phase 1

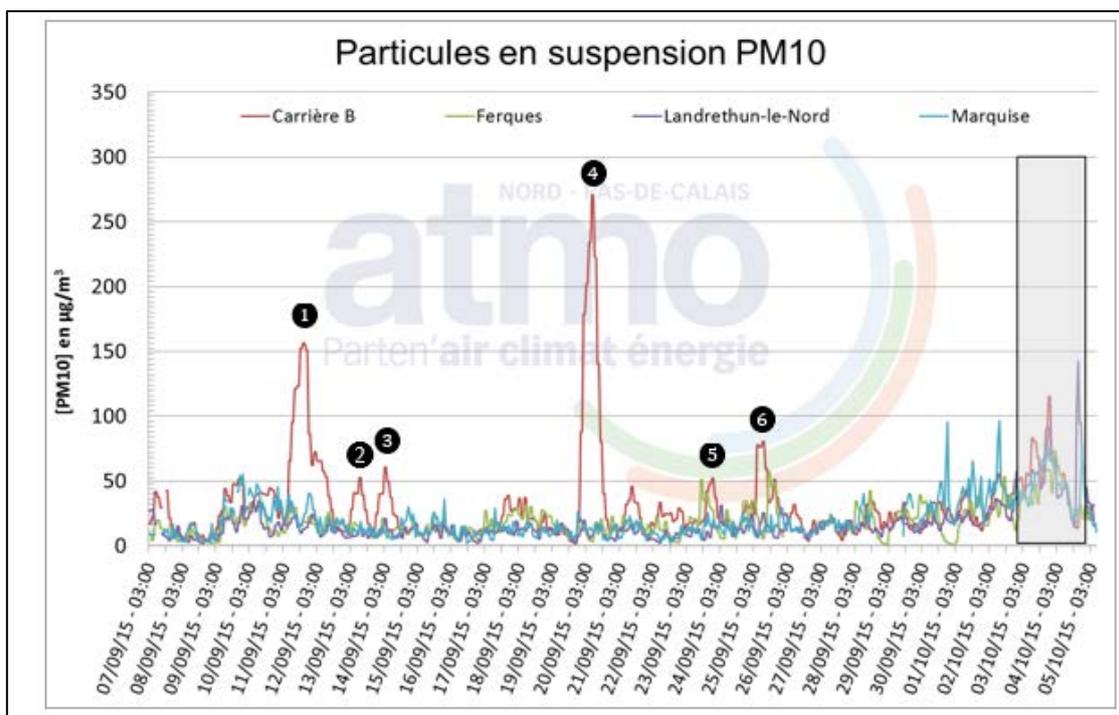


Figure 27 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 1 – Carrière B Hauts de France



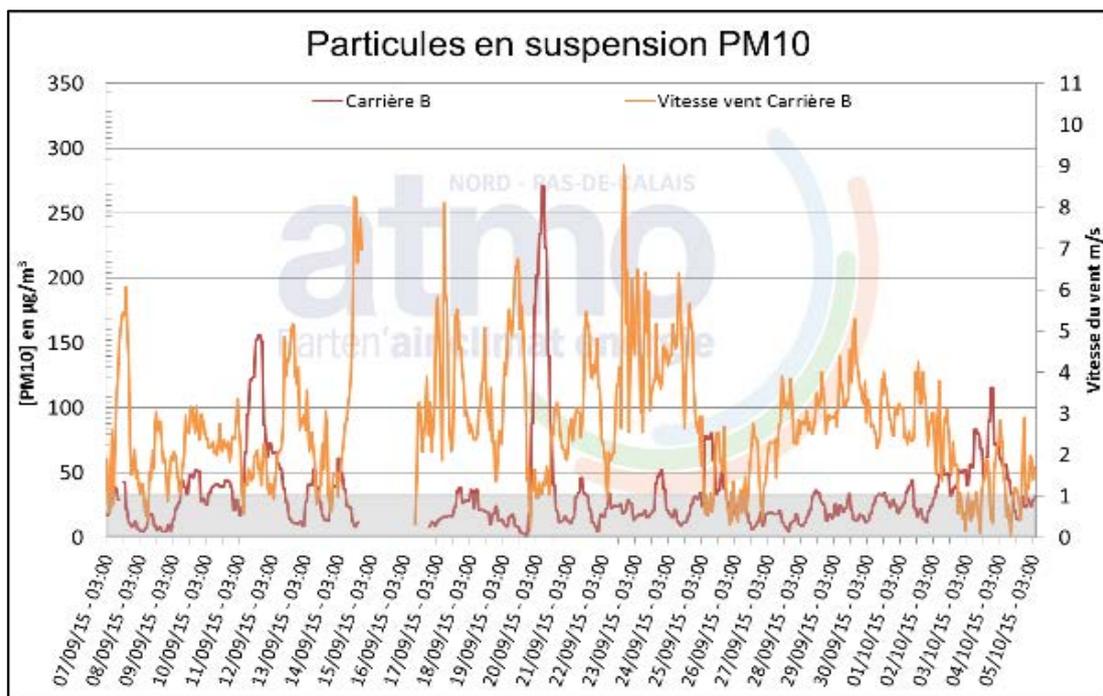


Figure 28 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) et vitesse du vent sur la carrière B - phase 1 Hauts de France

Carrière B – Phase 1			
Pic	Date et heure, démarrage du pic	Evolution concentration PM10 (µg/m³)	Observation
①	11 septembre – 7h00	23,4 → 65,5 Max à 156,4 à 17h00	Vent d'est-sud-est
②	13 septembre – 5h00	27,8 → 40,7 Max à 52,7 à 9h00	Vent de sud-est
③	13 septembre – 23h00	24,8 → 39,6 Max à 60,8 le 14/09 à 3h00	Vent d'est-sud-est à sud-sud est
④	19 septembre – 23h00	18,5 → 87,7 Max à 271 le 20/09 à 7h00	Vent très faible, de sud-est
⑤	23 septembre – 17h00	20,7 → 41,8 Max à 52 à 21h00	Vent d'ouest
⑥	25 septembre – 5h00	25 → 77,8 Max à 80,3 à 9h00	Pas de vent

Tableau 8 : Pics des concentrations PM10 de la phase 1 ATMO Hauts de France – Carrière B

○ [Phase 2](#)

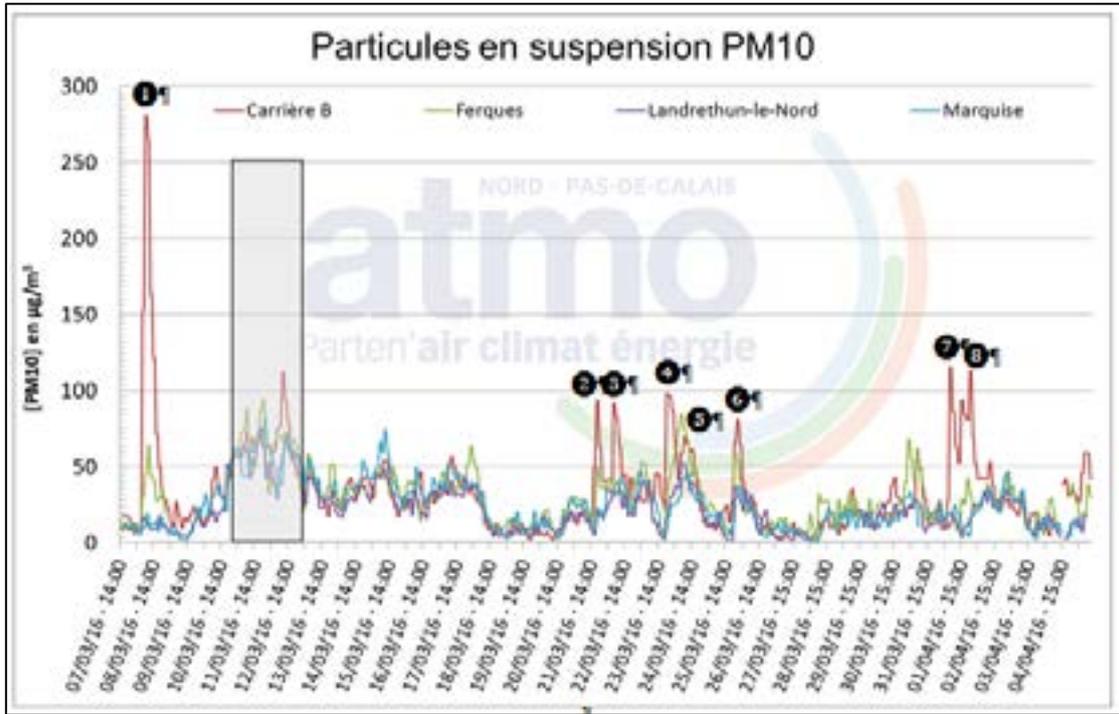


Figure 29 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 2 Carrière B

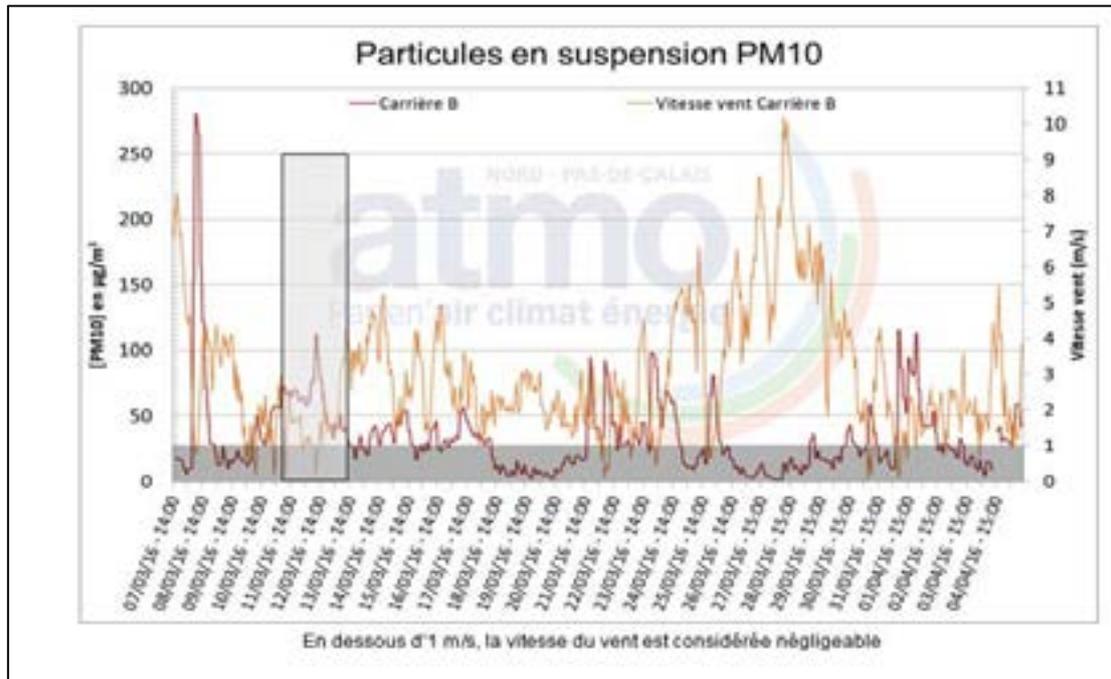


Figure 30 : Pics des concentrations PM10 de la phase 2 ATMO Hauts de France – Carrière B

Carrière B – Phase 2			
Pic	Date et heure, démarrage du pic	Evolution concentration PM10 (µg/m³)	Observation

①	08/03/2016 à 6h00	10,3 → 152,9 à 6h Max à 280,3 µg/m ³ à 8h et 9h	Vent d'ouest, sud-ouest à nord-nord-ouest
②	21/03/2016 à 16h00	18,1 → 49,7 à 16h Max à 93,8 à 18h	Vent de nord-ouest
③	22/03/2016 à 6h00	33,7 → 91,6 à 6h (= Max)	Pas de vent
④	23/03/2016 à 20h00	22,5 → 98,1 à 20h (= Max)	Pas de vent
⑤	24/03/2016 à 6h00	41,1 → 58,6 à 6h Max à 69,6 à 8h et 9h	Pas de vent
⑥	25/03/2016 à 20h00	27,7 → 66,3 à 20h Max à 80,9 à 22h et 23h	Pas de vent
⑦	01/04/2016 à 7h00	27,9 → 115,8 à 7h (= Max)	Pas de vent
⑧	01/04/2016 à 21h00	80,7 → 113,1 à 21h (= Max)	Pas de vent

Tableau 9 : Pics des concentrations PM10 de la phase 2 ATMO Hauts de France – Carrière B

Sur l'ensemble des deux phases de mesures, les pics de concentrations en particules PM10 recensés au niveau de la Carrière B ont été observés soit en l'absence de vent, soit par vent faible, généralement de sud-est, de sud-ouest ou d'ouest. Au regard des installations situées à proximité du point de mesures et en fonction de la direction des vents, il est très probable qu'il y ait eu une influence :

- Du site de production de produits fins (fillers), CB2M, par vent de sud-est,
- Des stocks placés au sud-ouest,
- Des chargements / déchargements des trains ayant lieu à l'ouest,
- Des activités de concassage, criblage par vent d'ouest-nord-ouest,
- De la carrière A par vent de sud-est.

De plus, comme pour la Carrière A, les graphes reprenant les concentrations en PM10 en fonction de la vitesse du vent montrent une anti-corrélation presque parfaite tout au long de chacune des deux phases de mesures : lorsque la vitesse du vent s'élève, les concentrations diminuent et à l'inverse, lorsque la vitesse du vent est au plus faible, des pics de concentrations en particules sont alors observés.

Pour les deux carrières, le visionnage des Webcams infrarouge installées au niveau des carrières a en parallèle apporté des informations intéressantes :

- Le visionnage des images liées aux pics de concentration ayant eu lieu en journée n'apporte pas d'informations particulières : les images ne distinguent pas d'éventuelles masses de poussières,
- Le visionnage des images liées aux pics de concentrations ayant eu lieu la nuit apporte en revanche une toute autre information : pour les plus fortes concentrations observées, une nuée de poussières est visible, avec, si le vent est à minima significatif, une direction bien définie, et si le vent n'est pas significatif, un tourbillon bien visible.



Figure 31 : Vue aérienne de la station carrière B





Figure 32 : Photos des caméras situées dans la Carrière A – Phase 1 – Pic n°1 nuit du 7 septembre 2015 vers 3h 00

Ce phénomène est d'autant plus visible au niveau de la Carrière A, laquelle enregistre les concentrations les plus élevées. Ce qui concorde avec l'implantation du site de mesure et son environnement proche : dans la mesure où la station de mesure est implantée en plein cœur de la carrière - non loin des concasseurs primaires -, à un endroit plus encaissé que les autres sites de mesures, les poussières se dispersent moins et s'accumulent aux environs de la station mobile et se déposent suivant les conditions météorologiques, notamment la nuit lorsque les activités industrielles du site sont suspendues.

De ce fait, il est très probable que les très fortes concentrations observées en carrière soient simplement liées à cette particularité des carrières qui sont à la fois émettrices et sièges de dépôts, le ré-envol ou le re-dépôt de poussières se déroulant dans le temps comme dans l'espace.

c) En dehors des carrières

[Au niveau des sites urbains du bassin de Marquise](#)

o [Phase 1](#)

Si l'on regarde à présent de plus près les trois sites périurbains, il a apparue que, globalement, les concentrations en particules PM10 observées au niveau des sites de mesures situés « hors carrières » ont évolué de façon similaire. Néanmoins, quelques pointes horaires se distinguent en fonction des sites de mesures.



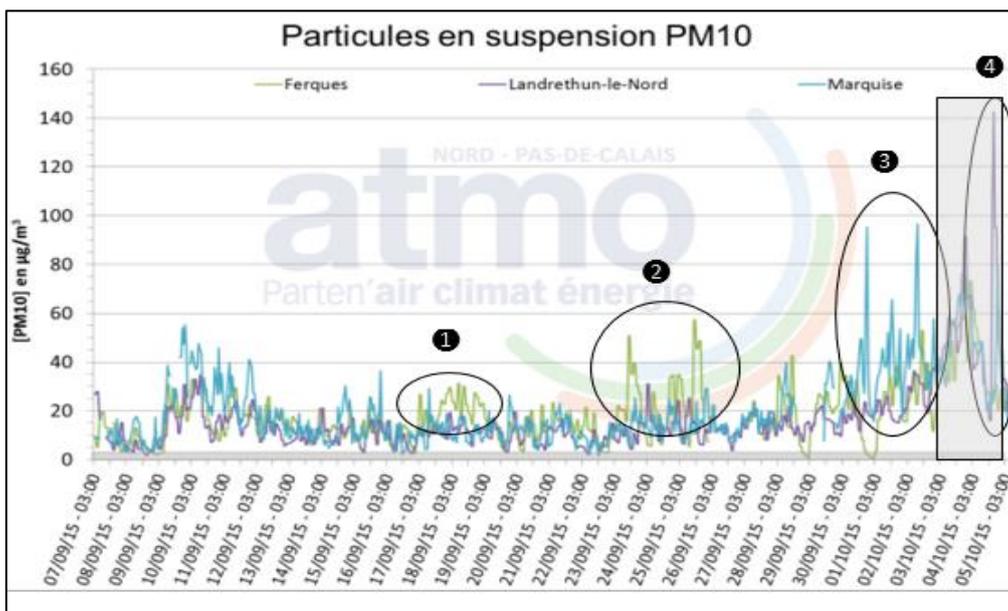
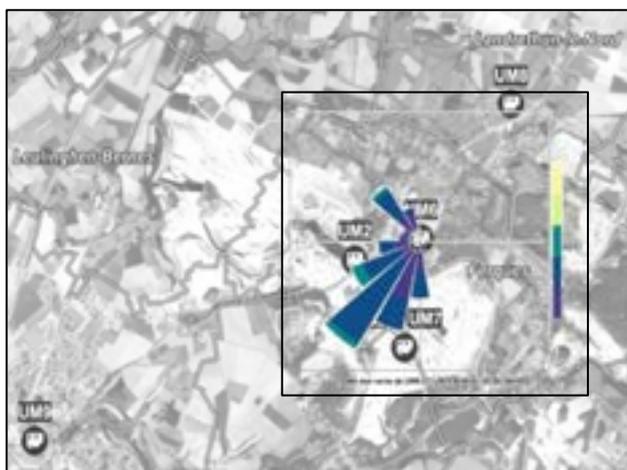


Figure 33 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 1 – Hors carrières Hauts de France

A Ferques, quelques pointes s’observent en milieu de phase (pics 1 et 2). En fin de phase, les concentrations se sont davantage élevées à Marquise (pic 3), et Landrethun-le-Nord (pic 4).

1 Du 17/09 03h00 au 19/09 06h00, Ferques

Météo : Ferques



La rose des vents indique des vents dominants de secteur sud-ouest, donc passant par les carrières.

A cette même période, les concentrations en poussières PM10 se sont élevées au niveau des carrières, et davantage au niveau de la Carrière A.

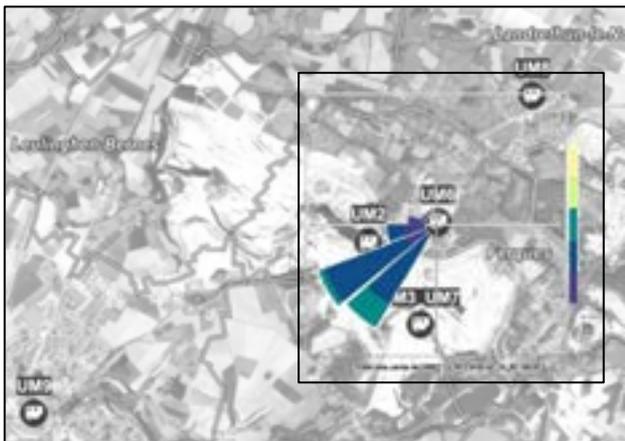
Par ailleurs, les hausses de concentrations visibles à Ferques, ne sont pas visibles à Landrethun-le-Nord (les concentrations de ce site sont même très similaires à celles de Marquise).

Conclusion : il y a une influence potentielle des carrières, et en particulier de la Carrière A, sur les concentrations (toutefois modérées) de particules PM10 observées à Ferques. Cette influence ne s’étend pas jusque Landrethun-le-Nord.



② Du 23/09 13h00 au 25/09 19h00, Ferques

Météo : Ferques



La rose des vents indique là encore des vents dominants de secteur sud-ouest.

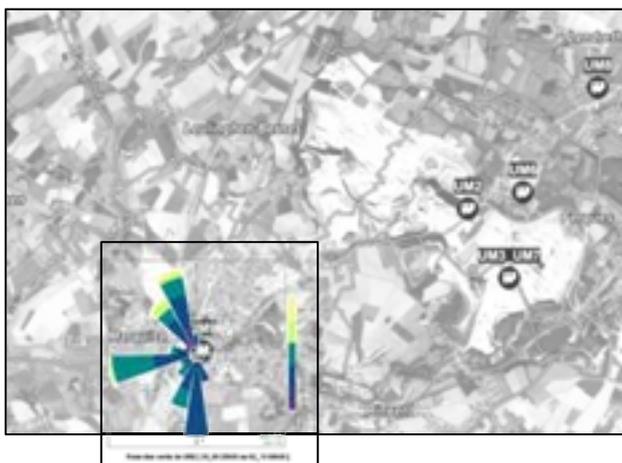
A cette même période, les concentrations en poussières PM10 se sont élevées au niveau des deux carrières.

Par ailleurs, comme pour le pic n°1, les hausses de concentrations visibles à Ferques, ne sont pas visibles à Landrethun-le-Nord.

Conclusion : il y a une influence potentielle des carrières sur les concentrations, un peu plus élevées, de particules PM10 observées à Ferques.

③ Du 30/09 20h00 au 02/10 09h00, Marquise

Météo : Carrières B

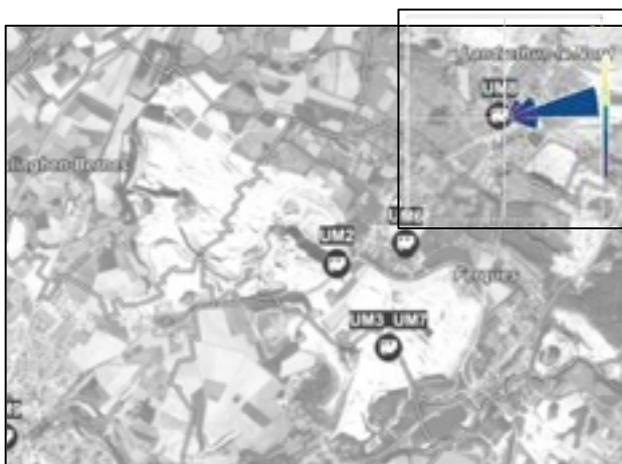


La rose des vents indique des vents dominants de secteurs nord-ouest au secteur sud, ne provenant donc pas des carrières.

Conclusion : d'autres sources, locales dont le trafic routier et le chauffage résidentiel, peuvent être à l'origine des hausses de particules en suspension PM10 observées à Marquise.

④ Le 04/10 de 15h00 à 20h00, Landrethun-le nord

Météo : Carrières B



La rose des vents indique des vents dominants de secteur est, ne provenant donc pas des carrières.

Conclusion : d'autres sources, locales (pouvant être des sources agricoles d'après l'occupation des sols présentée plus haut), peuvent être à l'origine des hausses de particules en suspension PM10 observées à Landrethun-le-Nord.



○ Phase 2

Lors de la seconde phase de mesures, il a apparu également que, globalement, les concentrations en particules PM10 observées au niveau des sites de mesures situés « hors carrières » ont évolué de façon similaire. Néanmoins, quelques pointes décrochent, principalement à Ferques (pics 1, 3, 4 et 5).

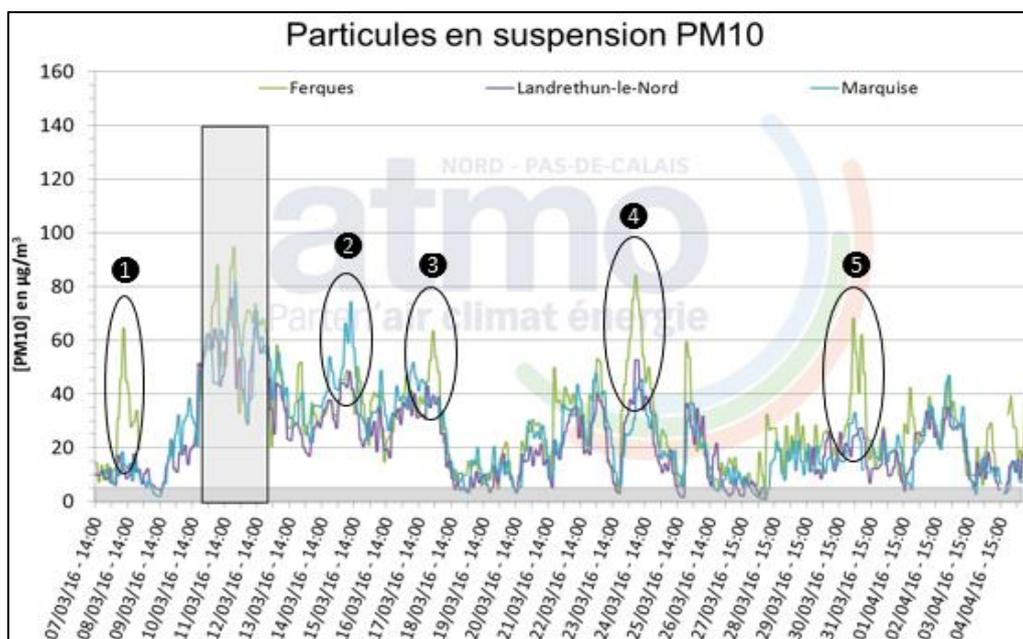
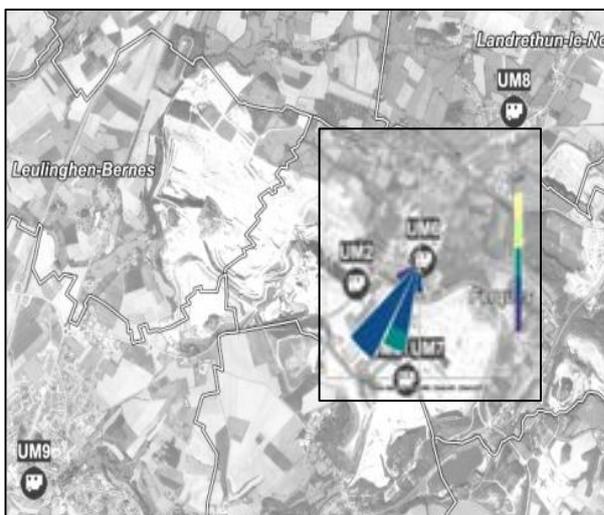


Figure 34 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 2 – Hors carrières Hauts de France

❶ Du 08/03 06h00 au 08/03 21h00, Ferques

Météo : Ferques



La rose des vents indique des vents dominants de secteur sud-ouest, donc passant par les carrières.

A cette même période, les concentrations en poussières PM10 se sont élevées au niveau des deux carrières, et davantage au niveau de la Carrière B.

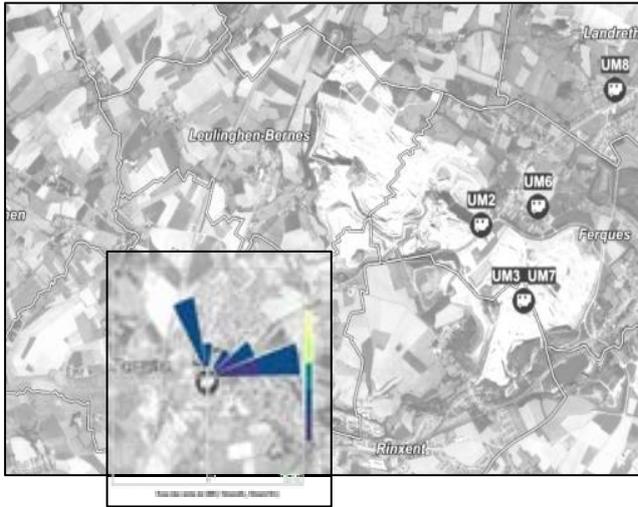
Par ailleurs, les hausses de concentrations visibles à Ferques, ne sont pas visibles à Landrethun-le-Nord (les concentrations de ce site sont du même ordre de grandeur que celles de Marquise).

Conclusion : il y a une influence potentielle des carrières, et en particulier de la Carrière A, sur les concentrations (toutefois modérées) de particules PM10 observées à Ferques.

❷ Du 15/03 06h00 au 15/03 16h00, Marquise



Météo : Carrière B

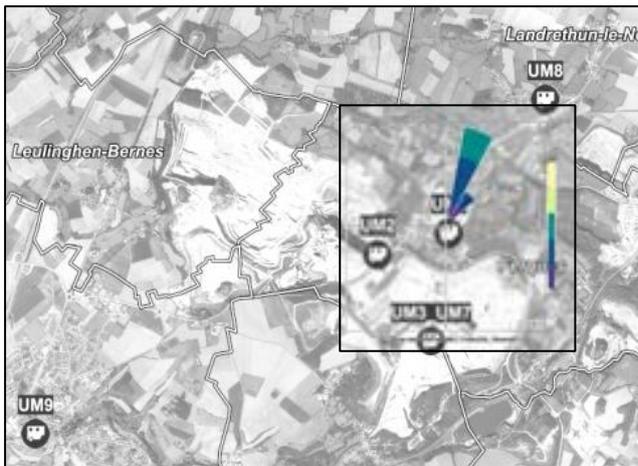


La rose des vents indique des vents dominants de secteurs nord-est et de secteur est-nord-est, pouvant potentiellement provenir des carrières. Néanmoins, les vents n'ayant pas été forts à cette période (< 4 m/s), il est très probable que la source de pollution soit davantage d'origine urbaine qu'industrielle.

Conclusion : d'autres sources, locales, peuvent être à l'origine des hausses de particules en suspension PM10 observées à Marquise.

3 Du 17/03 22h00 au 18/03 05h00, Ferques

Météo : Ferques



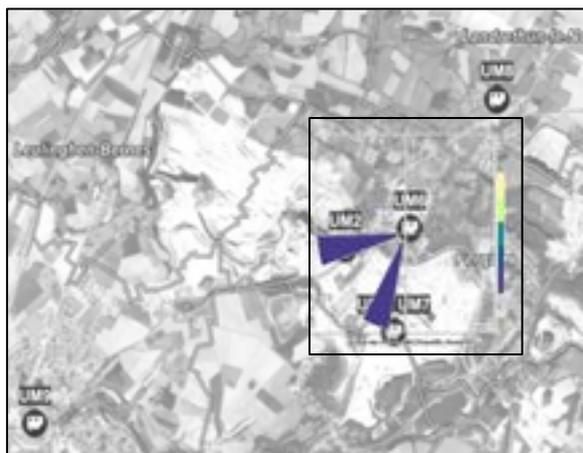
La rose des vents indique des vents de secteur nord-nord-est, éliminant ainsi toute origine industrielle (carrière).

Conclusion : il existe une influence autre que celle issue des carrières sur les concentrations de particules PM10 observées à Ferques, et, au regard de l'environnement de la station de mesures, cette influence est probablement d'origine agricole.

4 Du 23/03 20h00 au 24/03 13h00, Ferques



Météo : Ferques



La rose des vents indique des vents dominants de secteurs ouest et sud-sud-ouest, donc plaçant le site de Ferques sous le vent des carrières.

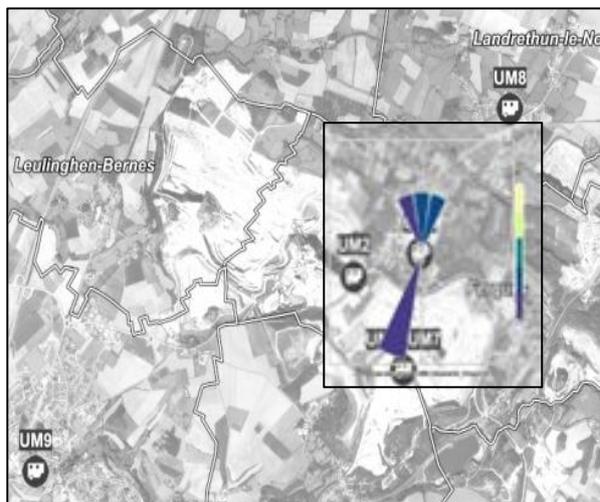
A cette même période, les concentrations en poussières PM10 augmentent au niveau des deux carrières, et davantage au niveau de la Carrière A.

Par ailleurs, les hausses de concentrations visibles à Ferques, sont également visibles à Landrethun-le-Nord et à Marquise, mais dans une moindre mesure.

Conclusion : les élévations de concentrations en particules PM10 observées à Ferques peuvent être la conséquence d'un phénomène observé à échelle régionale. Néanmoins, lorsque les amplitudes de concentrations s'élèvent davantage que sur les autres sites de mesures, une pollution locale (ici provenant des carrières) s'ajoute alors à la pollution de fond déjà existante.

5 Du 30/03 23h00 au 31/03 12h00, Ferques

Météo : Ferques



La rose des vents indique des vents dominants de secteurs nord et sud-sud-ouest. Les deux origines, agricole et industrielle (carrières) sont alors probables.

Les hausses de concentrations visibles à Ferques, ne sont pas visibles à Landrethun-le-Nord ni à Marquise. En revanche, les concentrations se sont élevées au niveau de la Carrière A.

Conclusion : dans ce cas de figure, il est très probable que les niveaux observés à Ferques soient liés à l'activité de la Carrière A.

[Entre les sites urbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région](#)

o [Phase 1](#)



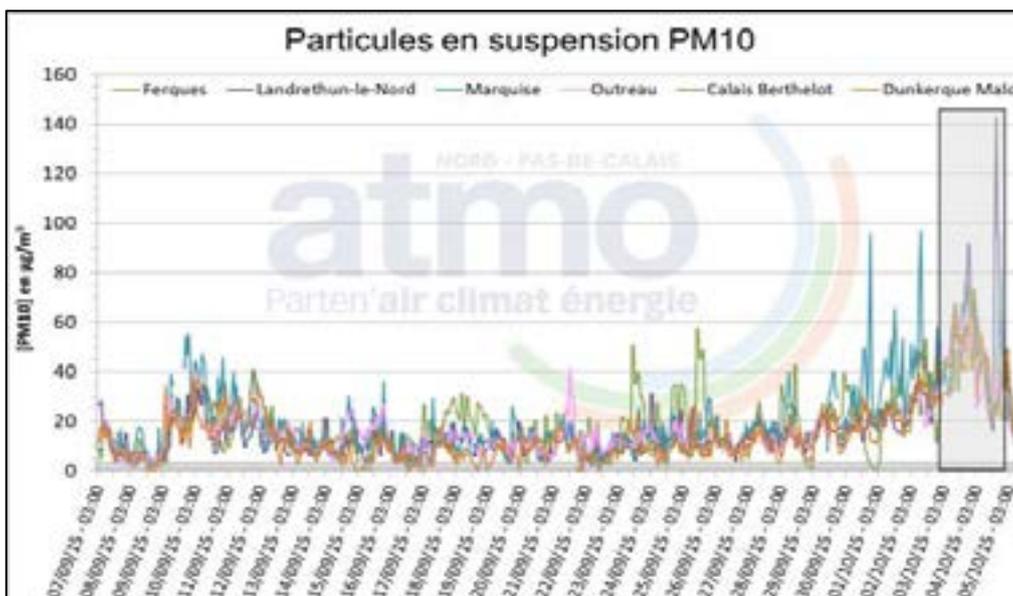


Figure 35 : Evolution des concentrations PM10 entre les sites urbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région

NB : La bande grisée horizontale correspond à la limite de détection des appareils de mesures

Comparativement aux stations fixes de Calais Berthelot, Dunkerque Malo et Outreau, les stations mobiles enregistrent globalement des concentrations similaires, sauf en fin de période, où l'on retrouve les hausses ponctuelles déjà identifiées plus haut.

La station de Landrethun-le-Nord, suivant le mieux les courbes de concentrations des autres stations du littoral, semble ainsi être la station la plus représentative des niveaux de fond pouvant être observés dans le secteur concernant les particules en suspension PM10.

○ **Phase 2**

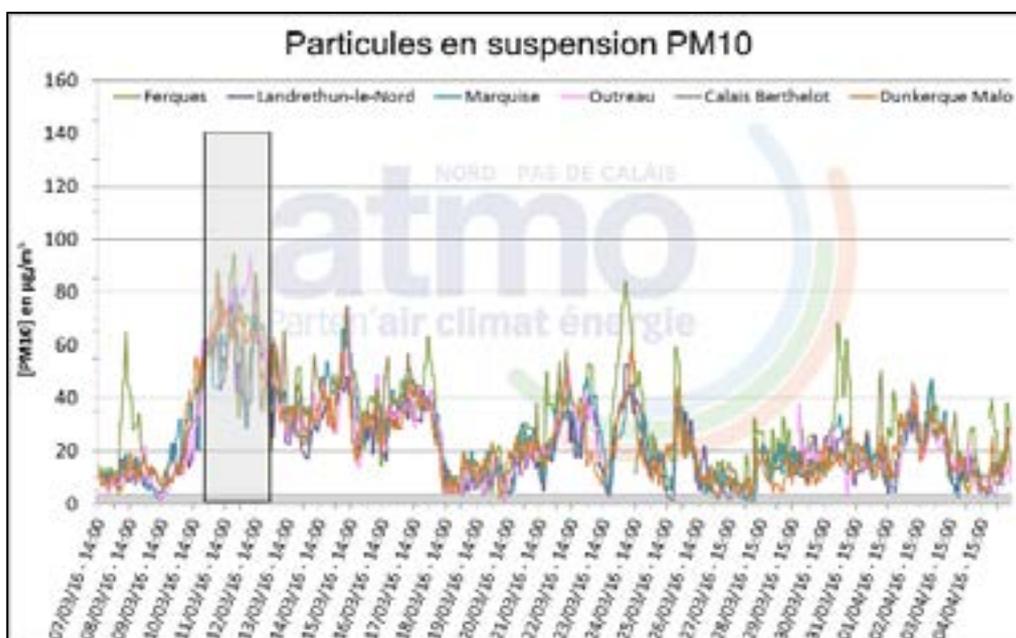


Figure 36 : Evolution des concentrations PM10 entre les sites urbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région

Comme pour la 1ère phase de mesures, comparativement aux stations fixes de Calais Berthelot, Dunkerque Malo et Outreau, les stations mobiles enregistrent globalement des concentrations similaires, sauf ponctuellement à Ferques, où l'on retrouve des hausses plus accentuées que sur les autres sites de mesures.



Cette 2ème phase confirme le fait que la station de Landrethun-le-Nord, suivant le mieux les courbes de concentrations des autres stations du littoral sans jamais s'en écarter, soit la station la plus représentative des niveaux de fond pouvant être observés dans le secteur concernant les particules en suspension PM10.

3.1.7.1. Bilan – Particules en suspension PM10

Site de mesures	Typologie	Concentration moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Valeur journalière maximale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Nombre de jours où la moyenne journalière a été supérieure à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		Phase 1	Phase 2	Phase 1	Phase 2	Phase 1	Phase 2
Carrière A	Tendance « proximité industrielle »	46,6	53,9	180,4 le 07/09	182,8 le 22/03	11	11
Carrière B	Tendance « proximité industrielle »	33,7	33,8	105,5 le 20/09	100,2 le 08/03	3	4
Ferques	Tendance périurbaine	18,8	29,8	47,4 le 03/10	65,4 le 11/03	0	3
Landrethun-le-Nord	Tendance périurbaine	16,2	22,2	58,0 le 03/10	57,5 le 11/03	1	1
Marquise	Tendance périurbaine	20,3	24,9	54,4 le 03/10	59,8 le 11/03	1	2
Outreau	Périurbaine	16,2	26,4	53,6 le 03/10	71,5 le 11/03	1	2
Calais-Berthelot	Urbaine	17,0	25,8	54,1 le 03/10	68,0 le 11/03	1	2
Dunkerque-Malo	Urbaine	14,2	23,9	47,2 le 03/10	67,3 le 11/03	0	2

Tableau 10 : Concentrations moyennes PM10 – bilan phases 1 et 2

Avis et interprétation :

Au regard de la **valeur réglementaire** selon laquelle les concentrations en particules PM10 ne doivent pas dépasser 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par jour plus de 35 fois par année civile, les résultats montrent que les sites où **les dépassements** ont été les plus nombreux sont les sites des carrières, et en particulier le site de la **Carrière A** avec **22 dépassements** sur l'ensemble de la campagne de mesures. Les moyennes journalières relevées au niveau des carrières sont elles aussi plus élevées qu'ailleurs, ce qui n'est pas surprenant vu l'environnement étudié. L'étude ayant eu lieu sur deux années civiles distinctes, les moyennes ne peuvent être comparées aux valeurs réglementaires. En extrapolant que l'étude ait été faite sur une seule année civile, le site de la Carrière A dépasserait les valeurs réglementaires en moyenne journalière et en moyenne annuelle civile, et le site de la

Valeurs réglementaires air ambiant	
En moyenne annuelle civile	En moyenne journalière
40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (valeur limite)	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à ne pas dépasser plus de 35 jours par année civile (valeur limite)

Tableau 11 : Valeurs réglementaires

Carrière B dépasserait probablement la valeur réglementaire en moyenne journalière (uniquement) sur une année complète. **Il est toutefois nécessaire de préciser que les sites de mesures en carrières – donc à l'intérieur d'un site industriel relevant de la réglementation des ICPE - ne sont pas soumis à la même réglementation que les sites de mesures périurbains**, la comparaison aux valeurs réglementaires en air ambiant est donc ici faite à titre indicatif uniquement.



Sur les trois sites « hors carrières » de la zone d'étude, la concentration journalière la plus élevée a été relevée le 3 octobre en phase 1 et le 11 mars en phase 2, en cohérence avec les épisodes de pollution qui ont touché les deux départements lors de ces périodes. Les concentrations moyennes observées à Landrethun-le-Nord, Ferques et Marquise sont du même ordre de grandeur que ce qui peut être observé par ailleurs en région.

A Ferques et Marquise en phase 1, et à Ferques en phase 2, les concentrations sont toutefois quelque peu supérieures aux sites de mesures de référence sur le littoral (hors zone d'étude). Toujours en extrapolant que l'étude ait été faite sur une seule année civile, les trois sites périurbains respecteraient les valeurs réglementaires, que ce soit en moyenne journalière ou en moyenne annuelle.

Bilan sur Ferques

Les roses de pollution représentant les concentrations maximales et effectuées sur l'ensemble de la période de mesures sont représentés ci-dessous. Sur les deux roses, la diagonale nord-est à sud-ouest se distingue. D'après l'exploitation précédente, on retrouve différents « types » de pollution. En phases 1 et 2, on retrouve une pollution dite « locale », illustrée par les premières cellules jaunes en partant du centre de la rose, ayant **probablement une origine agricole**. On retrouve également sur les deux phases de mesures une pollution issue du sud-ouest, pointant alors **la direction des carrières**. En phase 2, les particules provenant de la direction nord-est sont propres à **la pollution de fond régionale**, puisque cette direction a été retrouvée sur l'ensemble des sites de mesures à échelle régionale.

- Phase 1

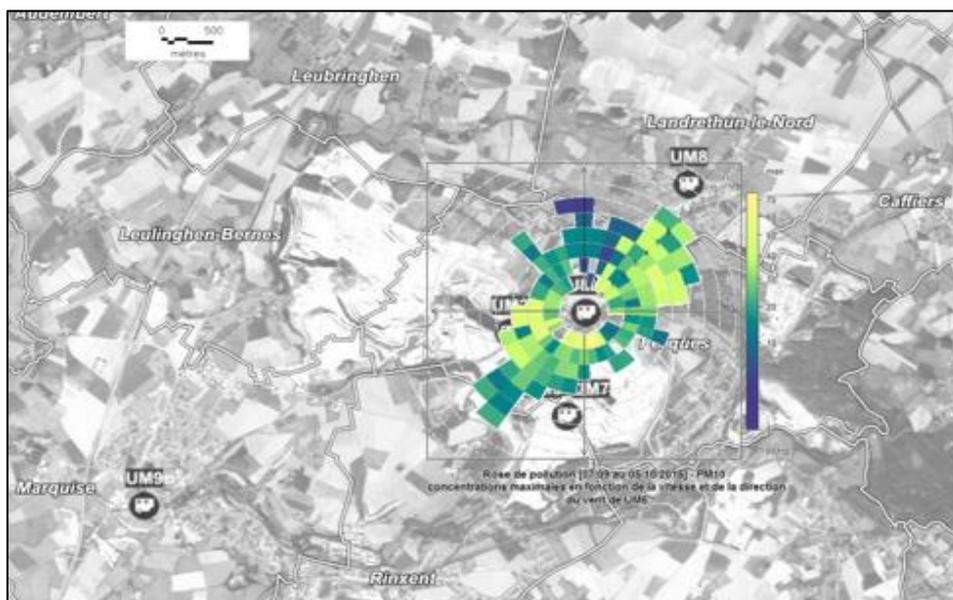


Figure 37 : Rose de pollution Ferques Phase 1

- Phase 2





Figure 38 : Rose de pollution Ferques - Phase 2

[Bilan sur Landrethun-le-Nord](#)

A Landrethun-le-Nord, les roses de pollution entre les phases 1 et 2 sont nettement différentes. Sur la phase 1 quelques cellules se démarquent, avec une pollution locale ou issue du sud-est. Sur la phase 2, la direction nord-est ressort, en lien avec la pollution de fond ayant été recensée lors de cette période de mesures. Globalement et d'après les deux phases de mesures, il semble que les carrières n'influencent pas spécifiquement le site de Landrethun-le-Nord sur les concentrations en particules PM10.

○ [Phase 1](#)

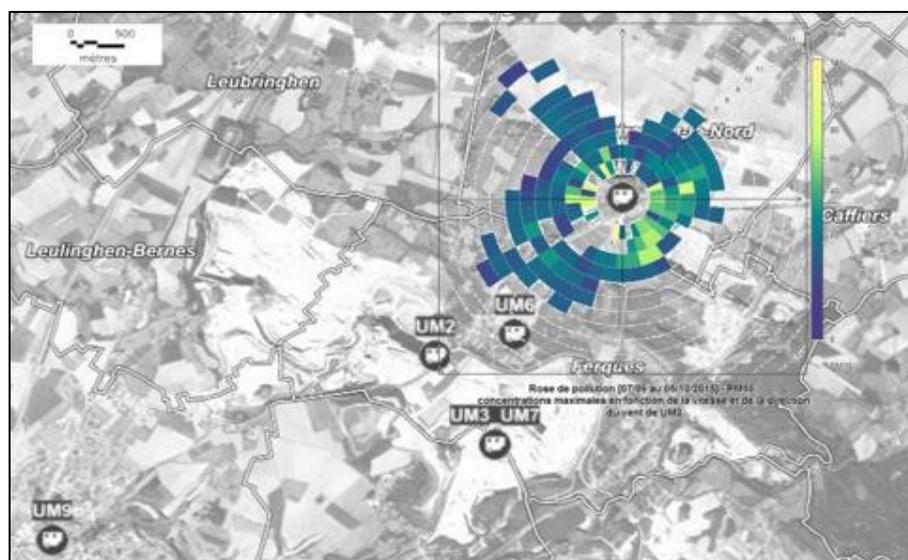


Figure 39 : Rose de pollution de Landrethun - phase 1

○ [Phase 2](#)





Figure 40 : Rose de pollution de Landrethun - phase 2

Bilan sur Marquise

En phase 1, par vent faible, voire par absence de vent, de fortes concentrations en poussières sont visibles (cellules jaunes), provenant des secteurs sud-est et est. Pour des vents plus forts, la pollution n'a pas la même origine : elle est davantage issue du secteur nord-est. En phase 2, on retrouve une pollution locale et la direction nord-est ressort à l'identique des autres sites de mesures, ainsi que les directions nord et est. Ce qui signifie que pour **Marquise, comme pour Ferques, la pollution due aux poussières peut avoir plusieurs origines : les carrières (associées à la pollution de fond régionale en phase 2), lorsqu'il y a du vent de nord-est, et une autre origine (urbaine ?) par vent faible voire quasi nul.** L'analyse chimique des particules faite par le LSCE pourra permettre d'affiner les conclusions.

○ Phase 1

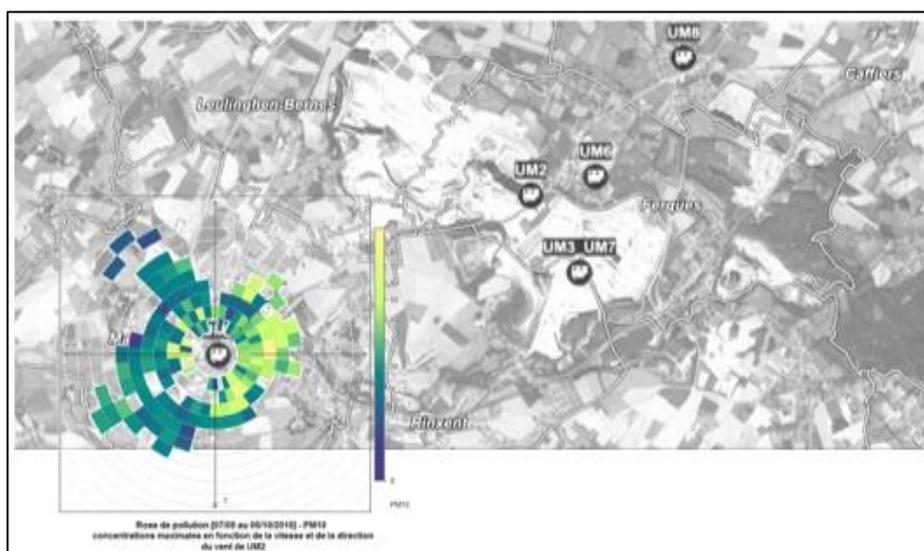


Figure 41 : Rose de pollution de Marquise – Phase 1

○ Phase 2



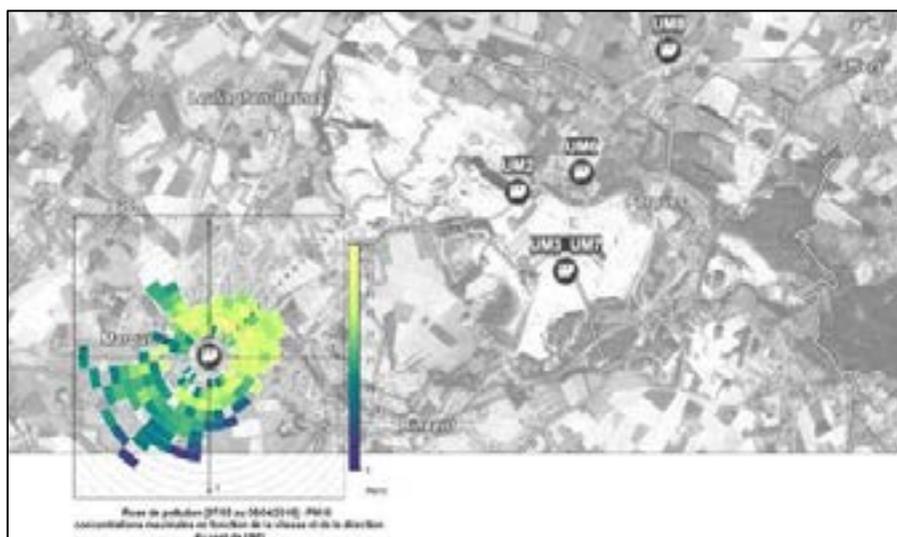


Figure 42 : Rose de pollution de Marquise – Phase 2

Bilan sur la Carrière B

En phase 1 comme en phase 2, les roses de pollution indiquent que les concentrations en poussières PM10 les plus fortes sont visibles par vent faible (cellules jaunes proches du centre de la rose). En phase 1, la direction sud-est ressort également, tandis qu'en phase 2, c'est la direction nord-ouest se distingue. Par vent de sud-est, il est difficile de conclure quant à l'origine de la pollution : les particules peuvent provenir des installations situées à proximité immédiate du point de mesures (train, installation CB2M), et/ou celles-ci peuvent provenir de la Carrière A. L'analyse chimique des particules faite par le LSCE pourra permettre d'affiner les conclusions.

○ Phase 1

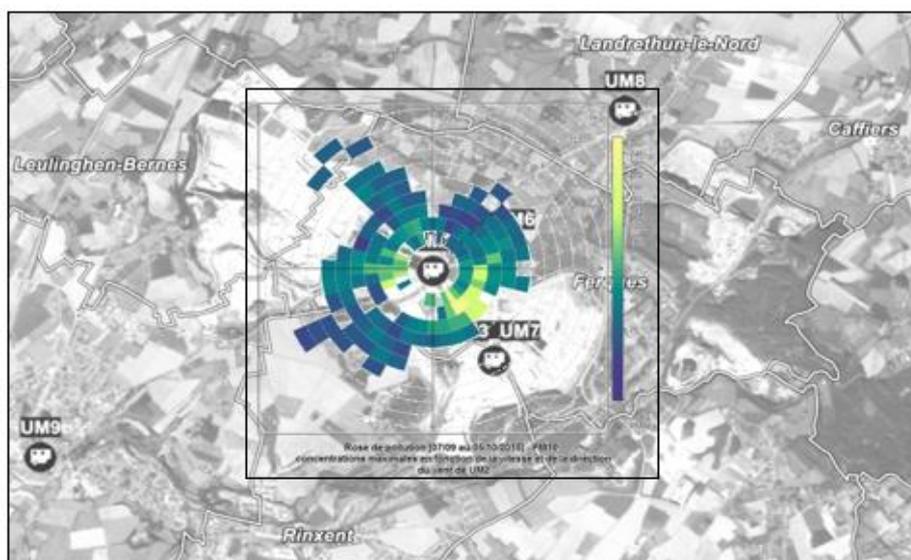


Figure 43 : Rose de pollution carrière B phase 1

○ Phase 2





Figure 44 : Rose des vents Carrière B phase 2

Bilan sur la Carrière A

Que ce soit en phase 1 ou en phase 2, les roses de pollution indiquent que les concentrations maximales en poussières PM10 sont visibles par vent quasi nul (< 1 m/s) : issues principalement du ré-entrainement de poussières. Ces observations sont en accord avec l'emplacement du site de mesures, lequel se trouve dans un milieu particulièrement encaissé, peu soumis aux vents dominants.

o Phase 1

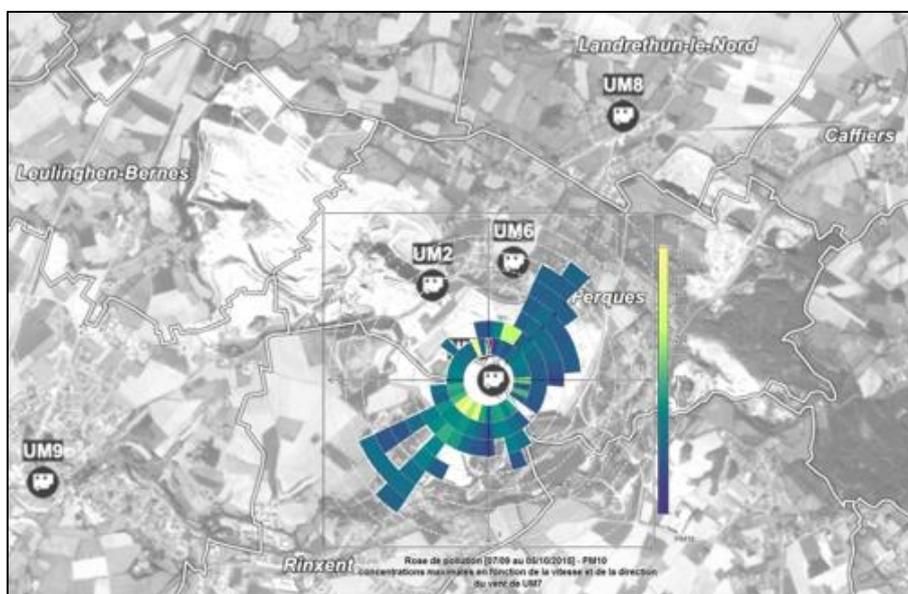


Figure 45 : Rose de pollution de la carrière A phase 2

o Phase 2



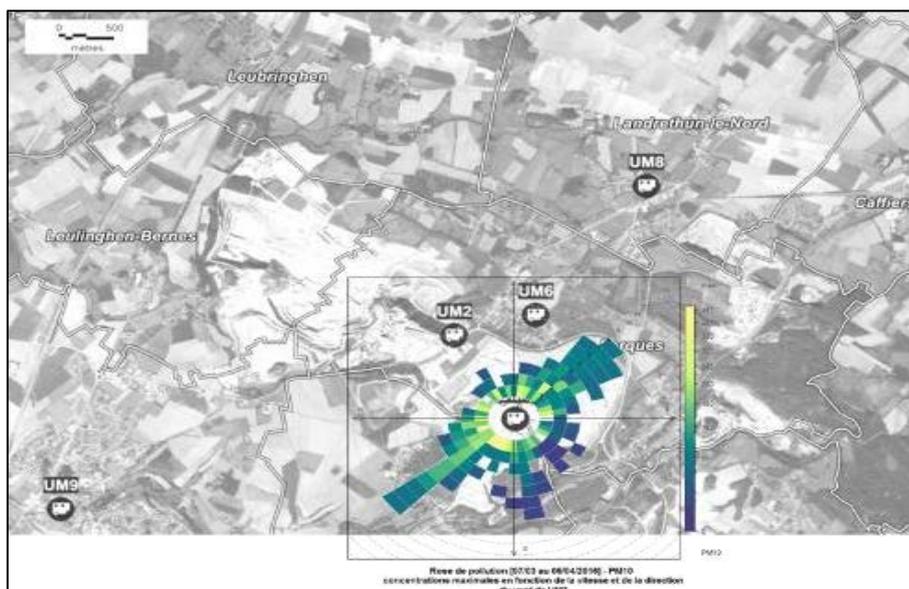


Figure 46 : Rose de pollution de la carrière A - phase 2

3.1.7.1. Les particules fines (PM2.5)

a) Sur l'ensemble des sites de la zone d'étude

Evolution des concentrations moyennes horaires

o Phase 1

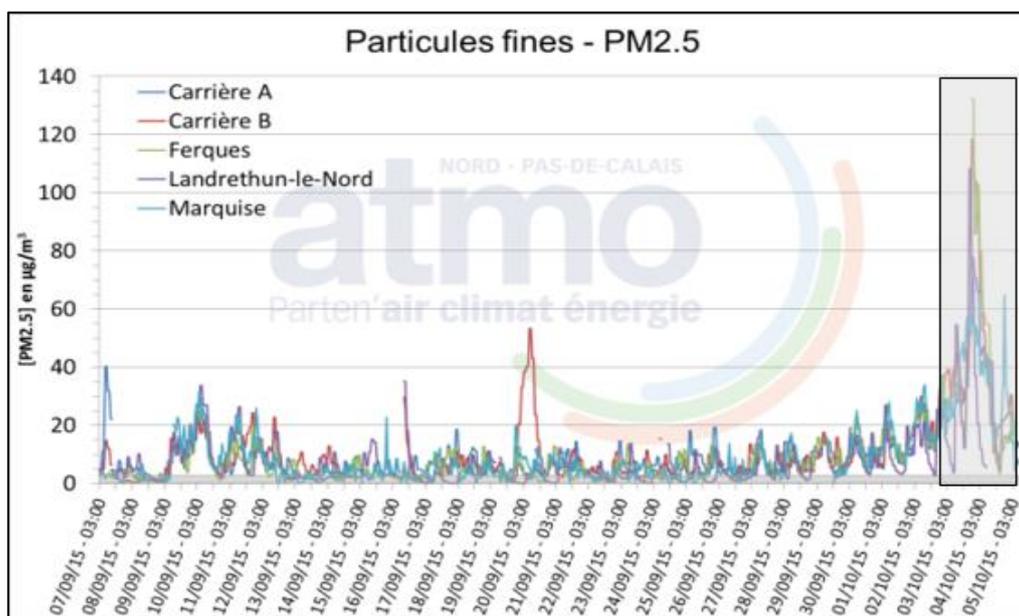


Figure 47 : Evolution des concentrations des particules fines PM2,5 – Phase 1

Globalement, si l'on compare les concentrations en particules fines PM2,5 observées au niveau des cinq sites de mesures de la zone d'étude, toutes les courbes se suivent (contrairement aux résultats des particules PM10). Seule une pointe se distingue au niveau de la Carrière B, le 20 septembre, comme pour les particules PM10.

o Phase 2



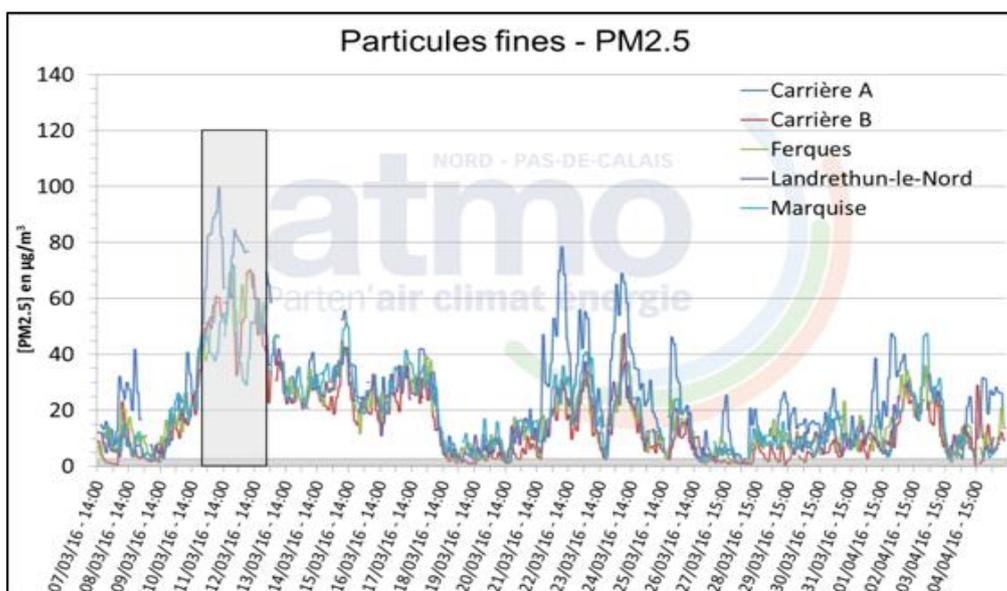


Figure 48 : Evolution des concentrations des particules fines PM2,5 – Phase 2

En phase 2, les concentrations en particules fines PM2.5 observées au niveau des cinq sites de mesures de la zone d'étude se suivent toujours entre elles, en revanche, celles-ci s'élèvent davantage au niveau de la Carrière A, notamment les 22, 24, 25, 27 mars et 2 avril, (particularité non observée en phase 1). Au-delà de ces amplitudes de concentrations plus élevées, les niveaux observés depuis la Carrière A évoluent de la même façon que les concentrations relevées depuis les sites périurbains alentours.

b) En dehors des carrières

[Au niveau des sites périurbains du bassin de Marquise](#)

o Phase 1

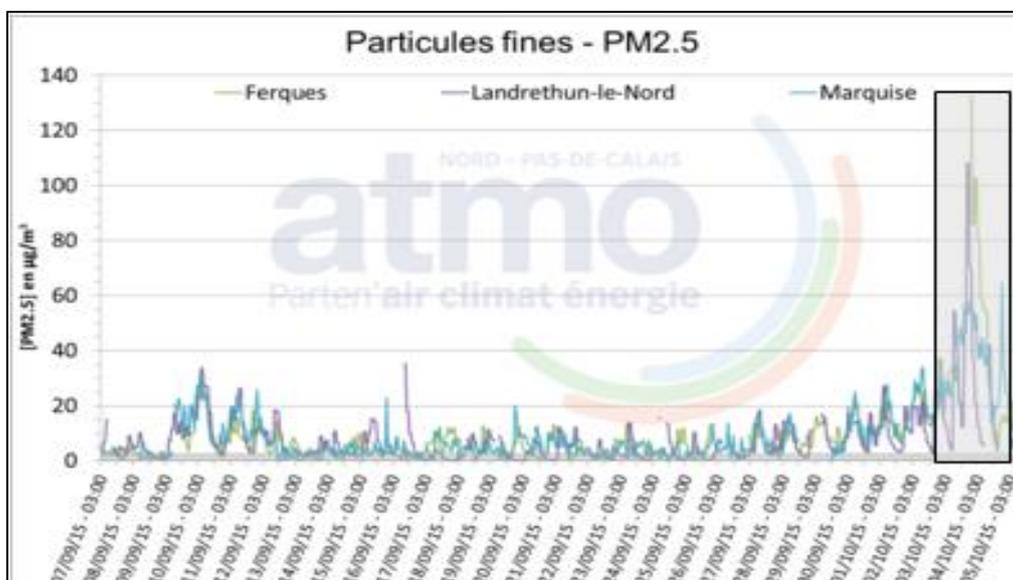


Figure 49 : Evolution des concentrations en particules fines PM2,5 - phase 1 (La bande grisée horizontale correspond à la limite de détection des appareils de mesures)

Les concentrations en particules PM2.5 observées au niveau des sites de mesures situés « hors carrières » ont évolué de façon similaire tout au long de la phase de mesures.

o Phase 2



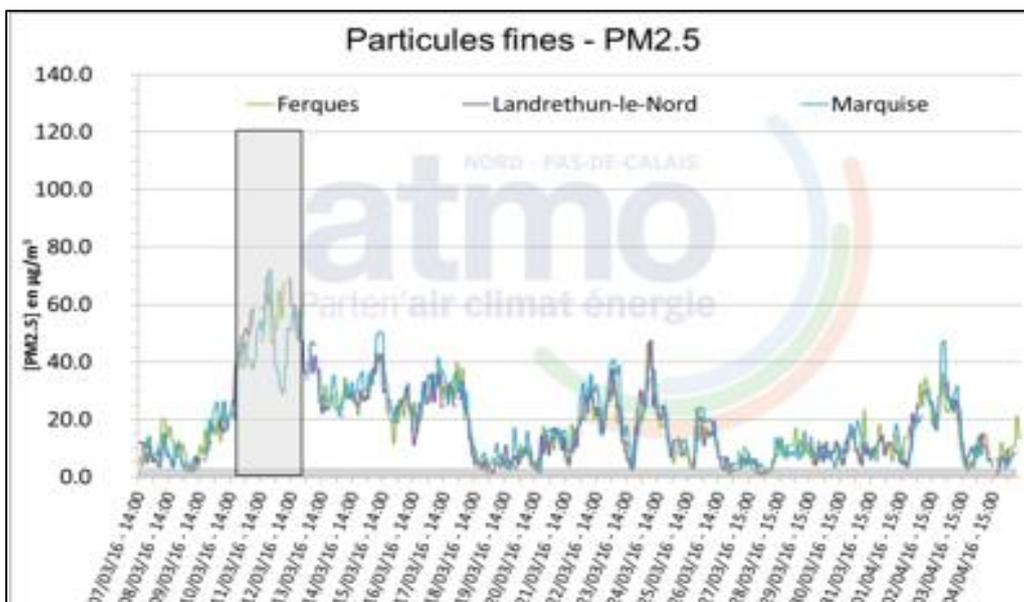


Figure 50 : Concentration en particules fines PM2,5

Comme pour la phase 1, les concentrations en particules PM2.5 observées en phase 2 au niveau des sites de mesures situés « hors carrières » ont évolué de façon similaire tout au long de la phase de mesures.

[Entre les sites périurbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région](#)

o **Phase 1**

Comparativement aux stations fixes de Calais Berthelot et Dunkerque Malo (Outreau ne mesure pas les particules fines en continu), les stations mobiles de Marquise, Ferques et Landrethun-le-Nord enregistrent en phase 1 des profils de concentrations similaires aux deux stations fixes de référence.

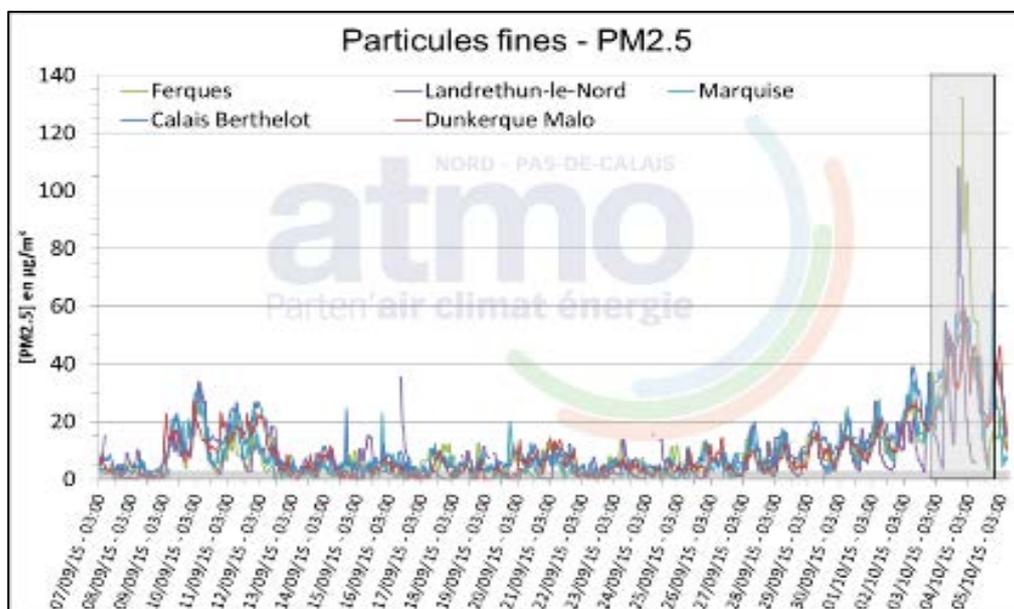


Figure 51 : Evolution des concentrations entre les sites périurbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région-Phase 1

Une pointe ponctuelle est tout de même visible à Ferques en fin de phase, du 3 21h00 au 4 octobre 10h00, atteignant 132 µg/m³ à 21h00 et 22h00. Les vents de cette tranche horaire sont restés inférieurs à 1 m/s. La source est donc locale (proximité immédiate de la station).



La station mobile de Landrethun-le-Nord enregistre elle aussi une pointe ponctuelle le 3 octobre, atteignant 108 µg/m³ à 19h00, par vent d'ouest, donc pas issue des carrières. La source n'a pas été identifiée.

○ **Phase 2**

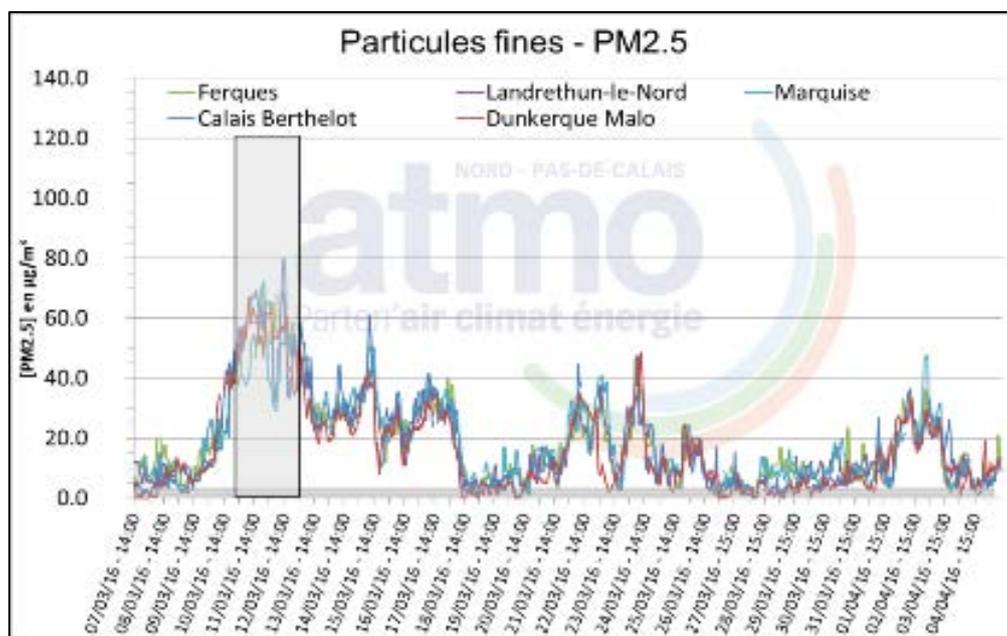


Figure 52 : Evolution des concentrations entre les sites périurbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région-Phase 2

En phase 2, les stations mobiles de Marquise, Ferques et Landrethun-le-Nord continuent de suivre des profils de concentrations similaires aux deux stations fixes de référence.

Les activités exercées depuis les carrières n'ont visiblement pas d'impact sur les concentrations en particules fines PM2.5 observées depuis les sites périurbains alentours (Ferques, Marquise et Landrethun)

c) Bilan – Particules en fines PM2.5

Site de mesures	Typologie	Concentration moyenne (µg/m ³)	
		Phase 1	Phase 2
Carrière A	Tendance « proximité industrielle »	9,1	25,4
Carrière B	Tendance « proximité industrielle »	11,2	15,6
Ferques	Tendance périurbaine	9,4	18,1
Landrethun-le-Nord	Tendance périurbaine	8,1	17,7
Marquise	Tendance périurbaine	9,4	19,6
Calais-Berthelot	Urbaine	11,7	17,8
Dunkerque-Malo	Urbaine	9,1	16,3

Tableau 12 : Bilan des concentrations en PM2.5 des phases 1 et 2 entre les sites périurbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région

Avis et interprétation :

En ce qui concerne les concentrations moyennes en particules fines, au niveau des cinq sites de la zone d'étude, le site de la Carrière B est celui qui enregistre la moyenne la plus élevée avec 11,2

µg/m³ en phase 1, alors qu'en phase 2, c'est le site de la Carrière A (avec 25,4 µg/m³). Les moyennes des autres sites sont, par phase de mesures, proches entre-elles.

Valeurs réglementaires air ambiant
En moyenne annuelle civile
25 µg/m ³ (valeur limite)

Tableau 13 : Valeurs réglementaires

En phase 1, par comparaison avec des stations situées en dehors du bassin de Marquise, il s'avère que les concentrations en particules fines PM_{2.5} rencontrées au niveau des carrières et à proximité de celles-ci sont du **même ordre de grandeur** que ce qui peut être observé en milieu urbain. **En phase 2, le site de la Carrière A enregistré en revanche une concentration en particules fines bien plus élevée que ce qui peut être observé par ailleurs.** De plus, le site de la Carrière B présente quant à lui, une moyenne équivalente à celles des autres sites urbains de référence.

Si l'on compare, en extrapolant, les valeurs obtenues à la valeur réglementaire annuelle, celle-ci serait toutefois respectée sur l'ensemble des sites (sites des carrières compris) de la zone d'étude.

Bilan sur Ferques

La rose de pollution obtenue pour la phase 1 indique que les concentrations maximales de PM_{2.5} ont été relevées en l'absence de vent et durant l'épisode de pollution, ce qui peut traduire à la fois une influence locale et du transport longue distance. En phase 2, on retrouve cette pollution locale, mais également des particules provenant de la direction nord-est (propres à la pollution de fond régionale), ainsi que des particules issues du sud-est et du sud-ouest.

○ Phase 1

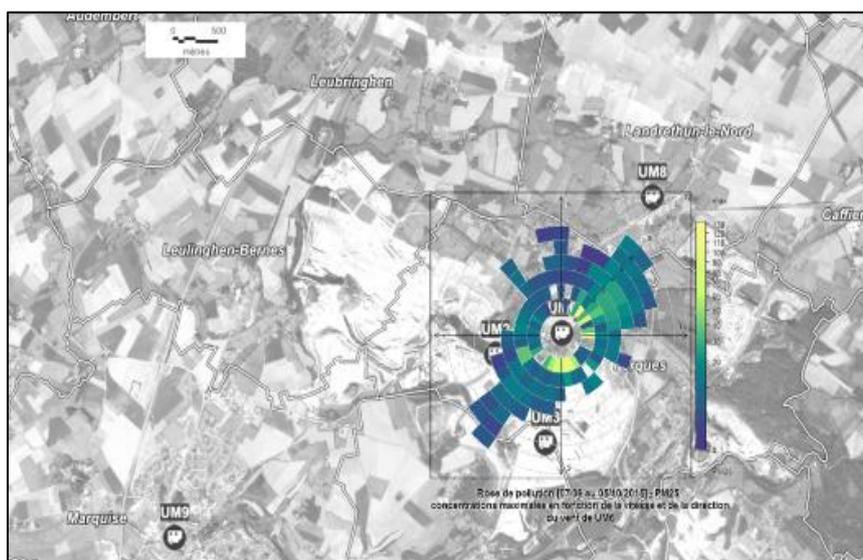


Figure 53 : Rose de pollution PM_{2.5} Ferques de la phase 1

○ Phase 2



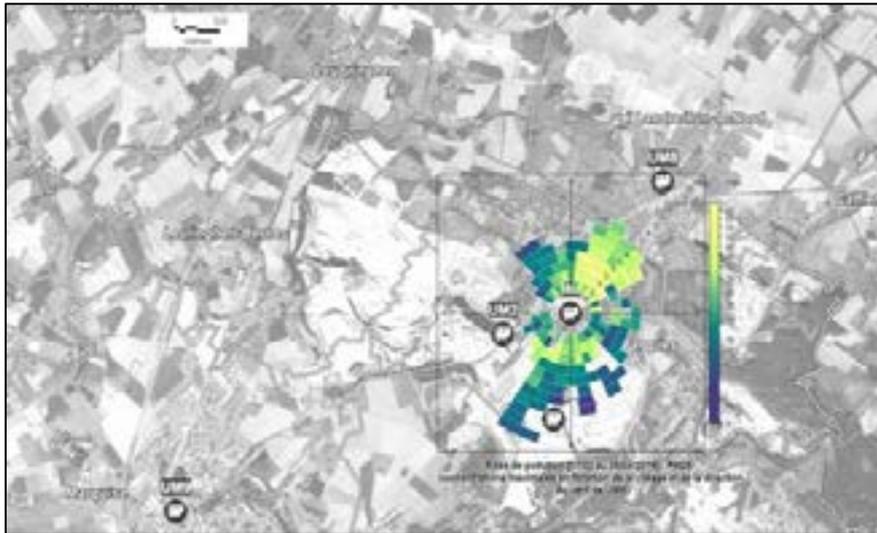


Figure 54 : Rose de pollution PM2.5 Ferques de la phase 2

[Bilan sur Landrethun-le-Nord \(Météo de Carrière B\)](#)

Les interprétations des roses de pollution de Landrethun-le-Nord sont similaires à celles de Ferques : en phase 1, les concentrations maximales de PM2.5 ont été relevées en l'absence de vent et durant l'épisode de pollution, ce qui peut traduire à la fois une influence locale et du transport longue distance. En phase 2, on retrouve cette pollution locale, mais également des particules provenant de la direction nord-est (propres à la pollution de fond régionale), ainsi que des particules issues du sud-est et du sud-ouest.

○ [Phase 1](#)

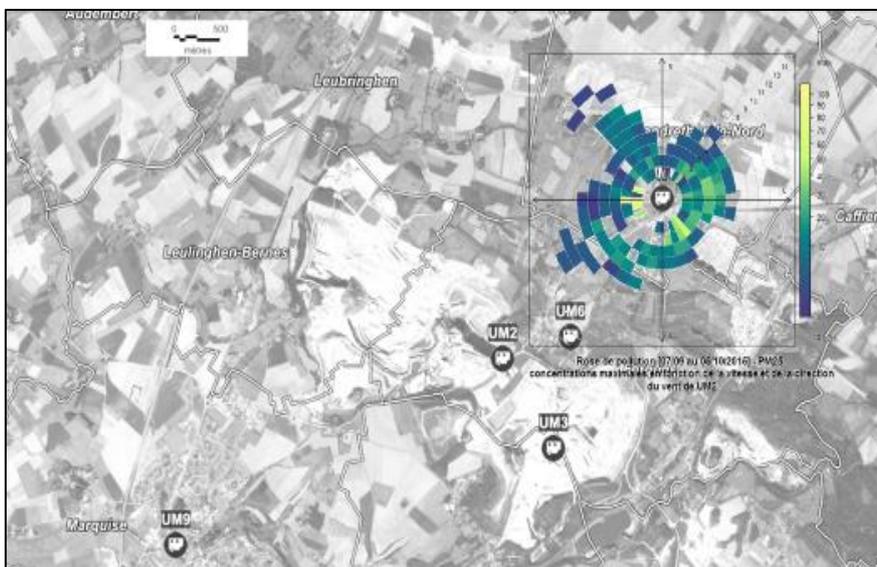


Figure 55 : Rose de pollution PM2.5 Landrethun-le-Nord de la phase 1

○ [Phase 2](#)



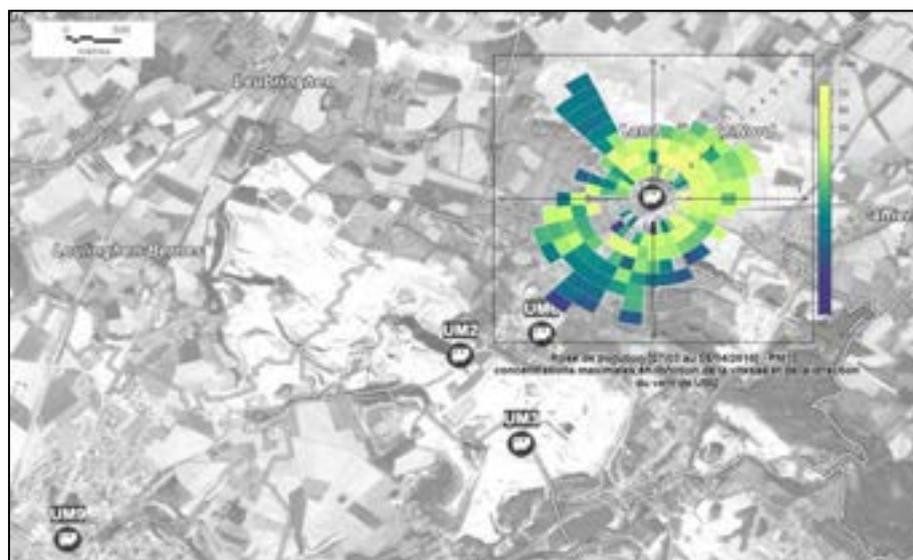


Figure 56 : Rose de pollution PM2.5 Landrethun-le-Nord de la phase 2

Bilan sur Marquise (Météo de Carrière B)

La rose de pollution obtenue pour la phase 1 indique que les concentrations maximales de PM2.5 ont été relevées en l'absence de vent et durant l'épisode de pollution, ce qui peut traduire à la fois une influence locale et du transport longue distance, et par vent d'est et de sud-est. En phase 2, la rose de pollution est similaire à celle de Landrethun-le-Nord : pollution locale, mais également des particules provenant de la direction nord-est (propres à la pollution de fond régionale), ainsi que des particules issues du sud-est et du sud-ouest.

○ Phase 1

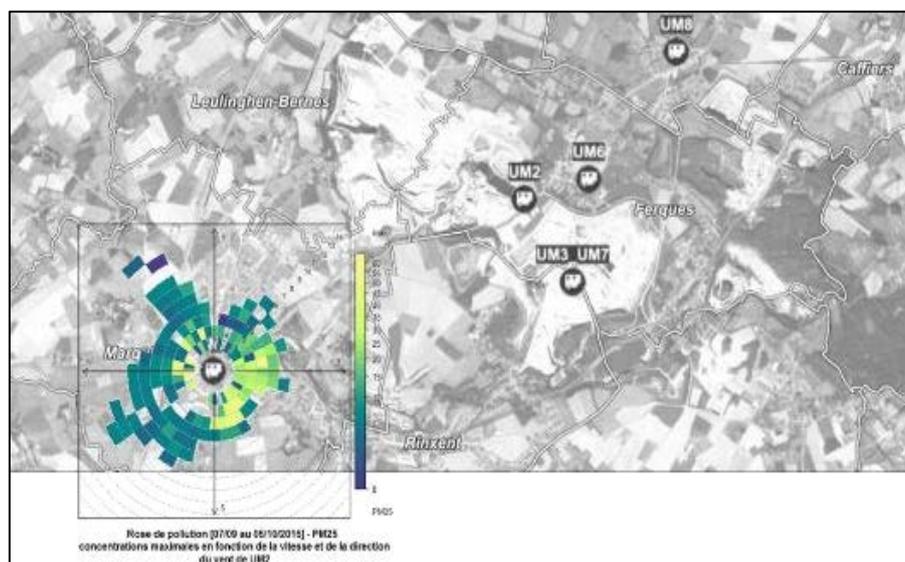


Figure 57 : Rose de pollution PM2,5 de la phase 1 à Marquise.

○ Phase 2

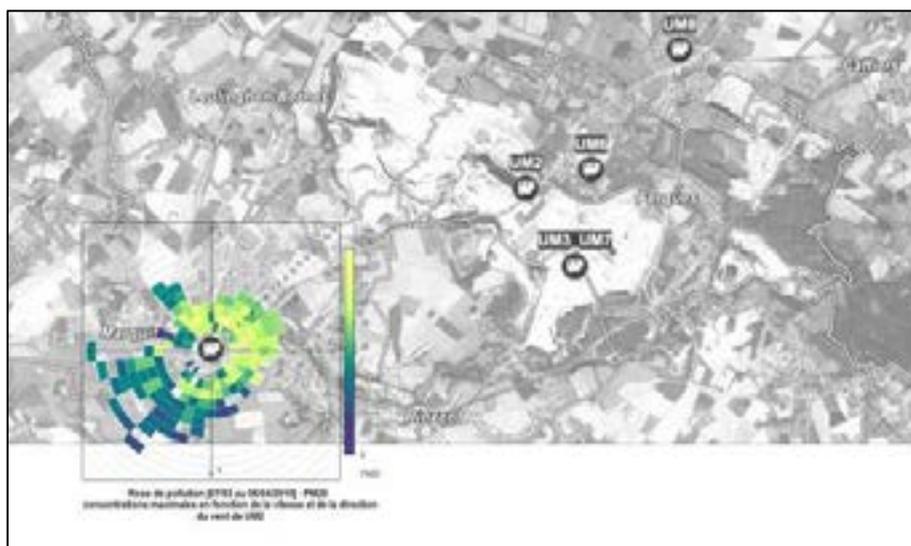


Figure 58 : Rose de pollution PM2,5 de la phase 2 à Marquise.

Bilan sur Carrière B

En phase 1 comme en phase 2, les roses de pollution indiquent que les concentrations en poussières PM2.5 les plus fortes sont visibles par vent faible. En phase 1, la direction sud-est ressort également, tandis qu'en phase 2, les directions retrouvées sont les mêmes que pour les autres sites de mesures, d'où une pollution de fond et non spécifique à la Carrière B.

○ Phase 1

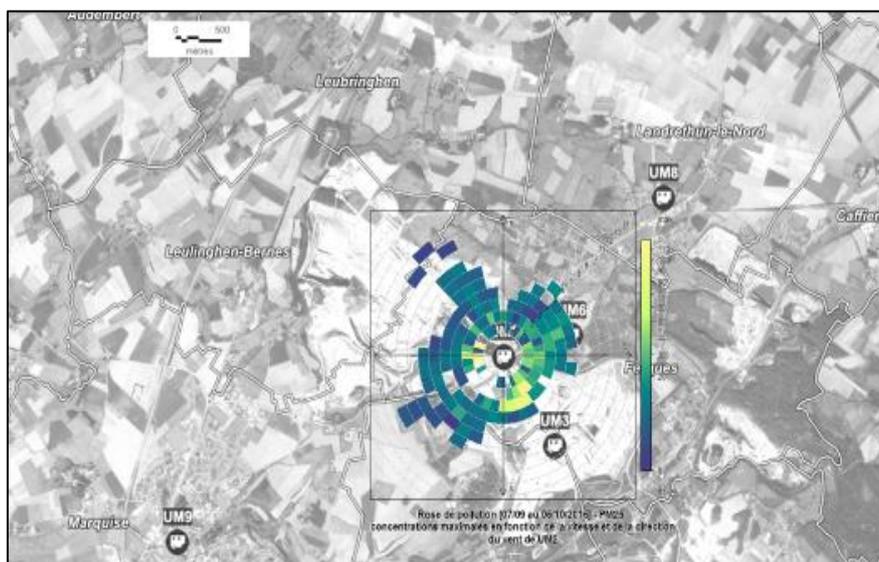


Figure 59 : Rose de pollution PM2,5 de la phase 1 – carrière B.

○ Phase 2



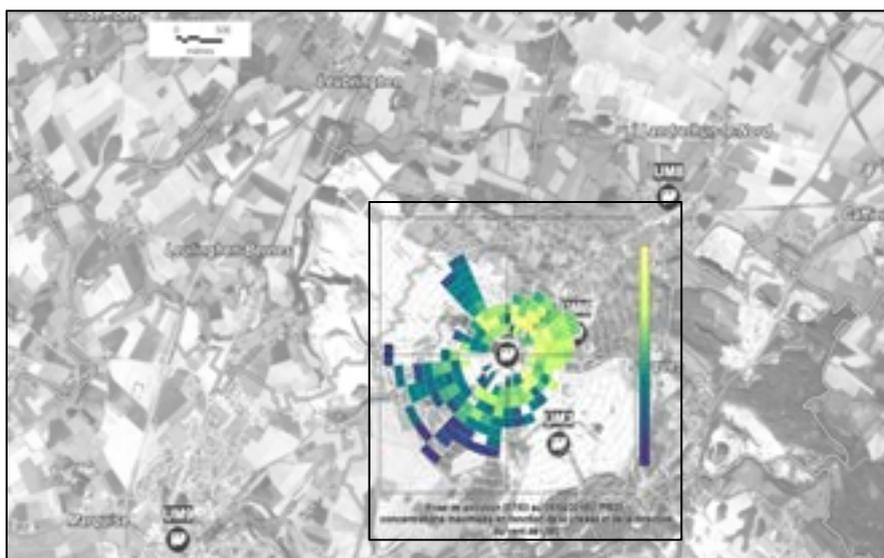


Figure 60 : Rose de pollution PM2.5 de la phase 2 – carrière B.

Bilan sur Carrière A

Que ce soit en phase 1 ou en phase 2, les roses de pollution indiquent que les concentrations maximales en poussières PM2.5 sont visibles par vent quasi nul (< 1 m/s) : issues principalement du ré-entrainement de poussières. Les directions des roses, phases 1 et 2, sont différentes des autres sites de mesures : seule la diagonale nord-est / sud-ouest ressort. Ces observations sont en accord avec l'emplacement du site de mesures, lequel se trouve dans un milieu particulièrement encaissé, peu ou moins soumis aux vents dominants.

○ Phase 1

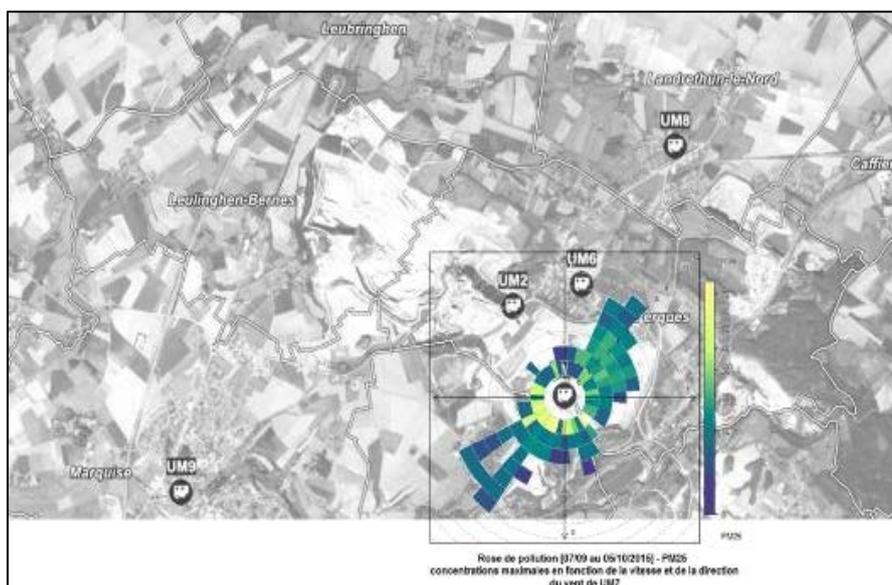


Figure 61 : Rose de pollution PM2.5 de la phase 1 – carrière A.

○ Phase 2



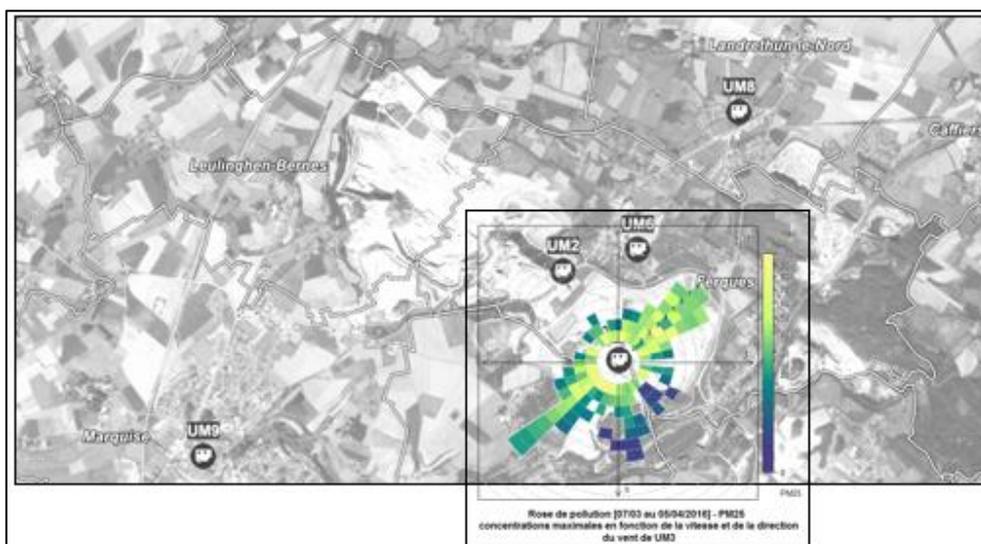


Figure 62 : Rose de pollution PM2.5 de la phase 2 – carrière A.

3.1.7.2. Résultats granulométriques

Lors des prélèvements de la 1ère phase de mesures, des problèmes techniques ont été rencontrés : des particules ont été retrouvées dans la ligne de prélèvement et les filtres ont été parfois découpés lors du sertissage du filtre sur le porte-filtre. Le système a été amélioré dans la mesure du possible pour la 2ème phase de mesures.

Les tableaux suivants présentent les résultats obtenus depuis les trois granulomètres (Dekati).

A noter que la différence de volumes obtenus entre le site de la Carrière B, et les sites de Landrethun-le-Nord et de Marquise, est tout à fait normale : le débit de prélèvement au niveau de la Carrière B était de 10 L/min, alors qu'il était de 30 L/min au niveau des deux autres sites. Le calcul de la concentration permet de s'affranchir de la différence métrologique liée au débit de prélèvement (et donc au volume prélevé) :

$$\text{Concentration moyenne } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{\text{Masse (mg)}}{\text{Volume (m}^3)} \times 1000$$

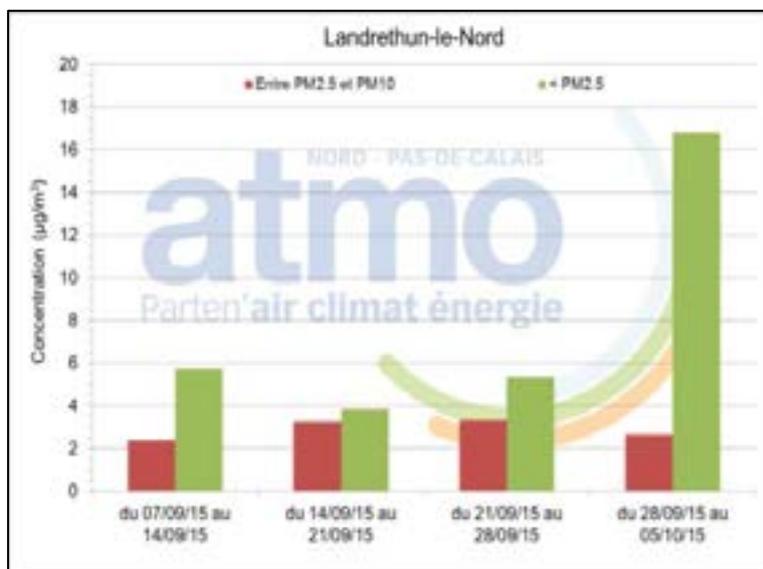
○ Phase 1



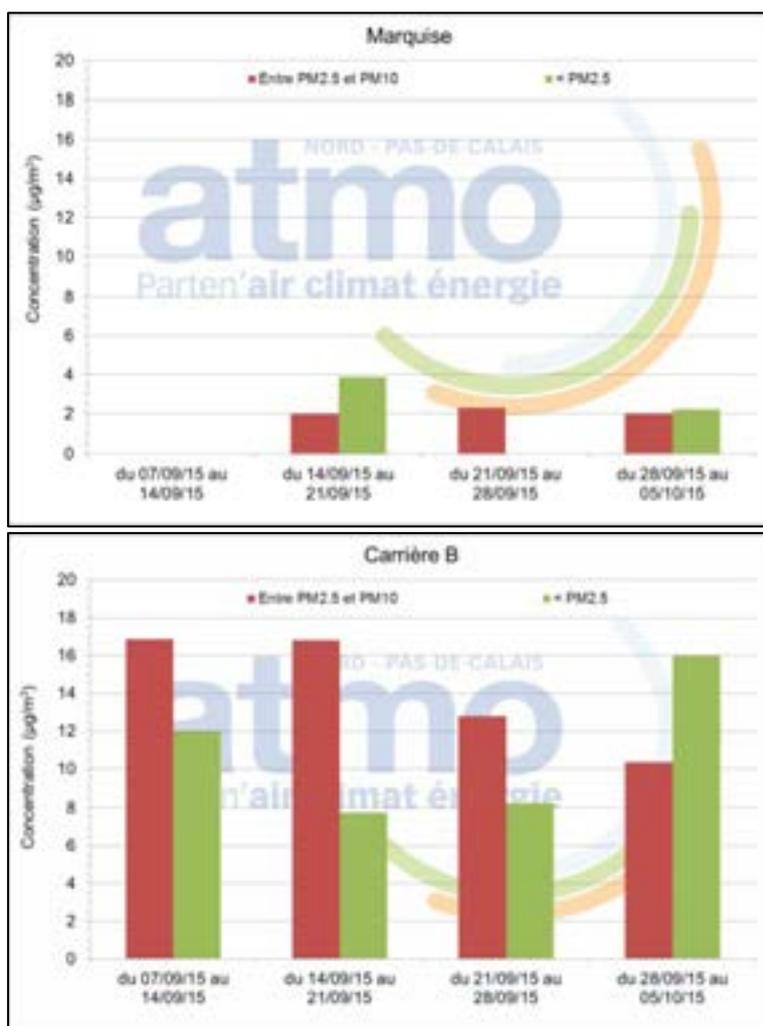
Période de prélèvement	Site de mesures	Volume (m ³)	Poussières inférieures à 2.5 µm		Poussières comprises entre 2.5 et 10 µm		Poussières supérieures à 10 µm
			Masse collectée (mg)	Concentration moyenne (µg/m ³)	Masse collectée (mg)	Concentration moyenne (µg/m ³)	Masse collectée (mg)
Du 07/09/15 au 14/09/15	Carrière B	98,4	1,18	11,99	1,66	16,87	nd
	Landrethun-le-Nord	304,6	1,74	5,71	0,73	2,40	nd
	Marquise	289,2	< LD	-	< LD	-	nd
Du 14/09/15 au 21/09/15	Carrière B	100,5	0,78	7,76	1,69	16,82	nd
	Landrethun-le-Nord	303,4	1,16	3,82	0,99	3,26	nd
	Marquise	305,9	1,19	3,89	0,61	1,99	nd
Du 21/09/15 au 28/09/15	Carrière B	101,6	0,84	8,27	1,3	12,80	nd
	Landrethun-le-Nord	310,1	1,66	5,35	1,03	3,32	nd
	Marquise	302,2	< LD	-	0,7	2,32	nd
Du 28/09/15 au 05/10/15	Carrière B	101,4	1,62	15,98	1,05	10,36	nd
	Landrethun-le-Nord	296,2	4,98	16,82	0,79	2,67	nd
	Marquise	310,3	0,69	2,22	0,63	2,03	nd

Tableau 14 : Granulométrie des poussières prélevées en phase 1.

Lors de la phase 1, les concentrations de la fraction supérieure à 10 µm ont été invalidées (non disponibles, nd dans le tableau) sur l'ensemble des trois sites de mesures en raison d'un problème technique lors des prélèvements. En ce qui concerne les résultats obtenus pour les fractions inférieures à 10 µm, ceux-ci sont à prendre avec précaution dans la mesure où le problème technique a également pu se reproduire sur leurs prélèvements. De ce fait, les résultats sont potentiellement sous-estimés. D'autre part, les résultats de la première semaine sur Marquise ont été invalidés : ils étaient tous inférieurs à la limite de détection.



Au niveau du site de mesure de Landrethun-le-Nord, les particules majoritaires semblent être des particules fines, de diamètre inférieur à 2.5 µm. Les concentrations sont du même ordre de grandeur au fil des semaines, excepté lors de la dernière semaine de mesures où la concentration en particules fines est beaucoup plus élevée. Lors de cette semaine, un épisode de pollution a été caractérisé au niveau régional. L'analyse de cet épisode précise qu'il était essentiellement constitué de particules fines PM2.5.



A Marquise, compte-tenu du manque de données obtenues pour ce site, il est difficile de conclure sur une tendance éventuelle. Les particules comprises entre 2.5 et 10 µm sont néanmoins plus faibles que sur les deux autres sites, lors des trois dernières semaines.

En ce qui concerne la Carrière B, la distribution granulométrique est cette fois inversée. Les particules de diamètre compris entre 2.5 et 10 µm sont ici majoritaires, sauf lors de la dernière semaine de mesures, où la hausse des particules fines PM2.5 s'explique très probablement par l'épisode de pollution ayant eu lieu lors de cette semaine de mesures.

Figure 63 : Distribution de la granulométrie des poussières prélevées en phase 1

Cette exploitation des résultats reste soumise à une grande incertitude compte tenu des problèmes techniques rencontrés lors des prélèvements, à noter que toutes les concentrations des particules supérieures à 10 µm ont été invalidées.

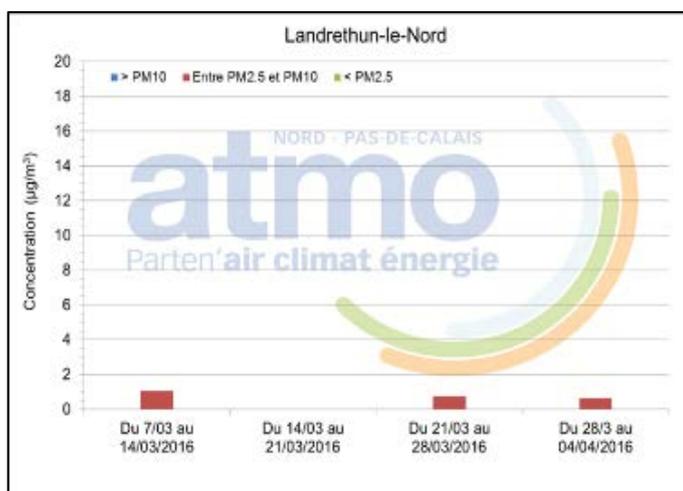
Les résultats obtenus lors de la 2ème phase de mesures, restent, malgré une tentative d'amélioration du système de prélèvement, insatisfaisants : de nombreuses valeurs s'avèrent être encore une fois inférieures à la limite de détection.

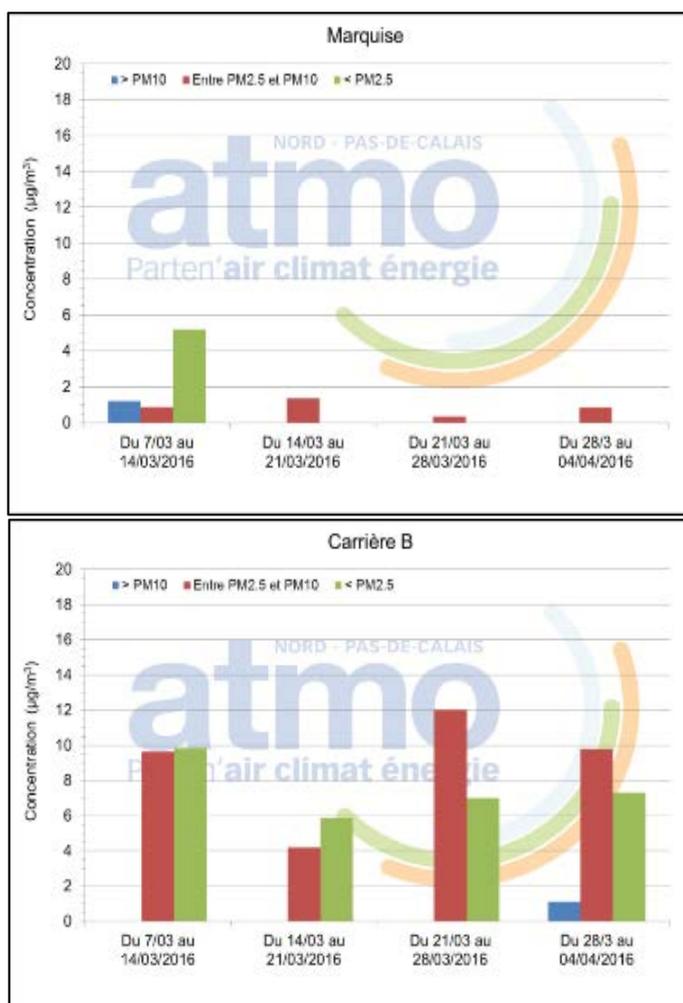
Période de prélèvement	Site de mesures	Volume (m³)	Poussières inférieures à 2.5 µm		Poussières comprises entre 2.5 et 10 µm		Poussières supérieures à 10 µm	
			Masse collectée (mg)	Concentration moyenne (µg/m³)	Masse collectée (mg)	Concentration moyenne (µg/m³)	Masse collectée (mg)	Concentration moyenne (µg/m³)
Du 07/03/16 au	Carrière B	105,8	1,040	9,83	1,020	9,64	< LD	-

Tableau 15 : Granulométrie des poussières prélevées en phase 2

14/03/16	Landrethun-le-Nord	305,6	< LD	-	0,320	1,05	< LD	-
	Marquise	320,6	1,670	5,21	0,280	0,87	0,390	1,22
Du 14/03/16 au 21/03/16	Carrière B	100,3	0,590	5,89	0,420	4,19	< LD	-
	Landrethun-le-Nord	317,7	< LD	-	< LD	-	< LD	-
	Marquise	304,5	< LD	-	0,410	1,35	< LD	-
Du 21/03/16 au 28/03/16	Carrière B	101,5	0,710	7,00	1,220	12,02	< LD	-
	Landrethun-le-Nord	322,9	< LD	-	0,240	0,74	< LD	-
	Marquise	361,2	< LD	-	0,130	0,36	< LD	-
Du 28/03/16 au 04/04/16	Carrière B	99,9	0,730	7,31	0,980	9,81	0,110	1,10
	Landrethun-le-Nord	313,7	< LD	-	0,200	0,64	< LD	-
	Marquise	271,6	< LD	-	0,230	0,85	< LD	-

Phase 2





Les résultats issus de la 2ème phase de mesures montrent et confirment que l'estimation des concentrations, par type de granulométrie, n'est pas représentative. Les filtres des granulomètres ont néanmoins été transmis au LSCE³, les masses collectées par coupure granulométrique étant suffisantes pour réaliser une analyse chimique qualitative. Aucune interprétation n'est donc réalisée sur ces mesures.

Figure 64 : Distribution de la granulométrie des poussières prélevées en phase 2

3.1.7.3. Les poussières sédimentables

Voici les résultats obtenus concernant les poussières sédimentables (jauge Owen). A noter que comme pour les granulomètres, les fractions collectées dans les jauges ont été aussi envoyées au LSCE pour analyses complémentaires.

○ Phase 1

Site de mesures	Volume total d'eau collectée		Masse poussières insolubles (mg)	Masse poussières solubles (mg)	Concentration* (mg/m²/j)
	(mL)	(L/m²)			
Carrière A	8995	136	493	468	521
Carrière B	5277	80	21	63	45
Ferques	8234	125	36	395	339

³ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement : <http://www.lsce.ipsl.fr/>

Landrethun-le-Nord	5973	90	6	24	16
Marquise	6882	104	8	69	42

Tableau 16 : Résultats de retombées de poussières de la phase 1 dans les Hauts de France

$$\text{Concentration} = ((\text{Masse poussières insolubles} + \text{Masse poussières solubles}) \div \text{nombre de jours d'exposition}) \div \text{surface de l'entonnoir de la jauge}$$

Les résultats obtenus montrent que les concentrations de poussières sédimentables sont très variables d'un site à l'autre. La Carrière A est le site où la concentration relevée a été la plus élevée : 521 mg/m²/j. Le site de Ferques connaît également une concentration non négligeable : 339 mg/m²/j. Ensuite, les concentrations obtenues à Marquise et au niveau de la Carrière B sont homogènes entre-elles, avec respectivement 42 et 45 mg/m²/j. Enfin, c'est à Landrethun-le-Nord que la concentration relevée a été la plus faible : 16 mg/m²/j. Ces résultats de retombées de poussières, solubles et insolubles, sont à mettre en lien avec le volume d'eau récolté. Les concentrations les plus élevées ont ainsi été retrouvées au niveau des sites où les volumes d'eau recueillis ont été les plus importants : 136 L/m² d'eau à la Carrière A et 125 L/m² à Ferques (sur la même période, les relevés Météo France affichent une pluviométrie de 104 L/m² à Boulogne-sur-Mer). La répartition n'est effectivement pas homogène. Le graphe ci-dessous indique que les poussières sédimentables ont principalement été retrouvées dans la partie soluble, excepté à la Carrière A, où l'on avoisine 50%-50% de matière soluble et insoluble.

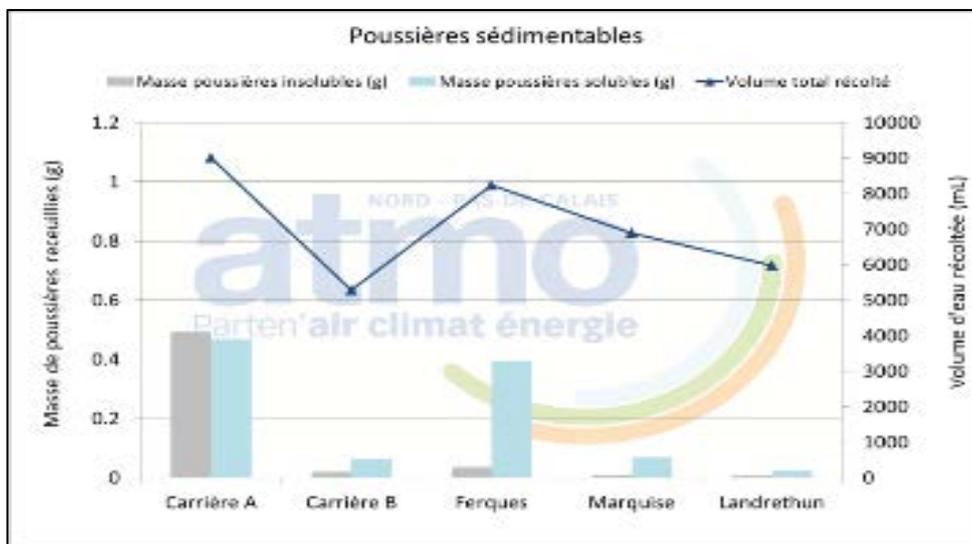


Figure 65 : Distribution des poussières sédimentables sur l'ensemble des sites - phase 1 Hauts de France



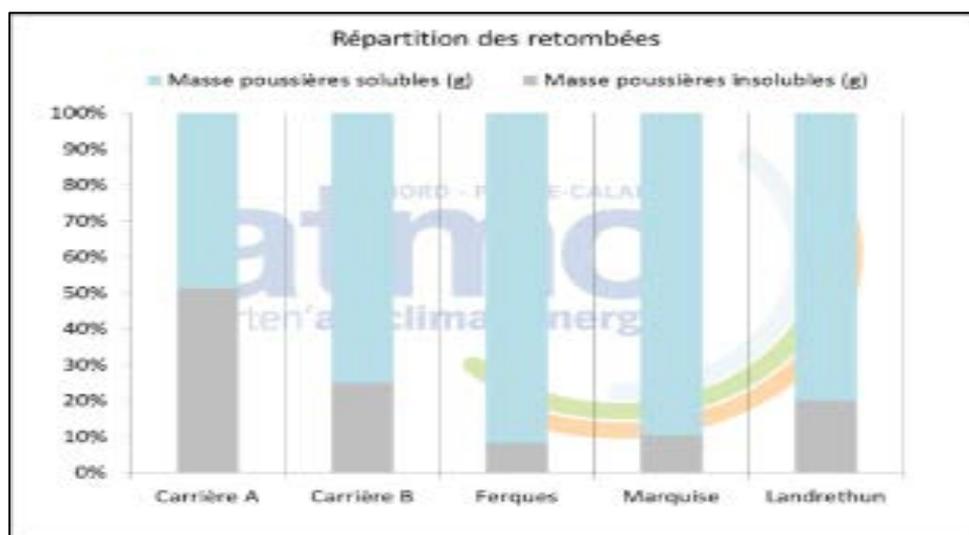


Figure 66 : Répartition des retombées de poussières sur l'ensemble des sites en phase 1 Hauts de France

o Phase 2

Site de mesures	Volume total d'eau collectée		Masse poussières insolubles (mg)	Masse poussières solubles (mg)	Concentration (mg/m ² /j)
	(mL)	(L/m ²)			
Carrière A	2384	52,72	1 159	305	1 152
Carrière B	2461	37,28	258	33	317
Ferques	4170	63,16	31	275	165
Landrethun-le-Nord	3105	47,03	11	224	126
Marquise	2997	45,40	48	138	100

Tableau 17 : Poussières sédimentables (dépôts secs et humides) pour les campagnes 1 et 2 en Hauts de France

Les résultats obtenus en phase 2 montrent que les concentrations de poussières sédimentables restent très variables d'un site à l'autre. La Carrière A est encore une fois le site où la concentration relevée a été la plus élevée : 1 152 mg/m²/j. En revanche, c'est désormais le site de la Carrière B et non le site de Ferques qui connaît également une concentration non négligeable : 317 mg/m²/j. Ensuite, les concentrations obtenues au niveau des sites périurbains diminuent, avec respectivement 165, 126 et 100 mg/m²/j à Ferques, Landrethun-le-Nord et Marquise.

Pour l'ensemble des sites de mesures sauf Ferques, les concentrations obtenues en phase 2 sont supérieures à celles relevées en phase 1. Ces résultats de retombées de poussières, solubles et insolubles, ne semblent pas cette fois être corrélés au volume d'eau recueilli.

La répartition n'est en revanche toujours pas homogène. Le graphe ci-dessous indique que les poussières sédimentables ont principalement été retrouvées dans la partie soluble pour les sites périurbains, tandis que pour la Carrière A, on se situe sur du 80% insoluble et 20% soluble. Pour la Carrière B, on avoisine les 50% - 50% soluble/insoluble.



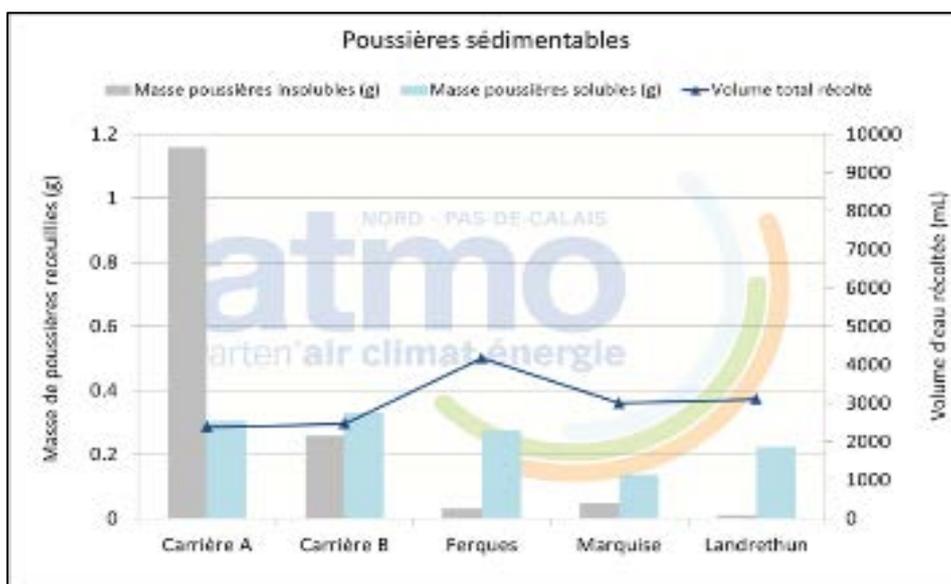


Figure 67 : Distribution des poussières sédimentables sur l'ensemble des sites - phase 2 Hauts de France

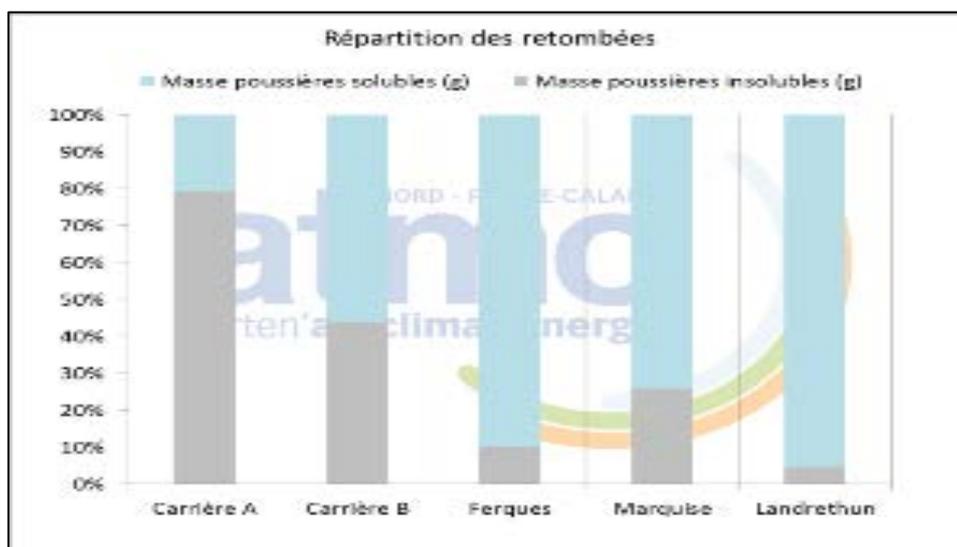


Figure 68 : Répartition des retombées de poussières sur l'ensemble des sites en phase 2

3.1.8. Analyse chimique des particules

3.1.8.1. Résultats des analyses chimiques

Dans cette section III, nous expliquerons la méthodologie de calcul des fractions PM (PM2.5 et PM10) à partir des analyses chimiques (section a). Les résultats d'analyse des poudres (échantillons des roches extraites dans les carrières) et jauges OWEN (dépôts) seront présentés en section b. Puis nous procéderons à une analyse métrologique des résultats d'analyse (section c) dans laquelle nous vérifierons la cohérence de la méthodologie de calcul des PM. Les performances du collecteur de filtre MICROVOL sera présenté en (section d).

L'interprétation des analyses chimiques se focalisera d'abord sur les fractions réglementées PM2.5 (section e) et PM10 (section f) et nous verrons dans ces fractions l'importance des poussières crustales à la fois en champ proche et en carrière, et sur les campagnes été/hiver.



Ensuite, nous focaliserons notre attention sur la fraction « poussières crustales » en section g); nous évaluerons dans un premier temps les espèces chimiques majeures émises par la carrière à partir de la méthode dite des « facteurs d'enrichissement » (section g i); nous verrons également si les caractéristiques des poussières champ proche/carrière sont analogues ou non (section g ii); enfin nous tenterons d'évaluer la distribution granulométrique PM2.5/PM10 des émissions des carrières (section g iii).

a) Méthodologie de calcul de reconstruction de la masse (PM) des particules

Il est possible de remonter aux concentrations atmosphériques des différentes fractions PM à partir de l'analyse chimique des particules suivant l'équation 1 ci-dessous

Équation 1 :

$$[PM] = [EC] + [OM] + [NH_4] + [SO_4] + [NO_3] + [\text{sels de mer}] + [\text{poussières crustales}]$$

De nombreuses études ont montré la solidité de cette relation ; voir par ex. (Bressi M. S., 2013) pour la région Ile-de-France.

- [OM] est la concentration atmosphérique de matière organique calculée à partir de [OC] (mesurée par instrument thermo-optique) suivant la relation : $[OM] = 2.1 [OC]$. Le facteur 2.1 traduit ici le fait que la matière organique n'est pas uniquement constituée de carbone mais aussi d'autres éléments (principalement H, O, N) ; il est inspiré de Turpin & Lim (Lim, 2001) et traduit un aérosol organique « âgé » comme on peut le trouver en zone rurale (cas de cette étude).
- [sels de mer] est la concentration atmosphérique en embruns. Sur la base de la composition ionique de l'eau de mer, on peut estimer cette concentration atmosphérique comme : $[\text{sels de mer}] = [Na] + [Cl] + [ss-SO_4] + [ss-Ca] + [ss-K] + [ss-Mg]$ où « ss-X » traduit la concentration en « sea salt » (e.g dans les sels de mer) de l'espèce X (voir en annexe les concentrations des espèces chimiques majeures des sels de mer).
- [Poussières crustales] est la concentration atmosphérique en poussières terrigènes. Elle est principalement constituée d'oxydes métalliques, fonction de la minéralogie (voir en annexe tableau de correspondance entre composition chimique et minéralogie et la concentration typique présente dans les poussières atmosphériques). Elles sont principalement constituées des éléments suivants : Si, Ti, Al, Fe, Ca et dans une bien moindre mesure Mn, Mg, Na, K, P, S. En première approximation on peut calculer la concentration en poussières crustales suivant l'équation 2 proposée par Malm et al. (al M. e., 2004) :

Équation 2 :

$$[\text{Poussières crustales}] = 2.20[Al] + 2.49[Si] + 1.63 [Ca] + 2.42[Fe] + 1.94[Ti]$$

La silice n'est pas analysée par ICP-MS (notamment parce que les filtres de collection sont en quartz). Dans le cas présent (la carrière n'extrait pas de silice), on peut estimer [Si] à partir des données bibliographiques du rapport [Si]/[Al] qui se situe typiquement entre 0.17 et 0.27 (en moyenne aux alentours de 0.21 (al K. e., 2004) ; (al M. e., 2006) ; (al S. e., 2013)). C'est cette valeur de 0.21 que nous avons adoptée ici pour estimer la fraction de Si dans les poussières crustales.

Le facteur 1.63 prend en compte la forme oxydée du calcium sous forme CaO. Dans le cas présent (extraction de calcaire), nous retenons la forme CaCO₃ comme prédominante, conduisant à un facteur de 2.07 (masse molaire).

Par ailleurs il est important de bien soustraire ici la possible contribution du Ca issu des sels de mer (voir ci-dessus). Cependant, un rapide calcul montre que cette contribution est minime ici (elle contribue à environ 1% du Calcium détecté). Nous avons donc fait le choix de ne pas corriger les valeurs de Ca acquises ici.

b) Echantillons de roches (prélèvements carrière) et dépôts (Jauges OWEN)



Echantillons de roches (prélèvements carrière) : L'analyse chimique de ce type de prélèvement doit nous aider à identifier les éléments chimiques susceptibles d'être émis par les activités d'extraction. Ils sont présentés ci-dessous pour les 2 sites carrière (UM2 et UM3).

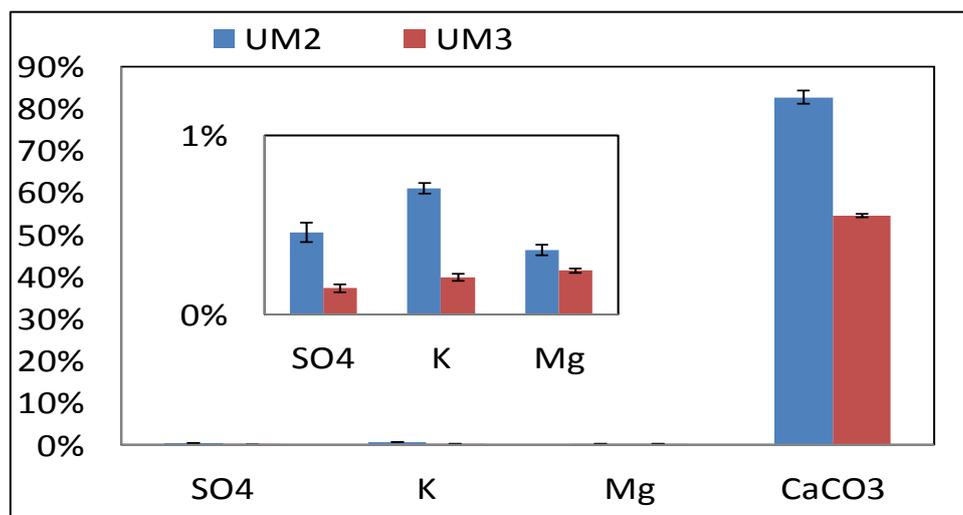


Figure 69 : Résultats des analyses ioniques sur les poudres prélevées en carrières (UM2 et UM3).

La calcite prédomine (98-99% des espèces ioniques analysés). La fraction non déterminée ioniquement contient de l'eau et des métaux trace non analysés.

UM2	Rapport	UM3	Rapport
SO ₄ /Ca	1.4%	SO ₄ /Ca	0.7%
K/Ca	2.1%	K/Ca	1.0%
Mg/Ca	1.1%	Mg/Ca	1.2%

Tableau 18 : Rapports caractéristiques entre les différents éléments pour les 2 sites carrière (UM2 et UM3)

Jauges OWEN : L'analyse de la composition élémentaire des filtres collectés par les jauges OWEN sur l'ensemble de la campagne ETE est rapportée dans la figure ci-dessous. **La signature chimique des retombées sèches/humides en champs proche et en carrière est très différente.** La signature chimique en carrière est, comme attendu, constituée quasi exclusivement de Calcium en lien avec les activités d'extraction de calcaire. La signature chimique en champs proche est caractéristique d'une composition en poussières crustales avec la prévalence des éléments Al, Ca, Fe (pour mémoire Si n'est pas analysé ici car les prélèvements aérosols sont réalisés sur filtre quartz). A noter qu'il n'a pas été possible de faire une analyse ionique sur ces filtres (impossibilité de prélever un « punch » de ce filtre en raison de sa texture). Il n'a donc pas été possible de comparer les rapports S, K, Mg relativement au Ca (comme présenté ci-dessus pour les poussières prélevées en carrière). Il faut également garder en tête la possible dissolution de calcite par lessivage (pluie) sur les filtres (e.g. les filtres ont pu perdre une partie de leur dépôt sec en calcite).



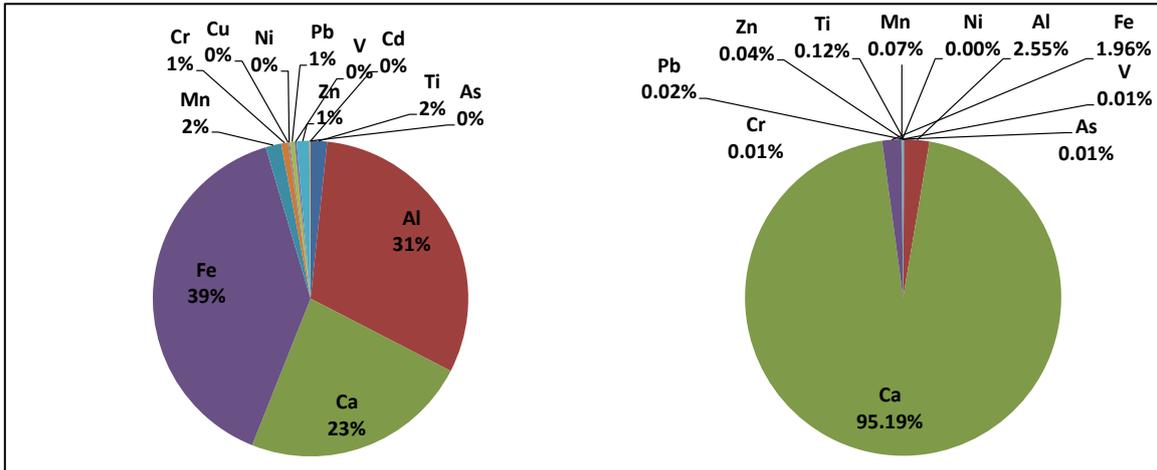


Figure 70 : Composition élémentaire des dépôts mesurés en champs proche (figure de gauche) et en carrières (figure de droite).

La composition ionique des dépôts humides des jauges OWEN a été réalisée sur la campagne HIVER et rapportée dans la figure ci-dessous en moyenne pour les sites carrières (carrières A et B) et champ proche (UM8, UM9). Comme pour les dépôts secs, on retrouve une très nette dominance du calcium en carrières, ce qui n'est pas observé en champ proche. L'importance des ions Cl et Na traduit l'impact des embruns (sels de mer) sur ces dépôts humides.

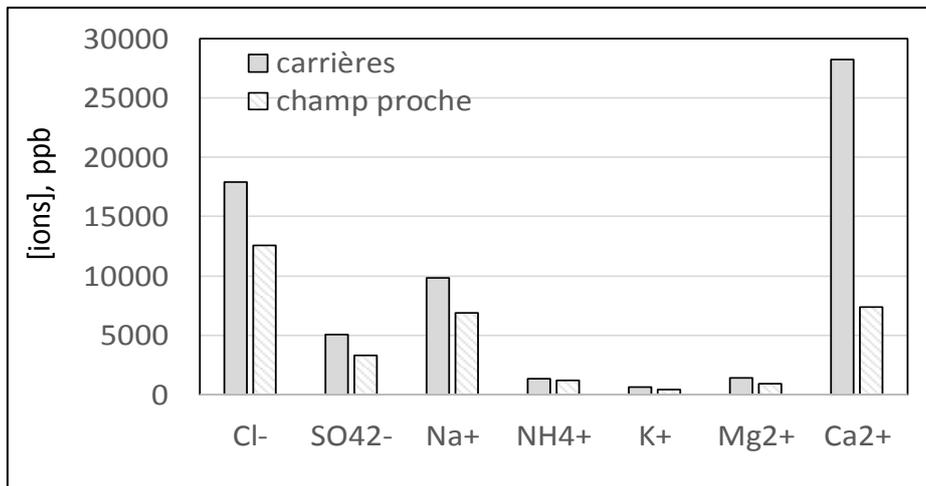


Figure 71 : Concentration des espèces ioniques analysées dans les dépôts humides (pluie)

c) Contrôle métrologique des résultats d'analyse aérosol

Bilan d'analyse : Le bilan des analyses chimiques (été + hiver) est présenté dans le tableau ci-dessous. Seuls les filtres PM10, PARTISOL et PM2.5 DEKATI permettent de reconstruire la masse des PM suivant l'équation E1. En raison de leur dépôt hétérogène d'aérosols, les filtres DEKATI PM2.5-10 et TSP n'ont été analysés qu'en métaux.

L'ensemble des préleveurs a fonctionné correctement sur la campagne ETE à 3 exceptions près :

- Fonctionnement partiel du PARTISOL UM9 sur semaine 4 (26h / 167h)
- Fonctionnement partiel du PARTISOL UM2 sur semaine 2 (130h / 168h)
- Un seul échantillon collecté sur semaine 3+4 pour le PARTISOL UM8.

L'ensemble des préleveurs a fonctionné correctement sur la campagne HIVER à 1 exception près :

- Fonctionnement partiel du PARTISOL UM8 sur semaines 3 et 4 (143h et 141h / 167h)

Aucun problème n'est à relever sur l'analyse chimique ; 100% des filtres reçus ont été analysés et 100% des analyses ont été validées au niveau métrologique ; A savoir un total de 85 analyses ioniques, 69 analyses de carbone, et 129 analyses de métaux.



	Filtres- PM ₁₀ (PARTISO L)	Filtres PM ₁₀ (MICROV OL)	Filtres PM _{2,5} (DEKATI)	Filtres PM _{2,5-10} (DEKATI)	Filtres TSP (DEKATI)	Jauges OWEN	Roches
UM2 (Carrière B)	I,C,M	I,C,M (hiver)	I,C,M	M	M	I,M	I
UM3 (Carrière A)	I,C,M					I,M	I
UM6 (Ferques)	I,C,M					I,M	
UM8 (Landrethn)	I,C,M		I,C,M	M	M	I,M	
UM9 (Marquise)	I,C,M		I,C,M	M	M	I,M	
Nombre échantillons analysés	I = 41 C = 41 M = 41	I = 4 C = 4 M=4	I = 24 C = 24 M = 24	M = 24	M = 24	I = 12 M = 12	I=4

Tableau 19 : Tableau récapitulatif des prélèvements et analyses chimiques réalisées sur les campagnes ETE et HIVER.

NB : I = ions, C= carbone (EC, OC), M = Métaux. Le nombre d'échantillons analysés intègrent les analyses de blanc de terrain. Les cellules grisées correspondent aux sites « carrière » (UM2, UM3). Les cellules hachurées correspondent aux sites en « champ proche » (UM8, UM9). La position géographique du site UM6 hors carrière mais à proximité directe des zones d'extraction est un site intermédiaire aux sites « champ proche » et « carrière ». Il n'a pas été intégré dans l'analyse ci-dessous.

Neutralité ionique : La balance ionique permet de vérifier la neutralité de la solution d'aérosol et de **confirmer la qualité des mesures anions/cations**. Elle est réalisée quand on obtient une pente de 1 entre d'un côté les anions (Cl, NO₃, SO₄) et de l'autre les cations (Na, NH₄, K, Mg, Ca). Les sites « carrières » ont été exclus de cette inter comparaison car ils contiennent beaucoup de CaCO₃ et le CO₃ n'est pas analysé par IC.

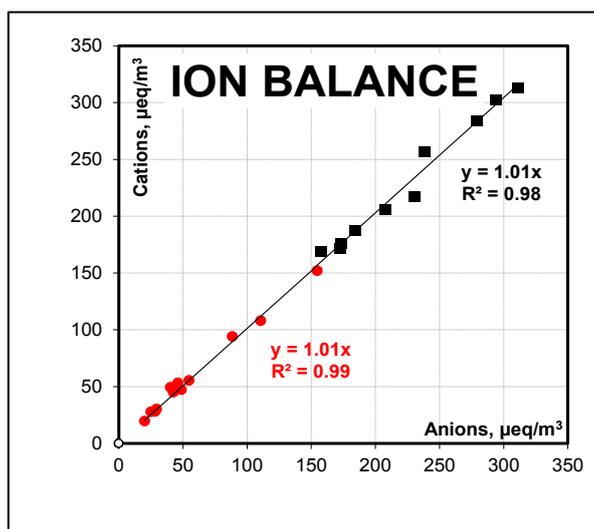


Figure 72 : Balance ionique en rouge pour les prélèvements PM_{2.5} (DEKATI) et en noir pour les prélèvements PM₁₀ (PARTISOL).

Cohérence des analyses chimiques : Celle-ci a été vérifiée par comparaison entre analyse IC et ICP-MS sur plusieurs espèces (figure ci-dessous). Les pentes proches de 1 et les coefficients de corrélation (r^2) très élevés (proche de 1) montrent la qualité/précision des analyses réalisées sur ces 2 instruments. Cette vérification est importante pour le Calcium, composant chimique majoritaire de la carrière B.



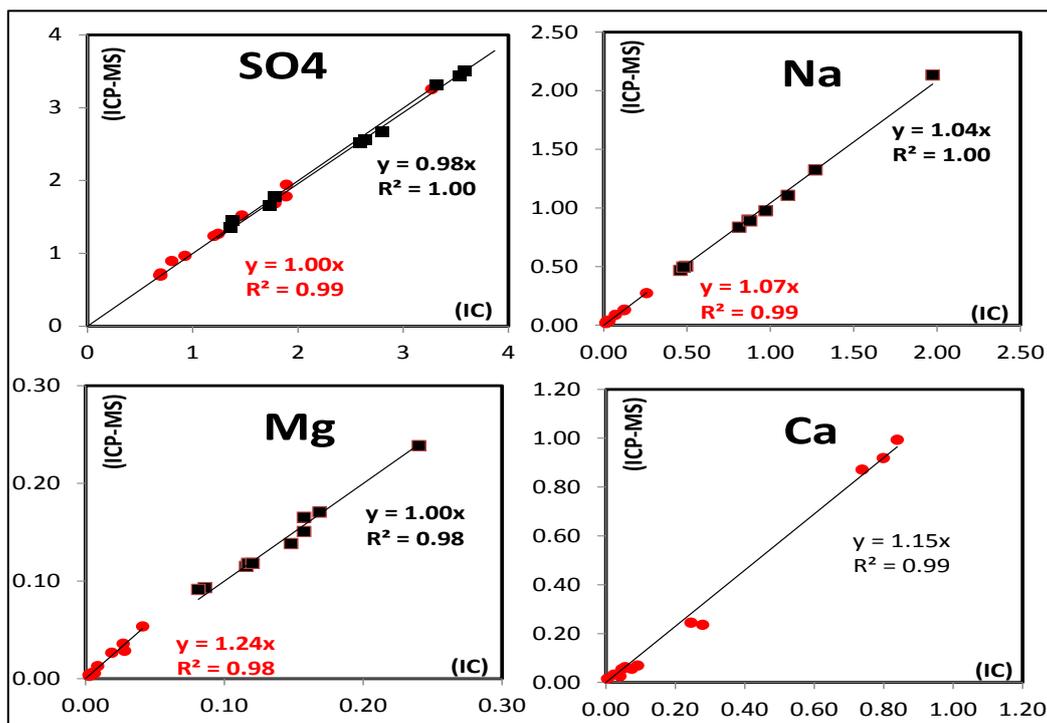


Figure 73 : Comparaison des résultats de chimie obtenus sur plusieurs espèces chimiques (Na, Mg, Ca, SO4) analysés à la fois par IC et ICP-MS.

NB :En rouge les prélèvements PM2.5 (DEKATI) et en noir les prélèvements PM10 (PARTISOL).

Cohérence des fermetures chimiques PM2.5 et PM10 : Nous avons fait plusieurs hypothèses concernant la reconstruction chimique des PM2.5/PM10 et notamment sur le calcul des poussières crustales, ce qui est très important pour notre étude sur les carrières (voir section 3.1.4.1 a). Afin de vérifier la cohérence de ces hypothèses, nous avons rapporté ci-dessous la comparaison de nos calculs PM2.5 et PM10 avec les mesures directes réalisées en continu sur sites par l'AASQA HdF.

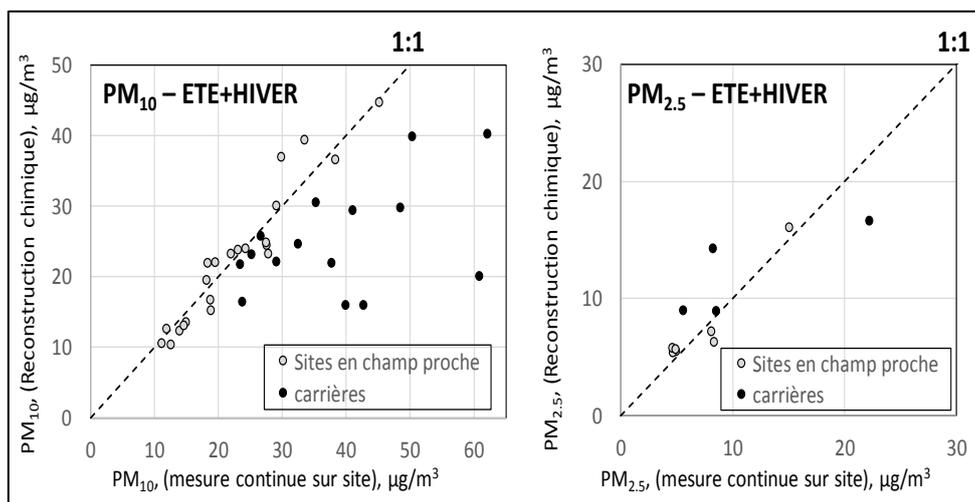


Figure 74 : Comparaison entre PM mesuré directement et en continu sur site et PM calculé par reconstruction chimique

On note une très **bonne cohérence** entre ces 2 mesures de PM (direct et reconstruction chimique) pour les sites en champ proche (UM6, UM8, et UM9 pour PM10 -PARTISOL ; UM8 et UM9 pour PM2.5 -DEKATI). L'ensemble de ces points sont proches de la pente 1 : 1.

En revanche, les résultats ne sont pas bons pour les mesures en carrières. Les mesures en continues sont systématiquement supérieures en PM10 ; pour le PM2.5 pas de tendance (mais forte dispersion).

Cette différence entre champ proche et carrières tient principalement au fait **du caractère très hétérogène des panaches de poussières en carrière** (les différents instruments ne collectent pas exactement à la même hauteur/même endroit) alors qu'en champs proche, le mélange atmosphérique de particules est beaucoup plus homogène (la différence de disposition des instruments importe peu ici).

d) Cohérence des mesures MICROVOL

Rappelons ici que l'intérêt des mesures MICROVOL est de vérifier si ce préleveur est métrologiquement fiable par rapport aux préleveurs PARTISOL (accrédités pour la mesure PM sur filtre). Cette comparaison a été réalisée sur la campagne HIVER en site carrière (UM2). Nous avons restreint ici cette comparaison aux données ioniques (les données métaux conduisent aux mêmes résultats).

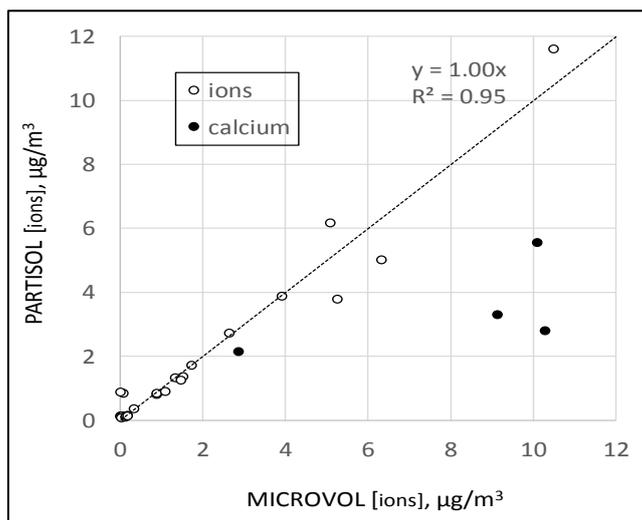


Figure 75 : Comparaison entre les résultats MICROVOL et PARTISOL. Campagne HIVER, PM10, site UM2 (semaines 1,2,3,4)

On trouve **une très bonne cohérence entre les 2 préleveurs** (pente de 1 et coefficient de corrélation r^2 de 0.95) ce qui justifie complètement l'intérêt de l'utilisation de préleveur MICROVOL, bien moins cher que les préleveurs PARTISOL pour ce type d'application (1 prélèvement/semaine). La dispersion autour de la courbe sur les points les plus élevés concerne le nitrate qui est difficile à collecter quantitativement sur filtre en hiver (artefact lié à la nature semi-volatile du nitrate d'ammonium).

En revanche, pour le Calcium il y a une très forte dispersion. C'est le même phénomène qui a été observé précédemment entre les prélèvements filtre PARTISOL et mesures en continue de PM10, qui **confirme ici la nature hétérogène des panaches de poussières qui arrivent sur les préleveurs en carrière** (filtre et/ou continu).

e) Composition chimique moyenne de la fraction PM2.5

Nous présentons dans les figures ci-dessous la composition chimique moyenne des sites « champ proche » (UM8 et UM9) et « carrières » (UM2 et UM3) pour **la fraction PM2.5**. Les concentrations des différentes espèces chimiques sont calculées suivant la méthodologie décrite en section a).



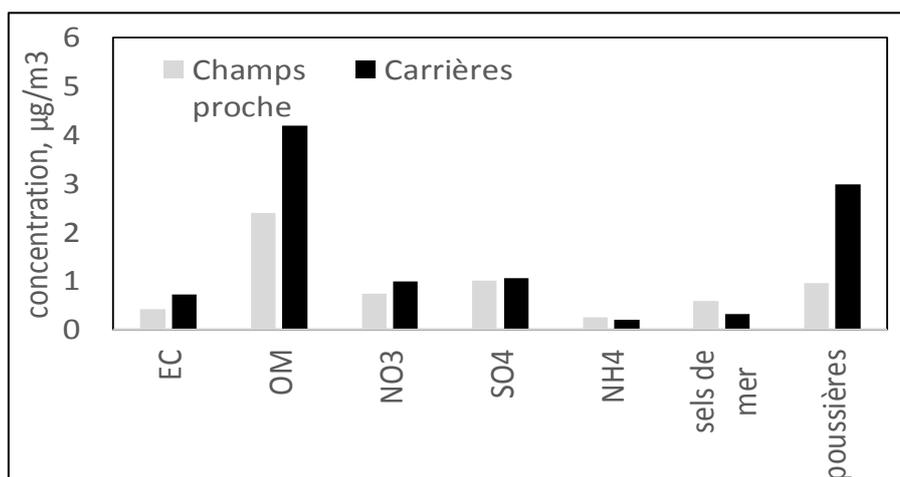


Figure 76 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM2.5. Campagne ETE

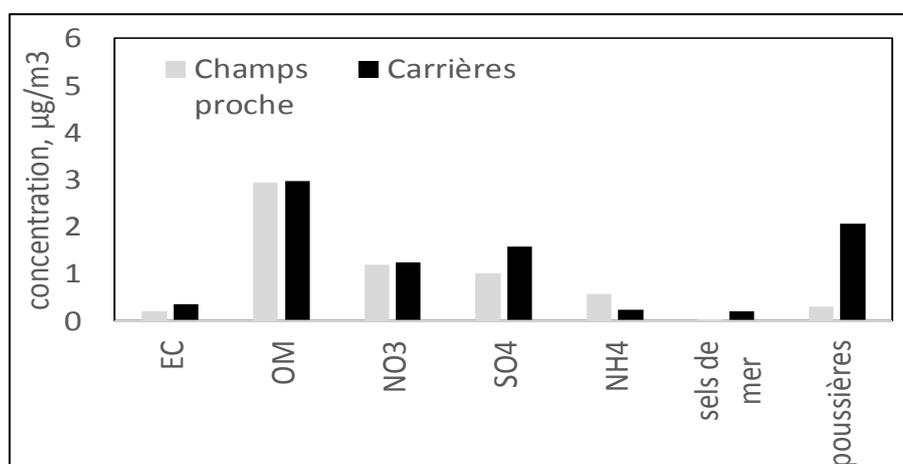


Figure 77 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM2.5. Campagne HIVER

Le tableau ci-dessous rapporte les concentrations en PM2.5 et poussières crustales pour les sites carrières/champ proche et pour les campagnes été/hiver

ETE	[PM _{2.5}] (µg/m ³)	[poussières] (µg/m ³) et %PM _{2.5}	HIVER	[PM _{2.5}] (µg/m ³)	[poussières] (µg/m ³) et %PM _{2.5}
Champ proche	6.2	1.0 (16.1%)	Champ proche	6.3	0.3 (4.8%)
Carrières	10.4	3.0 (28.8%)	Carrières	8.6	2.1 (24.4%)

Tableau 20 : Concentrations PM2.5 et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche et sur les campagnes hiver / ETE

Les concentrations de PM2.5 (été/hiver) sont calculées suivant l'équation 1. Elles sont respectivement de 6.2 et 6.3 µg/m³ pour les sites en champ proche, 10.4 et 8.6µg/m³ pour les sites carrières. Sur les 2 campagnes on trouve plus de PM2.5 en carrière qu'en champ proche. A savoir :

+68% (+ 4.2µg/m³) de PM2.5 en carrière par rapport au champ proche en été

+40% (+2.3µg/m³) de PM2.5 en carrière par rapport au champ proche en hiver

Les valeurs plus élevées de PM2.5 en carrière sont attribuables aux activités d'extraction. Elles restent malgré tout **bien en dessous des valeurs limites Européennes fixées pour le PM2.5** (25µg/m³ en moyenne annuelle). Les conditions sèches observées en été (propices à la remise en suspension des poussières dans la carrière) pourraient en partie expliquer ces fortes valeurs observées entre carrière et champ proche.



Si l'on s'intéresse aux espèces chimiques constituant les PM_{2.5}, on remarque que dans l'ensemble, **les concentrations en espèces chimiques sont très voisines entre champ proche et carrière, à l'exception des poussières crustales, plus élevées en carrière. Le poids des poussières est plus important en carrière (24.4-28.8% des PM_{2.5}) par rapport au champ proche (4.8-16.1% des PM_{2.5})**. L'homogénéité des concentrations des espèces chimiques est attendue en raison de la nature régionale de l'ensemble de ces composantes chimiques (EC, OM, NO₃, SO₄, NH₄, sels de mer). Voir par exemple (Bressi, 2013) pour la région Ile de France. On note malgré tout certaines différences notamment sur la matière organique qui semble plus élevée en site carrière. Néanmoins, il convient de garder en tête que les poussières de carrière contiennent du carbonate qui peut créer un artéfact de mesure de carbone et qui peut augmenter artificiellement EC et OC.

f) Composition chimique moyenne de la fraction PM₁₀

Nous présentons dans les figures ci-dessous la composition chimique moyenne des sites « champ proche » (UM8 et UM9) et « carrières » (UM2 et UM3) pour **la fraction PM₁₀**. Les concentrations des différentes espèces chimiques sont calculées suivant la méthodologie décrite en section a).

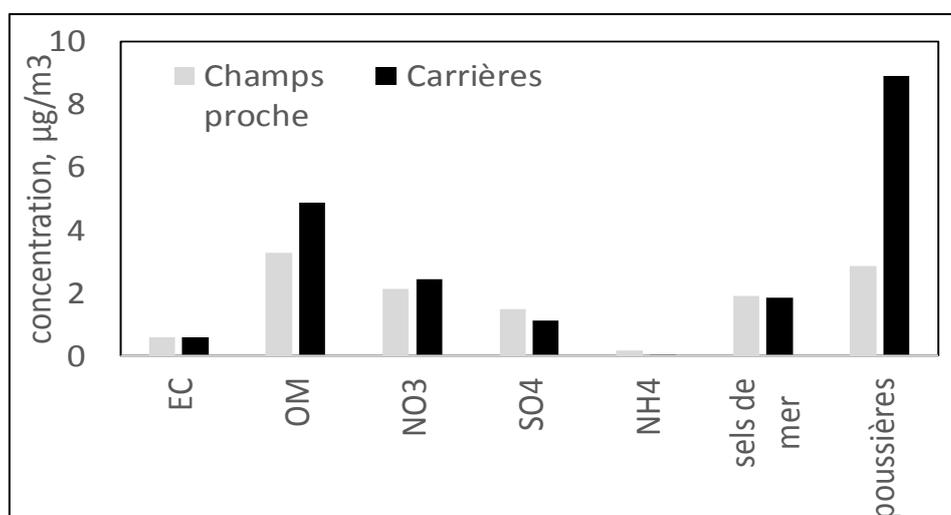


Figure 78 : Composition chimique des espèces principales constituant les PM₁₀ – ETE

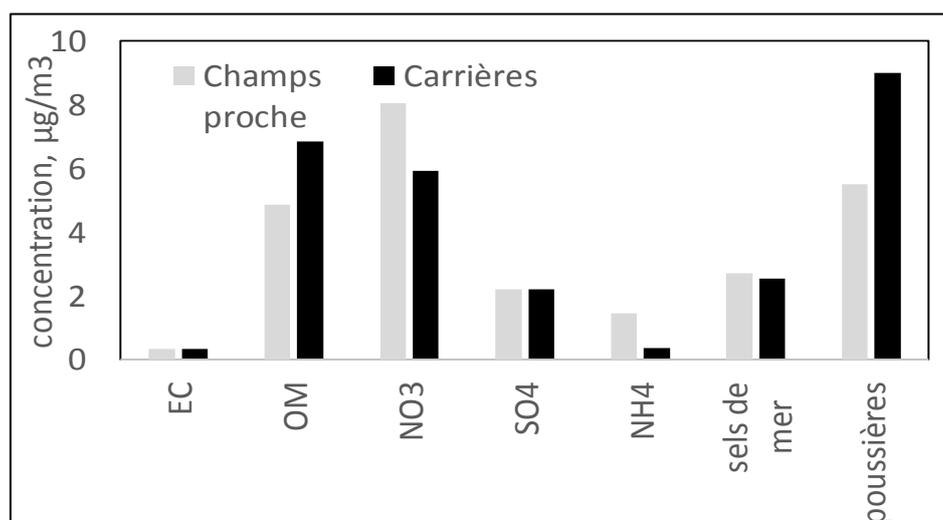


Figure 79 : Composition chimique des espèces principales constituant les PM₁₀ – HIVER



Le tableau ci-dessous rapporte les concentrations en PM10 et poussières crustales pour les sites carrières/champ proche et pour les campagnes été/hiver :

ETE	[PM ₁₀] (µg/m ³)	[Poussières] (µg/m ³) et %PM ₁₀	HIVER	[PM ₁₀] (µg/m ³)	[Poussières] (µg/m ³) et %PM ₁₀
Champ proche	12.4	2.9 (23.4%)	Champ proche	25.1	5.5 (21.9%)
Carrières	19.7	8.9 (45.2%)	Carrières	27.2	9.0 (33.1%)

Tableau 21 : Concentrations PM10 et poussières crustales sur les sites carrières/champs proche et sur les campagnes été/hiver

Les concentrations de PM10 (été/hiver) sont calculées suivant l'équation 1. Elles sont respectivement de 12.4 et 25.1µg/m³ pour les sites en champ proche, 19.7 et 27.2µg/m³ pour les sites carrières. Sur les 2 campagnes on trouve plus de PM10 en carrière qu'en champ proche. A savoir :

+59% (+ 7.3µg/m³) de PM10 en carrière par rapport au champ proche en été.

+8% (+2.1µg/m³) de PM10 en carrière par rapport au champ proche en hiver.

Le poids des poussières est plus important en carrière (33.1-45.2% des PM10) par rapport au champ proche (21.9-23.4% des PM2.5). Les valeurs plus élevées de PM10 en carrière sont attribuables aux activités d'extraction. Elles restent malgré tout bien en dessous des valeurs limites Européennes fixées pour le PM10 (40µg/m³ en moyenne annuelle ; 50µg/m³ en moyenne journalière. Les conditions sèches observées en été (propices à la remise en suspension des poussières dans la carrière) pourraient en partie expliquer la valeur de +50% observée entre carrière et champ proche. Il est intéressant de noter que la différence en PM10 entre champ proche et carrière reste constante sur les 3 premières semaines de la campagne d'été (+47%, +49%, +49%). Il est difficile de conclure sur la 4ème semaine (possible influence de la carrière sur le champ proche). Sur la période hiver, la différence entre PM10 champ proche et carrière est beaucoup plus changeante (de -9 à +31%).

Si l'on s'intéresse aux espèces chimiques constituant les PM10, on remarque que dans l'ensemble **les concentrations sont très proches entre champ proche et carrière, à l'exception des poussières crustales, plus élevées en carrière** (voir explications ci-dessus). On trouve moins de NH₄ en site carrière et là encore on peut expliquer ce phénomène par un artefact de collecte (réaction acide base entre NH₄(SO₄)₂ et CaCO₃ avec émission de NH₃). Ce même artefact peut expliquer la valeur de NO₃ plus faible en site carrière (réaction acide base entre NH₄NO₃ et CaCO₃ avec émission de NH₃).

g) Information Granulométrique des différentes composantes chimiques

Facteur d'enrichissement lié aux activités d'extraction

Les analyses des roches ont, comme attendu, démontré l'importance des émissions de calcite (CaCO₃) pour évaluer si d'autres composés terrigènes ont été co-émis avec la calcite, nous avons évalué le facteur d'enrichissement (EF = Enrichissement Factor) lié aux activités d'extraction pour l'ensemble des éléments trace analysés par ICP-MS. Ce facteur est couramment utilisé dans la littérature pour caractériser les émissions d'une source ponctuelle de particules typiquement riche en métaux (voir par exemple (al G. e., 2002) (al K. e., 2004) (al W. e., 2006) (al L. e., 2011).

Ce facteur EF pour le composé chimique X est défini par l'équation ci-dessous :

Équation 3 :

$$EF_x = [X]_{\text{carrières}} / [X]_{\text{champ proche}}$$

Où [X]_{carrières} est la concentration moyenne de l'espèce X en carrières (UM2 et UM3) et [X]_{champ proche} la concentration moyenne de l'espèce X en champ proche (UM8, UM9). Ces facteurs d'enrichissements sont présentés ci-dessous, pour la fraction PM10 (PARTISOL) sur les 2 campagnes (été/hiver).

- Si EF_x >> 1, la carrière émet le composé X dans l'atmosphère
- Si EF_x environ = 1, la carrière émet le composé X dans l'atmosphère



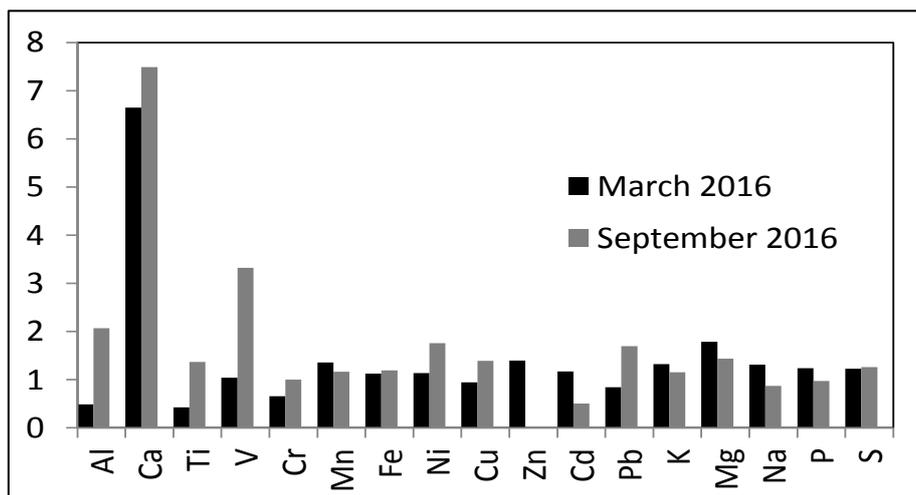


Figure 80 : Facteurs d'Enrichissement en éléments trace en site carrières. Données PM10 (PARTISOL)

On voit ici que **seul le Ca montre un EF très supérieur à 1 pour les 2 campagnes de mesure**, ce qui vient bien confirmer que la calcite est le principal élément émis. Même si on a pu détecter K, Mg, et S dans les échantillons de poudres de roches des carrières, ces composés ne ressortent pas ici clairement en raison de sources régionales importantes de ces composés (sels de mer pour K et Mg, combustion de fuel fossile pour S).

Comparaison de la composition en poussières crustales dans les PM2.5 et PM10

La composition chimique des poussières crustales (calculée suivant l'équation 2) est présentée ci-dessous pour les fractions PM2.5/PM10 et pour les sites carrières/champ proches pour les campagnes été/hiver.

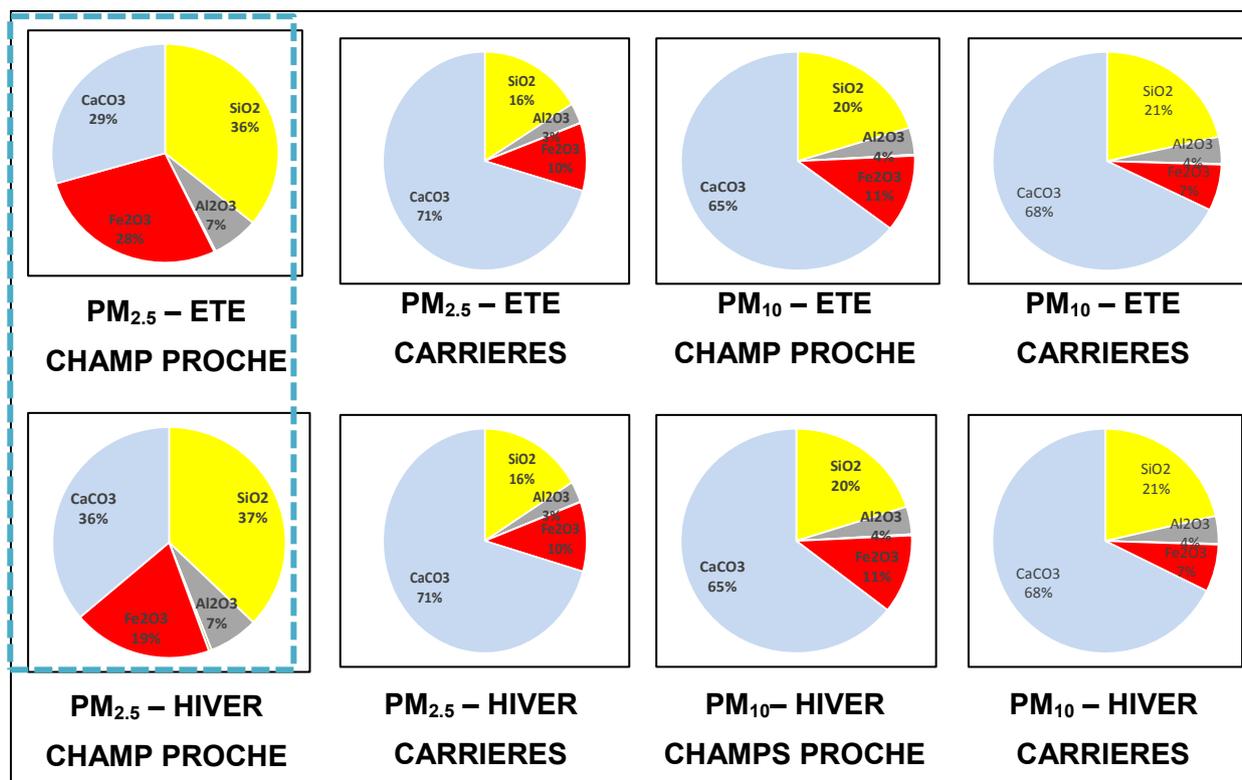


Figure 81 : Oxydes métalliques principaux constitutifs des poussières terrigènes mesurées dans les fractions PM2.5 et PM10 en site carrière/champ proche sur les campagnes été/hiver.

Les fractions PM2.5 et PM10 en sites carrières ont des compositions chimiques très proches en été comme en hiver. On notera que les poussières crustales de la fraction PM10 en champ proche ont une composition chimique très voisine des sites de carrière, ce qui n'est pas le cas dans la fraction PM2.5. **Ces résultats suggèrent que les émissions PM2.5 de poussières des carrières ne sont**

pas la source dominante de poussières crustales en champ proche. Une influence des émissions des carrières, même si elle n'est pas dominante, doit être évaluée de façon plus précise.

On notera que la signature chimique des poussières crustales PM2.5 et PM10 en carrières diffère de la signature chimique des dépôts secs/humides enregistrés par Jauge OWEN. Il convient malgré tout de relativiser ce résultat (trop peu de données de Jauges OWEN pour conclure).

Granulométrie des émissions de carrière

Comme mentionnée en introduction de ce rapport, l'information granulométrique (PM2.5/PM10) des émissions carrière est une donnée très importante dans la contrainte de leur facteur d'émission (inventaires du CITEPA). La figure ci-dessous rapport la variabilité de ce rapport sur les 4 semaines des campagnes été/hiver, sur les sites champ proche/carrières.

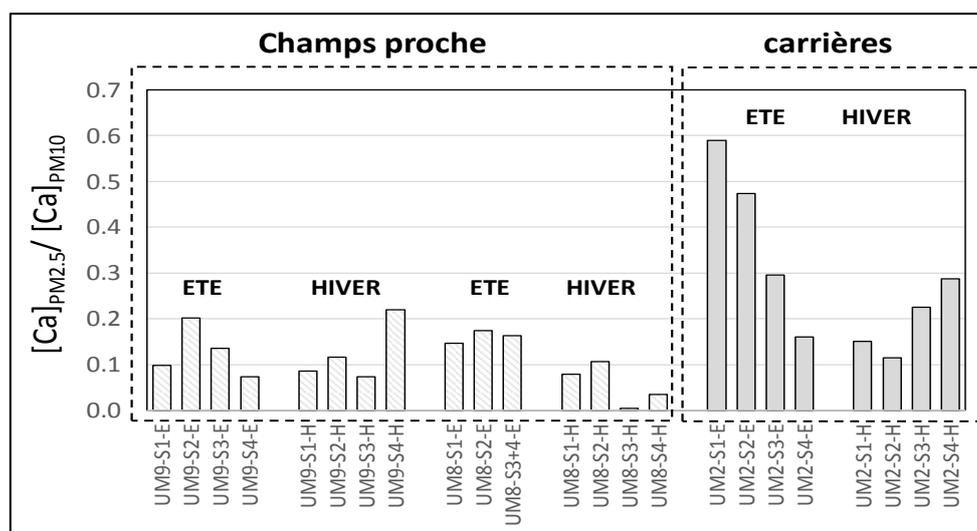


Figure 82 Rapport de concentration PM2.5/PM10 du calcium en champ proche et carrières sur les 4 semaines des campagnes été/hiver.

On remarque notamment que :

- Le rapport PM2.5/PM10 du calcium présente une importante variabilité en champ proche et en carrières. **Il varie de 12 à 59% en carrières. Il semble donc difficile de tirer un rapport caractéristique PM2.5/PM10 pour les émissions des carrières.**
- D'une manière générale ce rapport est bien plus élevé en carrière par rapport au champ proche (29% contre 11%). **L'industrie extractive génère donc une fraction significative de particules de petites tailles** (inférieures à 2.5µm de diamètre) par rapport aux émissions contribuant au fond de pollution régionale.
- En carrière, le rapport PM2.5/PM10 du calcium ne dépend pas de la charge totale (PM10) de calcium (degré d'empoussièrement de la carrière)

En conclusion, et à ce stade, il semble difficile d'expliquer la variabilité observée du rapport PM2.5/PM10 du calcium. Plusieurs paramètres peuvent être responsables de cette variabilité comme, i) l'humidité des sols (favorable à la resuspension des poussières), ii) le vent (qui augmente la remobilisation des poussières déposées et leur dispersion), iii) la pluie (qui lessive les émissions atmosphériques). La très faible résolution temporelle de nos prélèvements (1 mesure / semaine) ne facilite pas l'identification des paramètres contrôlant la variation du rapport PM2.5/PM10.

Afin d'obtenir des rapports PM2.5/PM10 représentatifs des émissions de carrières, nous avons procédé ici à une autre approche non plus basée sur la mesure intégrée (hebdomadaire) d'un traceur spécifique des émissions (Ca) mais

- Sur une **mesure horaire des fractions PM2.5 et PM10** mesurées en continues par ATMO HdF.
- En ne **focalisant que sur les pics intenses** enregistrés sur les sites carrières et que l'on peut attribuer la plupart du temps aux activités d'extraction.

Nous reportons sur la figure ci-dessous le rapport PM2.5/PM10 enregistré sur les périodes été/hiver dans les 2 carrières (UM2 et UM3) et en se focalisant sur des concentrations en PM10 supérieures à 100µg/m³ (valeur fixée arbitrairement pour **isoler aux mieux les pics liés aux activités des carrières** par rapport à la pollution de fond régionale).



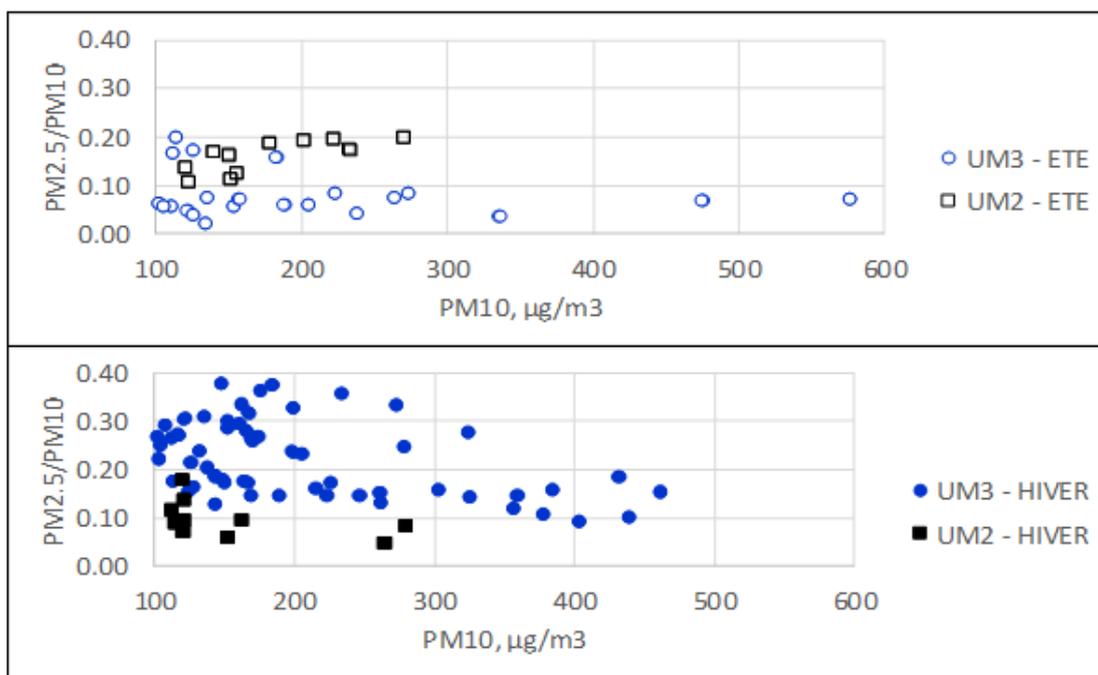


Figure 83 : Rapport de concentration PM2.5/PM10 en fonction des concentrations PM10 en carrières. Valeurs horaires des campagnes été / hiver pour les épisodes > 100 µg/m³

On remarque que globalement, plus les concentrations de PM10 sont élevées, plus les rapports PM2.5/PM10 deviennent stables (peu dispersés) et donc caractéristiques des émissions des carrières. Ces rapports sont synthétisés dans le tableau ci-dessous. Toutes les données au-dessus de la valeur du seuil ont été retenues pour les calculs de moyenne et écart type.

Rapports PM _{2.5} /PM ₁₀	Moyenne	Ecart type	Nombre de données	Valeur seuil PM10
Carrière A (UM3) - ETE	0.07	0.03	24	150
Carrière A (UM3) - HIVER	0.17	0.07	42	200
Carrière B (UM2) - ETE	0.17	0.03	16	150
Carrière B (UM2) - HIVER	0.07	0.02	8	150

Tableau 22 : Rapport des concentrations PM2.5/PM10 en carrières sur les périodes été/hiver

Ce tableau présente des rapports PM2.5/PM10 entre 7 et 17% avec des écarts types relativement faibles qui confèrent à ces rapports un bon niveau de confiance. Ces résultats sont proches de ceux observés par approche chimique (17±14%) avec toutefois un bien meilleur degré de confiance. Ils sont également en accord avec l'étude du CEREGE/AirPACA qui note des rapports PM2.5/PM10 inférieurs à 25% sur les pics de concentration PM10 en carrière (carrière de Bronzo-Perasso, Marseille).

Ces rapports sont représentatifs des émissions carrières et peuvent, à ce titre, être comparées aux rapports PM2.5/PM10 qui peuvent être déduites des données révisées du CITEPA des facteurs d'émission. Ces rapports rapportés par le CITEPA varient typiquement entre 10.3% (roches meubles), 12.9% (roche massive), et 13.5% (recyclage). Ces données sont très comparables à celles obtenues ici.

3.1.8.2. Quantification de l'impact des carrières en champ proche

La méthodologie retenue ici pour la quantification de l'impact des carrières en champ proche est celle dite de « Lenschow » (al L. e., 2001) et notamment utilisée sur la région Ile de France afin de mieux distinguer (les experts utilisent le verbe « déconvoluer ») les parts fond régional/fond urbain/sites de proximité trafic (al G. e., 2012) Son concept est illustré ci-dessous



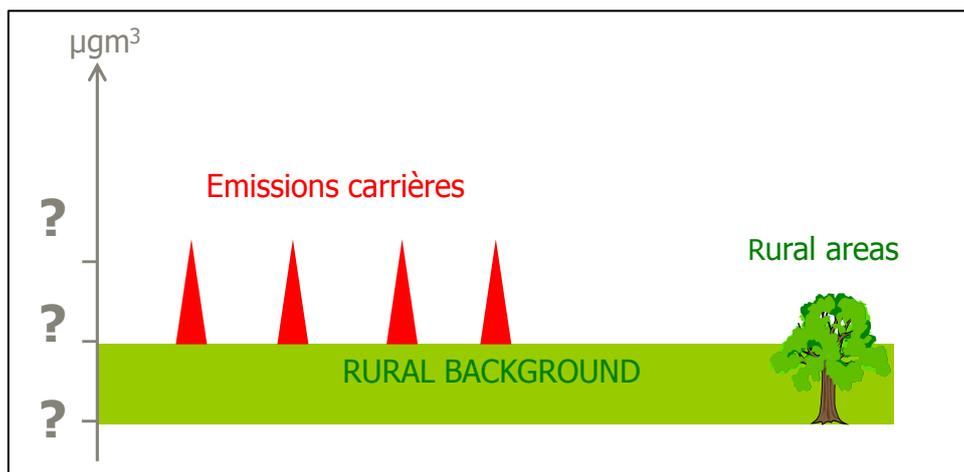


Figure 84 : Principe de la méthodologie de Lenschow. Les sites en champ proche des carrières ont des concentrations en PM qui sont la somme d'un fond régional et d'une contribution des carrières.

La figure ci-dessus s'organise de la manière suivante. Nous avons une concentration uniforme de pollution de fond (que l'on qualifie ici de « rural background »). Cette pollution se retrouve sur tous les sites de mesures et la mesure chimique doit nous aider à calculer la valeur (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de cette pollution de fond pour les fractions PM_{2.5} et PM₁₀. A cette pollution de fond uniforme s'ajoute une pollution locale (matérialisée ici par des pics isolés rouges) et qui représente les émissions des carrières. Ainsi, en carrière, nous aurons la surimposition à la fois de la pollution de fond et des émissions des carrières ; alors que loin des carrières, nous n'aurons que la pollution de fond.

Dans le cas qui nous concerne ici, nous ferons l'**hypothèse que le site en champ proche présentant la concentration la plus faible en Calcium est représentatif du fond régional**. Et donc la concentration en Calcium sur le 2ème site en champ proche est la somme du fond régional et d'une influence des carrières. Cette hypothèse suppose que le site présentant la concentration la plus faible en calcium n'est pas impacté par les carrières. Si cela peut s'avérer être le cas sur une période de quelques heures, cela est moins sur une période d'une semaine (comme c'est le cas de nos prélèvements). Cela conduirait à une sous-estimation de l'impact des émissions de carrières sur le champ proche.

Pour cette raison, nous donnerons une fourchette pour chaque semaine des campagnes été/hiver. La valeur minimale (de la contribution de la carrière en champ proche) sera calculée comme décrit ci-dessous. La valeur maximale (de la contribution de la carrière en champ proche) sera calculée en considérant qu'il n'y a pas de source régionale significative de Calcium en dehors des émissions de carrière. Ce calcul sera fait pour les fractions PM_{2.5} et PM₁₀.

Une fois calculée la contribution en Calcium de la carrière sur le champ proche, nous calculerons cette contribution en termes de poussières crustales en passant de [Ca] à [CaCO₃] (e.g. [CaCO₃] = 2.07[Ca]) puis en passant de [CaCO₃] à [poussières crustales] sur la base des résultats obtenus en section 3.1.4.1 g) ii). (e.g. [CaCO₃] = 0.65 [poussières crustales] pour PM_{2.5} et [CaCO₃] = 0.68 [poussières crustales] pour PM₁₀).

La figure ci-dessous illustre les concentrations de Calcium dans les fractions PM_{2.5} et PM₁₀ pour les 4 semaines des campagnes été/hiver des sites en champ proche et carrière. Ce sont ces données qui vont être utilisées par la méthodologie de Lenschow décrite précédemment.



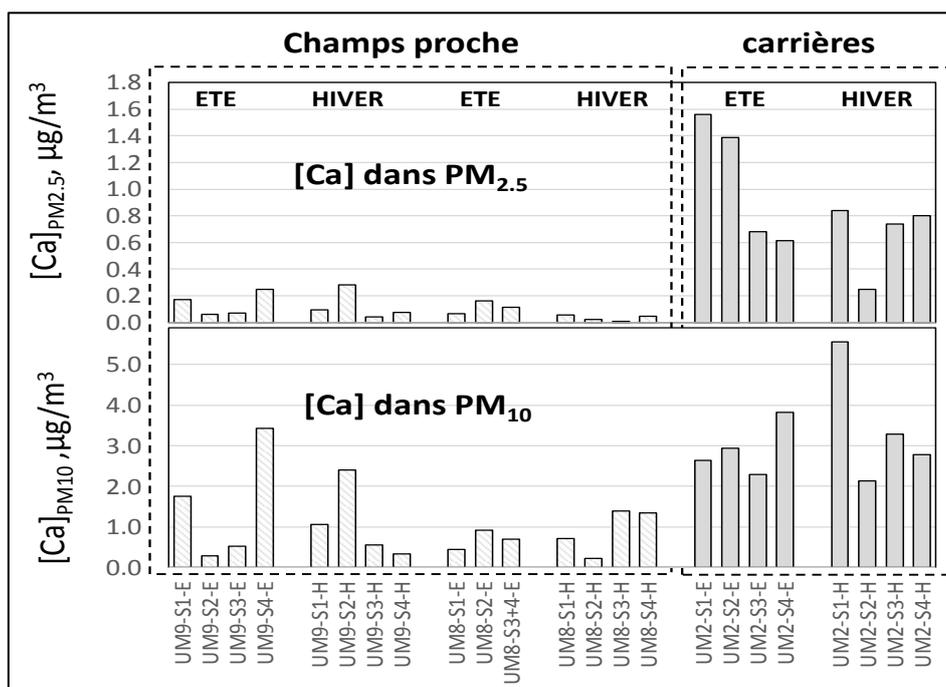


Figure 85 : Variation des concentrations de calcium dans les fractions PM_{2.5} (**figure du haut**) et PM₁₀ (**figure du bas**). Figure obtenue pour les 4 semaines des campagnes été/hiver et pour les sites en champ proche (UM8, UM9) et carrière (UM2). Sx est la xème semaine. E pour été, H pour hiver

Nous présentons ci-dessous, pour chaque semaine et chaque campagne (été/hiver), les sites en champ proche impactés par les émissions carrières, l'apport (minimum/maximum) en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des poussières crustales des carrières sur ces sites dans les fractions PM_{2.5} et PM₁₀, et enfin la contribution de cet apport par rapport aux concentrations de PM_{2.5} et PM₁₀ sur ces sites :

Site en champ proche	Contribution des émissions carrière sur [PM _{2.5}] en champ proche		Contribution des émissions carrière sur [PM ₁₀] en champ proche	
	MIN-MAX ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MIN-MAX (%)	MIN-MAX ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MIN-MAX (%)
UM9-S1-E	0.34-0.55	4.7-7.6	3.96-5.32	23.8-32.0
UM9-S3-E	0.29-0.65	3.1-6.9	6.09-8.24	25.0-33.8
UM8-S2-E	0.32-0.51	5.6-8.9	1.91-2.81	17.1-25.2
UM9-S1-H	0.11-0.29	0.8-2.0	1.09-3.25	2.8-8.3
UM9-S2-H	0.81-0.89	10.0-10.9	6.62-7.31	22.1-22.4
UM8-S3-H	0.00-0.02	0.0-0.3	2.56-4.25	10.8-17.9
UM8-S4-H	0.00-0.15	0.0-3.9	3.08-4.12	14.0-18.7
MOYENNE	0.27-0.44	3.4-5.6	3.62-5.04	15.6-21.1

Tableau 23 : Contribution des émissions des carrières en champs proche. Les sites régulièrement sous le vent des carrières sont en bleu. Les sites régulièrement au vent sont en rouge

NB : La numérotation des sites est similaire aux précédentes figures. Sx est la xème semaine. E pour été, H pour hiver.

Le site UM9 (Marquise) a été identifié comme site en champ proche impacté par les émissions pendant 5 sur les 8 semaines d'étude (S1-E, S3+S4-E, S1-H, S2-H) ; le site UM8 (Landrethun) a été impacté sur 3 semaines (S2-E, S3-H, S4-H). A l'exception de S1-H, le site UM9 semble être

davantage impacté par les émissions des carrières quand celui-ci est sous le vent des carrières. On note que :

- **L'impact des émissions carrières de [PM2.5] en champ proche reste très faible (entre 3.4 et 5.6% des [PM2.5]).**
- **L'impact des émissions carrières de [PM10] en champ proche est visible mais reste globalement assez faible avec malgré des contributions légèrement supérieures (entre 15.6 et 21.1% des [PM10]).**

Même si on observe davantage de poussières crustales en suspension dans l'air en été par rapport à l'hiver, **l'impact des émissions carrières sur le champ proche ne semble pas suivre de tendance saisonnière.**

Enfin, il est important de préciser ici qu'il existe d'autres techniques d'estimation de la source **poussières crustales - carrières** (et son impact sur les PM en champs proche). C'est le cas de l'analyse statistique PMF (Positive Matrix Factorization). Nous avons tenté d'intégrer l'ensemble des résultats chimiques obtenus sur ces campagnes été/hiver sur une PMF (US EPA ver 5.0). Même si nous avons pu sortir une source **poussières crustales** à forte teneur en Calcium, le profil chimique de cette source ne nous a pas semblé correct (contenant notamment une fraction non négligeable de NO₃/SO₄). Ceci s'explique notamment par le très faible nombre d'échantillons atmosphériques obtenus sur ces campagnes été/hiver (l'outil PMF a besoin d'un très grand nombre d'échantillons). Nous avons choisi de ne pas montrer ici ces travaux sur l'outil PMF.

3.1.9. Conclusions et interprétations pour le Bassin de Marquise

Les mesures des concentrations réalisées sur le bassin de Marquise (Pas de Calais - 7 septembre au 5 octobre 2015 et 7 mars au 4 avril 2016) ont fait l'objet de l'analyse détaillée par ATMO Hauts de France, avec l'appui des éléments d'exploitation des professionnels concernés ; les principaux enseignements ont été présentés (3.1). Pour les analyses, retenons d'abord que les analyses des échantillons prélevés ont montré un très **bon accord entre les techniques IC et ICP-MS** sur les espèces communes (Na, Mg, Ca, SO₄), 3) et une **très bonne cohérence des exercices de fermeture chimique permettant de calculer PM2.5 et PM10 sur chaque site et chaque campagne, ainsi qu'entre les échantillons prélevés avec différents appareils** (MICROVOL et PARTISOL). Afin de relier la composition des poussières avec la nature des roches extraites, des échantillons ont également été prélevés en carrière, montrant le **poids majoritaire du calcium** (extraction de calcaires CaCO₃). L'analyse du facteur d'enrichissement (EF) réalisée sur les 2 campagnes (été/hiver) montre qu'il n'y a que le Ca qui possède un EF très supérieur à 1. **Il n'y a donc que le calcium qui soit suffisamment discriminatif des émissions carrières** (les autres oxydes métalliques issus des poussières crustales ne ressortent pas clairement).

Ainsi les déductions découlant de l'approche par les concentrations peuvent être complétée et renforcée par l'approche chimique, se dégagent les tendances suivantes :

- D'une manière générale, les **courbes de concentrations PM2.5 et PM10 se suivent pour les trois sites de mesures périurbains**. Les deux sites implantés au sein des carrières, eux, se distinguent des trois sites en champs proches par des comportements spécifiques, de nombreuses valeurs isolées et élevées du fait de la très grande proximité des sources d'émissions et de la configuration des lieux. Cette distinction entre sites en champs proches et carrières se retrouve également dans les résultats des retombées atmosphériques et des caractérisations chimiques.
- Les carrières produisent et libèrent dans l'air des particules, **majoritairement des PM10** Les concentrations les plus élevées en PM2.5 y ont été relevées. Par exemple, la station de mesure de la carrière A à proximité des installations de concassage-criblage, dans un milieu encaissé donc peu exposé aux vents, montre des valeurs moyennes élevées ; de même l'autre site pour la Carrière B se situe aux abords des installations non loin du poste de chargement des trains, mais à un endroit surélevé et bien dégagé ce qui explique des concentrations moindres. A noter que les concentrations en particules relevées pour la carrière A sont anti-corrélées à la vitesse de vent : plus la vitesse du vent est faible plus les concentrations augmentent.
- En termes de concentrations en poussières, un impact potentiel de l'activité des carrières sur les concentrations en particules en suspension PM10 au niveau des sites périurbains de Ferques et Marquise est possible mais non systématique : d'autres sources locales potentielles (agricole, urbaine...) peuvent également influencer les concentrations en PM10 observées. En **extrapolant l'étude** faite sur une seule année civile, les **trois sites périurbains respecteraient les valeurs réglementaires**, que ce soit en moyenne journalière

ou en moyenne annuelle. Pour les carrières, la comparaison aux valeurs réglementaires en air ambiant est faite à titre indicatif uniquement puisque la réglementation dans les ICPE est différente. Le site de la Carrière A dépasserait les valeurs réglementaires en moyenne journalière et en moyenne annuelle civile, et le site de la Carrière B dépasserait probablement la valeur réglementaire en moyenne journalière sur une année complète.

- La chimie confirme cette prévalence de la fraction PM10 : on retrouve systématiquement plus de poussières crustales en carrières par rapport au champ proche (+59% en été, +8% en hiver). **Les concentrations en espèces chimiques sont très voisines entre champ proche et carrière, à l'exception des poussières crustales, plus élevées en carrière.**
 - En ce qui concerne les concentrations en **particules fines PM2.5**, les carrières semblent peu émettrices et aucune influence des activités des carrières n'a été démontrée sur les concentrations relevées au niveau des trois sites périurbains alentours. Si l'on compare, en extrapolant, les valeurs obtenues à la **valeur réglementaire, celle-ci serait respectée sur l'ensemble des sites de la zone d'étude, carrières comprises.**
 - Par contre, pour la fraction **PM2.5**, la chimie précise ce que les mesures de concentrations ne permettent pas de voir. On retrouve systématiquement plus de poussières crustales en carrières par rapport au champ proche (+68% en été, +40% en hiver). Les concentrations en espèces chimiques sont très voisines entre champ proche et carrière, à l'exception des poussières crustales, plus élevées en carrière. L'industrie extractive génère donc **une fraction significative de particules de petites tailles (inférieures à 2.5µm de diamètre) que seules les analyses chimiques permettent d'identifier.**
 - La différence de composition en oxydes métalliques présents dans les poussières crustales révèle, en comparant champs proches/carrières, que **les émissions PM2.5 de poussières des carrières ne sont pas la source dominante des poussières crustales en champ proche.**
 - Le rapport PM_{2.5}/PM₁₀ du calcium présente une importante variabilité en champ proche et en carrières. Il varie de 12 à 59% en carrières. Il semble donc difficile de tirer par la chimie des particules un rapport caractéristique PM_{2.5}/PM₁₀ pour les émissions des carrières. Cependant, en reprenant les données des analyseurs en continu d'ATMO, on peut constater (pour des concentrations supérieures à 100 µg/m³) que ce rapport pourrait être une caractéristique des émissions en carrières avec des valeurs **PM_{2.5}/PM₁₀ entre 7 et 17% pour les épisodes mesurés ici** (voir figures 82 et 83). Il est pertinent de noter ici que **ces rapports sont comparables à ceux révisés récemment par le CITEPA** pour les facteurs d'émission des carrières (aux alentours de 13%).
 - L'utilisation de la méthodologie dite de **Lenschow** a permis d'estimer de façon quantitative l'impact des émissions "carrière" en champ proche (c'est-à-dire sur les sites UM8 et UM9 éloignés à 2.5-4km des sites d'exploitation) :
- **L'impact des émissions carrières de [PM10] en champ proche est visible avec des contributions supérieures (entre 15.6 et 21.1% des [PM10]).**
- **L'impact des émissions carrières de [PM2.5] en champ proche reste très faible (entre 3.4 et 5.6% des [PM2.5]).**
- En termes de **retombées atmosphériques**, des différences s'observent entre les deux campagnes : davantage de poussières ont été relevées en phase 2, sauf pour le site de Ferques qui avait été plus exposé à l'influence de la carrière A en première campagne. Systématiquement, ce sont les **carrières qui enregistrent les dépôts (secs et humides) les plus importants, soulignant qu'elles fonctionnent également comme puits des particules en suspension.** La chimie met en évidence la nette dominance du calcaire dans l'analyse des dépôts secs et humides collectés par les jauges OWEN en carrières (le calcium constitue 95% de la masse chimique caractérisée par ICP-MS).
 - Même si les concentrations de calcium des dépôts secs/humides en champ proche ne sont pas nulles, on ne retrouve pas la même dominance du calcium sur ces sites. **L'impact des émissions de carrières sur les dépôts secs/humides en champs proche ne semble pas être très important.** Il n'est pas possible de conclure plus avant (la présence de calcium en champs proche peut avoir une origine régionale).
 - La **signature chimique des dépôts secs/humides enregistrés par Jauge OWEN en carrières semble différer de la signature chimique des poussières crustales PM2.5 et PM10.** La topographie des carrières conduit à leur faire jouer le rôle de puits par rapport aux particules en suspension dans l'air, certaines d'entre-elles ne venant pas de l'extraction pourraient expliquer cette différence chimique. Il conviendra de compléter cet aspect sur



- d'autres sites avec des analyses complètes des éléments pour préciser les relations entre les informations obtenues par Jauge OWEN et celles issues des fractions PM en carrière.
- L'éloignement (de quelques mètres) des différents préleveurs atmosphériques (mesure en continue des PM et échantillonneurs filtre) met à la lumière des différences de concentrations en poussières ce qui souligne le **caractère très localisé des panaches de poussières en termes d'émissions comme en termes de retombées en carrière.**
 - A noter que d'autres outils métrologiques (comme les compteurs optiques) sont bien mieux adaptés que la chimie pour décrire la granulométrie des émissions en carrière. Ce type d'instrumentation n'était pas disponible au cours de l'étude.
 - Même si on observe davantage de poussières crustales en suspension dans l'air en été par rapport à l'hiver, **l'impact des émissions carrières sur le champ proche ne semble pas suivre de tendance saisonnière.**

3.2. Modélisations Bassin de Marquise

Le premier objectif de cette partie est de venir confirmer ou infirmer les facteurs d'émissions issus de l'approche AP-42 et calculés par une méthodologie mise en place par le CITEPA. Pour rappel, en Provence Alpes Côte d'Azur, la profession a réalisé une première modélisation avec AIR PACA suite aux suivis de 2013-2014.

La méthodologie mise au point pour l'estimation des émissions de poussières de l'industrie extractive sera présentée. Pour discuter de la pertinence de ces facteurs, une validation du modèle sera effectuée à partir de la comparaison statistique des concentrations mesurées par des laboratoires mobiles placés au sein même des carrières et sur des zones amont/aval du site. Des illustrations cartographiques témoignant de l'état de la qualité de l'air seront présentées.

3.2.1. Paramètre de la modélisation

3.2.1.1. Modèle ADMS URBAN

La modélisation de la qualité de l'air, un outil en développement

Dans de nombreux domaines d'études, comme celui de l'environnement, les moyens de calcul numérique permettent aujourd'hui de « simuler », ou « modéliser », de nombreux phénomènes qu'il nous est difficile de mesurer et d'observer. En pollution atmosphérique, la modélisation permet de déterminer les concentrations de divers polluants sur un territoire étendu où l'on ne dispose pas d'un grand nombre de stations de mesure fixes. La modélisation de la dispersion de polluants atmosphériques repose sur la résolution numérique du comportement d'un grand nombre de variables physiques et d'espèces chimiques (équations physiques et chimiques), en essayant de refléter la grande complexité des réactions se produisant dans l'atmosphère. La modélisation est un outil permettant de répondre à des attentes réglementaires et sanitaires, elle sert donc d'étude à l'appui pour de nombreux décideurs publics dans l'évaluation environnementale de projets locaux. En effet, sur la base d'indicateurs de suivi représentatifs de la pollution, des planifications réglementaires à court terme ou long terme peuvent être entreprises par les pouvoirs publics, comme les plans de protection de l'atmosphère (PPA), les études d'impact environnementales et d'évaluation de la qualité de l'air à l'échelle de l'agglomération ou d'un quartier.

Physique du modèle

Atmo Hauts-de-France a choisit pour réaliser ses modélisations annuelles d'utiliser le logiciel ADMS-Urban qui est une version du système de modélisation de dispersion atmosphérique développé par les chercheurs du CERC (Cambridge Environmental Research Consultant). Il est actuellement commercialisé en France par la société Numtech qui est le référent technique pour tout besoin opérationnel. La version utilisée pour cette étude est « ADMS Urban, V3.4 ».



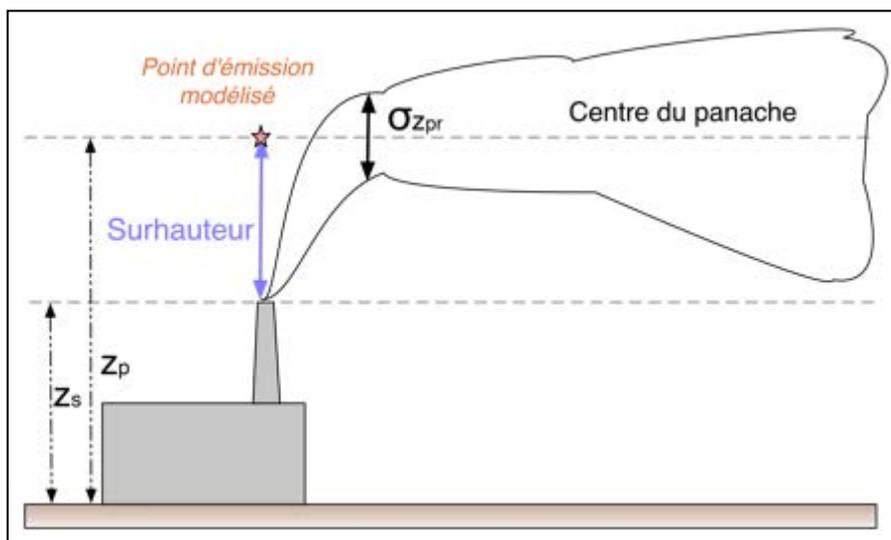


Figure 86 : Schéma de dispersion d'un panache sous ADMS-Urban

Elle intègre différents modules couplés qui décrivent les effets complexes de la dispersion des effluents : topographie (relief et rugosité de la zone, particulièrement important dans une carrière), turbulence liée au trafic, phénomènes météorologiques particuliers (inversion de température). D'un point de vue physique, le modèle s'appuie sur des équations décrivant une distribution gaussienne de l'évolution des concentrations. Ce modèle gaussien consiste à supposer que la dispersion des polluants à partir de leurs différents points d'émissions s'effectue à l'intérieur du panache dont la répartition des concentrations est gaussienne par rapport à l'axe du panache. La Figure 86 illustre l'ouverture du panache selon un modèle gaussien, pour une hauteur modélisée Z_p . La variable calculée par ADMS en fonction des paramètres d'écoulement et météorologiques est la diffusion turbulente σ . Finalement, pour un même écoulement la dispersion des polluants dépend intégralement des conditions météorologiques.

Le module chimique

Les polluants qui font l'objet de cette étude sont les particules PM10. L'inventaire des émissions utilisé pour cette étude répertorie les émissions de chaque polluant par secteur d'activité, sur l'année de référence 2012. Quand ces polluants sont émis directement par une source d'activité dans le milieu extérieur, on parle alors de polluants primaires. On inventorie donc les sources de pollution directes, afin d'injecter au modèle cette pollution primaire sur l'ensemble du périmètre d'étude.

Cependant, ces polluants étudiés peuvent être formés dans le milieu extérieur de manière indirecte, par des réactions faisant intervenir d'autres composés chimiques précurseurs de transformations. On parle alors de polluants secondaires. Pour tenir compte de cette réalité, ADMS possède un module avancé qui retranscrit de manière plus simplifiée la chimie troposphérique réelle. Le schéma chimique comprend les réactions qui gouvernent l'oxydation du dioxyde de soufre SO_2 menant à la formation de particules de sulfate d'ammonium, répertoriés dans ADMS comme des particules fines PM10 et PM2.5. Les réactions de cette chimie des sulfates sont détaillées en annexe § 7.4. C'est pourquoi, on le verra par la suite, on a renseigné pour chaque source d'émission quand cela est possible la quantité de SO_2 émise.

Les grandes étapes d'une étude de modélisation

La figure ci-après reprend les différentes étapes à réaliser pour mener à bien une modélisation de la dispersion des polluants sur un territoire. On peut retenir trois grandes phases de production :

- Le prétraitement de données en entrée de modèle, où l'on paramètre le modèle (météo, topographie, grille de sortie etc.) et où l'on définit qualitativement et quantitativement les sources d'émissions (géométrie, hauteur, taux d'émission etc.)
- Une phase intermédiaire de calage du modèle sur la mesure de terrain, pour s'assurer que le modèle décrit une situation proche de la réalité. L'ajustement de certains paramètres d'entrée est possible si cela est nécessaire, et le choix de la pollution de fond est validée par des calculs de scores statistiques entre la mesure et le modèle.



- Le post-traitement des données issues des calculs numériques, qu'il faut pouvoir traduire au format cartographique sur l'ensemble de la zone d'étude. Des techniques d'interpolation géostatistique sont d'usages lors de cette phase.

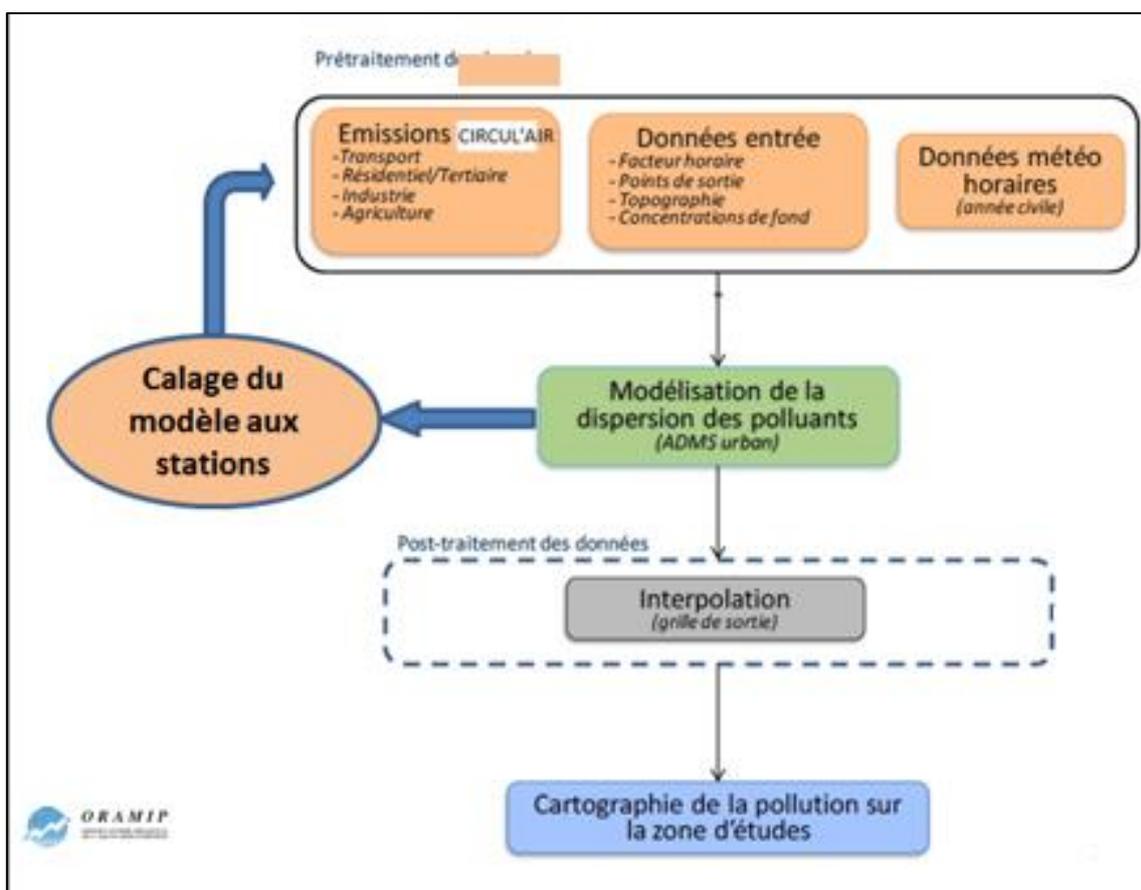


Figure 87 : Schéma général pour la construction d'une modélisation avec le modèle ADMS-Urban

Domaine de simulation

Le périmètre d'étude (cadre rouge) figure ci-dessous, au sein duquel les concentrations en polluants sont calculées, est centré sur les carrières A et B. Il comprend entièrement ou en partie un ensemble de 10 communes du bassin (fond jaune). D'une **dimension de 8 par 6 km**, il inclut l'ensemble des sources d'émissions anthropiques de la zone, tout particulièrement celles liées aux activités de l'industrie extractive. La dimension du domaine permet de prendre en compte les sources de polluants extérieures aux carrières et ainsi considérer l'ensemble des sources de pollutions locales. Les stations mobiles de mesure déployées lors des campagnes de terrain sont dans le périmètre d'étude et sont matérialisées par une étoile violette.



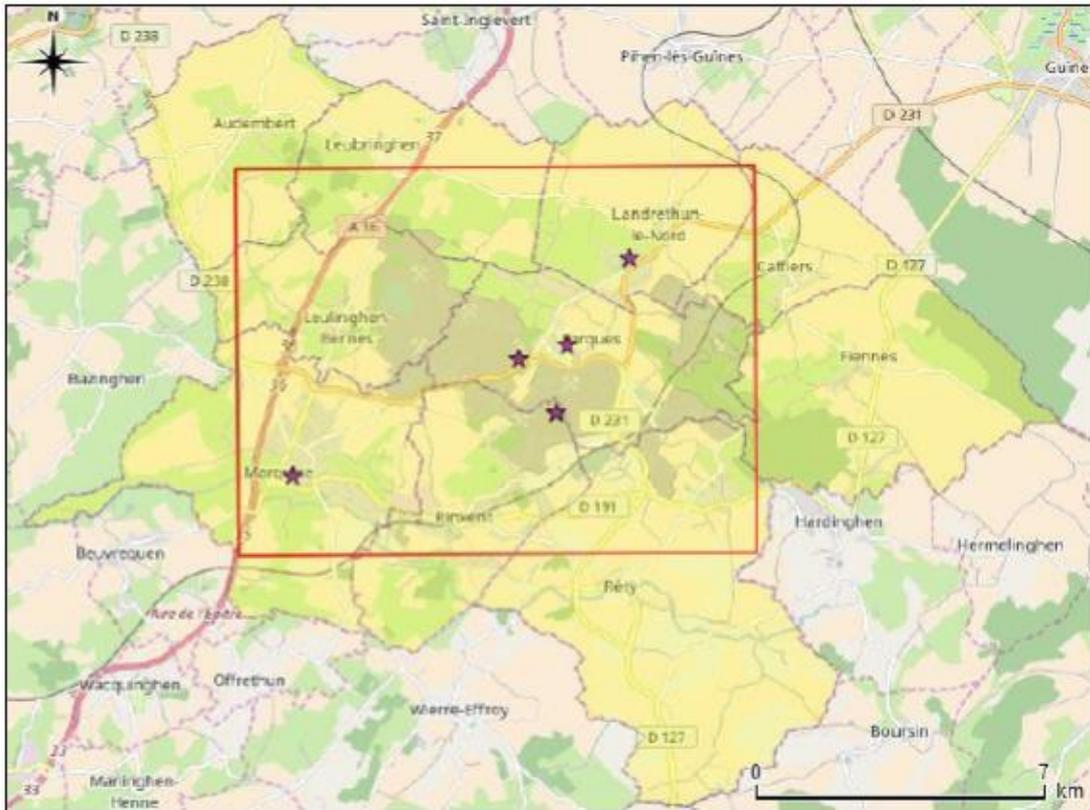


Figure 88 : Périmètre de l'étude

Grille de calcul en sortie de modèle

Il est nécessaire d'expliciter au modèle les points de la zone d'étude où les calculs de la simulation seront retenus. On ne peut lui demander de calculer les concentrations mètre par mètre sur toute la surface de la zone de modélisation, le temps de calcul serait beaucoup trop important. L'idée ici est donc de définir un maillage le plus fin possible, adapté aux contraintes opérationnelles du modèle, et qui assurerait tout de même un rendu cartographique de qualité pour le résultat final.

Pour cela, la grille est composée de 14 000 points de calcul répartis dans le domaine de simulation selon un maillage régulier (100 mètres), complété par un maillage fin (40 mètres) au niveau des surfaces de carrières et un maillage dit « intelligent » de points positionnés de part et d'autre des tronçons routiers et ferroviaires.

Tous les points de calcul des concentrations sont positionnés à une hauteur de 1,5 m par rapport au sol.

Les points matérialisés par la couleur bleu correspondent au maillage régulier défini par sa résolution 100 mètres par 100 mètres. Les points matérialisés par le marron correspondent aux maillages intelligent et fin défini par une résolution de 40 mètres par 40 mètres.



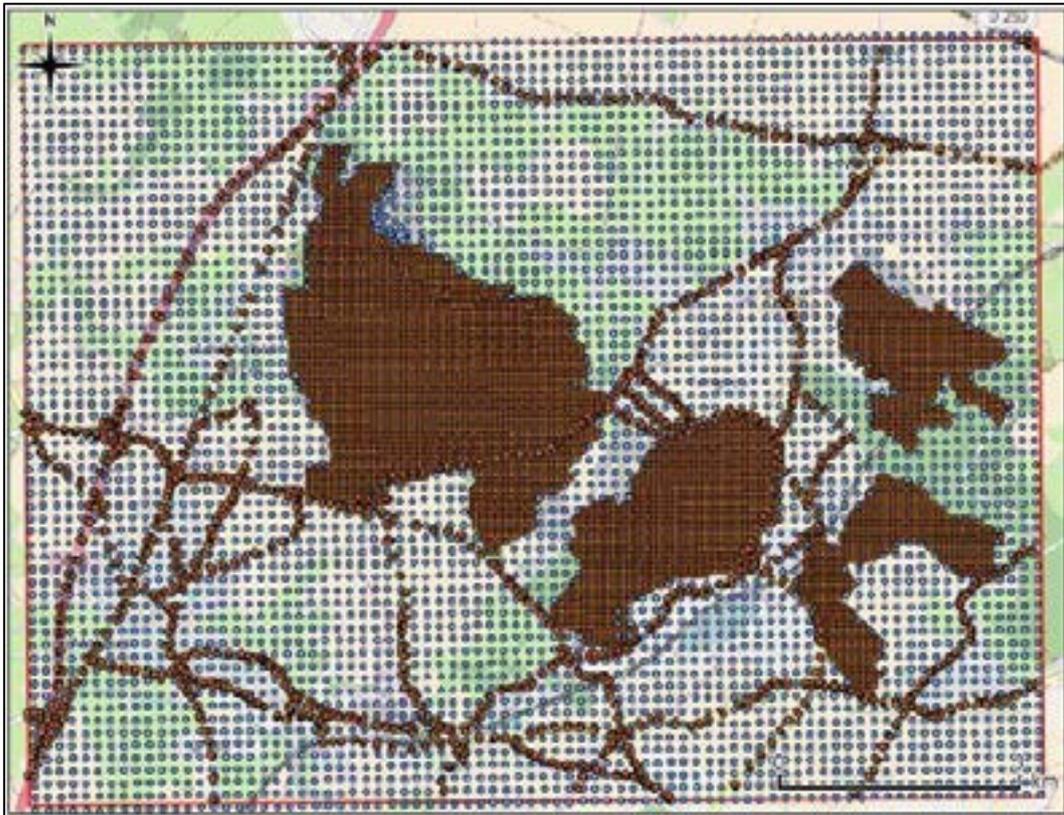


Figure 89 : Grille des points de calcul du modèle

Les périodes de simulation

Plusieurs périodes ont été simulées pour les besoins de l'étude.

Pour la phase de calage du modèle, les concentrations ont été simulées sur deux périodes correspondantes aux périodes de campagnes de mesures terrain :

- au niveau des stations mobiles uniquement pour une période allant du **7 septembre au 5 octobre 2015**, qui correspond à la campagne de mesure dite « **phase 1** ».
- au niveau des stations mobiles uniquement pour une période allant du **7 mars au 4 avril 2016**, qui correspond à la campagne de mesure dite « **phase 2** ».

Pour les besoins des résultats cartographiques, et sur la base de la validation de l'étape de calage, les concentrations ont été simulées sur :

- l'ensemble de la zone d'étude lors de la phase 1,
- l'ensemble de la zone d'étude lors de la phase 2,
- l'ensemble de la zone d'étude sur l'année civile 2015.

Lors de chaque simulation, les concentrations ont été calculées sur un pas de temps horaire, afin d'être comparables aux valeurs réglementaires. Les données horaires calculées par le modèle sont ensuite agrégées en moyennes annuelles et en percentiles journaliers.

Données météorologiques

Ce modèle de dispersion travaille en régime stationnaire, c'est-à-dire pour une météo supposée constante et homogène dans le panache pour chaque heure de données. C'est pourquoi ADMS nécessite des données météorologiques séquentielles horaires pour lui permettre de prendre en compte l'évolution temporelle des conditions météorologiques durant la journée. Pour une étude de qualité de l'air à l'échelle d'une carrière, l'utilisation d'un schéma de dispersion fonctionnant en régime stationnaire pendant des échelles de temps de l'ordre de l'heure est tout à fait adéquate. Les conditions météorologiques conditionnent pour une grande part le transport et la transformation chimique des polluants dans l'air (module physique et chimique décrit précédemment).



Les paramètres météorologiques pour l'année 2015 sont issus de la station de mesure Météo France, représentative de la zone d'étude et localisée au niveau de Boulogne-sur-Mer. Les paramètres retenus sont la température (°C), la vitesse et direction du vent mesuré à 10 m (secteur 10°), la précipitation (mm/h). Ils sont complétés par des paramètres caractérisant la stabilité de la couche de surface provenant de notre modèle régional MM5 (Esmeralda) de l'atmosphère à Boulogne-sur-Mer : la hauteur de couche limite, le flux de chaleur sensible et la longueur de Monin-Oboukhovo sont les variables retenues. Les mesures enregistrées par les mâts météo placés sur les UM n'ont pas été utilisées pour cette modélisation. En effet, cela se justifie par plusieurs raisons. Le jeu de données était incomplet (uniquement mesures de la vitesse et de la direction du vent), certaines spécificités locales sur l'emplacement des UM n'étaient pas représentatives de l'ensemble de la zone de dispersion. De plus, les paramètres de stabilité proviennent d'une station sur Boulogne-sur-Mer, aussi nous avons considéré qu'il était plus pertinent de s'orienter sur des données Météo France de Boulogne-sur-Mer afin que l'ensemble des paramètres soit issu du même site météorologique.

Ces données sont présentées en une série de moyennes horaires sur une année. Le préprocesseur météo d'ADMS effectue alors les calculs heure par heure des paramètres caractérisant la couche limite pour une modélisation en 3D de la dispersion (entre le sol et 2000 mètres d'altitude).

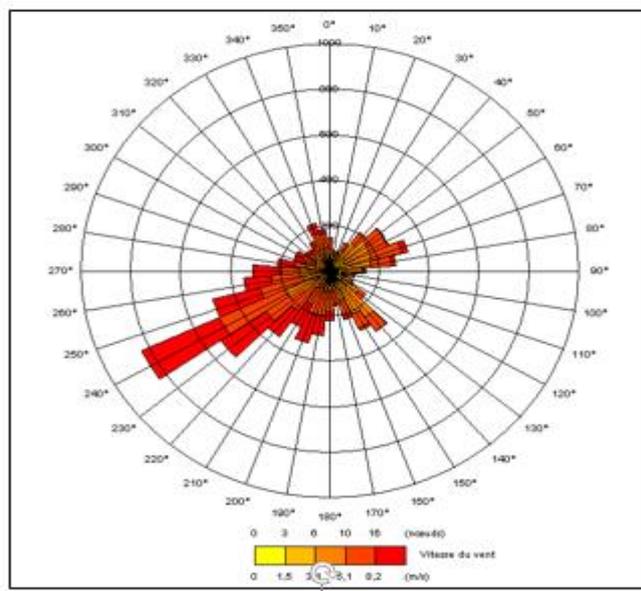


Figure 90 : Rose des vents à Boulogne sur Mer – 2015

Concentration de fonds

Le modèle ADMS Urban requiert une pollution de fond pour mettre en œuvre son module de chimie. Cette pollution de fond est également nécessaire pour évaluer la quantité de polluant présente en conditions initiales et aux limites du domaine de simulation pour chaque échéance simulée. Il est d'usage d'utiliser des mesures établies sur une station rurale ou périurbaine située en dehors du domaine.

Pour cette étude, les mesures horaires en PM10 de la station rurale de Campagne-lès-Bouonnais ont été utilisées. Cette station fixe du réseau Atmo Hauts-de-France se trouve au sud du bassin de Marquise, et est plus révélatrice du niveau de fond rural de la zone que la station de Boulogne-Outreau, pourtant plus proche géographiquement. En effet, la station de Boulogne-Outreau est sous influence directe du littoral (vent, embrun marin etc), ce qui n'est pas nécessairement l'idéal pour déterminer une concentration en pollution de fond représentative de la région.

Aucune mesure de fond n'a été renseignée pour le SO₂, car il est considéré que les concentrations de fond sont inférieures aux limites de détection pour ce polluant. En métrologie, la limite de détection admise pour le dioxyde de soufre est de 1 ppb soit 2.67 µg/m³.





Figure 91 : Localisation et typologie des stations fixes sur le territoire littoral

Topographie et occupation des sols

La topographie et l'occupation des sols peuvent influencer la dispersion et la turbulence des masses d'air. Dans la construction du modèle, il s'avère que la zone d'étude est très hétérogène en matière de type de sol (carrière, forêt, étang, rase campagne, habitation), et les reliefs y sont marqués au sein des carrières. L'activité extractive provoque des encaissements pouvant atteindre 200m en différents points des sites d'extraction. La figure ci-dessous témoigne de cette irrégularité de hauteur du terrain sur la zone au niveau des carrières. L'échelle de couleur varie du vert clair au centre des carrières pour des hauteurs inférieures au niveau de la mer (échelle en mètres), jusqu'au bleu foncé pour les points culminants du site étudié. Aussi l'intégration de cette variable « relief » nous a semblé primordiale pour tenir compte de la disparité du champ de dispersion. Avec son modèle de terrain, ADMS-Urban offre la possibilité suivante : à partir de paramètres météorologiques moyens et de la couche de relief IGN (points d'altitude), le modèle d'écoulements fluides FLOWSTAR calcule en 3D tous les champs de vent (résolution de l'ordre de 100 m) et de turbulence en prenant en compte l'effet de la topographie et de la rugosité du sol (occupation des sols en surface).

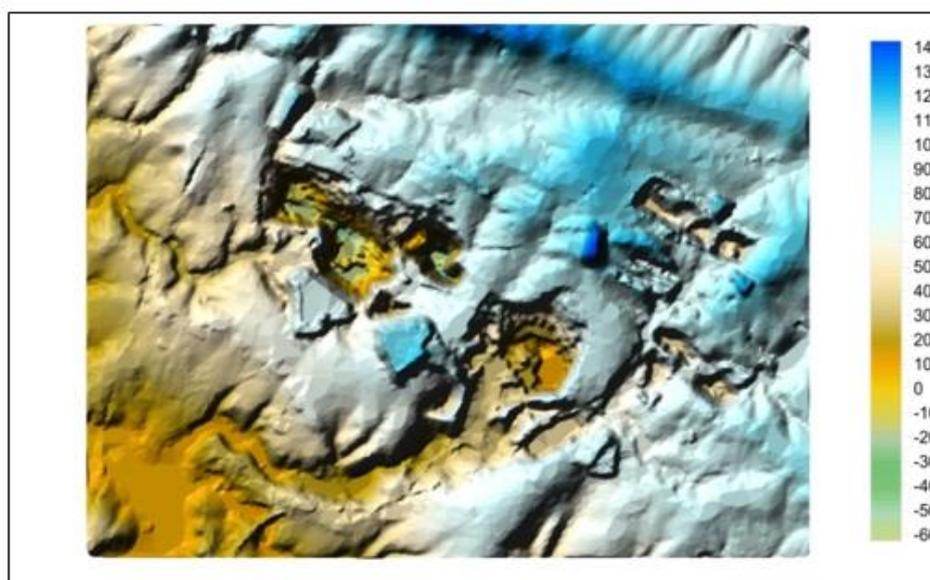


Figure 92 : Topographie de la zone d'étude – données reliefs IGN

La topographie utilisée provient des données reliefs IGN (Modèle Numérique de Terrain avec une résolution de 50 m). Les données de rugosité sont calquées sur l'occupation des sols à partir de la base de données européenne Corine Land Cover. Pour ses calculs de transport et de dispersion, le modèle tiendra compte de ces données de terrains complexes.



Phénomène physique	Pris en compte par le modèle dans l'étude	Commentaires
Météorologie locale et description verticale de la turbulence atmosphérique	Oui	Données horaires mesurées à la station Météo France de Boulogne-sur-Mer. Paramètres : année, jour, heure, vitesse du vent (m/s), direction du vent (°), température (degré C), précipitations (mm), hauteur de couche limite (m), flux de chaleur sensible (w/m ²), longueur de Monin-Obukhov (L)
Cycle diurne du développement de la couche de mélange	Oui	Les données météorologiques ne sont pas traitées de façon indépendante mais en considérant toujours les 24h précédentes
Nature de sols rencontrés	Oui	Grille de champ pour la hauteur de rugosité adaptée sur le domaine d'étude
Pollution de fond et production de particules soufrés à partir des sources de SO ₂	Oui	Utilisation des mesures de la station rurale de Campagne-lès-Boulonnais
Effet de la topographie (relief) sur la dispersion des panaches	Oui	Le modèle de dispersion est couplé au modèle d'écoulement fluide FLOWSTAR qui recalcule les champs de vent et de turbulence en 3D sur tout le domaine
Nature particulière des poussières	Non	Pas de prise en compte du dépôt sec (chute de gravité) et humide (lessivage par les précipitations).⁴
Variabilité temporelle des émissions	Non	Pas de profil horaire disponible sur les activités d'émissions des carrières

Tableau 24 : Tableau récapitulatif des paramètres ADMS

3.2.2. Comparaison modèle / mesure

Une fois les données d'entrée du modèle préparées et avant de lancer la simulation finale sur l'ensemble de la zone de modélisation, une phase de calage sur les périodes de campagne de mesure (phases 1 et 2) est nécessaire pour s'assurer de la cohérence des résultats simulés avec les mesures enregistrées aux stations mobiles du réseau d'Atmo Nord-Pas-de-Calais.

3.2.2.1. Principe et critères d'acceptation

L'écart entre le modèle et la mesure est fixé par la législation européenne, qui impose des objectifs de qualité des données modélisées en termes d'incertitude. La directive 2008/50/CE définit « l'incertitude pour la modélisation comme l'écart maximal des niveaux de concentrations mesurés et calculés de 90% des points de surveillance particuliers, sur la période considérée pour la valeur limite, sans tenir compte de la chronologie des événements ». Cependant certaines exigences ne sont pas jugées

⁴ Ce module n'a pas été choisi pour cette modélisation. Seul le rabatement humide des poussières (de manière artificielle sur les installations) est pris en compte dans le calcul des émissions à la source des activités au travers des facteurs d'émissions. Aussi, et par manque de retour d'expérience de ce module dans nos missions, il a été préférable de ne pas le tester dans cette modélisation.



assez sévères aux yeux du groupe expert des AASQAs qui préconise des erreurs relatives moins grandes. Finalement, les erreurs relatives exigées pour les moyennes mensuelles et trimestrielles en PM10, selon le type de station de mesure, sont les suivantes :

Typologie du site	Erreurs relatives exigées
Fond	30 %
Proximité industrielle	50 %

Tableau 25 : Critères statistiques exigés par type de station

Le groupe expert des AASQAs au travers du « Guide pour une modélisation avec une résolution spatiale fine des concentrations en milieu urbain » (GREXURB) recommande également le calcul de paramètres statistiques complémentaires pour juger du bon comportement du modèle à l'échelle horaire. Les paramètres statistiques pris en compte sont les paramètres normalisés afin de pouvoir comparer les performances à l'échelle nationale. Les paramètres retenus par le groupe expert des AASQAs sont : le biais normalisé, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (NMSE) et le coefficient de corrélation.

Paramètres statistiques	Intervalle acceptable pour une comparaison modèle / mesure
Biais normalisé	-30 % à 30 %
NMSE	Non défini
Coefficient de corrélation	0,6 à 1

Tableau 26 : Critères statistiques complémentaires pour le calage d'un modèle urbain

Le modèle ADMS offre la possibilité de prendre en compte une pollution de fond en PM10 sur le domaine. La pollution de fond intégrée au modèle, séquencée heure par heure est pour chaque heure uniforme sur l'ensemble de la zone de modélisation. L'utilisation de données horaires issues de stations mobiles permet d'apprécier :

- La dynamique spatiale du modèle, c'est-à-dire si les niveaux absolus et relatifs de concentrations modélisés sont bien reproduits au niveau des unités mobiles.
- La dynamique temporelle du modèle, c'est-à-dire d'évaluer si le modèle reproduit bien la temporalité de certains pics d'émission liés à des phénomènes grande échelle/moyenne échelle de transfert de masse d'air pollués.

Les valeurs de fond correspondent au niveau de fond « naturel » induit par les apports extérieurs au domaine de modélisation. Il ne s'agit pas de la contribution de sources secondaires locales non explicitées. On rappelle que les concentrations de fond horaires pour chaque simulation sont issues de la station fixe de typologie « rurale » Campagne-lès-Boulonnais⁵.

3.2.2.2. Résultats sur la campagne de mesure PM10- Phase 1

Station et polluant (typologie)	Moyenne mesures $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Moyenne Modèle $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Coefficient de corrélation	Erreur relative %	NMSE %	Biais normalisé %
UM3 et UM7 - Carrière A (prox. Industrielle)	46,6	44,8	0,12	-3,83	1.51	-3,9

⁵ Cette station fixe du réseau Atmo Hauts-de-France se trouve au sud du bassin de Marquise, et est plus révélatrice du niveau de fond rural de la zone que la station de Boulogne-Outreau, pourtant plus proche géographiquement. En effet, la station de Boulogne-Outreau est sous influence directe du littoral (vent, embrun marin etc...), ce qui n'est pas nécessairement l'idéal pour déterminer une concentration en pollution de fond représentative de la région.



UM2 - Carrière B (prox. Industrielle)	33,7	30,8	0,31	- 8,56	1,05	- 8,9
UM6 - Ferques (fond)	18,8	20,1	0,61	6,8	-	6,6
UM9 - Marquise (fond)	20,3	19,6	0,76	-3,39	-	- 3,4
UM8 - Landrethun le Nord (fond)	16,2	18,7	0,69	15,56	-	14

Tableau 27 : Résultats (modèle/mesure) campagne de mesures PM 10 - Phase 1

La comparaison modèle / mesure sur la période de la campagne 1 du 07/09/15 au 05/10/15 inclut l'ensemble des stations mobiles déployées sur la zone d'étude. Les stations de Ferques, Marquise et Landrethun le-Nord sont en situation de fond, tandis que les stations de la carrière A et B sont en situation de proximité industrielle.

- ✓ L'**erreur relative**, qui témoigne de l'erreur globale des données du modèle par rapport à la réalité, est très faible en moyenne pour les PM10 et respecte donc le critère de +/- 30 %. L'erreur relative en situation de fond est très satisfaisante au regard de la directive et de la période d'échantillonnage (presque 1 mois). De manière générale, la qualité des comparaisons modèle-mesure s'améliore à mesure que l'on augmente la durée de l'échantillonnage (annuelle par rapport à mensuelle ou horaire). En situation de proximité industrielle, le modèle est en légère sous-estimation, de 3,83% et 8,56% respectivement pour les carrières A et B. Ces scores sont très satisfaisants dans une telle configuration.
- ✓ Au regard du **biais normalisé**, il n'y a pas d'erreur systématique commise par le modèle, puisque la moyenne des différences entre observation et modèle est faible. Une valeur nulle indique que les données d'observations et les données modélisées ont la même moyenne. Le modèle est donc en mesure de bien restituer la valeur moyenne des concentrations et cela pour toutes les typologies d'unités mobiles. Toutefois les écarts peuvent être ponctuellement très importants : il suffit que les écarts positifs compensent les écarts négatifs. C'est pourquoi ce paramètre doit être accompagné de l'analyse du NMSE.
- ✓ Le **NMSE** (l'erreur quadratique moyenne normalisée) renseigne lui aussi sur l'écart relatif entre les données simulées et les observations. Plus le NMSE est faible, plus les quantités simulées par le modèle sont proches des observations. Le critère n'est pas défini dans le guide référence du GREXURB pour les PM10, cependant on peut avancer que pour les UM en situation de proximité industrielle le NMSE est très bon avec 1,51% d'écart moyen pour la carrière A et 1,05% d'écart pour la carrière B.
- ✓ Le **coefficient de corrélation** permet de qualifier l'intensité de la liaison linéaire existante entre observation et valeur modélisée. En outre, il permet d'évaluer si la temporalité des différents pics et creux journaliers du modèle sont bien reproduits. Les valeurs obtenues remplissent toutes les critères de validité (>0,6) aux stations mobiles de « fond ». Cependant, aux niveaux des carrières, la corrélation ne respecte pas le critère de corrélation avec des valeurs de 0,12 et 0,31 respectivement pour la carrière A et B. Ce score était attendu, dans la mesure où aucun profil temporel d'émission lié aux activités n'a pu être renseigné dans le modèle. On peut voir ici un point d'amélioration à mener pour la pertinence du modèle, même s'il est parfois difficile d'imaginer des profils d'émissions pour certains types de sources (érosion et manipulation des stocks, transport interne etc.)

Sur la base de cette analyse, le calage du modèle aux stations de mesure (tableau 27) est validé pour la première phase. Et la concentration de fond moyenne en PM10 injectée dans ADMS sur la phase 1 est de 18,1 µg/m³.

3.2.2.3. Résultats sur la campagne de mesure PM10 - Phase 2

Station et polluant (typologie)	Moyenne mesures µg/m ³	Moyenne Modèle µg/m ³	Coefficient de corrélation	Erreur relative %	NMSE %	Biais normalisé %
---------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	----------------------------	-------------------	--------	-------------------



UM3 et UM7 - Carrière A (prox. Industrielle)	64,6	59,2	0,25	-8,31	1,22	-8,6
UM2 - Carrière B (prox. Industrielle)	34,9	33,6	0,38	-3,84	1,04	-2,7
UM6 - Ferques (fond)	29,8	28,1	0,74	-5,82	-	-6,0
UM9 - Marquise (fond)	24,9	27,5	0,81	10,41	-	9,0
UM8 Landrethun le Nord (fond)	22,2	26,9	0,83	21,14	-	18,0

Tableau 28 : Résultats (modèle/mesure) campagne de mesures PM 10 - Phase 2

La comparaison modèle / mesure sur la période de la campagne 2 du 07/03/16 au 04/04/16 inclut l'ensemble des stations mobiles déployées sur la zone d'étude. Les stations de Ferques, Marquise et Landrethun-le-Nord sont en situation de fond, tandis que les stations de la carrière A et B sont en situation de proximité industrielle.

- ✓ **L'erreur relative**, qui témoigne de l'erreur globale des données du modèle par rapport à la réalité, est très faible en moyenne pour les PM10 et respecte donc le critère imposé par la directive européenne de +/- 30 %. L'erreur relative en situation de fond et de proximité industrielle est très satisfaisante, avec les mêmes remarques que pour la phase 1 de mesure. Le modèle sous-estime la mesure de 8,31% et 3,84% respectivement pour les carrières A et B.
- ✓ **L'ensemble des autres critères** définis par le GREXURB est respecté, mis à part le coefficient de corrélation linéaire pour les UM placées en proximité industrielle. Tout comme lors de la phase 1, la modélisation des pics liés à une activité extractive plus importante à un moment de la journée n'a pas pu être reproduite par le modèle, du fait de l'absence de profils temporels sur les émissions. Même si la corrélation linéaire entre le modèle et la mesure est légèrement meilleure pour la phase 2 que lors de la phase 1, elle ne rentre pas dans le critère fixé à 0,6.

En situation de fond (UM6, UM8, UM9) l'intensité de la liaison linéaire satisfait au critère, ce qui certifie au-delà du simple niveau de concentration de la qualité de la pollution fond choisie. Cela confirme dès lors que l'absence de profil temporel sur les émissions des sources carrières à une influence directe sur les profils de concentrations mesurées par les UM situées sur les sites carriers à proximité des sources.

Sur la base de cette analyse, le calage du modèle aux stations de mesure est validé pour la deuxième phase. Et la concentration de fond moyenne en PM10 injectée dans ADMS sur la phase 2 est de 20,9 µg/m³.

On peut noter dans les deux tableaux ci-avant, que le niveau de « production » de PM10 par le modèle est important puisque le modèle est capable de modéliser en moyenne 44.8 µg/m³ (phase 1) et 59,2 µg/m³ (phase 2) pour une pollution de fond « injectée » respectivement de 18,1 µg/m³ et 20,9 µg/m³.

La chimie soufrée du modèle, qui produit des PM10 dites « secondaires » à la suite de réaction chimique particulière, est très limitée au sein des carrières, car aucune source d'émissions de dioxyde de soufre n'y est recensée. Dans l'ensemble sur tout le domaine de modélisation, la part de production de PM10 secondaires dues à des combinaisons chimiques est faible.

Aussi sur la base de ces constats, on peut se satisfaire de la quantité d'émission en PM10 estimée sur les différentes sources « carrières » recensées. Et a fortiori de la méthodologie mise en place par le CITEPA qui aboutit à ces estimations, avec l'utilisation de facteurs d'émissions de l'approche AP-42 de l'US (EPA) La spatialisation détaillée des sources d'émissions selon le type d'activité et le paramétrage géométrique propre à chacune ont indéniablement permis au modèle de reproduire de manière plus détaillée les phénomènes de dispersion et de transport des polluants. Pour Atmo Hauts-de-France, cela vient conforter la pertinence du modèle dans son utilisation permanente pour ses missions de modélisation.



Finalement après validation du modèle dans cette configuration, nous pouvons conclure sur l'utilisation des nouveaux facteurs d'émissions définies par le CITEPA pour le polluant PM10. Ces facteurs ont permis d'estimer des émissions dont la modélisation de la dispersion et du transport des concentrations est en accord avec la mesure. Les scores statistiques répondent à la fois aux exigences de la directive européenne sur les modèles urbains, et aux préconisations notifiées par le GREXURB. Par expérience et recul avec ce que l'on peut calculer sur nos modèles urbains quotidiennement, les scores calculés ici en situation de « proximité industrielle » sont plus que satisfaisants. A l'avenir, si des besoins plus poussés sont demandés pour des études d'impact autour de sites carriers, un travail approfondi de temporalisation devra être mené afin d'obtenir une meilleure corrélation entre la concentration mesurée et celle modélisée.

La validation du modèle aux stations étant terminée, les modélisations peuvent être lancées sur chaque période de mesure, ainsi que sur l'année entière de référence du 01/01/2015 au 31/12/2015.

3.2.3. Résultats de l'étude de modélisation

Les cartographies de concentrations de polluants sont les résultats couplés du travail d'estimation des émissions, des calculs numériques de la modélisation et du travail géostatistique d'interpolation. Les échelles de couleur pour les niveaux de concentrations des différents polluants sont issues de groupes de travaux engagés par le LCSQA et les AASQAs pour harmoniser et améliorer la lecture des cartographies pour le public. Les échelles utilisées suivent les palettes de couleurs nationales. Pour chaque période modélisée sont réalisées les cartographies en PM10 sur la base de deux valeurs réglementaires : en moyenne annuelle et percentile⁶ 90,41, c'est-à-dire un nombre de jours pour lesquels la concentration moyenne journalière ne doit pas dépasser 50 µg/m³. Rappelons les valeurs limites :

- 40 µg/m³ pour la moyenne annuelle PM10
- 50 µg/m³ pour le percentile 90.4 des valeurs journalières PM10, concentration pour laquelle la valeur journalière de PM10 ne doit pas être supérieure plus de 35 fois par an.

Les concentrations calculées en sorties du modèle sont interpolées sur une grille de 10 mètres par 10 mètres sur l'ensemble de la zone d'étude. L'outil géostatistique utilisé est le logiciel Surfer 10, la technique d'interpolation appliquée est un krigeage linéaire.

Pour aller plus loin : l'interpolation est une opération mathématique qui a pour but d'estimer des valeurs (des concentrations) sur un maillage spatial de points, régulier et continu, à partir d'observations spatialisées discontinues, et/ou plus espacées. Le krigeage est une méthode d'estimation linéaire qui réalise cette interpolation. Ses propriétés principales sont d'être un interpolateur exact (si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue), sans biais, qui tient compte non seulement de la distance entre les observations et le point d'estimation, mais également des distances entre les observations deux-à-deux (variance des observations).

3.2.3.1. Cartographies générales et interprétation

Année 2015

⁶ Un centile, ou percentile, est chacune des 99 valeurs qui divisent les données triées en 100 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/100 de l'échantillon de population.



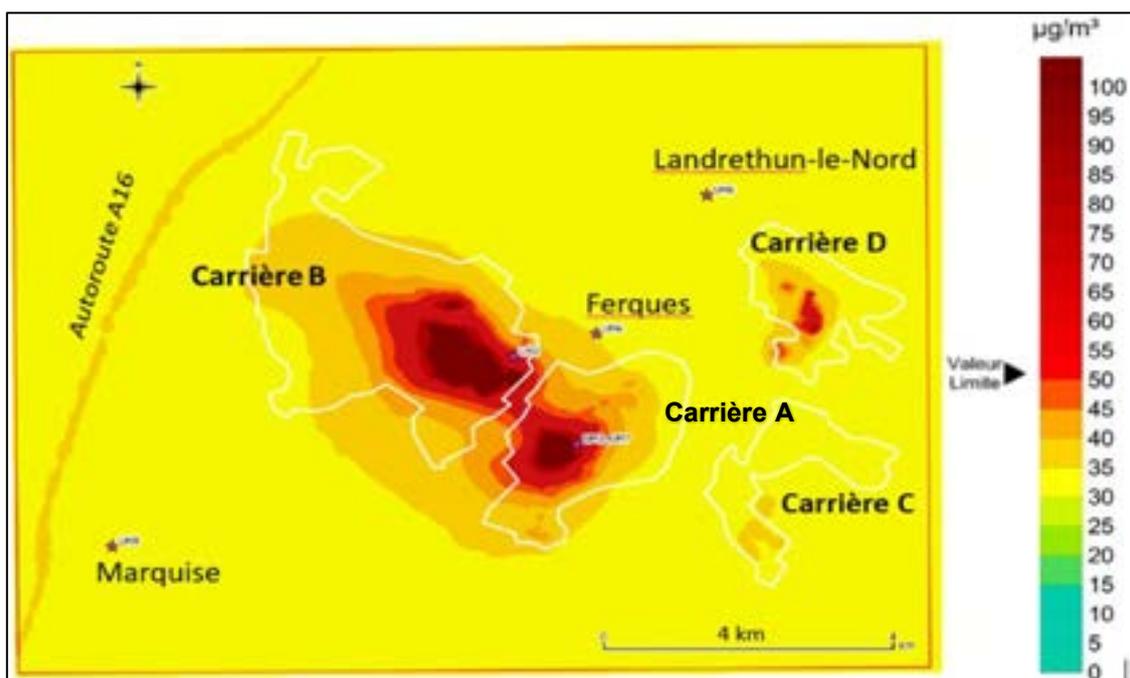


Figure 93 : Percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 sur la zone d'étude – VL 50 µg/m3 en moyennes journalières à ne pas dépasser plus 35 jours par an.

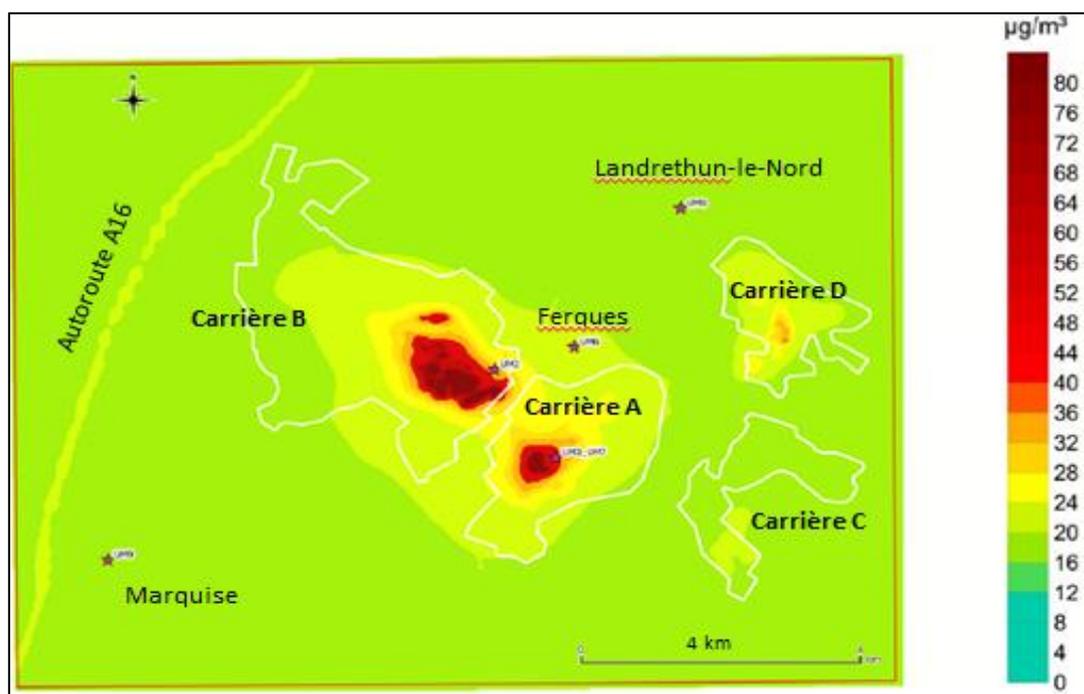


Figure 94 : Concentration en moyenne annuelle de PM10 en 2015 sur la zone d'étude – VL 40 µg/m3

La carte des concentrations moyennes annuelles en particules PM10 pour 2015 montre un gradient de concentration assez net entre la proximité des principales sources industrielles (Carrière B et Carrière A) et la situation dite « de fond », c'est-à-dire hors proximité d'une source particulière. Dans une moindre mesure, on peut aussi distinguer du niveau de fond, la part des activités liées aux 2 autres carrières C et D.

La valeur limite en moyenne annuelle fixée à 40 µg/m³ est dépassée sur une surface se cantonnant au domaine des exploitants de granulats, mis à part un débord sur la D231, route qui sépare la carrière B de l'exploitant EX A. La concentration maximale calculée est de 150,2 µg/m³ au niveau d'une source dite « traitement », tandis que le niveau de fond moyen est en dessous de la valeur guide (20 µg/m³) avec une valeur de 17 µg/m³. Sur la zone de modélisation, la contribution des

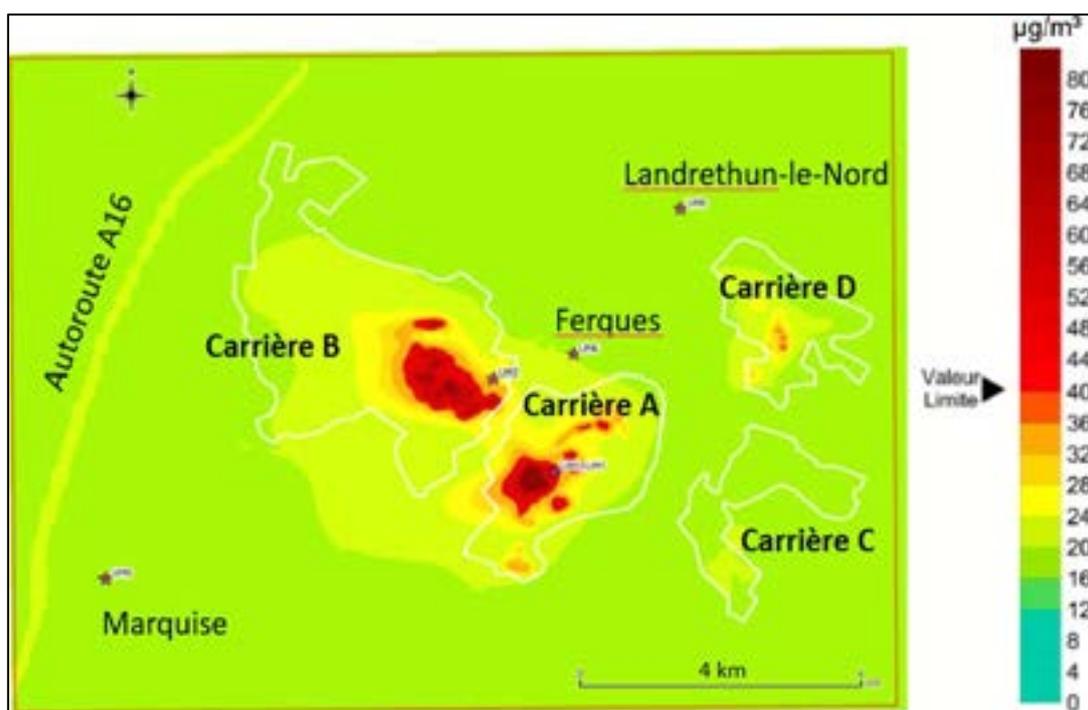


autres sources d'émissions locales (résidentiel/tertiaire, ferroviaire, agricole) à l'exception du routier (A 16) n'est pas visible sur la cartographie. Leur impact sur la qualité de l'air est donc très limité.

La carte de percentile 90,4 montre également un gradient qui va décroissant de la proximité des principales sources d'émission de Carrière du Boulonnais et Vallée Heureuse jusqu'à la situation de fond. La valeur limite de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière est dépassée plus de 35 fois dans l'année au sein des carrières. Néanmoins en dessinant un contour autour de cette valeur limite on constate qu'aucune habitation du bassin n'est affectée par ce dépassement de seuil réglementaire. En situation de fond, la valeur limite sur le percentile est respectée.

On constate qu'il existe une influence des activités extractives dans un rayon variable en dehors des domaines carriers, mais qu'elle n'induit pas un dépassement de la valeur limite en percentile 90,4 ou en moyenne annuelle. Tout comme sur la cartographie de moyenne annuelle, sur la zone de modélisation, la contribution des autres sources d'émissions locales (résidentiel/tertiaire, ferroviaire, agricole) à l'exception du routier (A 16) n'est pas visible sur la cartographie. Leur impact sur la qualité de l'air est donc très limité.

Phase 1



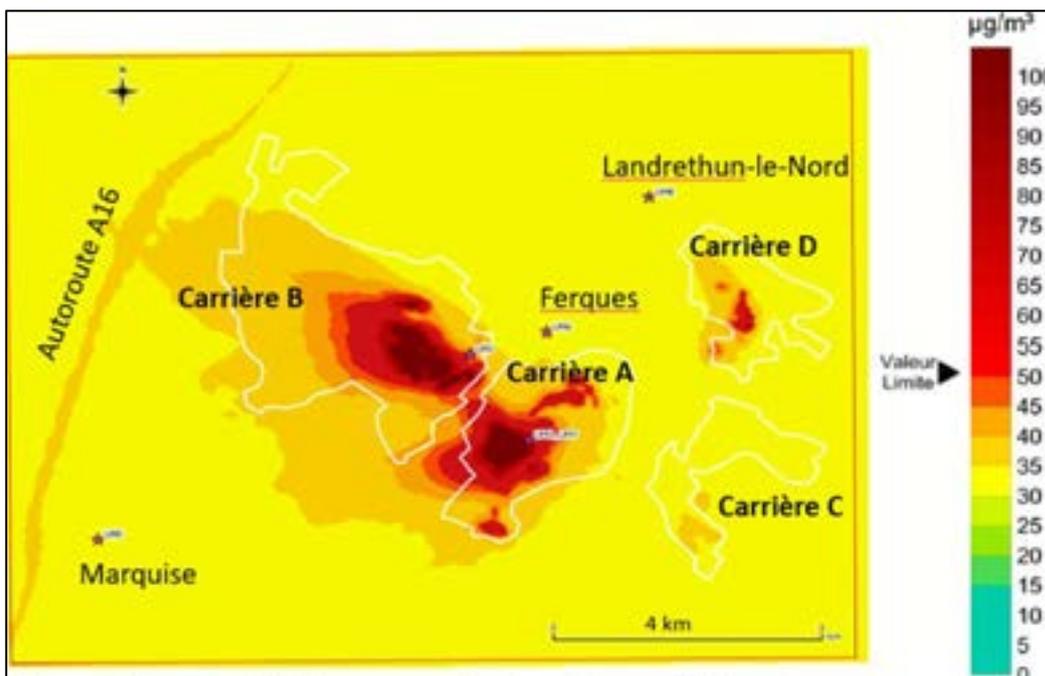


Figure 96 : Percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 sur la zone d'étude du 07/09/15 au 05/10/15

L'observation de la cartographie pour la moyenne en PM10 sur la phase 1 est sensiblement la même que celle en moyenne sur l'année 2015. La petite différence observée se trouve sur la carte du percentile : l'étendue de la surface d'influence des émissions des carrières (surface orangée allant de 32 à 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'échelle de couleur) est légèrement plus grande sur cette première phase de mesure que sur l'année 2015. Néanmoins le dépassement de l'une des valeurs réglementaires ne concerne aucune habitation du bassin. L'influence des sites carriers se fait plus sentir sur la partie du sud-ouest de la zone d'étude, du fait de l'orientation moyenne du régime de vent sur la période (voir rose des vents). En effet nous retrouvons un vent d'est-nord-est (2,6 m/s en moyenne) sur la période, ce qui a des conséquences sur l'allure du champ de concentration de la zone étudiée.

Phase 2

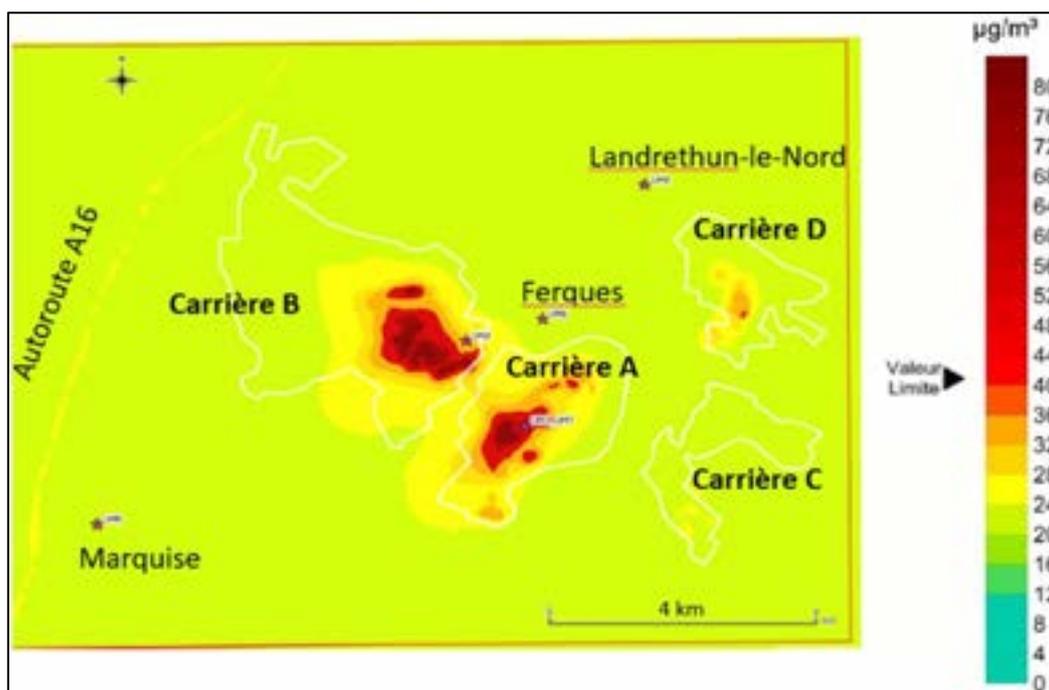


Figure 97 : Concentration moyenne de PM10 sur la zone d'étude du 07/03/16 au 04/04/16



Sur la phase 2 de campagne de mesure, la pollution de fond moyenne injectée dans le modèle est plus importante que lors la phase 1, respectivement de 20,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au lieu de 18,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Inévitablement l'ensemble des concentrations moyennes de PM10 s'en retrouve augmenté, autant en situation de fond qu'en situation de proximité industrielle. De plus, les quantités émises par les différentes sources carrières sont légèrement plus importantes que lors de la première phase en particulier pour l'activité de traitement et transformation (cf partie « Estimation des émissions de PM10 pour l'industrie extractive »).

La différence de niveau modélisée entre les phases 1 et 2 est donc une combinaison d'un facteur local, augmentation de la quantité émise de PM10, et d'un facteur grande échelle, avec le transport de masses d'air plus chargées en poussière sur cette seconde période.

En moyenne sur la phase 2, la concentration de PM10 en situation de fond est comprise entre les valeurs 20 et 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui correspond à la valeur de fond rural de la région sur cette période. La moyenne maximale modélisée atteint 176 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau d'une source d'émission de type « traitement », largement au-dessus de la valeur limite fixée à 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

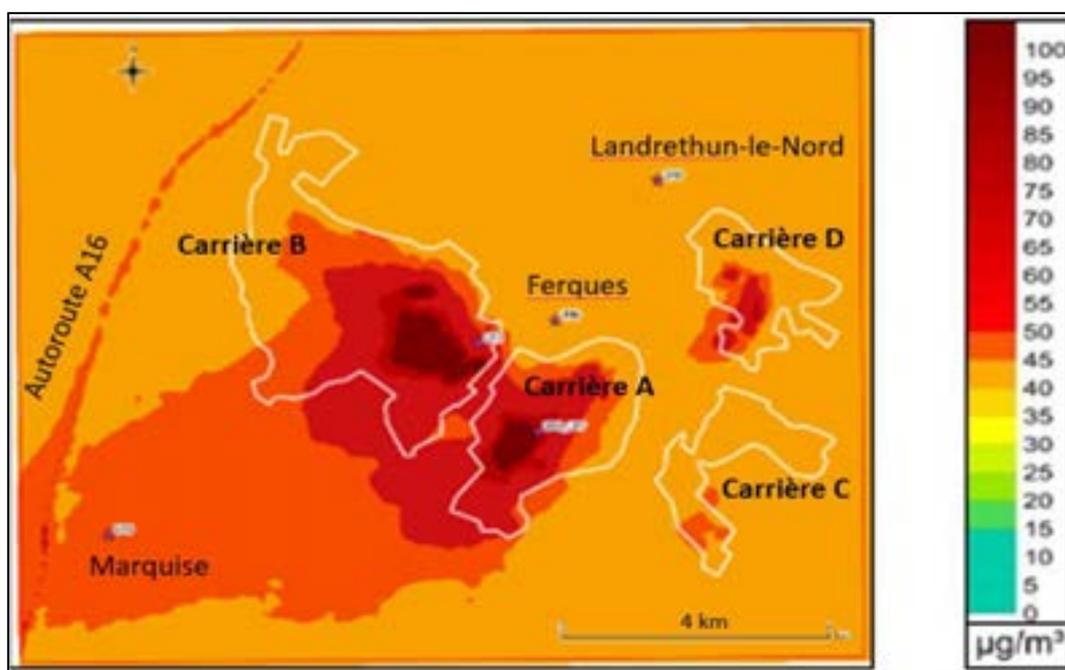


Figure 98 : SEQ Figure * ARABIC 74 : Percentile 90,4 des concentrations journalières en PM10 sur la zone d'étude du 07/03/16 au 04/04/16

Concernant les jours en dépassements pour le percentile 90,4, en situation de fond, la concentration atteint des valeurs comprises entre 40 et 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La valeur limite de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est dépassée sur une zone plus importante que lors de la phase 1 recouvrant notamment des habitations. Cette information est à relativiser, car la valeur limite sur le percentile a du sens uniquement lorsque l'échantillonnage du modèle s'étale sur une année complète. Sur cette période de mesure (30 jours) le percentile 90,4 donne une valeur limite de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à ne pas dépasser plus de 2,8 jours. Il suffit de conditions météorologiques ponctuellement défavorables à la dispersion pour dépasser la valeur réglementaire.

Il est à noter que, tout comme lors de la première phase, la dispersion et le transport par la force des vents dominants nord nord-est (majoritaire) et sud-ouest (voir rose des vents) sont visibles sur les deux cartographies. Les gradients de concentrations pour les deux valeurs limites (annuelle et percentile) suivent les champs de vents. Un comportement physique toujours bien reproduit par le modèle.



3.2.3.2. Cartographies par groupe de sources

Pour pouvoir visualiser la contribution de chaque type de source rattaché à l'industrie extractive, nous avons regroupé les concentrations par activité. On présente ci-dessous les résultats sur l'année 2015 pour les 3 groupes de sources définis précédemment dans la partie émission : le groupe « extraction/forage/transport interne » ; le groupe « traitement » ; le groupe « stockage ».

Groupe extraction/transport interne

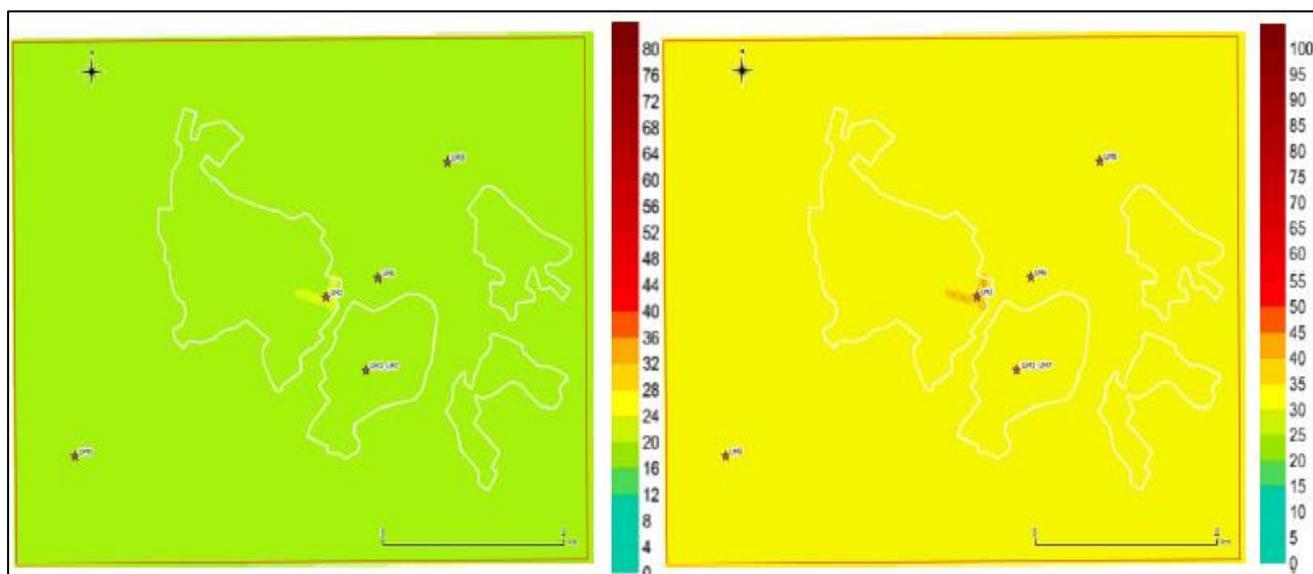


Figure 99 : Concentration en moyenne annuelle de PM10 pour les sources du groupe extraction/transport interne (à Gauche), Percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 pour les sources du groupe extraction/transport interne (à Droite).

Groupe traitement et transformation

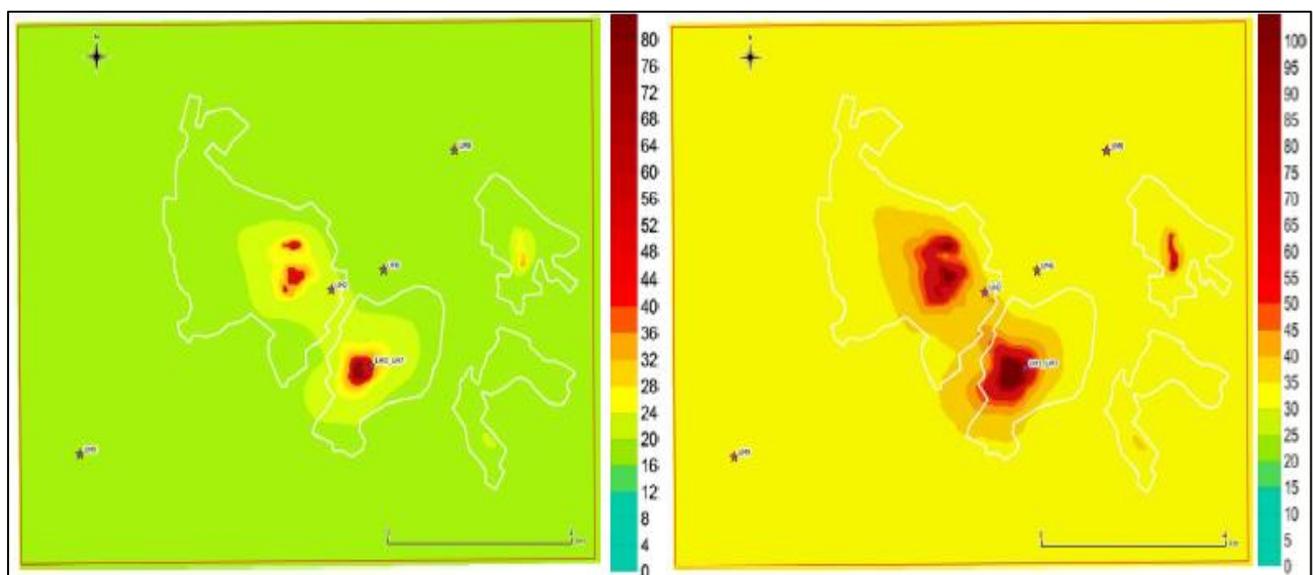


Figure 100 : Concentration en moyenne annuelle de PM10 pour les sources du groupe traitement et transformation (à Gauche), Percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 pour les sources du groupe traitement et transformation (à Droite).

Groupe stockage



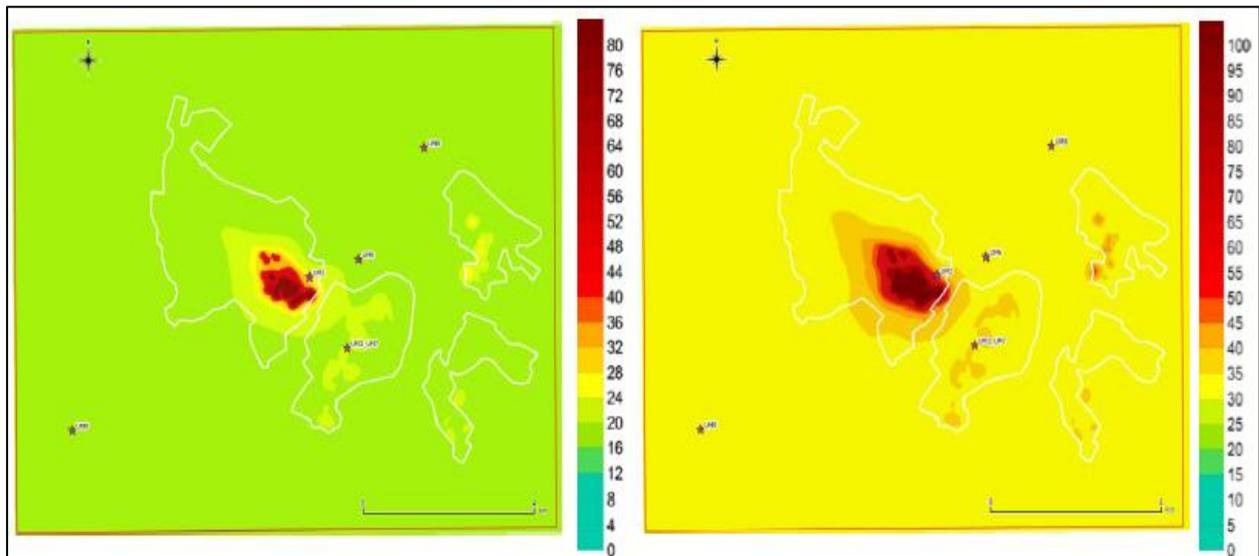


Figure 101 : Concentration en moyenne annuelle de PM10 pour les sources du groupe stockage (à Gauche),
 Percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 pour les sources du groupe stockage (à Droite).

On observe que les groupes de sources qui contribuent le plus au gradient de concentration autour des carrières sont ceux appartenant aux activités de « traitement » et de « stockage ». C'est également au sein de ces sources et à proximité de leurs émissions que l'on a simulé les concentrations maximales de PM10 en moyenne annuelle : 147,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les activités de traitement de la roche et 108,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les activités de stockage du matériau.

Il faut rappeler que les émissions issues du traitement ont été modélisées sous forme de sources volumiques, dont certains bâtiments atteignent une hauteur de 30 mètres. A cela s'ajoute, la présence de rejets canalisés modélisés sous forme ponctuelle par le biais de cheminées dont la hauteur est du même ordre de grandeur. Le cumul des deux types de rejets est à l'origine de concentrations importantes en proximité immédiate de ce type de source. La surface en dépassement de la VL 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ reste comprise à l'intérieur des deux carrières, dans l'environnement proche des infrastructures de traitement et transformation.

Pour ce qui est des concentrations en particules dues à la gestion et à l'érosion des stocks, elles sont aussi très élevées. Le gradient de concentration est tout aussi marqué que pour les sources « traitement », avec une surface en dépassement plus importante que les sources « traitement » dans laquelle la concentration reste supérieure à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle. Cependant le dépassement de la valeur limite pour les activités de « stockage » se concentre autour des stocks de la carrière B, où les émissions inventoriées sont bien plus importantes que pour la carrière A. La hauteur moyenne du volume simplifié dans laquelle se dispersent les émissions liées aux activités de stockage a été estimée à 4 mètres pour chaque stock.

Pour le groupe rattaché aux activités de transports et d'extraction, son influence sur la répartition des concentrations au sein de la carrière semble secondaire. En effet, au niveau des zones des fosses d'exploitation les concentrations modélisées sont à peine plus élevées que la concentration en situation de fond, mais pas assez pour que l'on puisse l'observer sur les cartographies. Malgré une configuration topographique enclavée, les émissions se dispersent dans un volume très important au niveau de ces fosses d'exploitation, ce qui a tendance à diluer conséquemment la concentration en PM10. C'est pourquoi on ne distingue pas ces rejets sur les cartographies du groupe « extraction/forage/transport interne ».

Les seules émissions visibles sont celles émises par le transport (évacuation de matériau) sur voie ferrée au niveau de la carrière B. La concentration maximale calculée en moyenne annuelle est de 25,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, aucun dépassement de valeurs limites n'est à signaler, et la zone d'influence directe de cette



3.2.4. Conclusion et perspectives

Le bassin de Marquise est composé de quatre carrières de roches massives calcaires. L'approche de cette modélisation se fait à l'échelle du bassin sur une surface recouvrant 48 km². Le modèle de dispersion et de transport des polluants utilisé est ADMS-Urban version 4.0 (dernière en date disponible lors de la réalisation de l'étude).

Ce volet s'est appuyé sur les résultats des campagnes de mesures mobiles réalisées en septembre 2015 et mars 2016. Faute de temps et parce que l'objectif d'EMCAIR était de porter l'effort sur l'approche élargie des carrières à leurs proche environnement, les mesures n'ont pas été individualisées sur chaque poste d'activité (tir de mine, concassage, stocks, pistes), alors qu'on disposait d'une partie des données pour le faire, notamment par les journaux de bord des carrières A et B. Dès lors, cela n'a pas permis de rendre compte spécifiquement de la contribution de chaque source d'émission, sans influence extérieure. C'est également pourquoi, par rapport à l'étude réalisée par AIR PACA en 2015, Atmo Hauts-de-France n'a pas orienté ses travaux sur différents scénarios changeant selon les facteurs d'émissions utilisés pour l'estimation des émissions de l'activité extractive.

La modélisation construite dans ce rapport s'appuie sur des données d'émissions de l'inventaire régional 2012 pour l'ensemble des secteurs identifiés sur la zone d'étude, mis à part celui de l'industrie extractive. Pour les sources se rapportant aux carrières, les quantités estimées sont fournies par les exploitants après un travail de traitement réalisé à partir de fiches de calcul mises à disposition par le CITEPA, dont la méthodologie reprend l'approche de l'AP-42 (US EPA).

La modélisation choisie tient compte des points suivants :

- ❖ **Trois périodes sont modélisées**, reprenant les deux phases de mesures et l'année civile 2015 afin de pouvoir comparer les calculs à des valeurs réglementaires définies sur une année.
- ❖ **Un inventaire des émissions complet** du site du bassin de Marquise et des communes environnantes, réalisé sur la base de l'inventaire régional 2012 d'Atmo Nord - Pas-de-Calais pour les secteurs résidentiel/tertiaire, routier, ferroviaire, agricole.
- ❖ **Un inventaire des émissions** des activités extractives **détaillant qualitativement l'emplacement des sources et leurs caractéristiques d'émission (géométrie, hauteur etc...)**, et complétée par une validation du plan de situation par les différents exploitants du bassin. Simplification du schéma d'émission pour les activités selon 3 systèmes : extraction (foration-tirs de mines-transport interne), traitement et stockage.
- ❖ **Un inventaire des émissions** des activités extractives **détaillant quantitativement l'estimation des émissions** avec l'utilisation de la **méthodologie et des facteurs d'émission du CITEPA** basés sur l'approche de l'**AP-42** de l'US-EPA.
- ❖ **La prise en compte de la topographie et de l'occupation des sols** du bassin dans le calcul de la dispersion.
- ❖ Les tests de calage réalisés selon **plusieurs scénarios météorologiques**, avec des variables décrivant la stabilité atmosphérique.

Les simulations réalisées à l'issue de ces travaux ont permis de valider la capacité du modèle à reproduire la dispersion et le transport des particules PM10 dans la proportion des niveaux de concentration mesurées. Les calculs de scores de comparaison modèle/mesure sont très satisfaisants compte tenu de la nouveauté pour le modèle d'évoluer dans ce type de configuration en proximité industrielle, et sur des zones encaissées. Les critères de la directive européenne en matière d'évaluation de modèle sont respectés.

Nous pouvons dès lors **confirmer la pertinence des facteurs d'émission issus de l'approche AP-42 et de la méthodologie mise en œuvre par le CITEPA**. Il sera important à l'avenir pour d'autres études de ce type, de bien s'attacher à définir précisément l'ensemble des sources des carrières selon la **décomposition en 3 systèmes d'activités**. Autant quantitativement que qualitativement, le détail de préparation des données d'entrée des sources d'émission est primordial. Tout comme la réalisation d'un cadastre d'émissions de la zone d'étude complet. L'utilisation de ces facteurs est garantie dans la configuration des sites d'exploitation du bassin de Marquise.

Les cartographies réalisées à l'issue des simulations sur l'ensemble du domaine d'étude montrent logiquement des dépassements de la valeur limite en moyenne annuelle pour les PM10 (40 µg/m³), localisés à l'intérieur du périmètre des carrières. L'influence des activités extractives sur le reste du domaine d'étude se note légèrement dans un petit périmètre aux abords des carrières sans pour autant atteindre des niveaux en PM10 dépassant la valeur limite en moyenne annuelle à l'extérieur du périmètre des carrières. Dans ce sens ces résultats viennent corroborer ceux du rapport de la



campagne de mesures (paragraphe 3.1.3) où un « impact potentiel mais non systématique de l'activité des carrières sur les concentrations en particules en suspension PM10 a été mesuré sur les sites de Ferques et Marquise ».

Une étude par groupe de sources a permis de déterminer la contribution de chacune des activités. On a ainsi pu montrer, pour le cas traité ici, le Bassin de Marquise, la part prépondérante des activités de stockage et de traitement sur les niveaux de concentration en PM10. Les émissions des activités d'extraction, de forage et de transport interne sont secondaires et plus limitées en surface exposée.

En perspective, des améliorations peuvent être apportées :

- **Mieux estimer la temporalité les pics et valeurs importantes de concentrations de PM10.** Pour cela des informations sur l'activité de chaque source sont nécessaires afin d'établir des profils temporels d'émission. Ils traduiraient les périodes d'arrêt de l'activité, des périodes de production plus grande, les heures de chargement/déchargement etc.
- **Mieux représenter les concentrations réelles en périphérie des carrières.** A partir des potentiels d'émissions évalués suivant la méthode CITEPA sur la base des facteurs d'émission, il s'agirait de tenir compte dans la modélisation des carrières de la « nature particulière du polluant et de sa sédimentation sous forme de dépôts secs et humides ». En effet, comme il est précisé dans les hypothèses de départ (tableau des paramètres ADMS §3.2.1), cette option n'avait pas été retenue faute d'expérience. Or, les suivis réalisés sur les différents sites au cours du programme EMCAIR soulignent dans leurs interprétations et conclusions cette particularité des carrières à la fois sources et puits pour les particules.
- **Mieux individualiser les sources d'émissions** à l'intérieur du périmètre de la carrière en tenant compte des données issues de l'exploitation et d'autres, plus spécifiques, qui pourraient être mises en place dans le cadre d'un programme de travail sur les facteurs d'émissions avec le CITEPA ; ainsi, la modélisation pourrait intervenir comme test pour valider plus finement les facteurs d'émissions et la modélisation retenue pour les carrières.

3.3. Air Pays de la Loire (Carrière E)

3.3.1. Bilan météorologique

Le tableau ci-dessous présente les paramètres mesurés, ainsi que les techniques de mesures employées en fonction des différents sites de mesures

Pays de la Loire	Analyseurs automatiques		Granulomètres	Préleveur séquentiel	Préleveur passif	Météo
	Moyen technique : jauges radiométriques et analyseur type BAM		Dekati filtres en fibre de quartz, débit 30L/min ou 10L/min ;	Partisol ; filtre en fibre de quartz, débit 1m³/h.	jauges Owen, prélèvement mensuel	
	[PM10] (µg/m³)	[PM2,5] (µg/m³)	PM10 et PM2,5 analyses	PM10 et PM2,5 analyses	Pesée poussières sédimentables (en mg)	
Les Béchis (amont)	GRIMM	GRIMM	X	X	X	
Carrière H	TEOM-FDMS	TEOM-FDMS	X	X	X	X
Les Rinières (aval)	TEOM-FDMS	TEOM-FDMS	X	X	X	

Tableau 29 : Equipement des stations de mesures pour les deux campagnes AIR Pays de la LOIRE. La carrière a été équipée de Webcams*.

3.3.2. Contexte météorologique

Vents

La direction et la vitesse du vent sont des paramètres importants à prendre en compte lorsqu'il s'agit de comprendre la dispersion des polluants dans l'environnement et d'analyser la qualité de l'air extérieur. Grâce aux données mesurées à partir de la station mobile installée dans la carrière E, il est possible de retracer les conditions de vent durant les campagnes.

La répartition des vents sur l'ensemble de la première campagne de mesure est présentée sur la rose des vents ci-dessous. Elle montre une prédominance des vents du secteur Ouest.

La représentation hebdomadaire des roses de vents dans la carrière E montre que les conditions de vents sont très stables au cours de cette première campagne. La direction Ouest (entre 210 et 330°)

est prédominante, et des vitesses de vent assez fortes sont relevées. Etant donnée la direction prédominante, le site des Bechis ne devrait pas être influencé par la carrière tandis que le site des Rinières sera directement sous les vents provenant de la carrière, ce qui permettra d'évaluer l'impact de la carrière sur celui-ci.

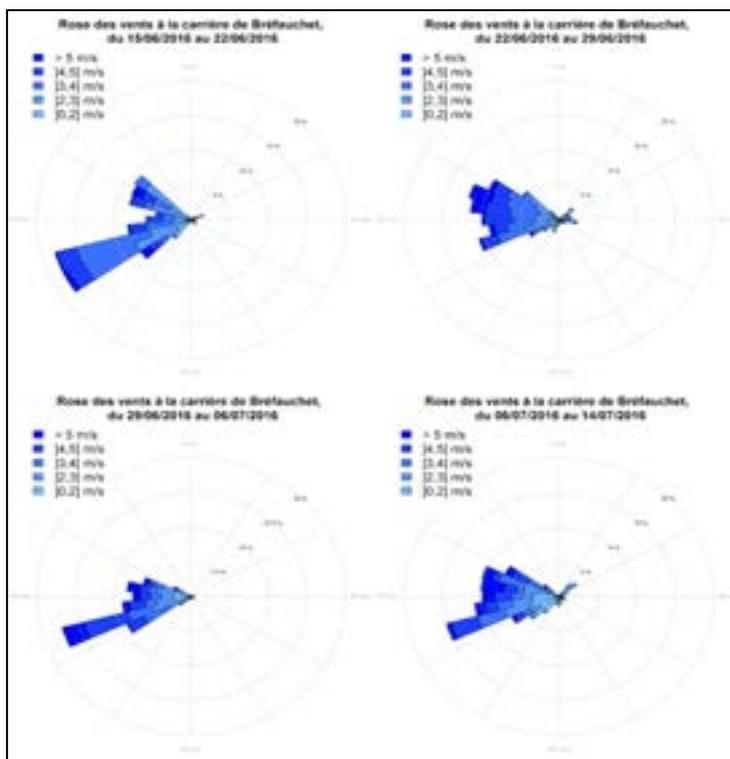
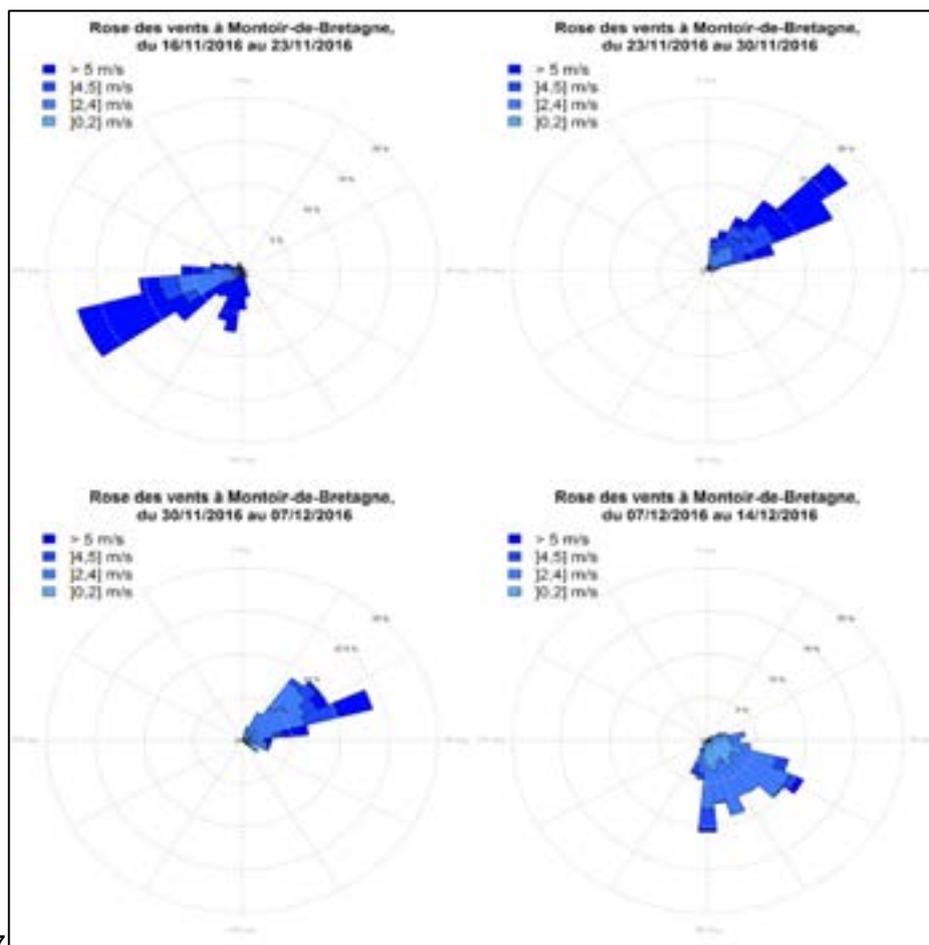


Figure 102 : Roses des vents hebdomadaires dans la carrière E durant la campagne estivale

En revanche lors de la seconde campagne les conditions de vents sont plus changeantes, comme le montre la représentation hebdomadaire ci-dessous. La direction du vent change d'une semaine à l'autre entre les directions Sud-Ouest et Nord-Est et des vitesses de vents assez fortes sont relevées lors des deux premières semaines de la campagne.





7

Figure 103 : Roses des vents hebdomadaires à Montoir-de-Bretagne durant la seconde campagne (16/11/2016 au 14/12/2016)

Ces résultats permettent de conclure que le site des Rinières ne sera pas sous les vents de la carrière durant la deuxième et la troisième semaine de cette campagne. En revanche il est possible que le site des Bechis soit influencé par la carrière étant donné qu'il se situe sous les vents de cette dernière. Cependant, il ne sera pas possible de confirmer directement cette hypothèse puisque aucune mesure en ligne n'a été effectuée sur le site des Bechis lors de la campagne hivernale, à cause d'un dysfonctionnement de l'appareil de mesure. Durant la quatrième semaine, étant donné la direction du vent, il est possible qu'aucun des deux sites ne soit influencé par la carrière. Les prélèvements hebdomadaires pour les analyses chimiques permettront de répondre précisément sur ces points.

⁷ A noter que pour cette seconde campagne ce sont les données de Météo France, mesurées à Montoir-de-Bretagne (situé à 45 km de la carrière E), qui ont été utilisées.



Précipitations

Les données de pluviométrie ont été récupérées depuis la station de Météo France située à Montoir-de-Bretagne. Durant les deux campagnes les précipitations sont plutôt faibles :

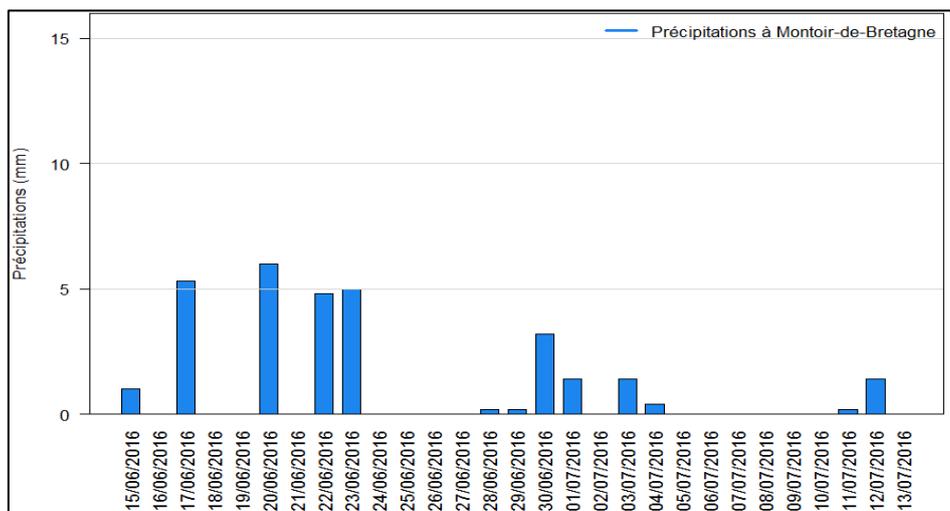


Figure 104 : Précipitations au cours de la campagne estivale – Pays de la Loire

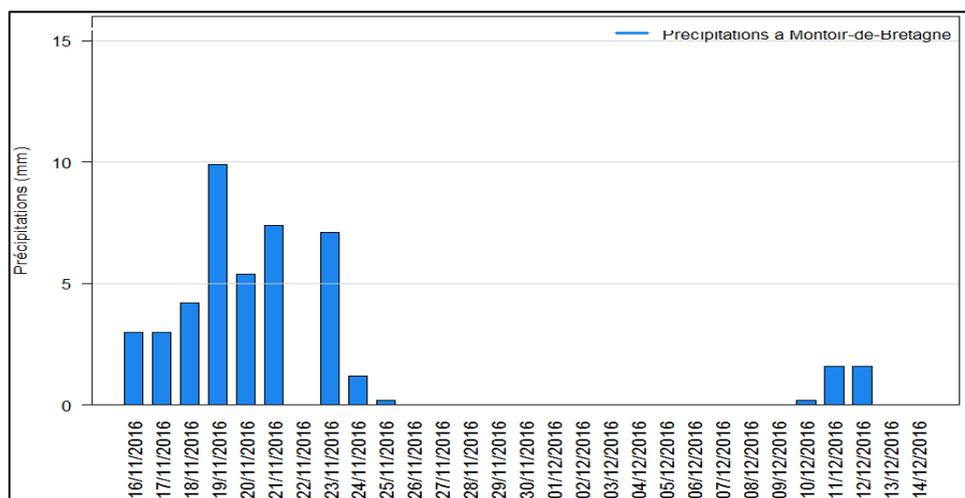


Figure 105 : Précipitations au cours de la campagne hivernale – Pays de la Loire

Pour les deux campagnes les valeurs sont inférieures aux normales de saison :

	Campagne estivale	Campagne hivernale
Mesures	37,4 mm	45,6 mm
Normales de saison	45 mm	93 mm

Tableau 30 : Normales de saison concernant les précipitations

De plus, tandis qu'en campagne estivale les jours de pluie sont dispersés tout au long du mois, en campagne hivernale les précipitations apparaissent surtout lors de la première semaine. Malgré cela les campagnes restent majoritairement sèches, ce qui permet de conclure que les deux campagnes ont connu des conditions favorables à un empoussièrément de la carrière.

Autres paramètres météorologiques



D'autres paramètres tels que la température, la pression relative et l'humidité relative ont également été étudiés afin de décrire les conditions météorologiques des campagnes. Durant la campagne estivale, la température et l'humidité relative ont été globalement stables. Seule la pression relative varie beaucoup entre la première semaine et le reste de la campagne. Concernant la campagne hivernale, ces facteurs varient plus mais restent en accord avec les normales de saison. Les deux campagnes se sont donc déroulées dans des conditions météorologiques relativement normales, sans anomalie ou évènement particulier.

3.3.3. Épisodes de pollution en région durant les campagnes de mesures

Un épisode de pollution correspond à une période pendant laquelle les concentrations de polluants dans l'atmosphère ne respectent pas les seuils réglementaires. Les particules en suspension PM10 font partie des polluants qui peuvent faire l'objet d'une procédure de déclenchement d'épisode de pollution de l'air. Pour ces épisodes, deux niveaux sont à distinguer : le seuil d'information et de recommandation, fixé à 50µg/m³ pour les moyennes journalières en PM10 et le seuil d'alerte, à 80 µg/m³ pour les moyennes journalières également. Le dépassement du premier seuil entraîne une information particulièrement renforcée auprès des publics sensibles, le dépassement du second seuil entraîne des mesures ciblées de réduction des émissions

Au cours de cette étude, aucun épisode de pollution n'a été constaté. Cependant, lors de la seconde campagne de mesure réalisée du 16 novembre au 14 décembre 2016, le niveau régional de particules fines a augmenté considérablement : sur le site de fond situé à Saint Denis d'Anjou, on observe une moyenne de 10 µg/m³ pendant la campagne estivale alors que ce niveau passe à 25µg/m³ pendant la campagne hivernale.

Cette augmentation peut être expliquée par l'utilisation soutenue des chauffages au bois en cette période hivernale, qui sont des procédés fortement émetteurs de particules en suspension PM10 et PM2.5. Ce contexte régional particulier a impacté les résultats des mesures effectuées sur les différents sites de l'étude, avec une augmentation du niveau de fond pour les particules fines, en carrière comme en dehors de celle-ci.

3.3.4. Analyse descriptive des données de mesures

3.3.4.1. Bilan métrologique

Les données obtenues durant les campagnes de mesures sont généralement basées sur un pas de temps quart-horaire (une mesure toutes les quinze minutes). Ces données sont ensuite agrégées pour obtenir des moyennes horaires ou journalières. Afin de garantir un résultat représentatif, les données sont validées et agrégées uniquement si un certain taux de fonctionnement est atteint. Ce taux représente le pourcentage de données valides d'un appareil de mesure sur une période donnée. Il est souvent fixé à 75%, c'est-à-dire qu'il faut au moins trois valeurs sur quatre valides pour calculer une moyenne.

Dans le cas du projet EMCAIR, certains appareils ont présenté un dysfonctionnement et n'ont donc pas été utilisés pour l'analyse⁸.

Pour le reste des appareils utilisés, tous les taux de fonctionnement ont été supérieurs à 85% comme indiqué dans le tableau suivant :

Donnée mesurées	Site de mesures	Taux de fonctionnement (%) Campagne estivale	Taux de fonctionnement (%) Campagne hivernale

⁸ Le compteur de poussières GRIMM, utilisé sur le site des Bechis, n'a pas fonctionné durant la campagne hivernale. L'anémomètre et la girouette installés en carrière ont affiché des valeurs aberrantes durant la campagne hivernale. Ces données ont donc été invalidées et nous avons décidé d'utiliser les données du site de Météo France à Montoir-de-Bretagne.



PM10	Les Béchis	97,8	-
	Carrière E	97,5	99,5
	Les Rinières	95,7	98,6
	Saint-Denis-d'Anjou	99,1	98,9
PM2,5	Les Béchis	97,8	-
	Carrière E	95,8	98,8
	Les Rinières	96,1	96,8
	Saint-Denis-d'Anjou	99,2	99,2
Vitesse du vent	Carrière E	91,2	-
Direction du vent	Carrière E	98,4	-

Tableau 31 : Taux de fonctionnement pour les différents paramètres mesurés durant les deux campagnes

L'analyse des résultats de mesures de particules fines PM10 permettra de connaître les niveaux de concentrations relevés sur les différents sites afin de conclure sur l'influence de la carrière sur la qualité de l'air extérieur. De même, cette partie permettra de vérifier le respect des valeurs réglementaires concernant les PM10 pour les sites des Bechis et des Rinières. A noter que les industries extractives, et donc les mesures effectuées au sein de la carrière, ne sont pas soumises à cette même réglementation et ne sont donc pas concernées par le seuil journalier de 50 µg/m³ relatif aux PM10.

Au sein de la carrière E

Les figures suivantes représentent l'évolution des concentrations en particules fines PM10 relevées au cours des campagnes, au sein de la carrière.

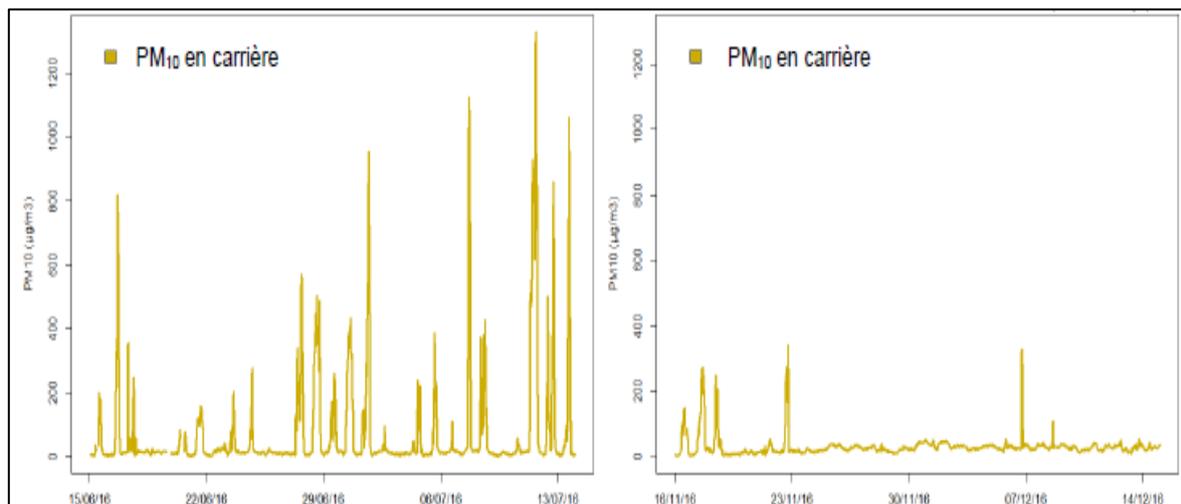


Figure 106 : Evolution des particules fines PM10 au sein de la carrière durant les campagnes 1 (à gauche) et 2 (à droite) – données quart-horaires

La campagne estivale est marquée par de nombreux pics de concentrations très élevées (presque un par jour ouvré) avec un maximum de 1 300 µg/m³ en valeur quart-horaire. Ces valeurs sont largement supérieures à celle mesurées généralement sur une station du réseau permanent.

Concernant la campagne hivernale, les pics sont moins nombreux et sont de concentrations moins élevées. A noter que la plupart des pics sont relevés en début de campagne alors qu'il s'agissait également de la période la plus pluvieuse pour cette phase de mesure. Il semblerait donc que la pluie ait un effet limité sur les émissions de particules, ce qui pourrait s'expliquer si les précipitations ont lieu pendant la nuit plutôt qu'en journée lorsque la carrière est en activité.

Concernant le niveau de fond (niveau hors des pics de concentration), il est plus élevé en campagne hivernale qu'en campagne estivale. Ces observations suggèrent l'influence d'autres sources de



pollution particulaire durant la campagne hivernale, car il s'agit d'une période en général plus marquée par des émissions liées au chauffage au bois. Par ailleurs, les conditions météorologiques, notamment le faible vent, sont plus propices à une accumulation des polluants près du sol.

Sur l'ensemble des sites de la zone d'étude

Les figures suivantes représentent l'évolution journalière des concentrations en particules PM10 relevées au cours des campagnes, sur trois sites de mesures (en carrière, sur le site des Rinières et à Saint-Denis-d'Anjou, site rural de référence en Pays de la Loire).

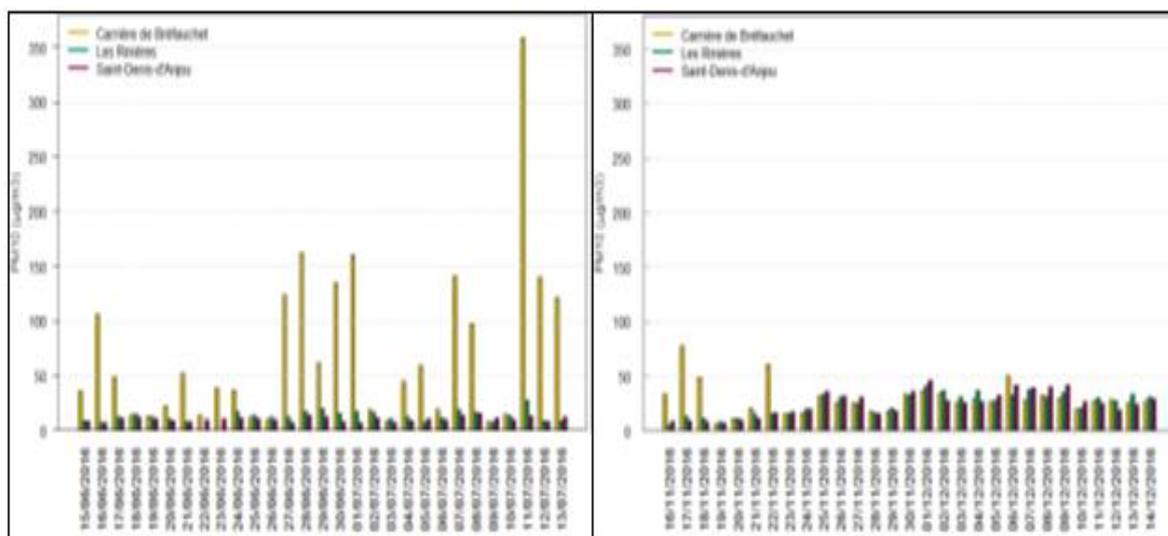


Figure 107 : Evolution des PM10 sur tous les sites durant les campagnes estivale (à gauche) et hivernale (à droite) en moyennes journalières

Concernant la campagne estivale les concentrations mesurées en carrière se démarquent nettement des concentrations mesurées sur le site des Rinières et à Saint-Denis-d'Anjou. Il est notamment facile de repérer les week-ends qui correspondent aux jours avec les valeurs les plus basses pour les concentrations mesurées en carrière. De plus, il semblerait que les concentrations mesurées sur le site des Rinières soient légèrement supérieures à celles mesurées à Saint-Denis-d'Anjou qui est un site rural. Cette observation permet de suggérer que le site des Rinières subit l'influence d'une source de particules fines.

En ce qui concerne la campagne hivernale, les concentrations mesurées en carrière se démarquent moins, à part pour certains pics en début de campagne. Cependant, les concentrations obtenues en dehors de la carrière, sur le site des Rinières et à Saint-Denis-d'Anjou, sont supérieures à celles obtenues lors de la campagne estivale. Cette observation confirme que la campagne hivernale, est influencée par une pollution de fond plus importante à l'échelle régionale à cause des combustions liées aux chauffages collectifs et individuels.

Une autre représentation graphique, la boîte à moustache « boxplot », permet d'avoir un autre aperçu des données de PM10 sur les différents sites. Elles ont été réalisées « sans oublier », c'est-à-dire sans valeurs atypiques qui correspondent ici aux valeurs des pics de concentrations : boîtes à moustache des concentrations de PM10 sur les différents sites, pour la campagne estivale (à gauche) et la campagne hivernale (à droite) réalisées avec les données quart-horaires :



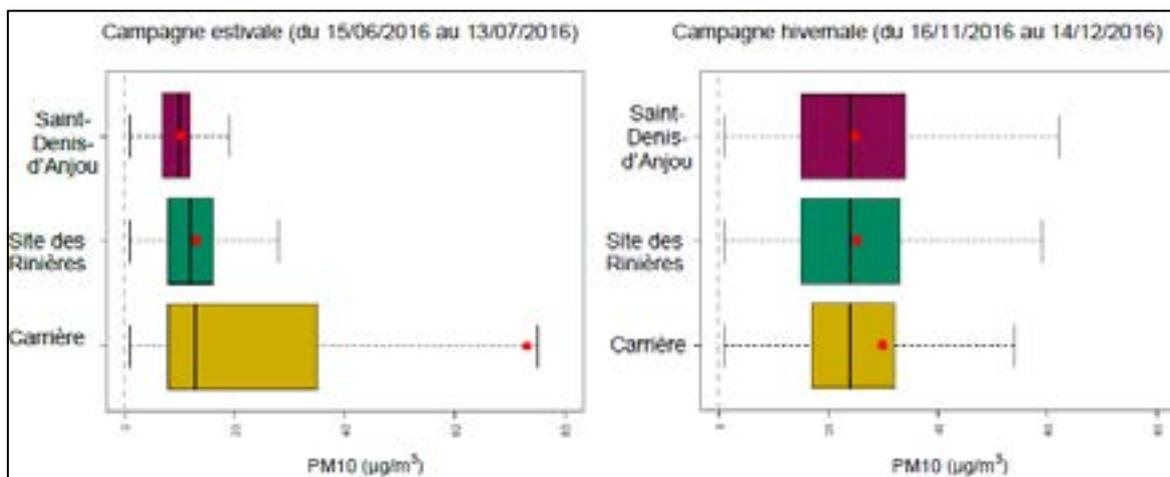


Figure 108 : Boîtes à moustache des concentrations de PM10 sur les différents sites, pour la campagne estivale (à gauche) et la campagne hivernale (à droite) réalisées avec les données quart-horaires

NB : La ligne noire représente la concentration médiane, le point rouge la moyenne

Pour la campagne estivale, l'influence des pics de concentration est lisible sur le boxplot de la carrière, notamment car la moyenne des PM10 sur ce site (de 73,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) est proche des valeurs maximales et largement supérieure à la médiane (est de 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ; la moyenne semble donc majoritairement gouvernée par les pics de concentrations. Cette représentation graphique permet également de confirmer que les valeurs moyennes en carrière sont significativement supérieures à celles des deux autres sites. De même les valeurs sur le site des Rinières sont elles-mêmes légèrement supérieures à celles mesurées à Saint-Denis-d'Anjou. Les valeurs médianes marquent des différences moins significatives

En campagne hivernale les boîtes à moustaches sont très proches (les outliers ne sont pas non plus représentés). Seule la moyenne en carrière laisse deviner la présence de quelques pics de concentrations élevées car elle est plus élevée que la médiane et les moyennes des autres sites.

En dehors de la carrière

Les graphiques suivants présentent l'évolution journalière de la concentration en particules PM10 en dehors de la carrière E, au cours de la campagne estivale.

Les profils des concentrations sur les trois sites sont proches les uns des autres. Les concentrations mesurées au niveau du site des Béchis sont légèrement inférieures à celles mesurées sur le site des Rinières. Il est difficile d'expliquer cette différence étant donné le possible biais métrologique existant entre les deux appareils de mesures utilisés.

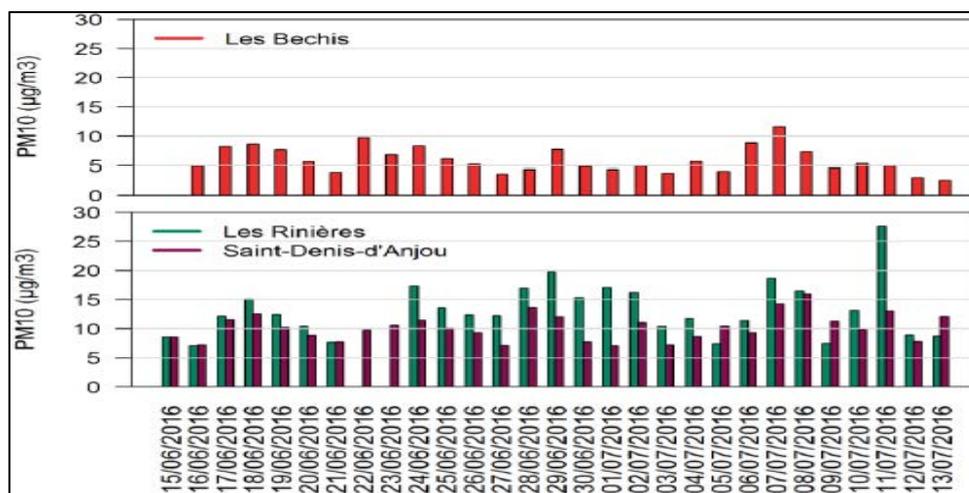


Figure 109 : Evolution des particules fines PM10 sur les sites des Béchis, des Rinières et à Saint-Denis-d'Anjou durant la campagne estivale, en données journalières



En effet, il est important de rappeler que les mesures pour le site des Bechis sont effectuées avec un compteur de poussière GRIMM tandis que les mesures pour le site des Rinières (et à Saint-Denis-d'Anjou) sont issues d'un analyseur TEOM-FDMS. D'autre part, les concentrations mesurées sur le site des Rinières sont légèrement supérieures à celles obtenues à Saint-Denis-d'Anjou qui est un site rural. Etant donné la direction du vent durant cette campagne estivale, ces observations suggèrent une possible influence de la carrière ou d'une autre source locale sur le site des Rinières. Les concentrations mesurées en dehors de la carrière E sont supérieures lors de la campagne hivernale, comme l'indique la représentation graphique ci-dessous. Comme expliqué précédemment, cette augmentation des niveaux de particules est due à une pollution régionale plus importante durant cette période hivernale.

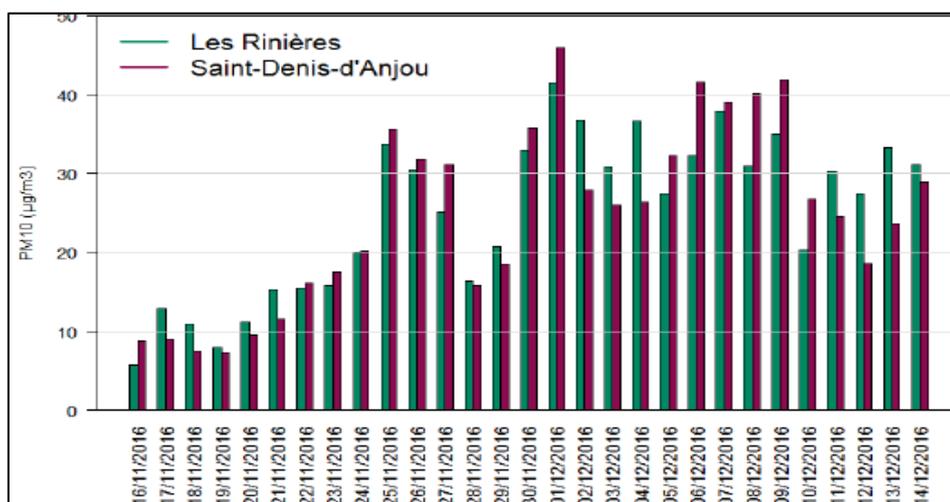


Figure 110 : Evolution des particules fines PM10 sur le site des Rinières et à Saint-Denis-d'Anjou durant la campagne hivernale, en données journalières

Les concentrations mesurées sur le site des Rinières et à Saint-Denis-d'Anjou restent proches, bien qu'en début et en fin de campagne les concentrations sur le site des Rinières soient supérieures à celle du site rural. La possible influence de la carrière est donc moins visible durant cette phase de mesure, notamment car les vents étaient moins favorables pour cette campagne.

3.3.4.2. Les particules en suspension PM2,5

Au sein de la carrière E

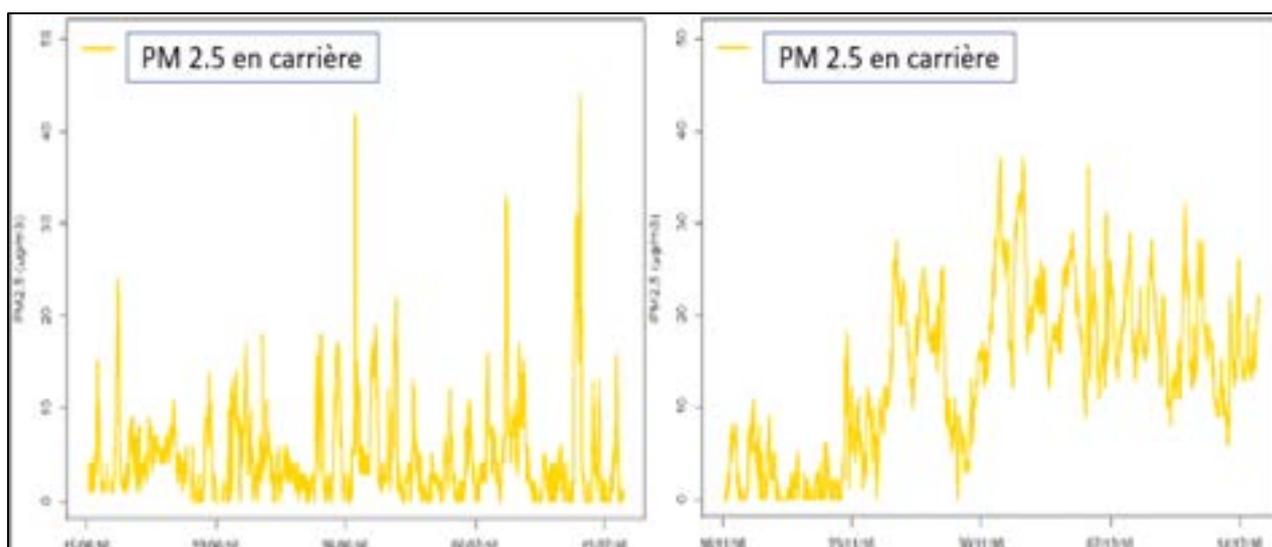


Figure 111 : Evolution des particules PM2,5 au sein de la carrière durant les campagnes estivale (à gauche) et hivernale (à droite) – données quart-horaires



A première vue les tendances des concentrations en particules PM2.5 rejoignent celles des particules PM10. En campagne estivale le niveau de fond est relativement bas mais plusieurs pics de concentrations élevées apparaissent. En revanche la campagne hivernale est moins marquée par des pics mais le niveau de fond est plus élevé à partir du 21 novembre 2016.

Sur l'ensemble des sites de la zone d'étude

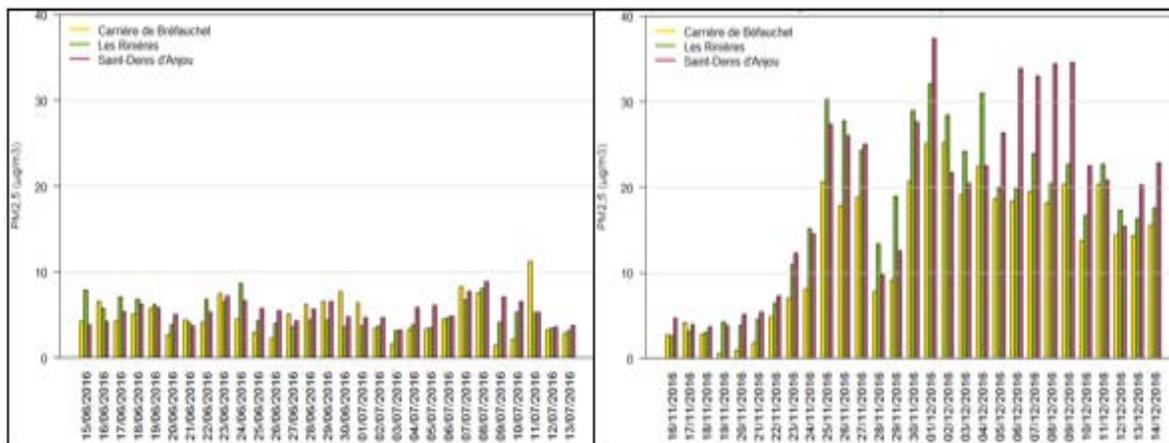


Figure 112 : Evolution des particules PM2,5 au sein de la carrière durant les campagnes estivale (à gauche) et hivernale (à droite) – données journalières

Concernant la campagne estivale, les concentrations sont du même ordre de grandeur entre les différents sites. Quelques pics sont relevés en carrière (le 11 juillet 2016 par exemple), mais de moindre ampleur comparée aux pics obtenus pour les particules PM10.

Les concentrations mesurées durant la campagne hivernale sont également du même ordre de grandeur entre les différents sites. Cette seconde campagne est marquée par une forte augmentation des concentrations à partir du 21 novembre 2016, et ce sur tous les sites. Ces observations confirment que la campagne hivernale a été fortement marquée par une pollution particulaire régionale, probablement liées à la combustion de biomasse (chauffage domestique au bois).

Les niveaux de PM2.5 relevés ne permettent donc pas d'observer des différences significatives entre le site en carrière, le site de proximité et le site de fond pour ce polluant.

3.3.4.3. Granulométrie

La granulométrie représente la répartition des particules selon leur taille (PM10 ou PM2.5), afin de mieux caractériser les propriétés des particules émises par les carrières. Un des indicateurs granulométriques est le ratio $PM_{2,5}/PM_{10}$. Ce ratio a été calculé pour les différents sites puis représenté sous forme de distributions statistiques et d'évolutions temporelles :

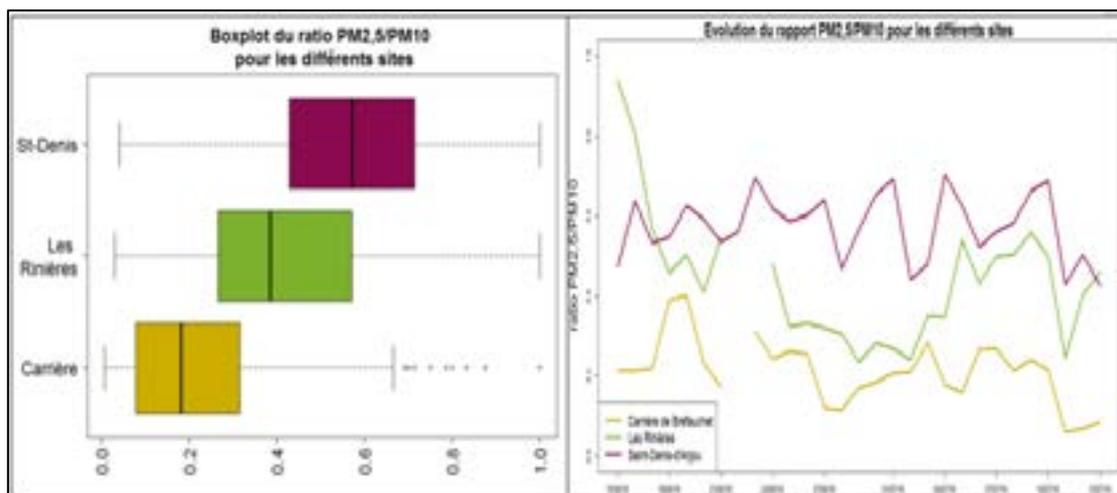


Figure 113 : **A gauche** : boxtplot du ratio $PM_{2,5}/PM_{10}$ pour les différents sites, lors de la campagne estivale. **A droite** : Evolution journalière de ce même ratio pour les différents sites, lors de la campagne estivale

Durant la campagne estivale, le site de Saint-Denis-d'Anjou se différencie des deux autres sites avec des valeurs de ratio assez élevées, 0.6 en moyenne.

En carrière en revanche, le ratio $PM_{2,5}/PM_{10}$ est très bas avec une valeur moyenne de 0,2. Les émissions en carrière semblent donc principalement caractérisées par des grosses particules visibles à l'œil nu et des PM_{10} .

Au niveau du site des Rinières, le ratio est inférieur à celui obtenu à Saint-Denis-d'Anjou. Avec une valeur moyenne de 0,4 il se rapproche donc du ratio obtenu en carrière ce qui permet de supposer une possible influence de la carrière sur le site des Rinières.

Concernant la campagne hivernale, voici les résultats obtenus :

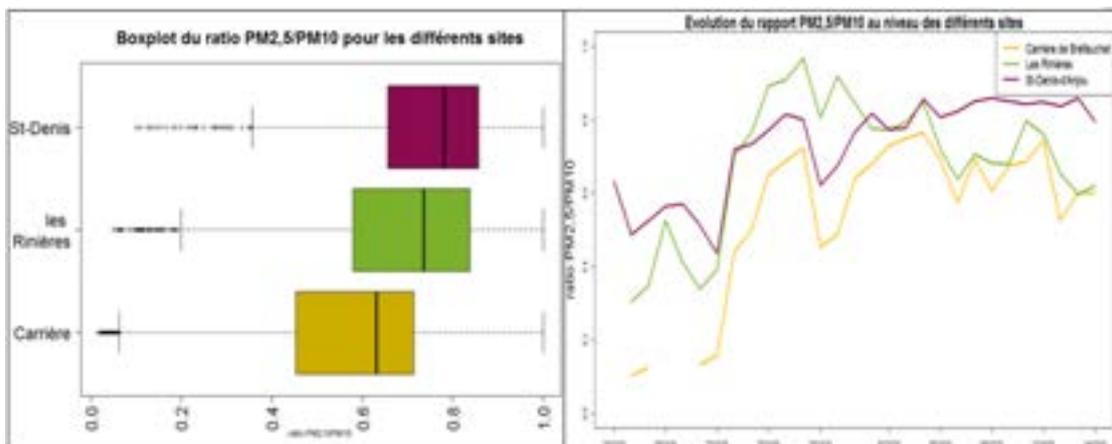


Figure 114 : **A gauche** : boxplot du ratio $PM_{2,5}/PM_{10}$ pour les différents sites, lors de la campagne hivernale. **A droite** : Evolution journalière de ce même ratio pour les différents sites, lors de la campagne hivernale

Pour cette campagne, les ratios des différents sites sont plus élevés, ce qui rejoint les hypothèses formulées pour cette campagne hivernale, plus touchée par des émissions de $PM_{2.5}$ dues au chauffage résidentiel.

Malgré cela, les remarques formulées pour les ratios de la campagne estivale sont valables pour la campagne hivernale, bien que les différences de ratios soient moins marquées. En effet le ratio à Saint-Denis-d'Anjou, avec une moyenne de 0,7, reste le plus élevé des différents sites. En carrière le ratio moyen est de 0,6 tandis que pour le site des Rinières le ratio moyen est de 0,7. Ainsi lors de cette campagne hivernale, la possible influence de la carrière sur le site des Rinières est moins visible.

Ces différentes conclusions permettent de mettre en avant un marqueur fort de la carrière : **un ratio $PM_{2,5}/PM_{10}$ faible**. Comme l'indiquent les figures suivantes, ce ratio est d'autant plus faible lors des pics de concentrations. En effet, le ratio se rapproche de zéro lorsque les concentrations en PM_{10} augmentent, formant un mode particulier pour des valeurs de ratio comprises entre 0 et 0,2.

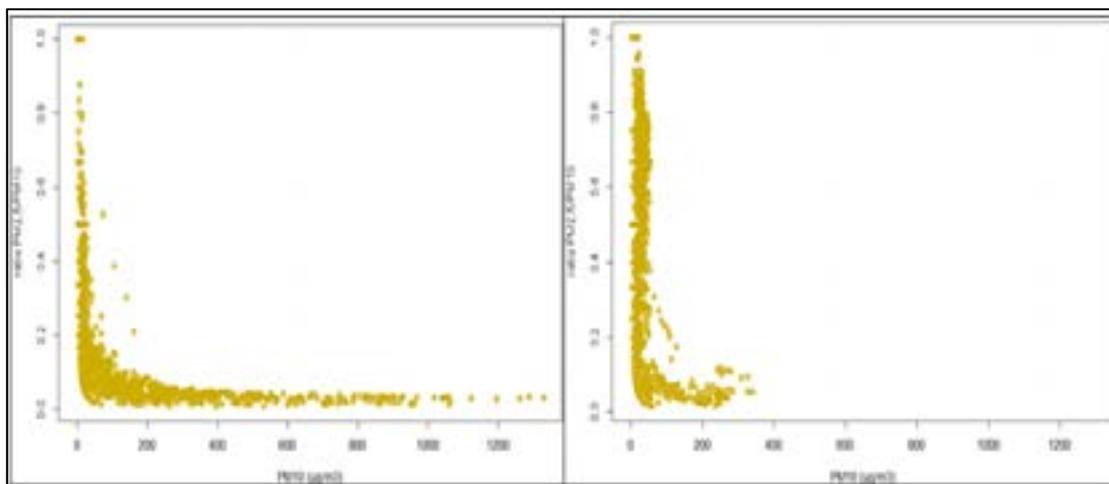


Figure 115 : ratios $PM_{2,5}/PM_{10}$ en fonction des PM_{10} pour le site carrière, lors de la campagne estivale (graphe de gauche) et lors de la campagne hivernale (graphe de droite)



Les modes observés dans la carrière sont moins marqués pour le site des Rinières, comme l'indiquent les figures suivantes :

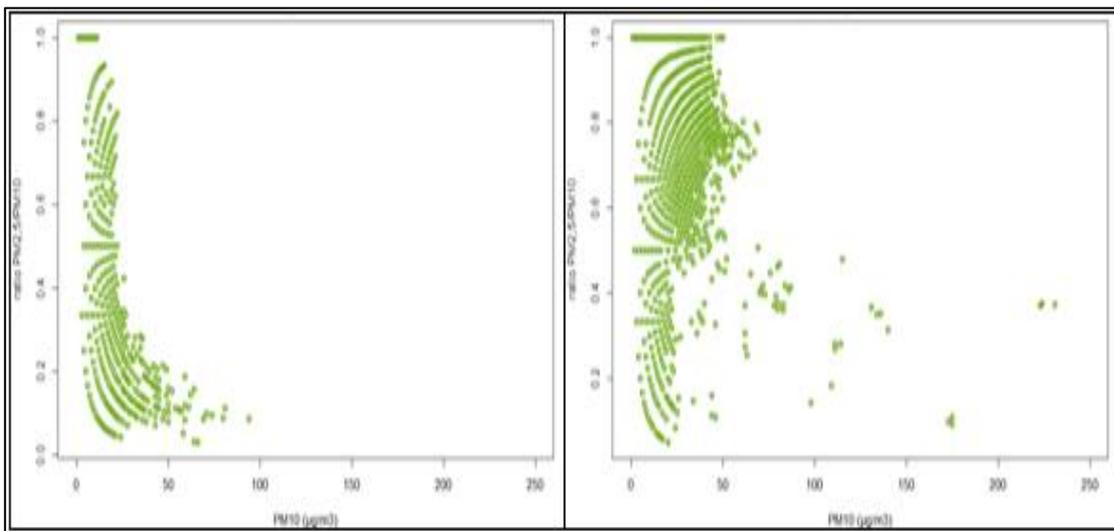


Figure 116 : ratios PM2,5/PM10 en fonction des PM10 pour le site des Rinières, lors de la campagne estivale (graphe de gauche) et lors de la campagne hivernale (graphe de droite)

Sur la campagne estivale il est tout de même possible d'observer le même phénomène. De plus, de manière générale le ratio est plus élevé, surtout en hiver lors de la seconde campagne.

L'étude de la granulométrie permet de conclure que la carrière est marquée par des ratios faibles à cause des importants niveaux de PM10 atteints lors des pics de concentrations. En comparant ce ratio à ceux des différents sites encadrant la carrière, il semble que la carrière ait une influence sur le site des Rinières, avec un apport de particules PM10, car celui-ci possède un ratio plus proche de celui de la carrière que celui du site de Saint-Denis-d'Anjou.

3.3.4.4. Sources de particules

La répartition des concentrations en PM10 en fonction des vents est présentée ci-dessous, pour les différents sites et sur l'ensemble de la campagne estivale.

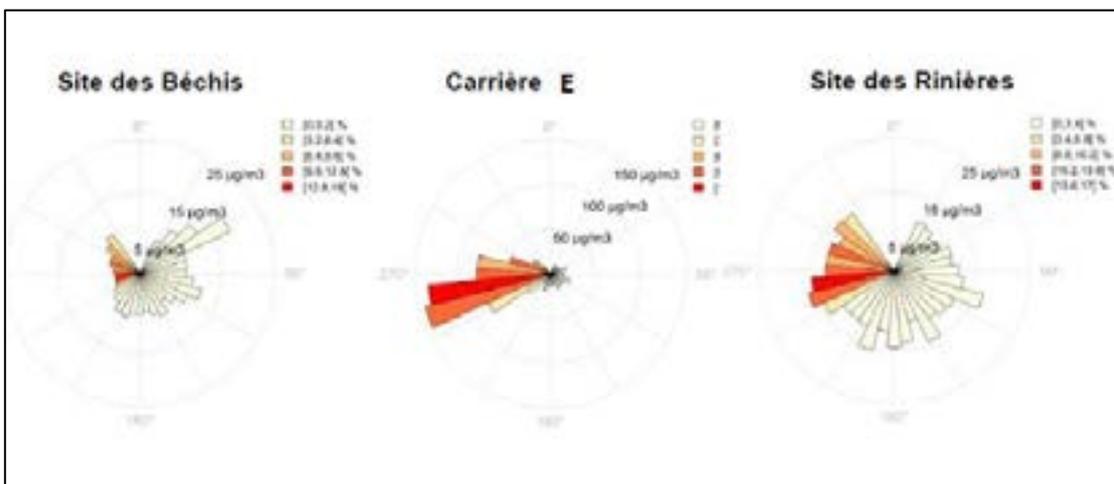


Figure 117 : Roses de pollution des PM10 pour le site des Béchis, de la carrière et du site des Rinières lors de la campagne estivale

En dehors de la carrière

Pour les deux sites à l'extérieur de la carrière, les concentrations sont homogènes et bien réparties sur les différentes directions de vent relevées durant cette campagne. Sur le site des Béchis, quelques pics de concentrations sont relevés lorsque le vent vient de la carrière, mais il s'agit d'une direction peu représentative comme l'indique la couleur de la pâle à 60°. Pour le site des Rinières, certains pics sont relevés dans la direction de la carrière avec une fréquence non négligeable.



Au sein de la carrière

En carrière, la composante Ouest est également présente avec des concentrations élevées. En comparant cette rose de pollution avec la carte de la carrière, il semble que la rose pointe les zones de traitements et de vente, comme l'indique la figure suivante



Figure 118 : Rose de pollution des PM10 au niveau du site mobile installé dans la carrière

Concernant la **campagne hivernale**, les vents étaient beaucoup moins stables pour cette période, et le site des Rinières est sous les vents de la carrière uniquement lors de la première semaine :

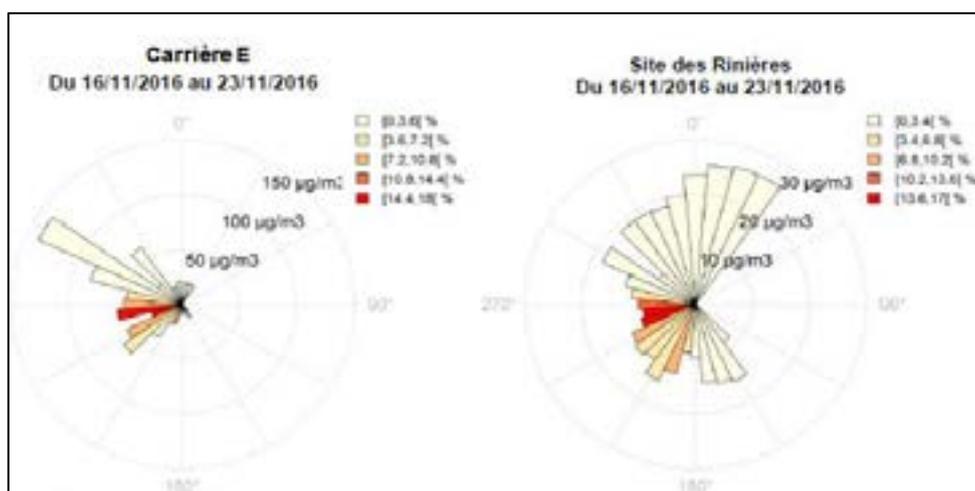


Figure 119 : Roses de pollution des PM10 pour le site de la carrière et le site des Rinières lors de la première semaine de la campagne hivernale

En carrière plusieurs pics sont relevés pour la direction Ouest, dont un pic majeur à 310°, mais avec des fréquences peu représentatives. Sur le site des Rinières, les concentrations sont plus élevées que durant la campagne estivale, et différentes directions sont pointées bien que les fréquences soient peu représentatives. Ces résultats confirment qu'en campagne hivernale le site des Rinières est influencé par un niveau de fond régional élevé, plutôt que par la carrière.

Les autres semaines de la campagne ayant des directions de vent différentes, il est difficile de conclure sur l'origine des particules à partir des données disponibles. Une analyse plus approfondie, menée sur des périodes plus courtes comme une journée, semble nécessaire.

Les roses de pollution pour le reste de la campagne hivernale sont présentées en annexe du rapport d'étape d'ATMO Pays de la Loire.

3.3.4.5. Les poussières sédimentables

Les retombées atmosphériques, ou poussières sédimentables, ont été mesurées à partir des jauges Owen installées au sein de la carrière E et en dehors de celle-ci, au niveau des sites des Bechis et

des Rinières. La détermination des Matières en Suspension (MES) a ensuite été effectuée par l'Institut d'Analyses et d'Essais en Chimie de l'Ouest (IANESCO) et les échantillons ont également été envoyés au LSCE pour des analyses chimiques complémentaires.

Site de mesures	Date début	Date fin	Masse collectée sur cette période (mg)	Surface (m ²)	Retombées (mg/m ² /jour)
Carrière E	15/06/2016 10:00	13/07/2016 14:15	1409	0,05	1019
Les Rinières	15/06/2016 13:50	13/07/2016 14:50	37	0,05	27
Les Bechis	15/06/2016 15:30	13/07/2016 15:20	36	0,05	26

Tableau 32: Poussières sédimentables ou « retombées atmosphériques totales » mesurées lors de la campagne estivale

Site de mesures	Date début	Date fin	Masse collectée sur cette période (mg)	Surface (m ²)	Retombées (mg/m ² /jour)
Carrière E	16/11/2016 13:10	14/12/2016 13:40	133	0,05	97
Les Rinières	16/11/2016 14:30	14/12/2016 15:45	17	0,05	12
Les Bechis	16/11/2016 11:30	14/12/2016 11:00	38	0,05	28

Tableau 33 : Poussières sédimentables mesurées lors de la campagne hivernale

Les résultats obtenus montrent que les retombées sont variables d'un site à l'autre. Pour les deux campagnes, les retombées les plus élevées sont mesurées en carrière. Durant la campagne estivale, les retombées mesurées au niveau des sites des Béchis et des Rinières sont relativement similaires. Il semble donc que la carrière n'ait pas d'impact en termes de retombées atmosphériques, alors qu'un impact avait été relevé concernant les particules PM10.

Cependant, lors de la campagne hivernale, les retombées atmosphériques sont supérieures au niveau du site des Bechis. Cette différence est probablement due aux changements de vent lors de cette campagne hivernale, plaçant souvent le site des Bechis sous les vents de la carrière. De même, le site des Bechis se situe plus près de la carrière E que le site des Rinières. Malgré les différences de niveaux de retombées atmosphériques entre les deux sites extérieurs à la carrière, l'impact de celle-ci reste faible durant la seconde campagne.

Ainsi, bien que la carrière semble avoir un impact sur l'air extérieur en termes de particules PM10, les données précédentes permettent de conclure que cet impact n'est pas retrouvé en ce qui concerne les poussières sédimentables.

Ces valeurs peuvent être comparées à la réglementation en vigueur concernant les carrières. En effet, l'arrêté du 30 septembre 2016, qui a modifié l'arrêté type relatif aux exploitations de carrières, fixe un objectif à 500 mg/m²/jour pour les retombées atmosphériques totales pour des jauges installées sur un site « à proximité immédiate des premiers bâtiments accueillant des personnes sensibles (centre de soins, crèche, école) ou des premières habitations situées à moins de 1 500 mètres des limites de propriétés de l'exploitation, sous les vents dominants » (article 19.6 de l'AM du 22 septembre 1994 modifié). Cette valeur de seuil ne concerne donc que les sites des Bechis et des Rinières, et les résultats des mesures permettent de conclure que le seuil n'a pas été dépassé sur ces sites.

3.3.5. Analyse approfondie de quelques épisodes en Pays de la Loire

Afin d'expliquer l'origine des pics relevés lors de la campagne estivale à l'aide des paramètres connus, une analyse approfondie a été mise en place pour certains jours. Pour cela, en plus des données étudiées lors de l'analyse descriptive, sont également utilisées les données d'activité de la



carrière, retraçant les activités des différents postes au cours des campagnes. L'objectif de cette partie est donc de « zoomer » sur certains jours marqués par des pics, pour essayer de les expliquer à partir des données d'activités.

3.3.5.1. Méthode

Sélection des journées marquées par un pic de concentration

Cette analyse approfondie a été effectuée sur 7 pics sélectionnés parmi la vingtaine de pics relevés en carrière lors de la campagne estivale. Afin d'avoir une sélection la plus représentative possible, plusieurs paramètres ont été pris en compte pour le choix des pics :

- la pluviométrie;
- les données d'activités de la carrière;
- le profil du pic;
- la concentration maximale de PM10 atteinte, etc.

Les journées suivantes ont été sélectionnées :

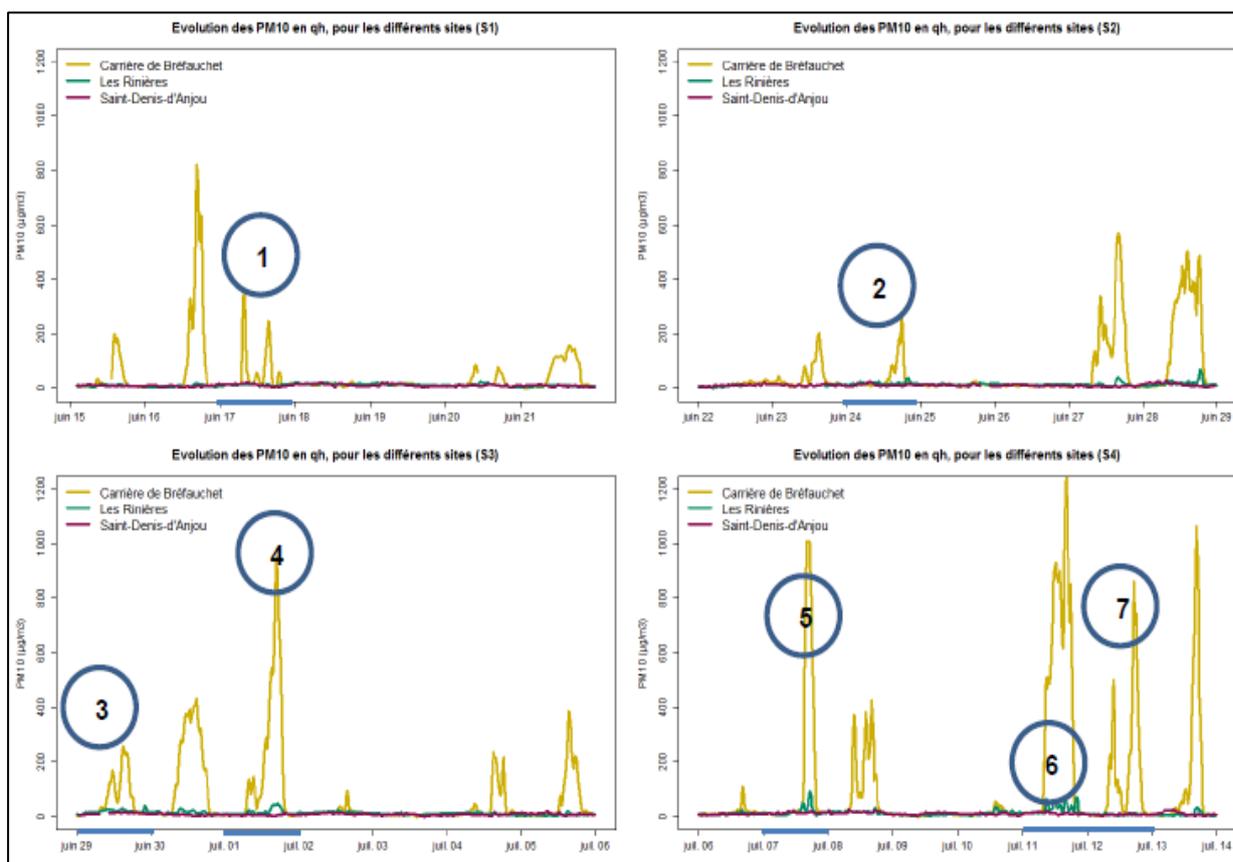


Figure 120 : Evolution des particules PM10 sur les différents sites, semaine par semaine pour la campagne estivale ; les pics sélectionnés pour une étude approfondie sont marqués par des numéros, (sauf pour les pics 6 et 7 ne seront pas étudiés pour le présent rapport)

Numéro du pic	Date
1	17 juin 2016
2	24 juin 2016



3	29 juin 2016
4	01 juillet 2016
5	07 juillet 2016
6	11 juillet 2016
7	12 juillet 2016

Tableau 34 : Liste des pics sélectionnés ; campagne estivale

Données analysées

Pour chaque journée caractérisée par un pic en carrière qui a été sélectionnée, différentes données ont été étudiées en détails :

- les **paramètres météorologiques** tels que le vent, la pluviométrie et l'humidité relative ;
- les concentrations en **particules fines PM10 et PM2.5** afin de suivre l'évolution de ces derniers tout au long de la journée et sur les différents sites ;
- les **données d'activité de la carrière (données journalières)** qui seront analysées afin d'essayer d'assimiler les pics à des postes précis au sein de la carrière. Les principales variables utilisées seront les tonnages journaliers associés à chaque poste et les horaires de début et fin de ces mêmes postes.

Grâce à l'analyse approfondie de toutes ces données, certaines hypothèses ont pu être formulées afin d'expliquer l'origine des pics de PM10 en carrière.

3.3.5.2. Analyse des journées sélectionnées

Pic du mercredi 29 juin 2016

Ce jour-là, deux pics sont relevés en carrières : le premier se forme entre 8h et 12h et atteint une concentration maximale de 175 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (donnée quart-horaire) tandis que le second apparaît entre 14h et 18h avec un maximum à 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (donnée quart-horaire).

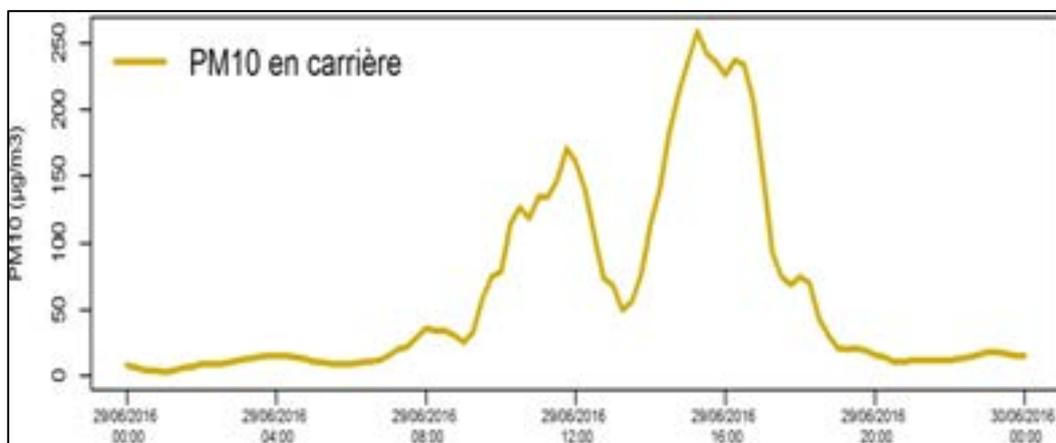


Figure 121 : Evolution des particules fines PM10 en carrière au cours de la journée du 29 juin 2016, données quart-horaires

Le premier pic apparaît à partir de 8h alors qu'au même moment la vitesse du vent augmente de 1 à 5 m/s et la direction se stabilise à 250°, comme l'indique les deux figures suivantes :



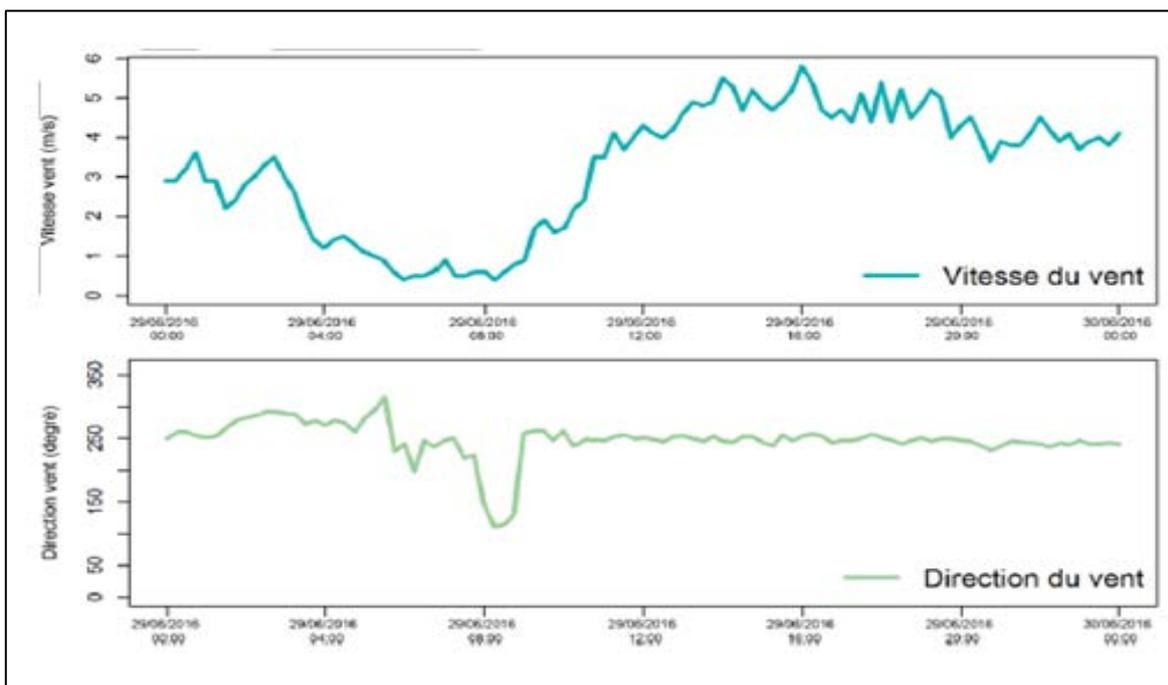


Figure 122 : Evolution des vitesse et direction du vent en carrière au cours de la journée du 29 juin 2016

Avec ces conditions de vent, le site installé au sein de la carrière est directement sous les vents de celle-ci, ce qui explique l'augmentation des concentrations en PM10 mesurées en début de journée. A noter qu'il n'a plu que 0,6 mm dans la nuit du 28 au 29 juin. L'humidité relative descend notamment à 60% aux alentours de 12h et aucun arrosage des pistes n'est effectué sur l'exploitation. Les conditions sont donc relativement sèches, ce qui favorise la remise en suspension des poussières.

Cependant, un creux est observé entre 12h et 14h alors que les conditions météorologiques n'ont pas changé : la vitesse du vent est toujours élevée et l'environnement est relativement sec. Afin d'expliquer le profil du pic, les données d'activité fournies par l'exploitant de la carrière E sont analysées :

Poste		Activité
Extraction		Elevée
Ventes		Elevée
Traitement	Primaire	A partir de 13h45
	Secondaire	Nulle – Maintenance
	Tertiaire	Nulle - Maintenance
Transport interne	Evacuation tout venant	Nulle
	Déstockage	Nulle

Tableau 35 : Données d'activité de la carrière E le 29 juin 2016

Ce jour-là, les deux activités principales sont l'extraction et la vente. Les activités de traitements sont faibles et seul le poste de traitement primaire fonctionne, à partir de 13h45. De plus il n'y a aucun transport interne que ce soit pour le déstockage ou pour l'évacuation du tout-venant.

L'extraction ayant lieu dans la fosse de la carrière, c'est-à-dire sur un terrain très encaissé (60 mètres de profondeur environ), il est peu probable que cette activité ait une influence sur les niveaux de particules en carrière.

Cependant les activités de ventes pourraient expliquer les concentrations de poussières relevées ce jour-là. En effet, la trémie de chargement utilisée pour les ventes est un poste fortement générateur de poussière, qui a une activité élevée ce jour-là. Ainsi, le creux relevé sur le profil des PM10 pourrait être dû à l'arrêt des activités de ventes pour la pause déjeuner. Puis l'après-midi, la reprise des activités de ventes et le démarrage du poste de traitement primaire, qui est aussi un poste fortement émetteur de poussières, pourraient expliquer le second pic relevé dans les niveaux de particules fines PM10.

La rose de pollution, présentée ci-dessous, confirme les remarques formulées grâce aux données d'activité.

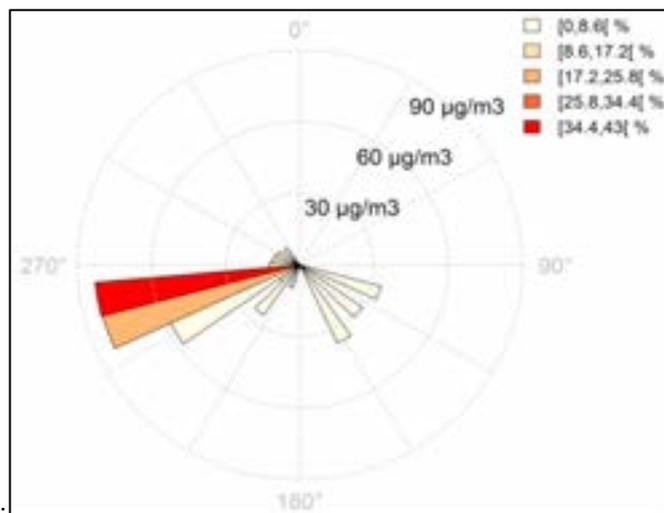


Figure 123 : Rose de pollution pour les particules PM10 en carrière le 29 juin 2016

En effet, des concentrations en PM10 élevées sont mesurées pour les directions prédominantes, entre 240° et 270°, qui correspondent aux zones de traitement et de vente.

De plus, les vidéos issues de la caméra installée au sein de la carrière révèlent plusieurs nuages de poussières qui se forment au niveau de la trémie dès lors que celle-ci est utilisée. Ce poste en particulier émet donc beaucoup de poussières.

Finalement, ce jour-là, les niveaux mesurés en carrière peuvent être expliqués par la combinaison de conditions météorologiques favorables à la remise en suspension de poussières et l'activité élevée d'un poste fortement émetteur de particules : la trémie de chargement.

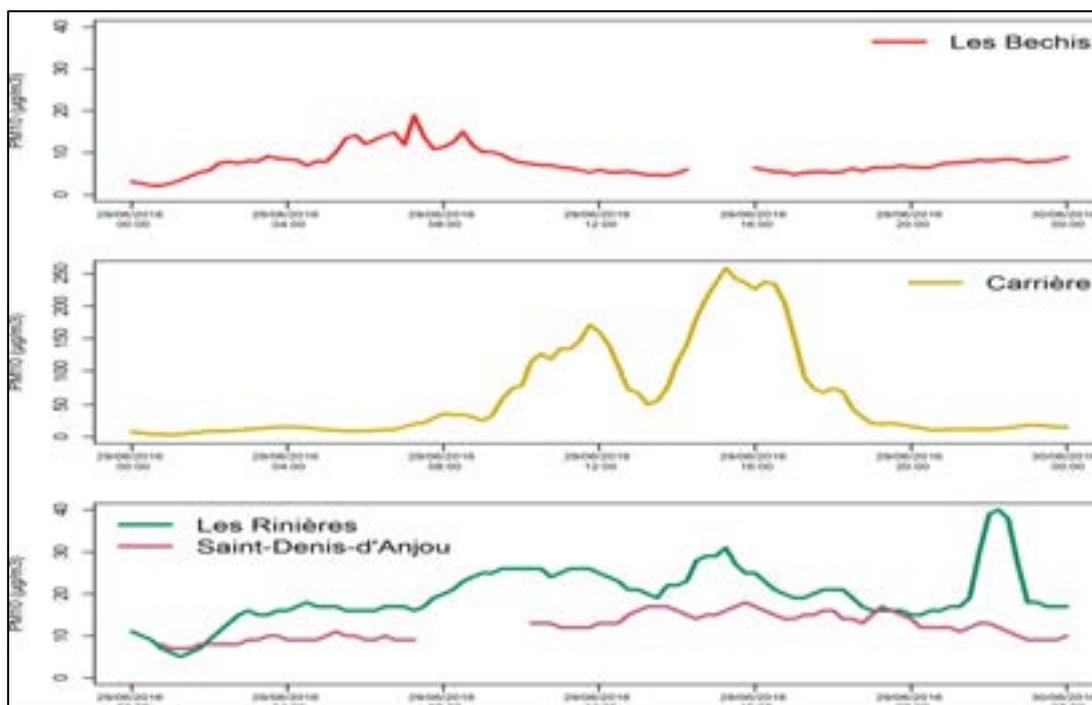


Figure 123 : Evolution des particules PM10 sur le site des Rinières et à Saint-Denis-d'Anjou au cours de la journée du 29 juin 2016

D'autre part, l'étude des conditions de vents ce jour-là laisse penser que le site des Rinières a été sous les vents de la carrière à partir de 10h. Il a ainsi pu être impacté par les activités de cette dernière. Le profil des particules PM10 mesurées sur le site des Rinières laisse effectivement penser qu'une source locale a influencé le site.



Les concentrations mesurées sur le site des Rinières sont en effet légèrement supérieures à celles mesurées à Saint-Denis-d'Anjou. Elles le sont d'autant plus pour les périodes comprises entre 8h et 12h et entre 14h et 18h, soit lorsque les deux pics de particules fines sont mesurés en carrière.

De plus, le ratio sur le site des Rinières semble plus proche de celui de la carrière que de celui de Saint-Denis-d'Anjou, comme le montre la figure suivante :

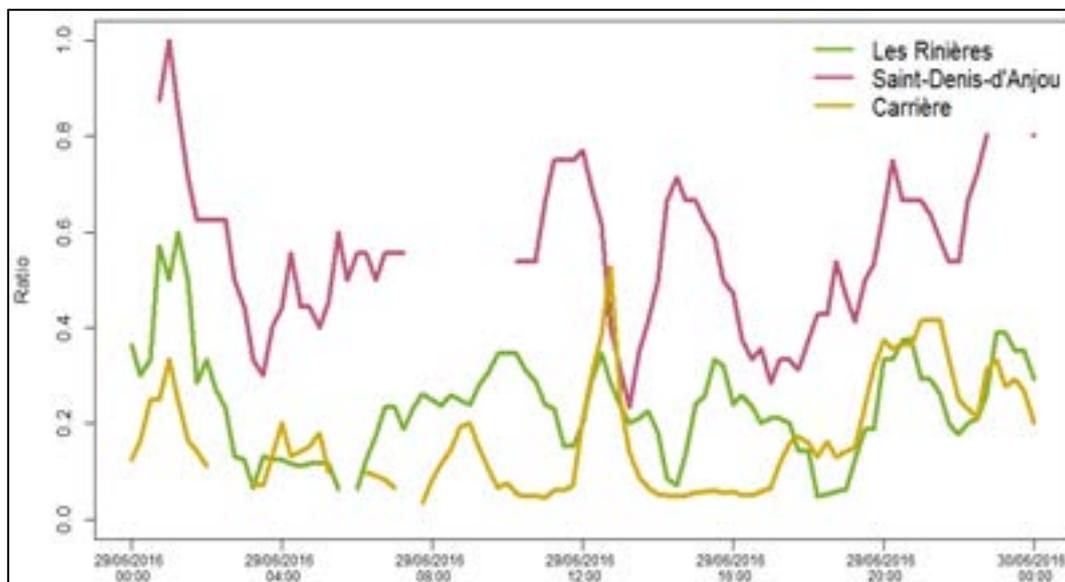


Figure 124 : Ratio PM2,5/PM10 en fonction du temps pour la journée du 29 juin 2016

Pic du mercredi 7 juillet 2016

Ce jour-là, un pic très net de valeur très élevée est relevé en carrière entre 14h et 18h. Le niveau en particules PM10 monte jusqu'à près de 1200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en deux heures, tandis que le reste de la journée la concentration est inférieure à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ce pic apparaît à partir de 14h alors que la vitesse du vent augmente brusquement, comme l'indique la figure suivante. De même, la direction se stabilise aux alentours de 250° à partir de 14h, alors qu'elle était plutôt vers 50° en début de journée

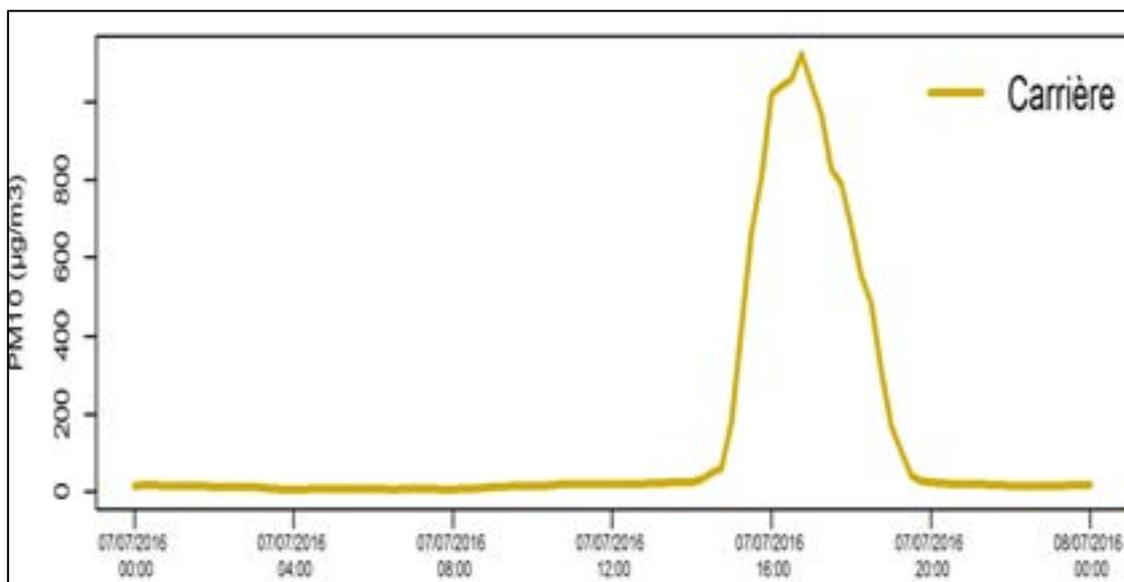


Figure 125 : Evolution des particules PM10 en carrière au cours de la journée du 7 juillet 2016



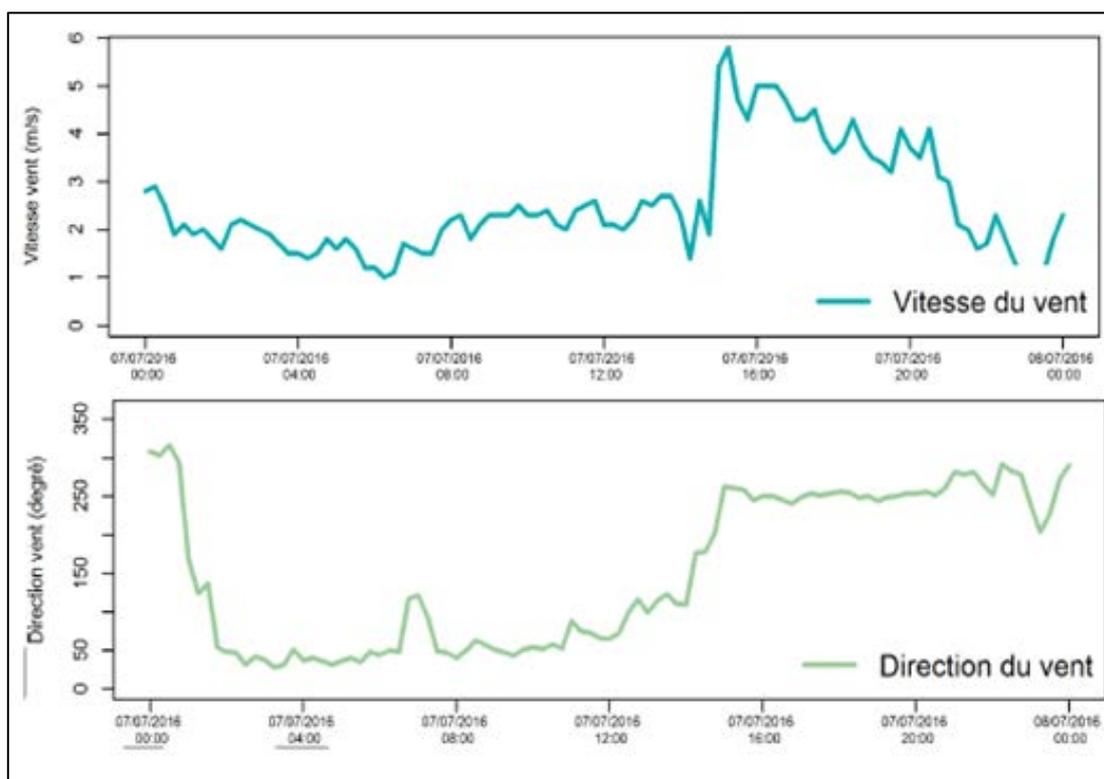


Figure 126 : Evolution des vitesse et direction du vent en carrière au cours de la journée du 7 juillet 2016

Ce jour-là les conditions sont également sèches : il ne pleut pas et un seul arrosage des pistes est effectué. Les conditions sont donc favorables à une accumulation de particules fines au sein de la carrière.

Les activités les plus importantes ce jour-là : le transport interne et les traitements, comme l'indique le tableau ci-dessous :

Poste		Activité
Extraction		Faible
Ventes		Faible
Traitement	Primaire	Moyenne (démarrage à 7h)
	Secondaire	Faible (démarrage à 9h30)
	Tertiaire	Faible (démarrage à 11h30)
Transport interne	Evacuation tout-venant	Elevée
	Déstockage	Faible

Tableau 36 : Données d'activité de la carrière E le 7 juillet 2016

L'évacuation tout-venant, qui se traduit par des allers-retours de dumpers entre la fosse où a lieu l'extraction et les stocks, est une activité connue pour être fortement génératrice de poussières. Même si, dans le cas de la carrière E, il s'agit d'une zone éloignée du point de mesure, il est tout à fait possible que cette activité puisse expliquer les niveaux de particules atteints ce jour-là.

De plus, même si les activités de ventes sont faibles ce jour-là, cela n'en reste pas moins un poste fortement émetteur de poussières. En effet, les vidéos de surveillance indiquent des nuages de poussières en provenance de la trémie de chargement à partir de 14h et à chaque fois que celle-ci est utilisée. La rose de pollution présente ci-dessous confirme une source de particules PM10 en provenance de la trémie et des installations de traitement :



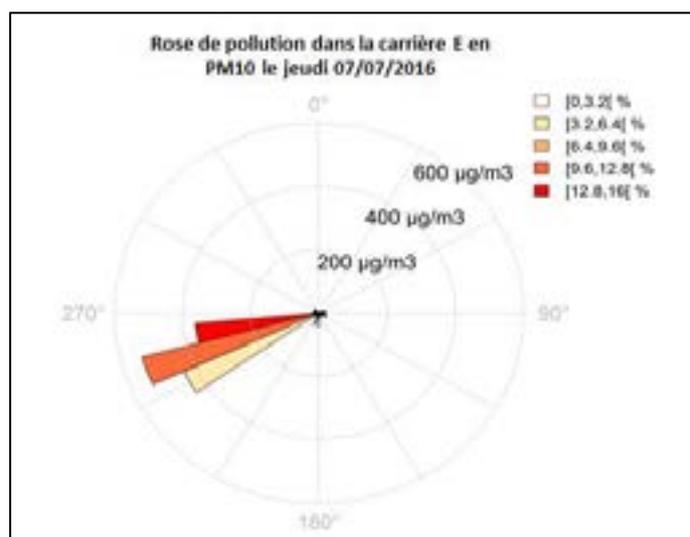


Figure 127 : Rose de pollution pour les particules PM10 en carrière le 7 juillet 2016

Finalement, les niveaux de particules PM10 atteints ce jour-là peuvent être expliqués avec les activités de ventes, de transport interne et de traitements, accompagnées de conditions météorologiques sèches et favorables à l'accumulation de poussières. A noter que le pic en carrière n'est relevé qu'après 14h car avant cela le vent n'est pas favorable et le site de mesure installé en carrière n'est pas sous les vents de celle-ci.

Etant donné les conditions venteuses ce jour-là, le site des Bechis est sous les vents de la carrière en début de journée tandis que le site des Rinières l'est à partir de 14h. Les profils de particules relevés sur ces sites sont donc logiques : dans les deux cas des niveaux de particules élevés sont relevés lorsque le site est sous le vent de la carrière.

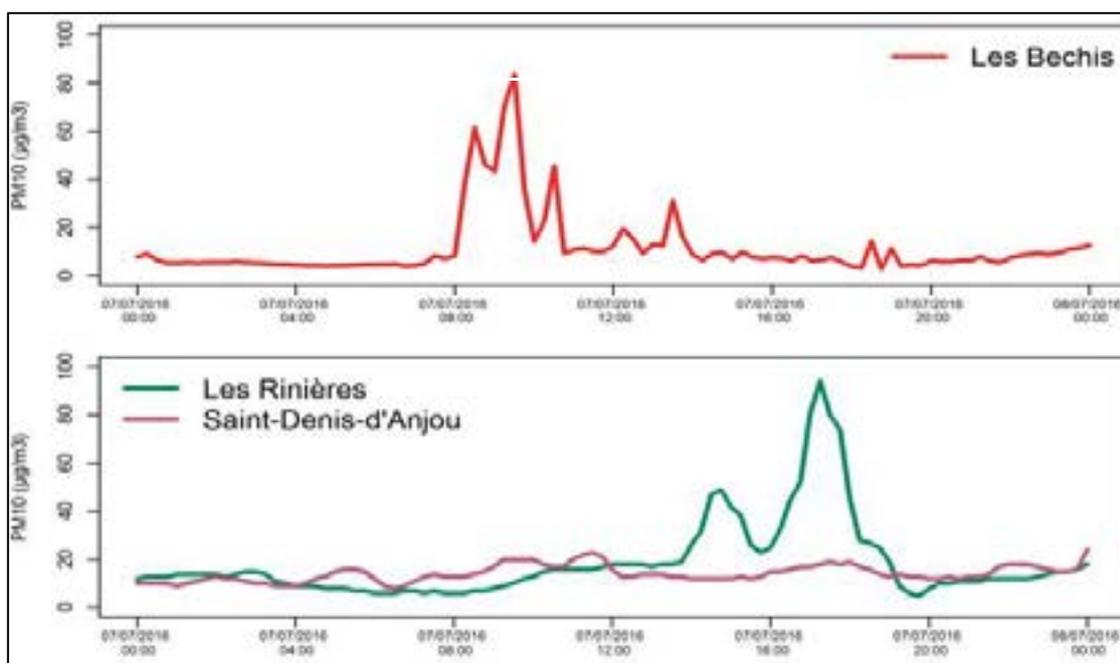


Figure 128 : Evolution des PM10 le 7 juillet 2016- Les Bechis, Les Rinières et Saint-Denis-d'Anjou

L'étude du ratio permet d'émettre l'hypothèse que les augmentations des concentrations de particules PM10 sur les deux sites extérieurs à la carrière sont dues aux activités de cette dernière :



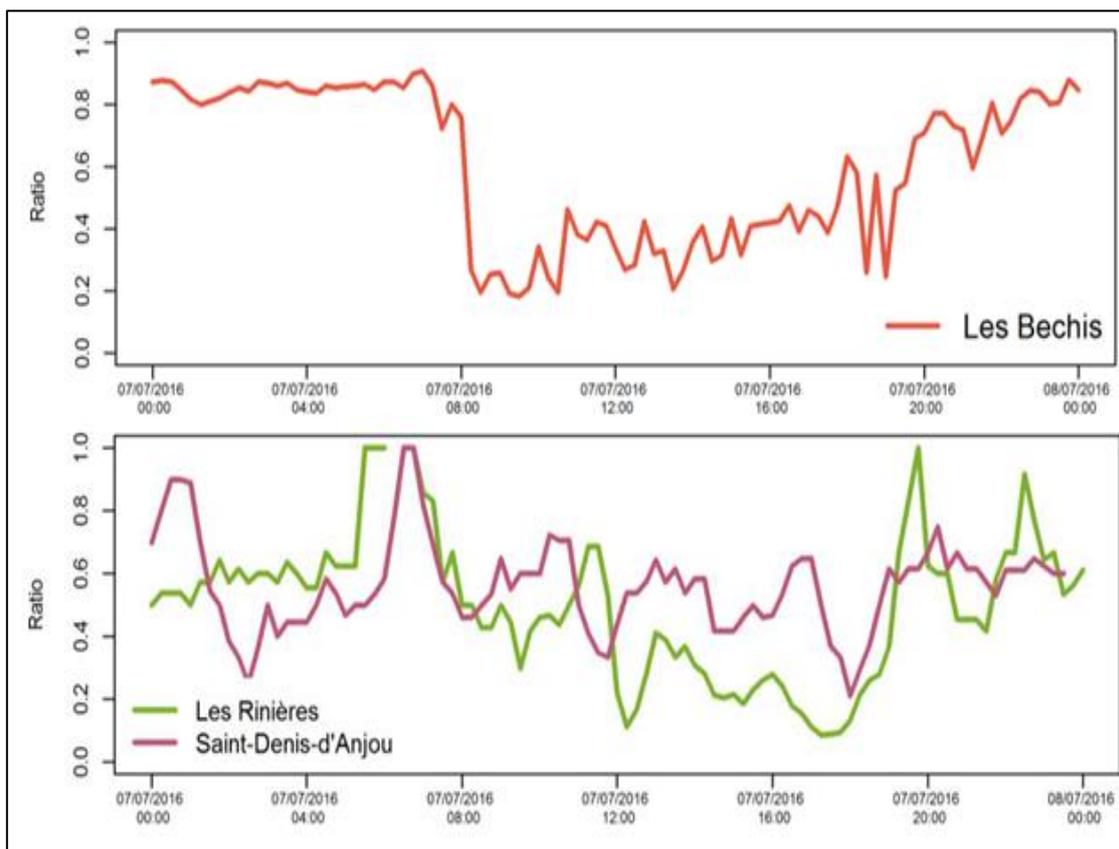


Figure 129 : Evolution du ratio PM_{2,5}/PM₁₀ pour la journée du 7 juillet – Les Béchis, Les Rinières et Saint Denis d'Anjou

Le site des Bechis semble directement impacté, avec une baisse significative du ratio en début de journée. Il est plus difficile de conclure pour le site des Rinières, le ratio de ce site étant proche de celui du site rural de Saint-Denis-d'Anjou. Entre 14h et 18h cependant, lorsque le site des Rinières est sous les vents de la carrière, le ratio de ce site diminue. L'analyse détaillée des autres pics sélectionnés pour la campagne estivale est présentée en annexe 6 du rapport d'étape Pays de la Loire.

3.3.6. Analyse chimique des particules en Pays de la Loire

Dans cette section, les résultats d'analyse des (échantillons des roches extraites dans les carrières) et des jauges OWEN (dépôts) seront présentés tout d'abord. Puis nous procéderons à une analyse métrologique des résultats d'analyse dans laquelle nous vérifierons la cohérence de la méthodologie de calcul des PM. L'interprétation des analyses chimiques se focalisera d'abord sur les fractions réglementées PM_{2.5} et PM₁₀ et nous verrons dans ces fractions, l'importance des poussières crustales à la fois en champ proche et en carrière. Ensuite, nous focaliserons notre attention sur la fraction « poussières crustales » ; nous évaluerons dans un premier temps les espèces chimiques majeures émises par la carrière à partir de la méthode dite des « facteurs d'enrichissement » ; nous tenterons d'évaluer la distribution granulométrique PM_{2.5}/PM₁₀ des émissions des carrières. Finalement, nous reprendrons ici la méthode de Lenschow pour estimer la part des émissions de carrière en champ proche.

3.3.6.1. Composition chimique des roches (prélèvements carrière) et dépôts (Jauges OWEN)

Echantillons de roches (prélèvements carrière) : L'analyse chimique de ce type de prélèvement doit nous aider à identifier les éléments chimiques susceptibles d'être émis par les activités d'extraction. Ils sont présentés ci-dessous pour deux types de sable et deux granulométries



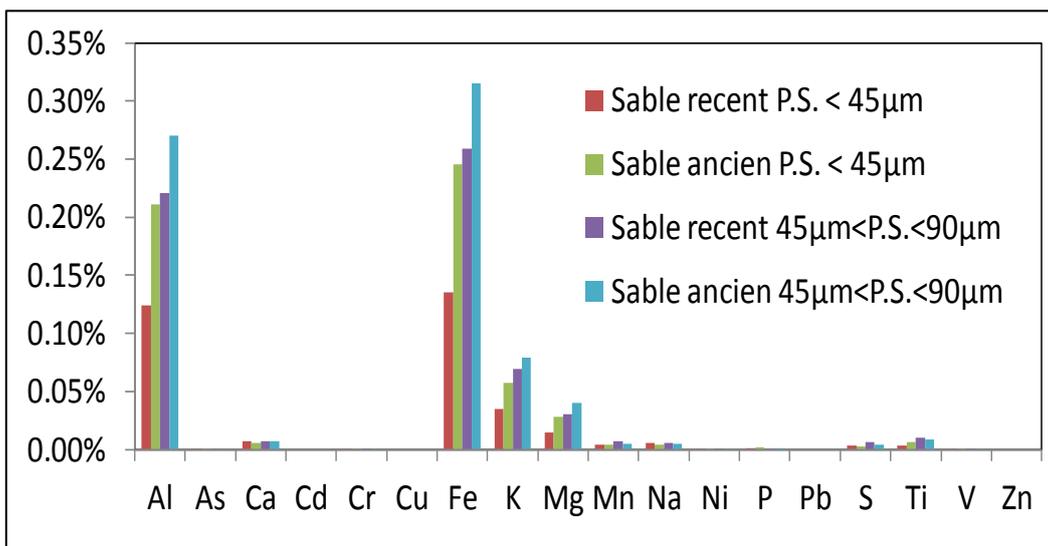


Figure 130 : Pourcentage massique de la composition en métaux trace des 2 échantillons de roche prélevés en carrière et suivant deux tailles de grain

Les résultats d'analyse chimique sont proches des données de littérature concernant le type de roche exploitée (gneiss), les 4 éléments dominants détectés dans les échantillons de sol sont (par ordre d'abondance) 1) Fe, 2) Al, 3) K, 4) Mg. Les rapports élémentaires montrent une très faible dispersion entre les différents types de sable (récent vs ancien ; petite taille vs grosse taille) et permettront d'être utilisés ultérieurement pour mieux discriminer les émissions de la carrière.

	Al/Fe	Al/K	Fe/K
Sable récent P.S. < 45µm	0.92	3.58	3.91
Sable récent 45µm < P.S. < 90µm	0.85	3.17	3.73
Sable ancien P.S. < 45µm	0.86	3.69	4.29
Sable ancien 45µm < P.S. < 90µm	0.86	3.41	3.97
Moyenne	0.87	3.46	3.97
Ecart Type	0.03	0.22	0.23

Tableau 37 : Rapports caractéristiques entre les différents éléments pour le site carrière

Jauges OWEN : L'analyse de la composition élémentaire des filtres collectés par les jauges OWEN sur l'ensemble de la première campagne (Juin-Juillet 2016) est rapportée dans la figure ci-dessous : c'est la plus significative avec des dépôts s'élevant à 1019 mg/m²/j. **La signature chimique des retombées sèches/humides en champs proche et en carrière semble assez différente.** La signature chimique en carrière est, comme attendu à partir des analyses chimiques de roche, enrichie en Fe, Al, K et Mg qui sont les éléments chimiques dominant des roches analysées par ICP-MS (pour mémoire Si n'est pas analysé ici car les prélèvements aérosols sont réalisés sur filtre quartz).

A noter qu'il n'a pas été possible de faire une comparaison directe entre carrière et fonds ruraux et d'évaluer un facteur d'enrichissement spécifique des émissions carrières ; ceci en raison d'un problème de collection du filtre en carrière (filtre abimé).



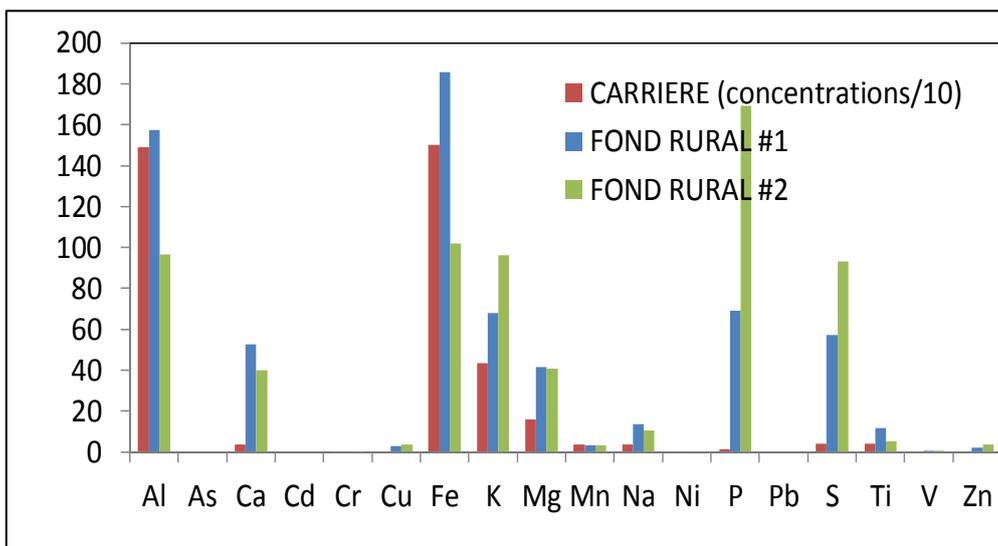


Figure 131 : Composition élémentaire des dépôts mesurés par les jauges OWEN sur les 3 sites d'étude (fonds ruraux #1, #2 et carrière). Les données sont exprimées en µg par gramme de poussière collectée sur le filtre

Même si nous avons des teneurs enrichies en Al et Fe nous permettant de travailler sur ces composés pour « tracer » les émissions de la carrière, nous avons tenté de voir s'il était possible de discriminer ces émissions à partir de rapports élémentaires caractéristiques. Pour cela, nous avons mis en relation des rapports caractéristiques (Al/Fe, Al/K, Fe/K) des échantillons de roche et des jauges Owen (Tableau 37)

	Al/Fe	Al/K	Fe/K		Al/Fe	Al/K	Fe/K
Site Rural #1	0,85	2,32	2,74	Site Rural #1	1,9	4,61	2,42
Site Rural #2	0,95	1,01	1,06	Site Rural #2	1,19	4,37	3,68
Site CARRIERE	0,99	3,43	3,45	Site CARRIERE	0,85	3,34	3,95
Echantillon CARRIERE	0,87	3,46	3,97	Echantillon CARRIERE	0,87	3,46	3,97

Tableau 38 : Rapports élémentaires obtenus sur les jauges Owen en été (à gauche) et en hiver (à droite) et comparaison avec les échantillons carrière

Pour les échantillons de Jauge OWEN en carrière (été et hiver), on trouve logiquement des rapports très proches de ceux obtenus par les analyses de roche (pas de variation suivant la saison).

Même si les sites ruraux en champ proche contiennent également ces éléments (Fe, Al, K, Mg) les rapports élémentaires sont très différents de ceux trouvés en carrière (exception faite du rapport Al/Fe en été qui ne semble pas être discriminant des émissions carrières). On note également que les rapports élémentaires en fond rural présentent une variation saisonnière (non observée en carrière). **Ces résultats suggèrent une influence limitée des émissions de carrière sur les dépôts en champ proche.** De façon assez surprenante, on trouve des niveaux de P, S, et Ca élevés sur les sites de fond ruraux qu'on ne retrouve pas en carrière et qui pourraient avoir une origine agricole (engrais).

3.3.6.2. Contrôle métrologique des résultats d'analyse aérosol

Bilan d'analyse : Le bilan des analyses chimiques (été + hiver) est présenté dans le tableau ci-dessous. Seuls les filtres PM10 PARTISOL et PM2.5 DEKATI permettent de reconstruire la masse des PM suivant l'équation E1. En raison de leur dépôt hétérogène d'aérosols, les filtres DEKATI PM2.5-10 et TSP n'ont été analysés qu'en métaux.

L'ensemble des préleveurs a fonctionné correctement sur les campagnes ETE (Juin/Juillet 2016) et HIVER (Novembre/Décembre 2016), à l'exception d'une courte coupure de courant sur la deuxième semaine été du site rural aval.

Aucun problème n'est à relever sur l'analyse chimique ; **100% des filtres reçus ont été analysés.** A savoir un total de 54 analyses ioniques, 54 analyses de carbone, 15 analyses de sucre, et 107 analyses de métaux.

	Filtres PM ₁₀ (PARTISOL)	Filtres PM _{2.5} (DEKATI)	Filtres PM _{2.5-10} (DEKATI)	Filtres TSP (DEKATI)	Jauges OWEN	Roches
Carrière	I,C,M,S	I,C,M	M	M	M	M
Aval	I,C,M,S	I,C,M	M	M	M	
Amont	I,C,M,S	I,C,M	M	M	M	
Nombre échantillons analysés	I= 30 C = 30 M=30 S=15	I=24 C = 24 M=24	M=24	M=24	M=3	M=2

Tableau 39 : Tableau récapitulatif des prélèvements et analyses chimiques réalisées sur les campagnes ETE et HIVER

NB : I = Ions, C= carbone (EC, OC), M = Métaux, S=sucres. Le nombre d'échantillons analysés intègrent les analyses de blanc de terrain. Les cell

Neutralité ionique : La balance ionique permet de vérifier la neutralité de la solution d'aérosol et de **confirmer la qualité des mesures anions/cations**. Elle est réalisée quand on obtient une pente de 1 entre d'un côté les anions (Cl, NO₃, SO₄) et de l'autre les cations (Na, NH₄, K, Mg, Ca).

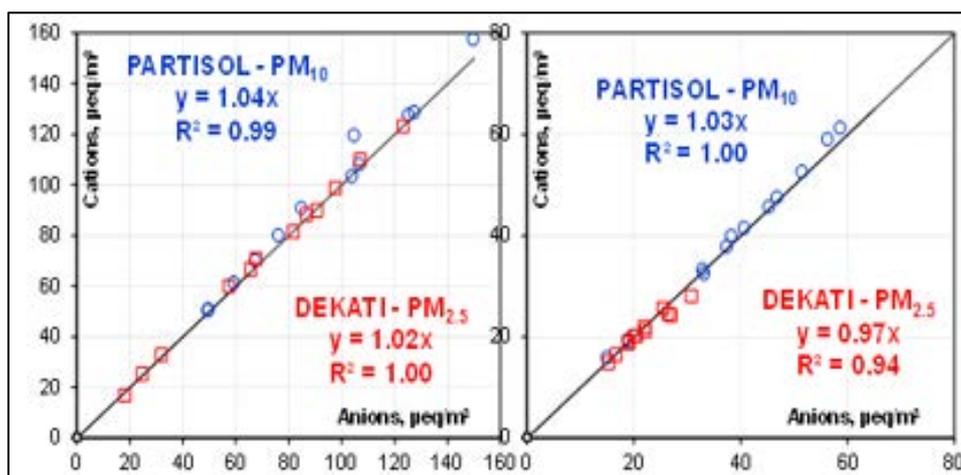


Figure 132: Balance ionique en rouge pour les prélèvements PM_{2,5} (DEKATI) et en bleu pour les prélèvements PM₁₀ (PARTISOL). (Gauche = ETE. Droite = HIVER)

Cohérence des fermetures du bilan de masse PM_{2.5} et PM₁₀ : Nous avons fait plusieurs hypothèses concernant la reconstruction chimique des PM_{2.5}/PM₁₀ et notamment sur le calcul des poussières crustales, ce qui est très important pour notre étude sur les carrières. Afin de vérifier la cohérence de ces hypothèses, nous avons rapporté ci-dessous la comparaison de nos calculs PM_{2.5} et PM₁₀ avec les mesures directes réalisées en continu sur site de fond rural par l'AAQA.



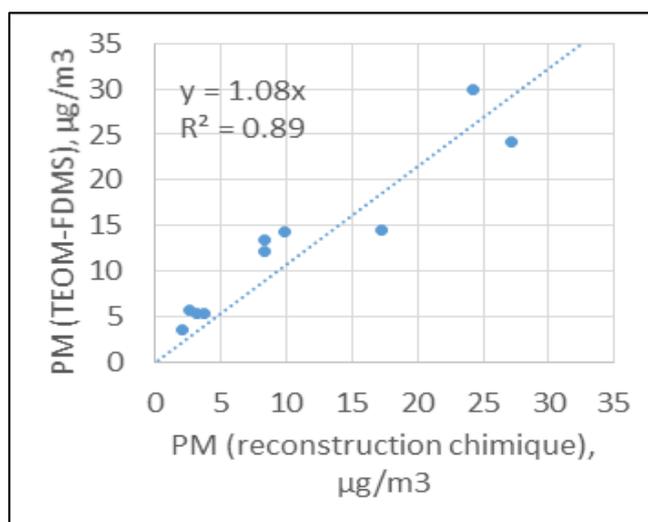


Figure 133 : Comparaison entre PM mesuré directement et en continu sur site et PM calculé par reconstruction chimique

3.3.6.3. Composition chimique moyenne de la fraction PM2.5

Note sur la composition chimique des granulats extraits sur la carrière : Nous reprenons ici pour le calcul de la composition chimique de la fraction PM2.5 les hypothèses précédentes. Pour le calcul de la concentration massique des poussières émises par la carrière nous avons décidé de travailler directement sur les informations bibliographiques disponibles sur la carrière E qui contient principalement du gneiss et la leptynite (roche métamorphique proche du gneiss). Les éléments chimiques contenus dans le gneiss sont : SiO₂ à 69.68%, Al₂O₃ à 14.58%, Fe₂O₃ à 4.26%, MgO à 1.63%, CaO à 1.61%, Na₂O à 3.25%, K₂O à 2.93%.

	K/Al	Fe/Al
Gneiss (littérature)	0.31	0.39
Jauge Owen CARRIERE	0.29	1.18
Echantillon ROCHE	0.29	1.15

Tableau 40 : Rapports élémentaires obtenus sur jauge Owen (carrière) et comparaison avec les échantillons roche de carrière et données de littérature

Cette composition typique du gneiss est légèrement différente des résultats obtenus sur nos analyses de roche et résumé comme ci-dessous. Ces différences s'expliquent par le mélange des roches utilisées sur site (par exemple, la leptynite a des teneurs faibles en fer). Parce que les niveaux de Fe sont susceptibles de varier de façon significative et parce que le rapport K/Al rapporté par nos mesures est cohérent avec les données bibliographiques, et enfin en raison de sa richesse dans le gneiss (et de son caractère « traceur » des émissions de la carrière), **nous avons pris ici l'Al pour calculer les concentrations de PM des carrières (exemple [PM]dust (carrières) = 25.92 [Al])**. Il est important de noter ici que cette valeur de 25.92 est très proche des valeurs que l'on retrouve dans la littérature pour les poussières crustales (valeur aux alentours de 27). C'est pour cette raison que nous avons choisi ce facteur de 25.92 à la fois pour la carrière mais aussi pour les sites de fond.

Nous présentons dans les figures ci-dessous la composition chimique moyenne des sites « champ proche » (Amont/Aval) et « carrière » pour **les fractions PM2.5 et PM10** et pour les campagnes ETE/HIVER. Les concentrations des différentes espèces chimiques sont calculées suivant la méthodologie décrite précédemment.



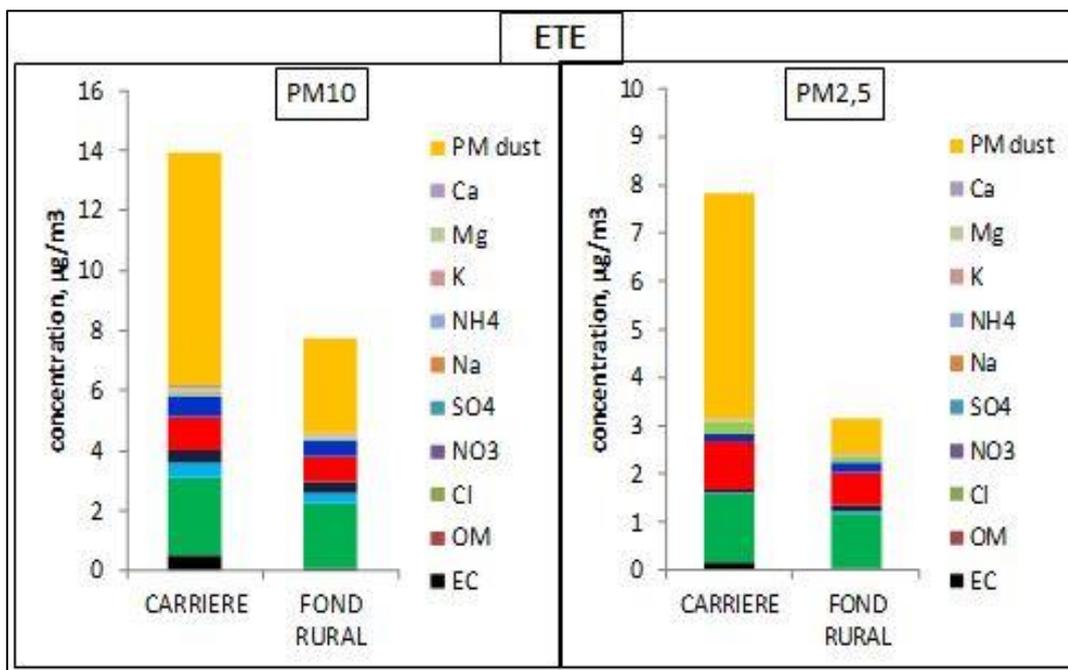


Figure 134 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM10 (à Gauche) et PM2.5. (à Droite) en site CARRIERE et en fond rural (stations de fond amont/aval). Campagne ETE

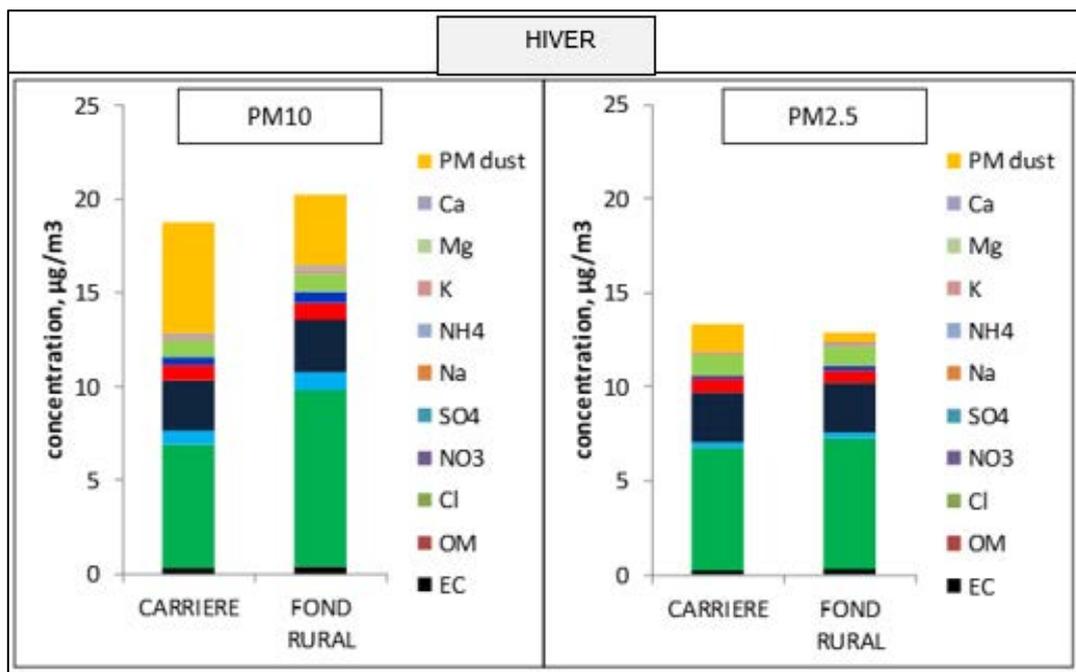


Figure 135 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM10 (gauche) et PM2.5. (Droite) en site CARRIERE et en fond rural (stations de fond amont/aval). Campagne HIVER

Comme attendu on retrouve davantage de poussières minérales en carrière par rapport au fond rural et davantage dans la fraction PM10 par rapport à la fraction PM2.5. On note que les niveaux de poussières minérales dans les PM sont très élevés sur la campagne ETE comparativement à la campagne HIVER ; ceci étant attribuable aux facteurs météorologiques (vent, pluie, sécheresse des sols).

Hors concentrations de poussières minérales (notées ici PMdust), on note que les concentrations chimiques des PM2.5 et PM10 sont très semblables entre les sites de fond et la carrière, ce qui traduit ici **l'absence d'émission atmosphérique autre que les poussières minérales en carrière**. L'homogénéité des concentrations des espèces chimiques est attendue en raison de la nature

régionale de l'ensemble de ces composantes chimiques (EC, OM, NO₃, SO₄, NH₄, sels de mer). Voir par exemple (al B. e., 2013) pour la région Ile de France.

Une exception demeure pour la fraction PM₁₀ durant l'hiver où les niveaux sont supérieurs en site de fond par rapport à la carrière. Cette différence est clairement visible sur la fraction organique (OM). Afin de mieux comprendre cette différence, nous avons rapporté ci-dessous les concentrations de PM issus du chauffage bois sur les 3 sites de mesure calculés à partir des concentrations de levoglucosan (traceur de combustion de biomasse) et d'un facteur [PM]/[levoglucosan] de 10 pour le chauffage bois pris dans la littérature (voir par ex. (al S. e., 2011)).

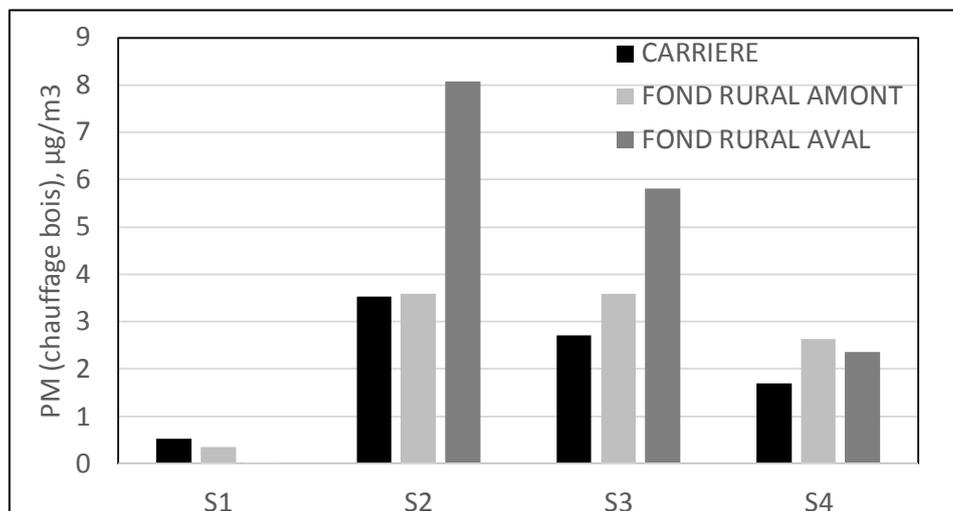


Figure 136 : Approche « macro-traceur » (levoglucosan) permettant de calculer la fraction de PM_{2.5} issue du chauffage au bois sur les 3 sites de mesure et sur les 4 semaines (S1 à S4) de la campagne HIVER.

On voit clairement que le site fond rural aval est bien plus impacté par cette source que les autres sites qui présentent des niveaux comparables de concentration en PM chauffage bois. On est donc ici dans **une situation assez rare où le site de mesure est contaminé localement** et perd donc son caractère représentatif de « fond rural ».

Les tableaux ci-dessous rapportent les concentrations en PM_{2.5} et PM₁₀ ainsi que les poussières minérales (PM_{dust}) dans ces fractions pour les sites carrières/champ proche et pour les campagnes été/hiver.

ETE	[PM _{2.5}] (µg/m³)	[PM _{dust}] (µg/m³) et %PM _{2.5}	ETE	[PM ₁₀] (µg/m³)	[PM _{dust}] (µg/m³) et %PM _{2.5}
Champ proche (amont)	3.5	0.7 (20%)	Champ proche (amont)	5.6	1.5 (27%)
Champ proche (aval)	2.9	0.8 (27%)	Champ proche (aval)	9.8	4.8 (48%)
Carrières	7.8	4.7 (60%)	Carrières	13.9	7.8 (56%)

Tableau 41 : Concentrations PM_{2.5}/ PM₁₀ et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche sur la campagne ETE.



HIVER	[PM _{2.5}] (µg/m ³)	[PM _{0.5-2.5}] (µg/m ³) et %PM _{2.5}	HIVER	[PM ₁₀] (µg/m ³)	[PM _{0.5-10}] (µg/m ³) et %PM _{2.5}
Champ proche (amont)	11.3	0.7 (6%)	Champ proche (amont)	17.2	4.8 (28%)
Champ proche (aval)	14.3	0.4 (3%)	Champ proche (aval)	23.2	2.7 (12%)
Carrières	13.3	1.5 (11%)	Carrières	18.7	5.9 (32%)

Tableau 42 : Concentrations PM2.5/ PM10 et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche sur la campagne HIVER.

Campagne ETE : Les concentrations de PM2.5 et de PM10 sont calculées suivant l'équation 1. Ces valeurs de PM2.5 et PM10 déterminées chimiquement en champs proche sont proches des mesures automatiques (voir au-dessus, fermeture des bilans de masse). Elles sont respectivement pour les PM2.5, de 2.9 et 3.5 µg/m³ pour les sites en champ proche, 7.8 µg/m³ pour le site carrière. Elles sont respectivement pour les PM10, de 5.6 et 9.8 µg/m³ pour les sites en champ proche, 13.9 µg/m³ pour le site carrière. On trouve plus de PM2.5 et PM10 en carrière qu'en champ proche. A savoir :

+ 4.6µg/m³ de PM2.5 en carrière par rapport au champ proche

+ 6.2µg/m³ de PM10 en carrière par rapport au champ proche

Les valeurs plus élevées de PM2.5 et de PM10 en carrière sont attribuables aux activités d'extraction. Elles restent malgré tout bien en dessous des valeurs limites Européennes fixées (25µg/m³ en moyenne annuelle pour le PM2.5 ; 40µg/m³ en moyenne annuelle pour le PM10). Les conditions sèches observées en été (propices à la remise en suspension des poussières dans la carrière) pourraient en partie expliquer ces valeurs observées entre carrière et champ proche.

Si l'on s'intéresse aux espèces chimiques constituant les PM2.5, on remarque que dans l'ensemble **les concentrations en espèces chimiques sont très voisines entre champ proche et carrière, à l'exception des poussières crustales, plus élevées en carrière.** Pour les PM2.5, le poids des poussières est plus important en carrière (60% des PM2.5) par rapport au champ proche (20-27% des PM2.5). Pour les PM10, le poids des poussières est quasi identique (56% des PM10) par rapport au champ proche (27-48% des PM10). Le poids relativement important des poussières minérales en fond rural dans les PM10 pourraient être dû aux émissions de la carrière. Nous y reviendrons par la suite.

Campagne HIVER : Le contraste avec la campagne ETE est notable tant sur les niveaux de concentration en PM (liés à un épisode de pollution régionale) que sur les niveaux de poussières minérales.

On trouve respectivement pour les PM2.5, de 11.3 et 14.3 µg/m³ pour les sites en champ proche, 13.3 µg/m³ pour le site carrière. On trouve respectivement pour les PM10, de 17.2 et 23.2 µg/m³ pour les sites en champ proche, 18.7 µg/m³ pour le site carrière. Pour la première fois sur l'étude EMCAIR on trouve des niveaux de PM supérieurs en fond (site aval) par rapport à la carrière ; ceci étant attribuable au chauffage au bois local. Si on exclut ce site, on trouve plus de PM2.5 et PM10 en carrière qu'en champ proche. A savoir :

+ 2.0µg/m³ de PM2.5 en carrière par rapport au champ proche

+ 1.5µg/m³ de PM10 en carrière par rapport au champ proche

Les valeurs plus élevées de PM2.5 et de PM10 en carrière sont attribuables aux activités d'extraction. Elles restent malgré tout bien marginales par rapport aux observations faites sur les autres carrières. Pour les PM2.5, le poids des poussières minérales est légèrement plus important en carrière (11% des PM2.5) par rapport au champ proche (3-6% des PM2.5). Pour les PM10, le poids des poussières minérales en carrière est un peu plus marqué (32% des PM10) mais reste proche des valeurs du champ proche (12-28% des PM10). Là encore, le poids relativement important des poussières minérales en fond rural dans les PM10 pourraient être dû aux émissions de la carrière. Nous y reviendrons par la suite.

3.3.6.4. Information Granulométrique des différentes composantes chimiques

Facteur d'enrichissement lié aux activités d'extraction

Les analyses des roches et des dépôts (Jauges Owen) ont démontré l'importance des émissions de composés traceurs de gneiss (Al, Fe, K, Mg). Pour évaluer si d'autres composés terrigènes ont été co-émis, nous avons évalué les facteurs d'enrichissement (EF = Enrichment Factor) lié aux activités d'extraction pour l'ensemble des éléments trace analysé par ICP-MS.

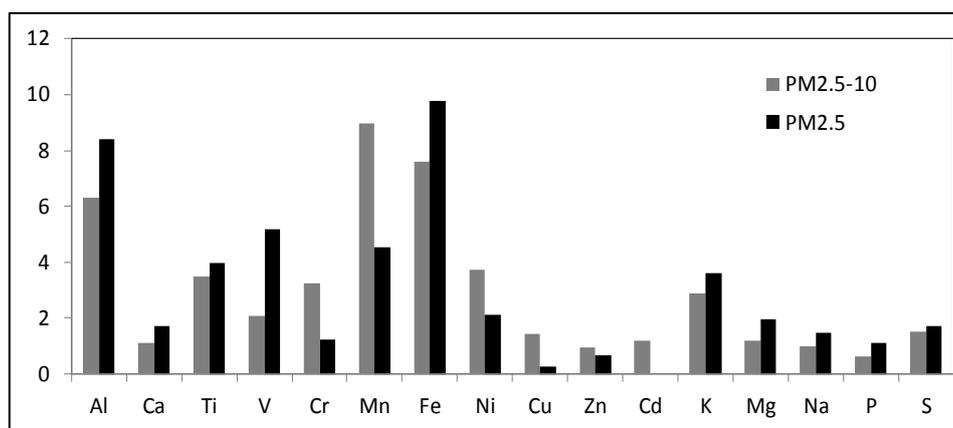


Figure 137 : Facteurs d'Enrichissement en éléments trace en site carrières. Données DEKATI (fractions PM10 et fraction grossières PM2.5-10)

On retrouve ici un enrichissement très marqué en Al, Fe que l'on avait observé sur les jauges Owen. On retrouve ici d'autres traceurs des émissions terrigènes comme Ti et Mn qui ne ressortaient pas précédemment (en raison de leur faible teneur dans les poussières minérales). **La répartition des valeurs entre fractions PM10 et PM2.5-10 est peu différente dans l'ensemble.** On trouve des valeurs élevées de Vanadium qui s'expliquent difficilement (le gneiss n'en contient pas normalement). Ce composé (avec Ni) est traceur de combustion de fuel lourd, mais le GNR utilisé dans les engins et les machines d'extraction dans la carrière ne comporte pas ces éléments (BCMA, 2012). Les valeurs de EF d'Al (aux alentours de 6-8) viennent confirmer ici notre choix d'utiliser préférentiellement ce traceur pour marquer les émissions de la carrière.

Quantification de l'impact des carrières en champ proche

La méthodologie retenue ici pour la quantification de l'impact des carrières en champ proche est celle dite de « Lenschow » (al L. e., 2001) et utilisée précédemment sur EMCAIR (Hauts de France)

Dans le cas qui nous concerne ici, nous ferons **l'hypothèse que le site en champ proche présentant la concentration la plus faible en PM_{dust} (calculé à partir de l'aluminium) est représentatif du fond régional** (non influencé par la carrière). Et donc la concentration en PM_{dust} sur le 2^{ème} site en champ proche est la somme du fond régional et d'une influence de la carrière. Cette hypothèse suppose que le site présentant la concentration la plus faible en PM_{dust} n'est pas impacté par les carrières. Si cela peut s'avérer être le cas sur une période de quelques heures, cela est moins évident sur une période d'une semaine (comme c'est le cas de nos prélèvements). Cela conduirait à une sous-estimation de l'impact des émissions carrières sur le champ proche. Pour cette raison, nous donnerons une fourchette pour chaque semaine.

La valeur **minimale** (de la contribution de la carrière en champ proche) sera calculée comme décrit ci-dessus. La valeur **maximale** (de la contribution de la carrière en champ proche) sera calculée en considérant qu'il n'y a pas de source régionale significative de PM_{dust} en dehors des émissions de carrière. Ce calcul sera fait pour les fractions PM2.5 et PM10 et pour les campagnes ETE et HIVER.

Les figures ci-dessous illustrent les concentrations de PM_{dust} dans les fractions PM2.5 et PM10 pour les 4 semaines des campagnes été/hiver des sites en champ proche et carrière. Ce sont ces données qui vont être utilisées par la méthodologie de Lenschow décrite précédemment. Comme attendu la fraction PM_{dust} est faible dans les PM2.5. En revanche, on voit bien l'influence des émissions carrière en champ proche dans les PM10 (station aval en ETE et station AMONT en HIVER).



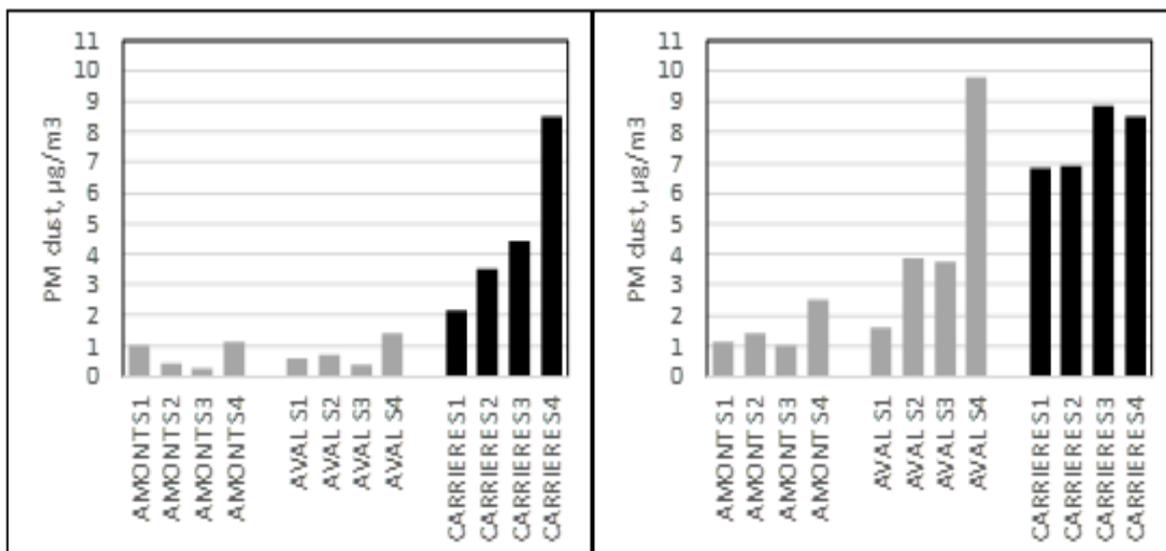


Figure 138: Variation des concentrations de (PM dust dans la fraction PM2.5 à **Gauche**) et de (PM dust dans la fraction PM10 à **Droite**) durant la campagne ETE. Sx est la xème semaine.

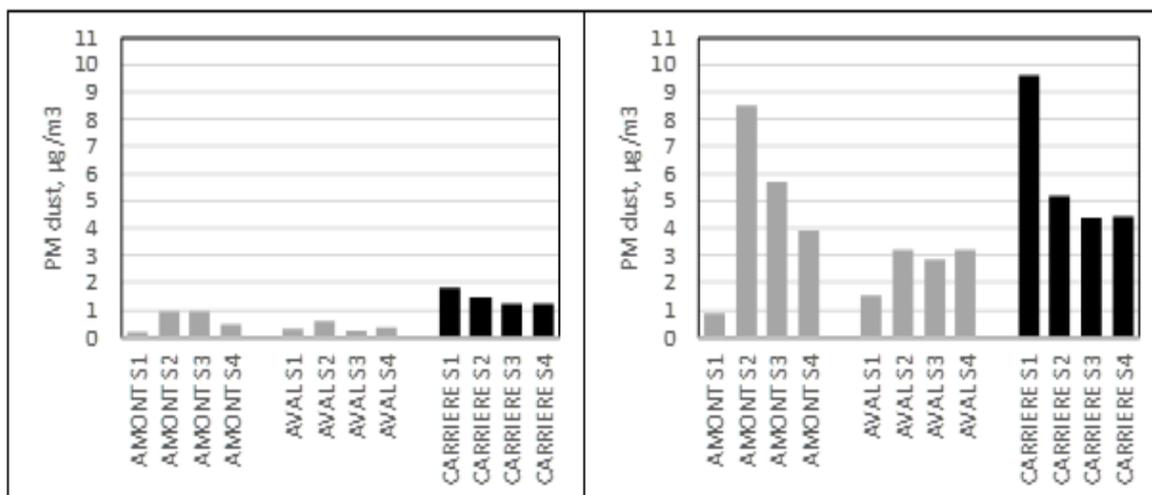


Figure 139 : Variation des concentrations de (PM dust la fraction PM2.5 à **Gauche**) et de (PM dust la fraction PM10 à **Droite**) durant la campagne HIVER. Sx est la xème semaine

Nous présentons ci-dessous, pour chaque semaine des campagnes ETE/HIVER, les sites en champ proche impactés par les émissions carrières, l'apport (minimum/maximum) en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des poussières crustales des carrières sur ces sites dans les fractions PM2.5 et PM10, et enfin la contribution de cet apport par rapport aux concentrations de PM2.5 et PM10 sur ces sites.

Site en champ proche	Contribution des émissions carrière sur [PM _{2.5}] en champ proche	Contribution des émissions carrière sur [PM ₁₀] en champ proche
----------------------	--	---

	MIN-MAX	MIN-MAX	MIN-MAX	MIN-MAX
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(%)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(%)
AMONT-ETE-S1	0.42-1.02	10-25	0.00-1.11	0-26
AMONT-ETE-S2	0.00-0.43	0-14	0.00-1.45	0-22
AMONT-ETE-S3	0.00-0.24	0-10	0.00-1.04	0-23
AMONT-ETE-S4	0.00-1.12	0-26	0.00-2.53	0-35
AVAL-ETE-S1	0.00-0.60	0-23	0.49-1.60	12-40
AVAL-ETE-S2	0.28-0.71	9-23	2.43-3.88	25-39
AVAL-ETE-S3	0.16-0.39	7-19	2.73-3.77	33-46
AVAL-ETE-S4	0.29-1.41	8-38	7.24-9.77	42-57
AMONT-HIVER-S1	0.71-1.02	22-32	0.00-0.89	0-14
AMONT-HIVER-S2	0.00-0.43	0-3	5.29-8.48	27-43
AMONT-HIVER-S3	0.00-0.24	0-1	2.86-5.73	11-22
AMONT-HIVER-S4	0.78-1.12	6-9	0.72-3.91	4-24
AVAL-HIVER-S1	0.00-0.30	0-10	0.66-1.55	8-19
AVAL-HIVER-S2	0.18-0.62	1-3	0.00-3.19	0-12
AVAL-HIVER-S3	0.02-0.26	0-1	0.00-2.87	0-9
AVAL-HIVER-S4	0.00-0.34	0-2	0.00-3.19	0-13
MOYENNE-ETE	0.14-0.74	4-22	1.61-3.14	14-36
MOYENNE-HIVER	0.21-0.51	4-8	1.19-3.73	6-19

Tableau 43 : Contribution des émissions de la carrière en champs proche. La numérotation des sites est similaire aux précédentes figures. Sx est la xème semaine.

L'analyse détaillée (semaine par semaine) sur **chacun des sites montre ponctuellement une influence marquée des émissions des carrières en champ proche** ; c'est le cas par exemple du site aval sur quasiment toute la campagne ETE qui montre des contributions de près 28-46% des PM10 dû aux émissions de la carrière. On retrouve ponctuellement ce phénomène sur la campagne HIVER (site amont en semaine 2 ; 27-43% des PM10 dû aux émissions carrière). L'ensemble de ces



observations est cohérent avec les données météorologiques (directions de vent) présentées précédemment dans ce rapport.

- **L'impact des émissions carrières de [PM2.5] en champ proche reste faible (0.14-0.74µg/m³ en été ; 0.21-0.51 µg/m³ en hiver).**
- **L'impact des émissions carrières de [PM10] en champ proche est lui aussi très faible avec malgré des contributions légèrement supérieures (1.61-3.14µg/m³ en été ; 1.19-3.73µg/m³ en hiver).**

Ces résultats montrent finalement que l'impact des émissions carrières reste très limité et ne présente pas de variabilité saisonnière marquée. Leur poids (en %) sur les sites de fond est visible principalement parce que ces sites présentent des concentrations régionales de fond qui sont très faibles.

3.3.7. Conclusions et enseignements en Pays de la Loire

L'exploitation des données recueillies au cours des deux campagnes de mesures organisées en Pays de la Loire permet de mieux comprendre les émissions de poussières en carrière et en périphérie immédiate (champ proche) par analyses et recoupements :

- des concentrations et des granulométries des particules émises en périodes mensuelles sur deux saisons contrastées (été/hiver) ;
- des évolutions horaires/journalières afin de caractériser les pics relevés et leurs impacts en champs proches ;
- de la composition chimique des particules par classe de taille afin de mieux quantifier l'empreinte de la carrière sur les concentrations de PM en champ proche.

La carrière suivie en Pays de la Loire est marquée par trois postes d'émission clairement identifiés dans les enregistrements du fait de l'implantation retenue :

- **Les trémies de chargement des clients.** Pour chaque pic étudié, le visionnage des vidéos de la caméra placée sur le site a permis de repérer d'importants nuages de poussières en provenance de ce poste dès qu'un camion s'installe pour charger. Ces nuages de poussières se dispersent ensuite sur l'ensemble de la zone, selon les conditions météorologiques de la journée : en partie supérieure les structures métalliques sont élevées avec des bardages qui ne sont ni complets ni étanches, ce qui favorise la dispersion par le vent et impacte potentiellement plus fortement le voisinage ; en partie inférieure des silos, les flux de granulats au chargement sont dépoussiérés par aspersion pour certains produits, mais pas pour d'autres. Même lorsque ce poste a une activité faible, il reste fortement émetteur de poussières qui forment des dépôts visibles à cet endroit : leur granulométrie est présentée plus loin (voir §3.6.3 poussières sédimentables). Il semble qu'il s'agisse du poste le plus émetteur de particules dans la carrière E.
- **Les installations de traitements :** Moins visibles à partir de la caméra installée, ces postes n'en restent pas moins d'importants émetteurs de poussières. Le pic maximal relevé en campagne estivale a par exemple lieu le jour où les activités de traitements produisent les tonnages les plus importants de l'étude. De même que pour le poste précédent, des prélèvements de dépôts secs ont été réalisés afin de faire le lien par la taille des particules (voir §3.6.3 poussières sédimentables).
- **Les transports,** regroupant aussi bien les trajets internes effectués par les dumpers ou le passage des camions clients, peuvent causer une remise en suspension des poussières et une émission directe (échappements). Les deux campagnes de mesures ayant été réalisées avec des conditions météorologiques plutôt sèches, il s'agit d'un poste non-négligeable concernant les émissions de poussières (pour les 2 campagnes).

Les mesures de concentrations en particules en suspension, comme en dépôts atmosphériques permettent de conclure que **la carrière produit des poussières grossières visibles dans la fraction PM10. L'analyse de la composition chimique de ces particules contribue à une meilleure caractérisation de leur influence en champ proche (stations amont/aval).** Ainsi :

- La dispersion en champ proche reste très limitée pour ce qui est des dépôts atmosphériques (résultats des analyses chimiques des Jauges OWEN). Par contre, les niveaux de P, S, et Ca dans les dépôts notés sur les sites de fond ruraux, qu'on ne retrouve pas en carrière, pourraient signer une origine agricole (engrais).
- Dans la fraction PM10, l'influence de la carrière en champ proche est visible à la fois sur les mesures en ligne et sur les mesures intégrées de chimie, en été (14 à 36% des PM10)



comme hiver (6 à 19%) avec des pointes estivales liées aux envols pouvant donner + 57% sur une semaine.

- Dans la fraction PM_{2,5}, l'influence de la carrière sur les sites en champs proches n'est pas significative ; la mesure chimique intégrée sur la semaine permet de préciser qu'elle évolue entre +0,14 et 0,74 µg/m³ (4 à 22%) en été et entre +0,21 et 0,51 µg/m³ (4 à 8%) en hiver.
- Comme attendu, la composante minérale des particules est dominante en carrière par rapport au fond rural ; elle est davantage marquée dans la fraction PM₁₀ (27-48% et notamment l'été) que dans la fraction PM_{2.5} (23%).
- Nous n'avons pas détecté d'émissions atmosphériques autres que les poussières minérales émises par la carrière : en d'autres termes, hors concentrations de poussières minérales (notées ici PM_{dust}), les compositions chimiques des PM_{2.5} et PM₁₀ sont très semblables entre les sites de fond et la carrière.
- Le rapprochement des données hebdomadaires (chimie) avec les observations des pics de concentrations sur la période estivale est très cohérente.

Du point de vue méthodologique, ces campagnes donnent l'occasion de souligner deux points :

- Le degré de précision et de sensibilité des analyses chimiques (intégrées sur une période hebdomadaire) permet de quantifier l'influence des émissions de PM de la carrière sur son champ proche par la méthode dite de « Lenschow ». Remarquons toutefois que les sites Amont/Aval ayant ici sur les périodes étudiées souvent fonctionné de manière alternative par rapport aux vents dominants avec des intensités différentes, cette approche peut conduire à une certaine sous-estimation de l'impact puisqu'on part de l'hypothèse que le site présentant la plus faible concentration est celui reconnu comme représentatif du fond régional (c'est à dire non impacté par les émissions de la carrière).
- Les analyses chimiques étant réalisées sur prélèvements d'une semaine (un mois pour les jauges), elles produisent un lissage des valeurs (jour/nuit ; semaine/weekend) ; lorsqu'on fait le rapprochement avec des valeurs de concentration obtenues sur les enregistreurs qui fonctionnent sur un pas de temps quart horaire, on introduit un « biais » dont il faut tenir compte. Il faut raisonner en tendance afin de vérifier la cohérence de l'interprétation qu'on mène.

L'analyse approfondie de ces deux campagnes en Pays de la Loire a ainsi permis de mieux évaluer l'impact de la carrière sur la qualité de l'air dans son environnement proche. Le site des Rinières, bien que plus éloigné (1500 m) du périmètre de la carrière que celui des Béchis semble présenter un niveau moyen plus élevé qu'un site rural hors influence carrière comme Saint-Denis-d'Anjou, notamment en été. En hiver, certaines périodes sans précipitations sont susceptibles d'émissions en carrière pouvant maintenir cette influence, en remarquant qu'on a pu relever, par la chimie, des pollutions externes en PM_{2,5} (chauffage au bois).

3.4. Air Breizh (Carrière H)

3.4.1. Bilan métrologique



Le tableau ci-après présente les paramètres mesurés, ainsi que les techniques de mesures employées en fonction des différents sites de mesures :

Bretagne	Analyseurs automatiques		Granulomètres	Préleveur séquentiel	Préleveur passif	Météo
	Moyen technique : jauges radiométriques et analyseur type BAM /GRMM		Dekati filtres en fibre de quartz, débit 30L/min ou 10L/min ; prélèvements hebdomadaires	Partisol ; filtre en fibre de quartz, débit 1m ³ /h, prélèvement hebdomadaire	jauges Owen, prélèvement mensuel	
	[PM10] (µg/m ³)	[PM2.5] (µg/m ³)	PM10 et PM2.5 analyses	PM10 et PM2.5 analyses	Pesée poussières sédimentables (en mg)	
Chêne sec (amont)	GRIMM	GRIMM	X	X	X	
Carrière H	TEOM-FDMS	TEOM-FDMS	X	X	X	X
Bouyère (aval)	TEOM-FDMS	TEOM-FDMS	X	X	X	

Tableau 44 : Equipement des stations de mesures pour les deux campagnes AIR BREIZH. La carrière a été équipée de Webcams.

Durant ces deux campagnes, les mesures en continu des particules PM10 et PM2.5 présentent des taux de couverture supérieurs à 97% des périodes ce qui est très satisfaisant. Pour les prélèvements séquentiels à l'aide des Partisols, la seconde campagne présente des taux de couverture de plus de 99% sur les 3 points et pour chaque période.

Pour la 1ère campagne, des problèmes techniques lors de la période C1.1 ont entraîné une invalidation du support de prélèvement pour deux points de mesures. Les autres prélèvements ont présenté des taux de couverture supérieurs (ou proches) de 85% excepté l'un d'entre eux sur lequel une réserve devra être apporté dans le cadre de l'interprétation (chêne sec – semaine C1.2).

Les prélèvements des poussières par fraction granulométrique (via les impacteurs) ou des retombées n'ont pas présenté de dysfonctionnement ce qui a permis de les valider en totalité.

3.4.2. Contexte météorologique

Le contexte météorologique peut avoir un impact sur les conditions de dispersion de la pollution atmosphérique. Certains paramètres favorisent la dispersion et/ou leur lessivage (par exemple la pluie), d'autres au contraire vont favoriser une accumulation des polluants (comme les hautes pressions), ou leur formation (comme l'ensoleillement). Pour une campagne de mesures de la qualité de l'air ambiant, il est donc important d'étudier les conditions météorologiques dans lesquelles les mesures des polluants ont effectué.

Les conditions pendant les mesures des paramètres influençant majoritairement la dispersion des particules, à savoir les précipitations et la vitesse et direction du vent, sont étudiées successivement ci-après.

3.4.2.1. Les précipitations

Les cumuls journaliers enregistrés pendant les deux campagnes de mesures sur la station météorologique Météo France de Rennes St Jacques sont présentés ci-après avec une indication des semaines de prélèvements.



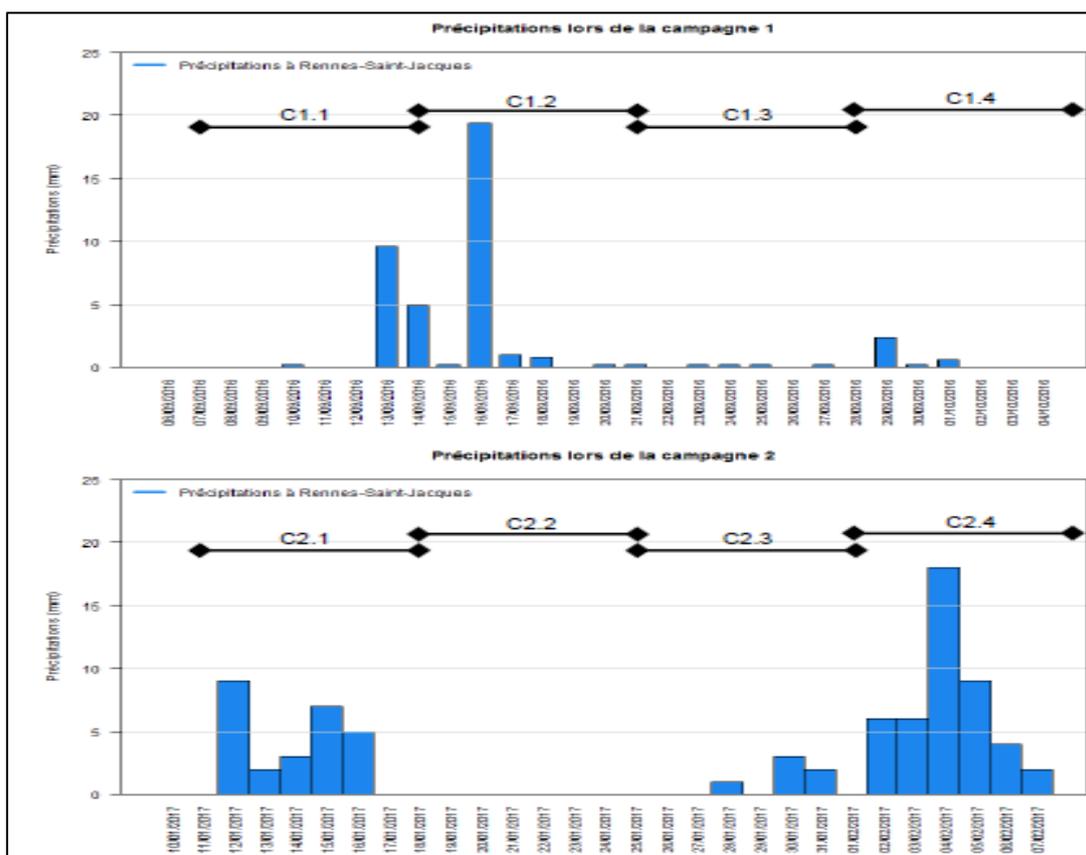


Figure 140 : Evolution des cumuls journaliers des précipitations enregistrées à la station Météo France de Rennes St Jacques

La campagne 1 réalisée du 7/09 au 5/10/16 se caractérise par un temps relativement sec, avec seulement 2 journées présentant des précipitations jugées significatives à savoir le 13/09 (8,6 mm) pendant la semaine C1.1 et le 16/09 (19,4) pendant la semaine C1.2. Les précipitations durant les semaines C1.3 et C1.4 ont été négligeables. Avec un cumul de 40.5 mm pendant cette période, **cette campagne estivale est donc jugée pénalisante en termes d'envols de particules**. A titre de comparaison, les précipitations moyennes (dites normales) enregistrées sur le mois de septembre de 1981 à 2010 à Rennes sont de 59 mm.

La campagne 2, du 11/01 au 8/02/17, présente trois périodes différentes : un début de campagne avec des précipitations modérées (du 11 au 16/01) puis une période sèche (du 17 au 27/01) qui coïncide avec un épisode de pollution généralisée, suivie d'une période avec des précipitations plus abondantes (du 30/01 au 08/02). Le cumul des précipitations durant cette campagne est de 77 mm soit globalement identique à la normale pour un mois de janvier (70.4 mm enregistrées à Rennes en janvier de 1981 à 2010). **Cette campagne est donc jugée représentative des conditions normales en termes de précipitations.**

3.4.2.2. Direction et vitesse du vent

Les conditions de direction et vitesse du vent pendant une période sont souvent représentées par des roses des vents. Celle-ci permet de visualiser sur une période donnée :

- le pourcentage de vent pour chaque direction : ainsi plus la pâle est de grande taille plus les vents venant de cette direction ont été nombreux pendant la période,
- les vitesses des vents venant de chaque direction et leur occurrence : la couleur de chaque pâle indique la classe de vitesse et sa grandeur, le pourcentage de vent avec cette vitesse.

Ainsi par exemple, plus une pâle sera grande, plus les vents en provenance de cette direction seront fréquents (direction majoritaire) et au sein de cette pâle, plus les couleurs bleues seront foncées, plus les vents seront forts.

La direction et la vitesse des vents ont été mesurées localement sur la carrière au niveau du camion laboratoire. Pour chaque campagne de mesure, nous présentons ci-après deux roses des vents, l'une



réalisée à partir des mesures sur site et l'autre à partir des données de la station Météo France (MF) de Rennes St Jacques située à une 30aine de kilomètres de la carrière.

Une analyse globale par campagne est réalisée dans un premier temps suivi d'une analyse détaillée pour chaque semaine au sein des deux campagnes.

Analyse de la campagne 1 (du 7/09 au 5/10/16)

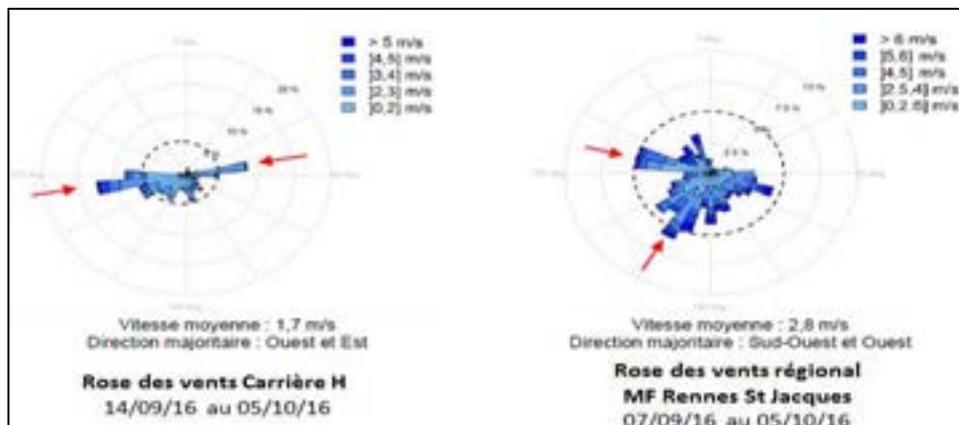


Figure 141 : Comparaison de la situation locale de la carrière H avec les données régionales – Septembre 2016

Malgré la différence d'échelle pour les occurrences de vents, ces deux roses des vents ne sont pas tout à fait comparables. En effet, la rose construite à partir des données de la carrière présente deux directions des vents majoritaires issus de l'Ouest et de l'Est. Ces deux directions sont peu ou pas représentées sur la rose des vents réalisée à partir des données de la station de Rennes.

La rose des vents que nous jugeons plus représentative de la météorologie de la zone d'étude (à savoir également sur les sites amont et aval) est celle de la station Météo France de Rennes.

En effet, la rose des vents de la carrière est jugée représentative des conditions très locales à proximité du site d'enregistrement, dans la mesure où le site a été implanté au cœur de la carrière, entourée sur une majeure partie d'un merlon d'une hauteur non négligeable. La rose des vents de Rennes sur cette campagne 1 justifie bien ce constat puisqu'elle présente des vents dans quasi toutes les directions bien que certains présentent des fréquences faibles, mais ce qui montre que le site est implanté dans un environnement parfaitement dégagé contrairement au site de la carrière. Notons également que la mesure Météo France a lieu à 10 mètres de hauteur alors que celle de la carrière a été réalisée entre 2.5 et 3 mètres.

Analyse de la campagne 2 (du 11/01 au 8/02/17)

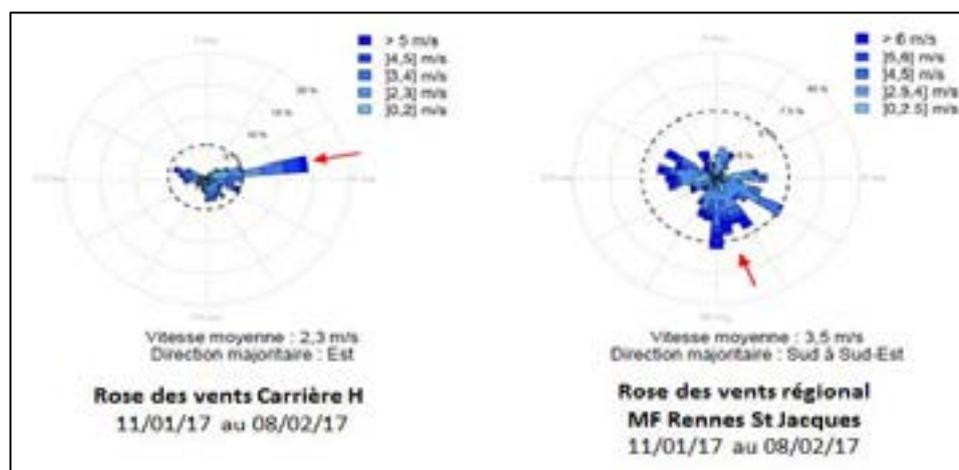


Figure 142 : Comparaison de la situation locale de la carrière H avec les données régionales – Janvier 2017

Durant cette période hivernale, le constat reste identique à savoir des roses des vents peu semblables entre les deux sites de mesures. Pour les mesures au niveau de la carrière, une direction est très largement représentée à savoir les vents d'Est, qui avait également été bien représentée durant la

campagne 1. Pour les mesures au niveau de la station Météo France de Rennes St Jacques, les vents de Sud à Sud-Est semblent être plus présents.

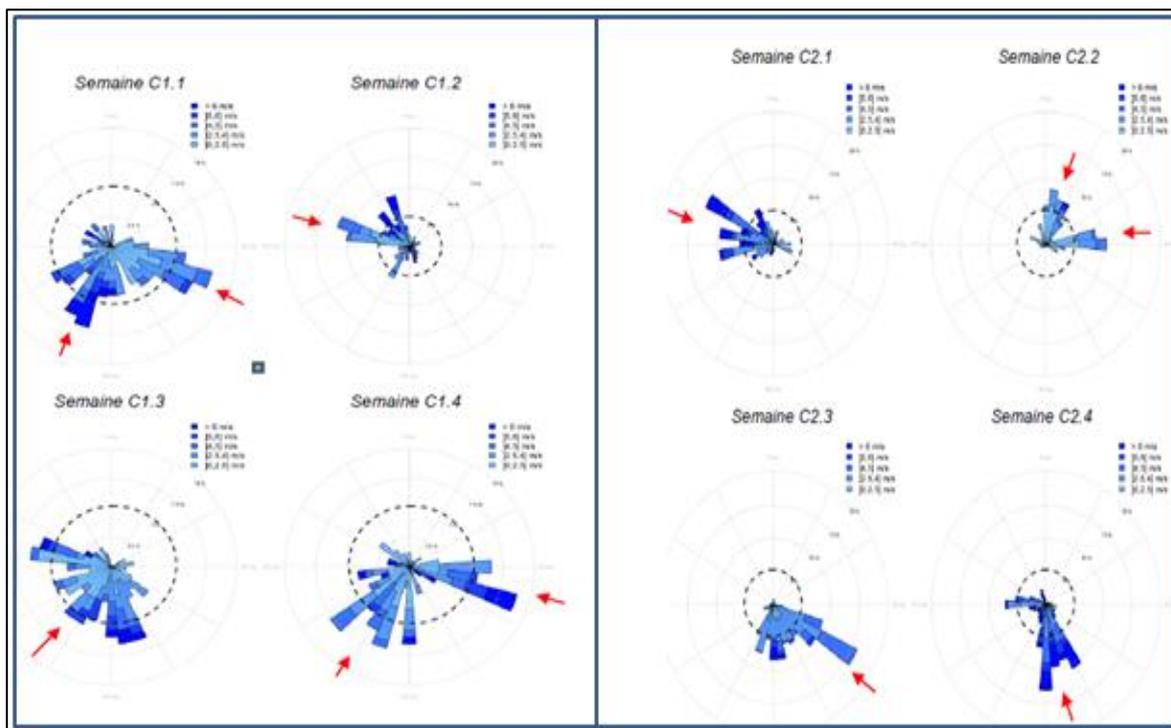
Au vu de ce constat au niveau du lieu d'implantation de la mesure en carrière, de la technique et des résultats de mesures, les données Météo France de la station de Rennes St Jacques sont jugées plus représentatives de l'environnement de la zone d'étude. Elles sont donc retenues pour l'interprétation des données de mesures de particules dans la suite de ce rapport entre carrières et champs proches. Pour l'interprétation des événements à l'intérieur de la carrière, les données de la station locale carrière seront alors utilisés.

Ces considérations soulignent l'importance méthodologique de disposer dans ce type de recherches appliquées en sites extérieurs de stations météorologiques systématiquement par station d'enregistrement.

Analyse par semaine

Une analyse détaillée des conditions de vents pour chaque semaine au sein des campagnes est présentée.

Deux directions prédominent lors de cette 1ère semaine (C1.2) : Sud-Ouest exposant le site Bouyère, et Sud Est. La semaine C1.2 se caractérise par des vents issus majoritairement du Nord-Ouest. Les autres secteurs de vents sont inexistantes. Pendant cette semaine, le site Chêne sec a été plus exposé aux envols du site par rapport au site Bouyère ce qui est contraire aux autres semaines de cette campagne. Pendant la semaine C1.3, les vents sont issus des directions Ouest à Sud exposant de manière préférentielle le site Bouyère (dit aval) aux envols sur le site. Enfin pendant la semaine C1.4, deux directions prédominent à savoir les vents d'Est et de Sud-Ouest. Ces derniers exposant le site Bouyère. **Cette campagne estivale se démarque par une absence de vents de Nord- Est.**



Temps d'exposition des points de mesures par semaine

Pour illustrer l'exposition des points de mesures hors site aux émissions de la carrière, les pourcentages d'exposition par semaine ont été estimés d'après les directions des vents.

Les secteurs de vent exposant les deux sites Bouyère et Chêne sec aux envols de la carrière ont été fixés comme suit :

- Bouyère : site exposé lors des vents issus des directions comprises entre 210 et 260° ;
- Chêne sec : site exposé lors des vents issus des directions comprises entre 310 et 10°.



Figure 144 : Secteurs de vents exposant les sites en dehors de la carrière aux éventuels envols de la carrière H

Les graphiques ci-après présentent les pourcentages d'exposition par semaine pour chacune des campagnes :

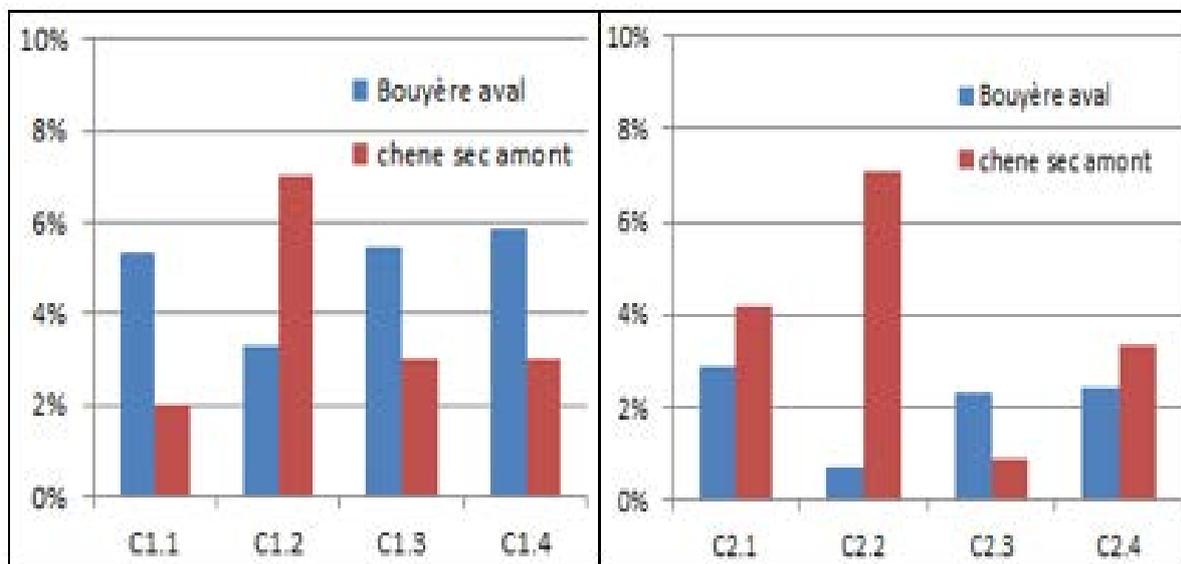


Figure 145 : Estimation des taux d'exposition des points hors site pendant les deux campagnes de mesures

Lors de la 1ère campagne, exceptée lors de la semaine C1.2, le site Chêne (dit amont) a été moins exposé aux vents en provenance du site que le site Bouyère (dit aval). Les taux d'exposition sont toutefois assez faibles, inférieurs à 7% du temps par semaine.

Pour la 2nde campagne, les taux d'expositions des deux points sont très faibles (<4%) excepté pour la semaine C2.2 pour laquelle le site chène sec a été bien plus exposé que le site Bouyère.

En synthèse de cette analyse, la dénomination amont/aval pour les points de mesure est justifiée pour la 1ère campagne au regard des conditions météorologiques.



Pour la 2^{de} campagne, les expositions sont très faibles et proches entre les deux sites. A retenir toutefois, une exposition majoritaire du site Chêne sec par rapport au site Bouyère lors de la semaine C2.2 qui pourra faire l'objet d'une analyse particulière.

3.4.3. Episode de pollution régionale

Un épisode de pollution correspond à une période, où les concentrations de polluants dans l'atmosphère ne respectent pas ou risquent de ne pas respecter les seuils réglementaires (seuil d'information/recommandation et seuil d'alerte) selon des critères prédéfinis (pourcentage de surface de la zone ou pourcentage de population impactés, niveau réglementaire franchi, durée de l'épisode, etc).

Quatre polluants réglementés sont intégrés dans la procédure de déclenchement d'épisode de pollution de l'air :

- l'ozone (O₃) ;
- le dioxyde d'azote (NO₂) ;
- le dioxyde de soufre (SO₂) ;
- les particules en suspension (PM10). Les particules (PM2.5) n'entrent pas dans les procédures de déclenchement à ce jour.

Pour atteindre des niveaux élevés de concentration conditionnant le déclenchement des épisodes de pollution, les critères à réunir sont multiples et varient selon les périodes de l'année. La combinaison de plusieurs des éléments suivants est souvent à l'origine des épisodes :

- mauvaises conditions de dispersion,
- conditions favorables aux transformations chimiques,
- transport transfrontalier ou interrégional de polluants,
- émissions de polluants en région,
- émissions de précurseurs du polluant.

Au cours de cette étude, un épisode de pollution a été constaté durant la 2^{de} campagne de mesure à savoir en période hivernale. Nous revenons de manière succincte sur cet épisode qui a touché la moitié Nord de la France.

Episode du 20 au 25/01/17

Durant cette période, les conditions anticycloniques sèches et froides ont limité la dispersion des polluants du fait de vents faibles et d'une couche d'inversion marquée. Les faibles températures ont également engendré un surcroît d'émission notamment dû au chauffage résidentiel.

Par conséquent, la procédure préfectorale lors d'un dépassement du seuil d'informations/recommandations (fixé à 50 µg/m³ en moyenne journalière) a été déclenchée à partir du 20/01 en Ile et Vilaine suivie d'un déclenchement du seuil d'alerte (fixé à 80 µg/m³ en moyenne journalière) du fait de la persistance de l'épisode jusqu'au 25/01/17.

Les cartes de dispersion tirées du modèle de prévision nationale Prév'air permettent d'illustrer cet épisode.



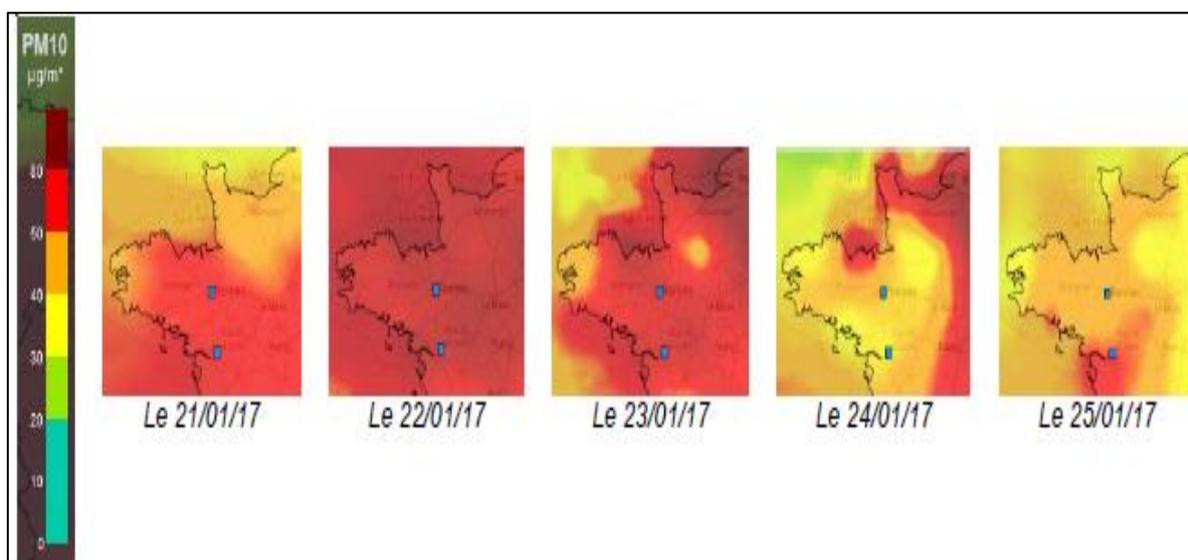


Figure 146 : Extrait des cartes de prévision du modèle Prév'air du 20 au 25/01/17

Nos stations de mesures, disposées sur l'ensemble de la région, ont enregistré des hausses des concentrations à partir du 17/01 comme visible sur le graphique suivant.

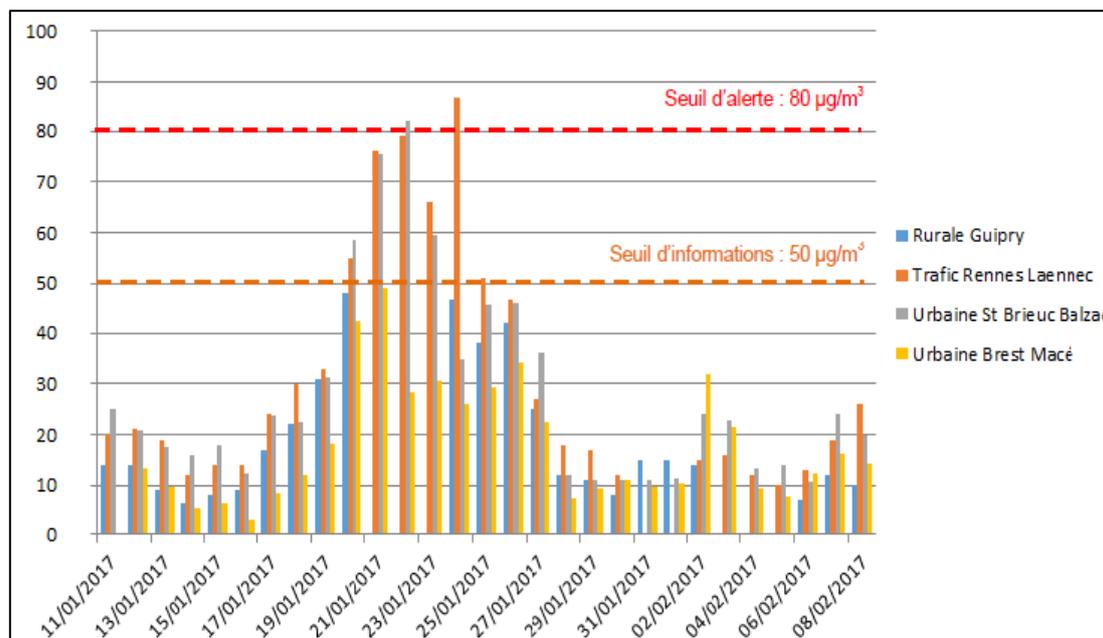


Figure 147 : Evolution des concentrations moyennes journalières en PM10 mesurées au niveau des stations de surveillance réglementaire

Cette hausse des concentrations sur l'ensemble de la région comme visible sur la figure précédente, sera prise en compte dans le cadre de l'interprétation des données de cette étude.

3.4.4. Analyse descriptive des résultats

Les évolutions des mesures de l'ensemble des paramètres sont présentées successivement dans ce chapitre.

Pour la mesure des particules PM10 et PM2.5, le site Chêne sec (Amont) a été équipé durant la campagne estivale d'un appareil de mesure optique, qui ne répond pas aux exigences réglementaires contrairement aux appareils disposés sur les deux autres sites de mesures. Par conséquent, les résultats des deux sites équipés d'un dispositif réglementaire (Bouyère et la carrière) sont comparés au site rural national de Guipry, intégré au réseau de surveillance régionale d'Air Breizh. Se trouvant à une cinquantaine de kilomètre de la zone d'étude, l'implantation rurale de cette station est comparable à l'environnement de la zone d'étude. La comparaison des trois sites de mesures (Bouyère, carrière et

chêne sec) sera réalisée par la suite via la comparaison des ratios des mesures $PM_{10}/PM_{2.5}$ par site (et donc par méthode identique) ce qui permet de s'affranchir des différences de méthodes de mesures.

3.4.4.1. Les particules PM_{10}

Evolution des concentrations quart-horaires

Les appareils de mesures fournissent une donnée par quart d'heure. Les graphiques suivants présentent l'évolution de ces données par semaine et successivement pour les campagnes 1 et 2.

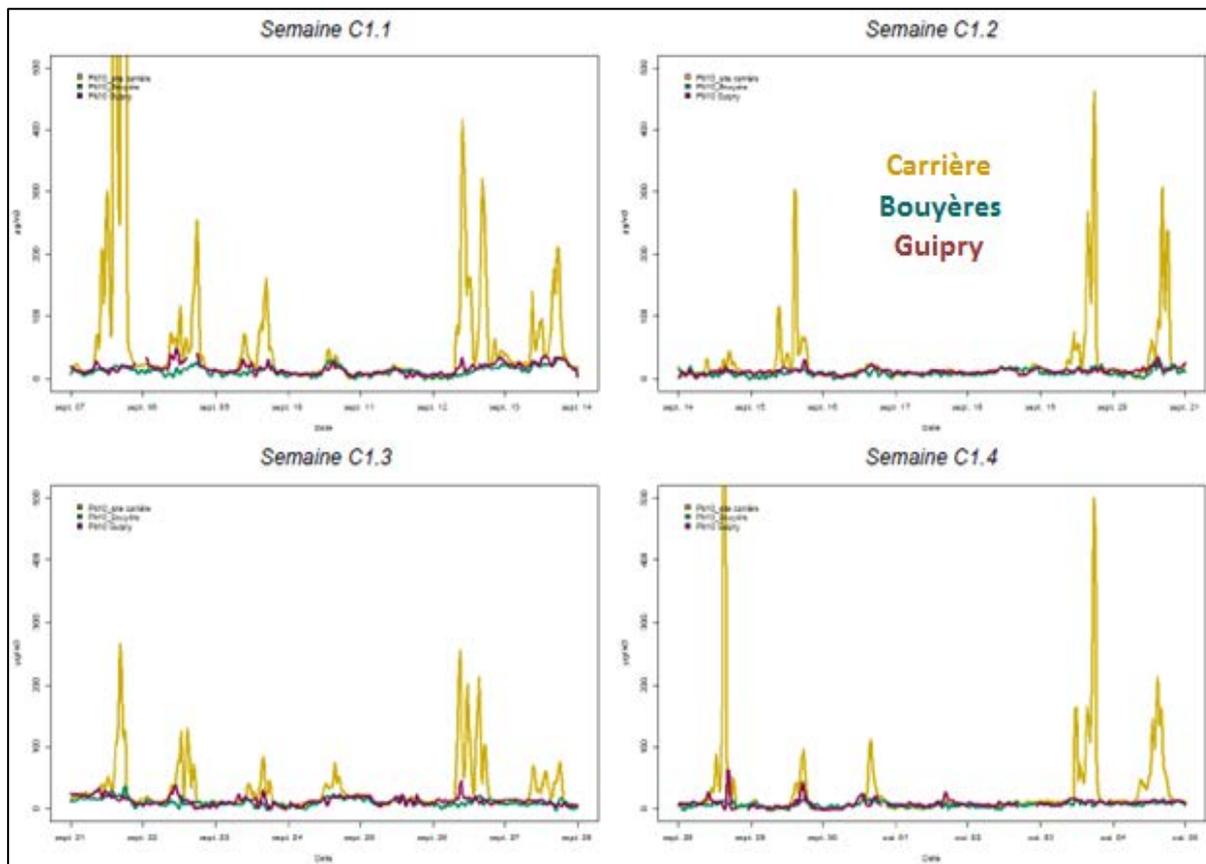


Figure 148 : Données 1/4h en PM_{10} (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant la campagne 1 ESTIVALE

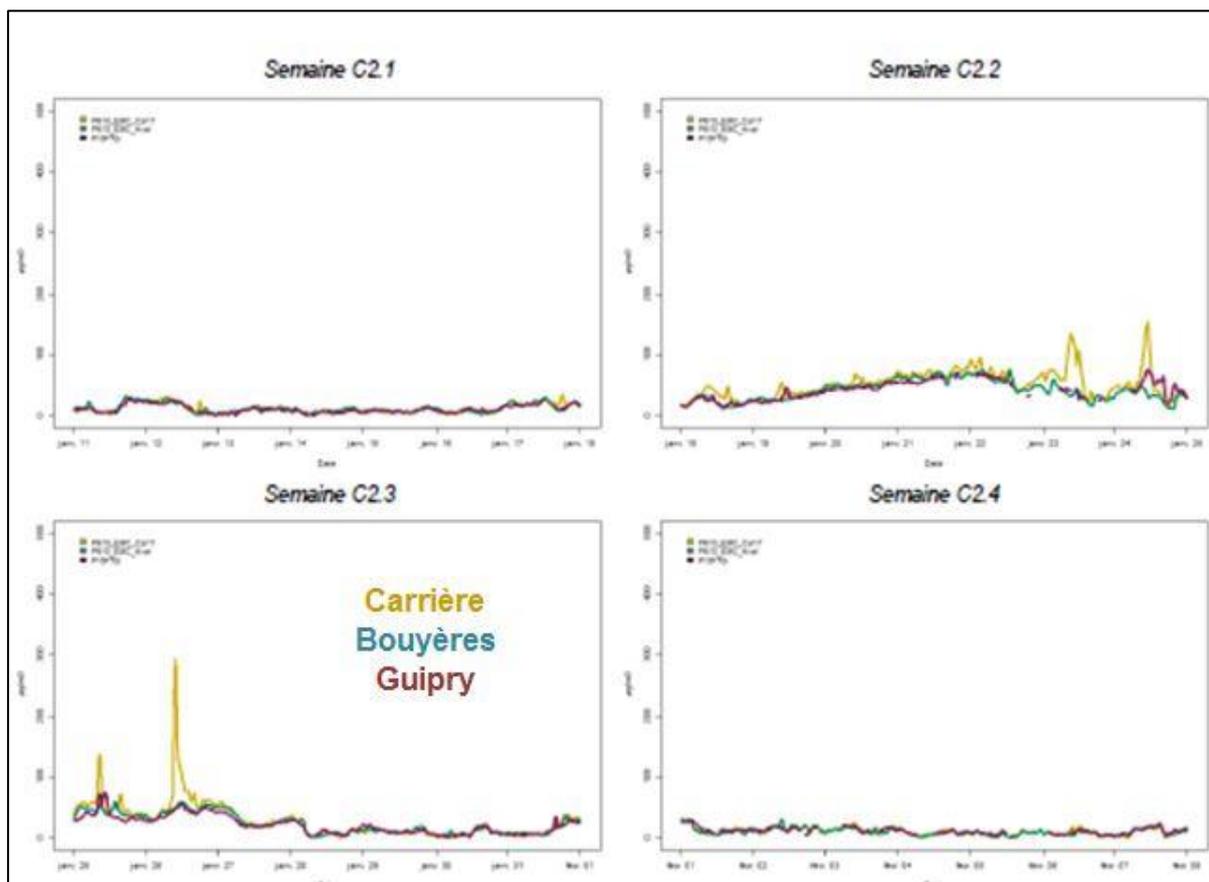


Figure 149 : Données 1/4h en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant la campagne2 HIVERNALE

Les mesures PM10 sur le site de la carrière :

Les concentrations en PM10 mesurées sur le site de la carrière se distinguent nettement des autres résultats.

Cette différence est très marquée lors de la campagne estivale pour laquelle on observe un ou plusieurs pics pour chaque jour d'exploitation en semaine. Ces pics présentent des amplitudes variables ; ils atteignent des niveaux très élevés au regard des valeurs habituellement mesurées dans l'environnement. La valeur maximale atteint $3\,400\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ le 7/09/16, en début de campagne 1. L'ampleur de ces pics est très liée au positionnement retenu pour ce point au sein de la carrière, du fait de sa proximité aux installations de traitement mais également aux voies de circulation.

Durant la campagne hivernale, en raison des précipitations récurrentes en semaine 2.1 et 2.4 (cf. figure 140), on note une absence de pic significatif de concentrations sur le site de la carrière. Les niveaux semblent proches des autres sites (site proche carrière et site témoin). Pour la semaine 2.2, on constate nettement l'influence de l'épisode de pollution régionale qui a contribué à élever les niveaux de fond en PM10 sur les trois sites de mesures. Des pics sont observés sur la carrière durant cette semaine mais d'amplitude faible au regard de ceux de la campagne estivale. Enfin la semaine 2.3 présente des pics de plus fortes amplitudes en début de période puis des valeurs proches des sites hors carrière par la suite du fait de précipitations (cf. figure 140).

La figure ci-après permet de comparer l'évolution des mesures sur le site carrière entre les deux campagnes.

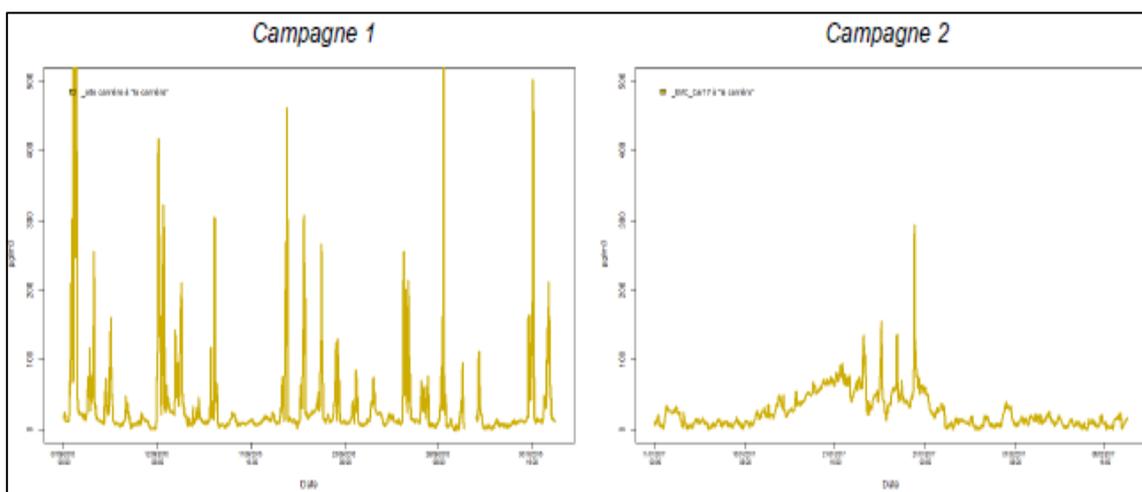


Figure 150 : Evolution des données 1/4h en PM10 sur le site de la carrière (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant les 2 campagnes

On observe via ces évolutions qu'en période estivale sèche (campagne 1), les pics de concentrations sont récurrents (1 ou plusieurs pics par jour d'exploitation) et d'amplitudes élevées (pic journalier $\geq 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ atteignant fréquemment $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

En hiver, en période de précipitations comme en début et fin de la campagne 2, les pics sont très peu significatifs ($<30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) comparativement à ceux de la campagne estivale. Toutefois, l'absence de précipitations sur plusieurs jours, comme lors des conditions anticycloniques rencontrées à mi-campagne, peut occasionner à cette période, des envols de poussières à l'origine de pics journaliers atteignant 200 à $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, proches des pics estivaux.

Les mesures PM10 hors site – Bouyère :

L'échelle retenue précédemment pour la comparaison des sites ne permet pas de comparer finement les deux sites hors carrière entre eux. Toutefois, il se dégage des graphiques précédents des niveaux bien inférieurs à ceux mesurés sur la carrière et proches entre les deux sites malgré la proximité du point Bouyère par rapport à la carrière. Cette observation est valable pour les deux campagnes de mesures.

Une comparaison de ces deux sites est réalisée par la suite à l'aide des moyennes journalières.

Analyses statistiques des données quart horaires

Pour compléter cette analyse, les données de mesures sont présentées ci-après sous forme de 'boxplot' permettant d'illustrer la distribution statistique des jeux de données. Les données brutes quart-horaires ont été retenues pour cette analyse.



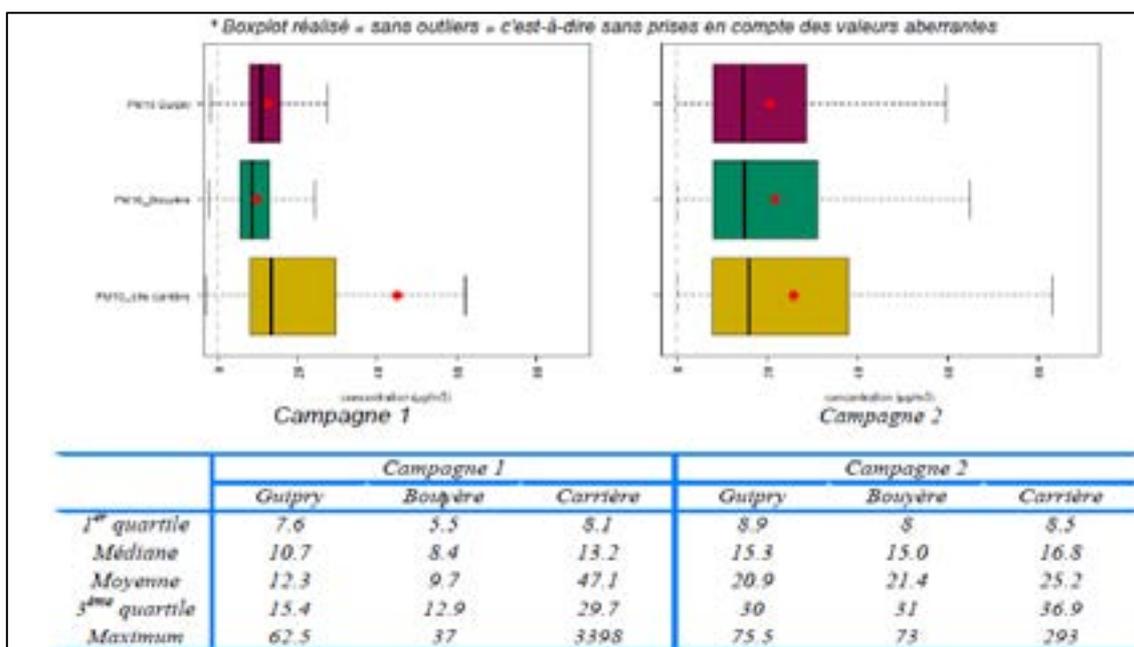


Figure 151 : Distribution statistique des données PM10 des deux campagnes de mesures (données ¼h en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Dans ce type de représentation, la comparaison des valeurs de la médiane et de la moyenne est intéressante car un écart important s'explique par des valeurs ponctuellement élevées qui tendent à augmenter la valeur de la moyenne contrairement à la médiane.

Pour le site carrière durant la campagne 1, la distribution des valeurs diffère nettement de celles des deux autres points. De même, pour ce site, la moyenne est bien supérieure à la médiane du fait de l'influence des valeurs ponctuellement très élevées en période de pic. Cette remarque est moins marquée sur la campagne 2 en raison de pics moins élevés et moins fréquents. La moyenne du site carrière est toutefois légèrement plus élevée que celles des autres sites ce qui pourrait s'expliquer par la présence de pics ponctuelles. Les médianes des trois sites sont par contre identiques.

Pour les deux autres sites, les distributions statistiques sont assez proches entre elles pour chacune des campagnes. Pour la campagne 1, la médiane du site Bouyère ($8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est même inférieure à celle de Guipry ($10.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En campagne 2 elles sont identiques. Les distributions des données entre les campagnes sont différentes en raison de l'épisode de pollution lors de la campagne 2 qui a influencé les mesures sur les 3 sites.

En analyse globale sur la campagne, ces distributions confirment la présence de pics importants sur le site carrière, et semblent dégager une absence d'impact de la carrière sur le site Bouyère qui présente une distribution identique à celle de Guipry, considéré comme témoin.

Evolution des concentrations journalières

Cette partie vise à présenter les concentrations journalières mesurées au regard de la valeur limite de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ imposée par la directive 2008/50/CE (transcrite dans le code de l'environnement – article R221-1) laquelle ne doit pas être dépassée plus de 35 fois par an dans l'air ambiant extérieur.

Cette réglementation est définie pour des mesures en air ambiant, c'est-à-dire « l'air extérieur à l'exclusion des lieux de travail tels que définis par la directive 89/654/CEE, auxquels s'appliquent les dispositions en matière de santé et de sécurité au travail et auxquels le public n'a normalement pas accès ». Elle ne s'applique donc pas aux mesures au sein de la carrière. Pour cette raison, deux graphiques sont proposés par campagne ci-après. L'un comparant les données journalières des sites carrière, Bouyère et Guipry et l'autre présentant les résultats des points hors site Bouyère et Guipry comparés au seuil limite journalier de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Notons que les échelles des graphiques sont différentes en raison des niveaux différents mesurés en carrière et hors carrière.



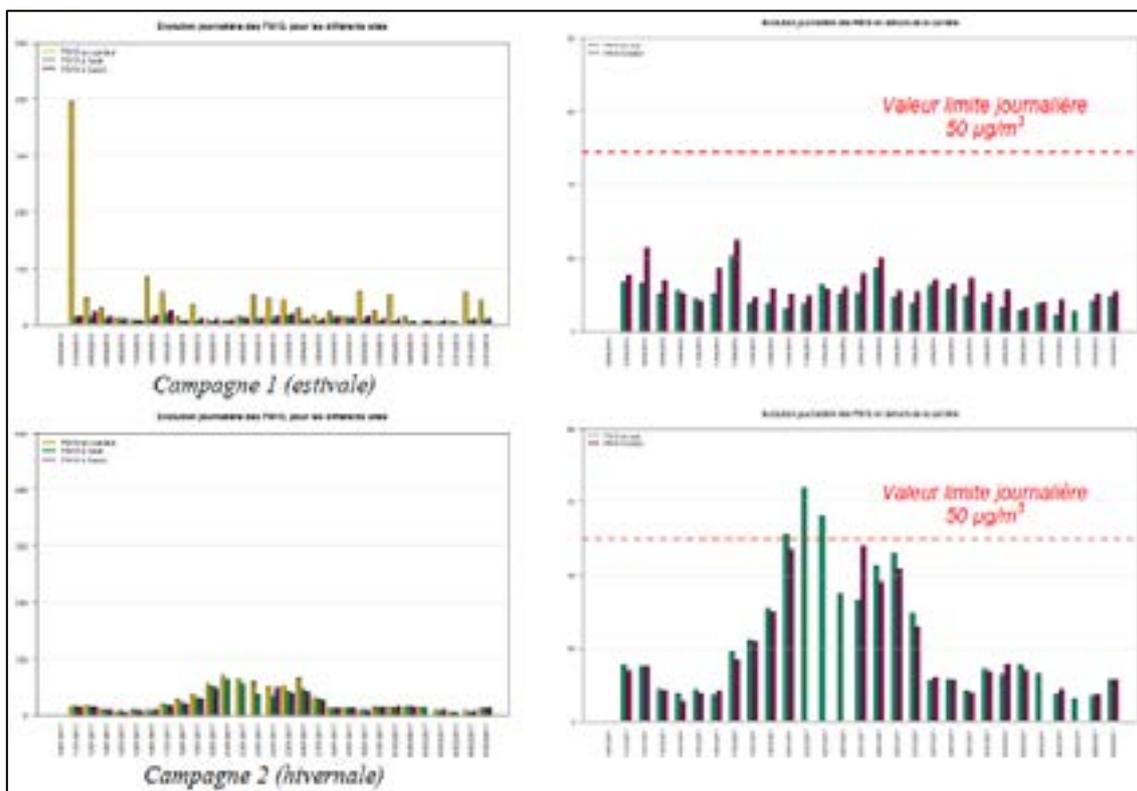


Figure 152 : Evolution des moyennes journalières par site lors des deux campagnes de mesures

Les mesures PM10 sur le site de la carrière :

Les graphiques présentant les moyennes journalières des trois sites de mesures (partie gauche ci-dessus) mettent en évidence des moyennes journalières élevées sur le site de la carrière comparativement aux autres sites, essentiellement sur la campagne 1 estivale.

La concentration moyenne journalière sur cette campagne 1 est de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ masquant toutefois de grandes amplitudes puisque la valeur maximale journalière atteint près de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ comme illustré sur le graphique ci-après qui présente les moyennes journalières du site carrière seul pendant la campagne 1.

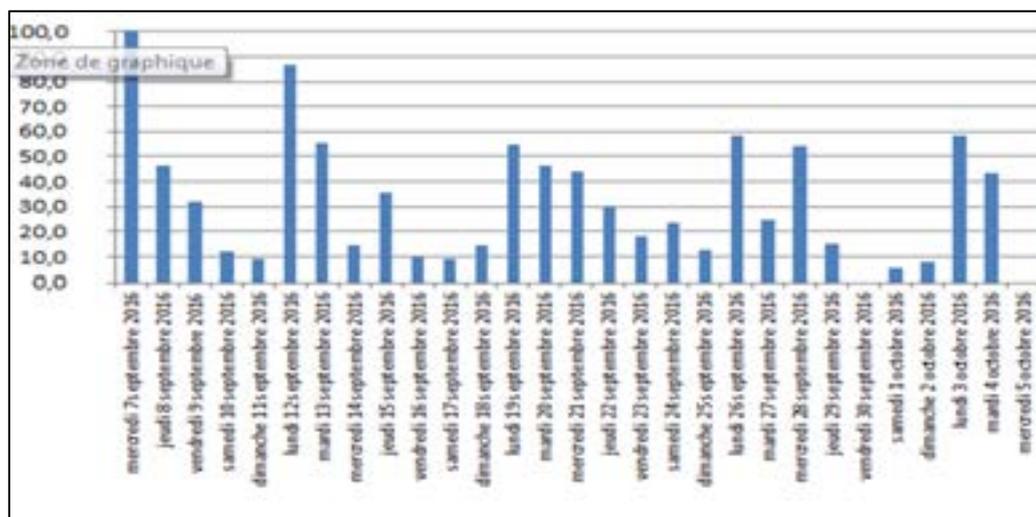


Figure 153 : Evolution des moyennes journalières en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur la carrière durant la campagne 1

On observe que les différences entre les moyennes journalières du site de la carrière et les deux autres sites durant la campagne 2 sont faibles durant la 1ère et dernière semaine de la campagne, du fait des précipitations récurrentes.



Une différence de l'ordre de 10% est observée sur ces semaines alors que cette différence atteint 40% en milieu de campagne en période anticyclonique. Ce point se justifie par une hausse plus importante des niveaux mesurés sur le site de la carrière malgré l'élévation des niveaux de fond observés sur les deux sites du fait de l'épisode de pollution régionale.

Les mesures PM10 hors site – Bouyère :

Durant la campagne 1, malgré des concentrations importantes observées sur la carrière, les mesures sur le point Bouyère restent inférieures au seuil réglementaire journalier de 50 µg/m³. La moyenne journalière maximale est de 20 µg/m³.

Pendant la campagne 2, au même titre que le site rural de Guipry, le point de mesure Bouyère présente des dépassements du seuil réglementaire de 50 µg/m³. Notons toutefois que durant cette période, les différences entre les moyennes journalières des deux sites Bouyère et Guipry sont semblables en début et fin de période alors qu'elles sont plus importantes en milieu de campagne toujours durant la période anticyclonique.

En synthèse de cette présentation des moyennes journalières par site et pour les deux campagnes, on observe :

- **sur site carrière** : des différences d'un facteur 5 entre les moyennes journalières en période d'activité et le week-end lors de la campagne estivale.
- **hors site** : les mesures sur le site Bouyère, proche de la carrière, restent toujours en dessous du seuil réglementaire (malgré des valeurs ponctuellement élevées mesurées sur site notamment en campagne 1), exceptée toutefois en période d'épisode de pollution régionale au même titre que les autres stations du réseau régional.

Estimation des valeurs moyennes annuelles

La directive 2008/50/CE précédemment citée, prescrit également une valeur limite annuelle de 40 µg/m³ pour les PM10.

Elle précise également que pour assurer la représentativité d'une campagne de mesure et le calcul de la valeur moyenne sur cette période et sa comparaison à la valeur limite annuelle réglementaire, une période minimale de mesure de 14% de l'année doit être respectée (soit 8 semaines), répartie uniformément sur l'année. Cette couverture temporelle et répartition sur l'année ont été respectées dans le cas de cette étude. Malgré le fait que celle-ci se soit déroulée sur deux années civiles distinctes, les moyennes sur les deux périodes sont calculées ci-après et comparées à la valeur limite réglementaire pour le site hors carrière Bouyère et le site rural national de Guipry.

PM10 en µg/m ³	Moyenne campagne 1	Moyenne campagne 2	Moyenne annuelle estimée	Valeur limite réglementaire
Carrière	47,1	25,2	36,1	X
Bouyère (aval)	9,7	21,4	15,6	40
Guipry - site rural national (témoin)	12,3	20,9	16,6	

Tableau 45 : Estimation des moyennes annuelles et comparaison à la valeur limite réglementaire

La moyenne annuelle estimée sur la base des deux mois de mesures sur le site Bouyère respecte largement la valeur limite imposée et est légèrement inférieure à la moyenne calculée sur la même période pour le site rural national de Guipry (hors influence des installations).

Cette comparaison permet de confirmer qu'en moyenne sur les deux campagnes de mesures, le site proche de la carrière Bouyère ne semble pas influencé par les activités de celle-ci.

Synthèse PM10



En synthèse de cette partie descriptive relative aux particules PM10, les mesures sur l'emprise de la carrière à proximité immédiate des installations témoignent d'un impact fort de l'activité sur les niveaux enregistrés. Les pics sont récurrents (à chaque jour d'activité) et d'amplitudes fortes.

Une différence d'un facteur 5 a été constatée en campagne 1 entre les moyennes journalières en semaine et celles du week-end. Hors période d'exploitation, les niveaux journaliers sur la carrière se rapprochent de ceux observés hors site même restent toute de même 30% supérieurs à ces derniers ce qui s'explique par les ré-envols.

Quant-à l'origine des pics de concentrations sur la carrière, une analyse détaillée de quelques-uns d'entre eux sera réalisée dans la suite du rapport.

En dehors de la carrière, les mesures réalisées sur le site Bouyère (500 mètres des limites de la carrière) ne semblent pas influencées par l'activité par comparaison aux niveaux mesurés sur le site témoin Guipry. Ce point doit toutefois être modéré du fait des faibles taux d'exposition du point de mesures aux envols du site pendant les deux campagnes ($\leq 5\%$ des périodes).

Les valeurs limites réglementaires ont également été respectées excepté pendant l'épisode de pollution régionale.

3.4.4.2. Les particules PM2.5

Au même titre que pour les PM10, les PM2.5 ont été mesurées via des équipements réglementaires sur les sites carrière et Bouyère (campagnes 1 et 2) et avec un appareil de mesure non réglementaire sur le site Chêne sec durant la campagne1 (absence de mesure en campagne 2).

La comparaison des niveaux mesurés sur les trois sites n'est pas réalisée pour cette raison mais l'approche par les ratios permettra de compléter cette analyse.

Evolution des données quart-horaires

Les graphiques présentent les données quart-horaires pour chaque semaine au sein des campagnes et pour les deux sites de mesures (la carrière, Bouyère) comparées au site de Guipry (témoin).

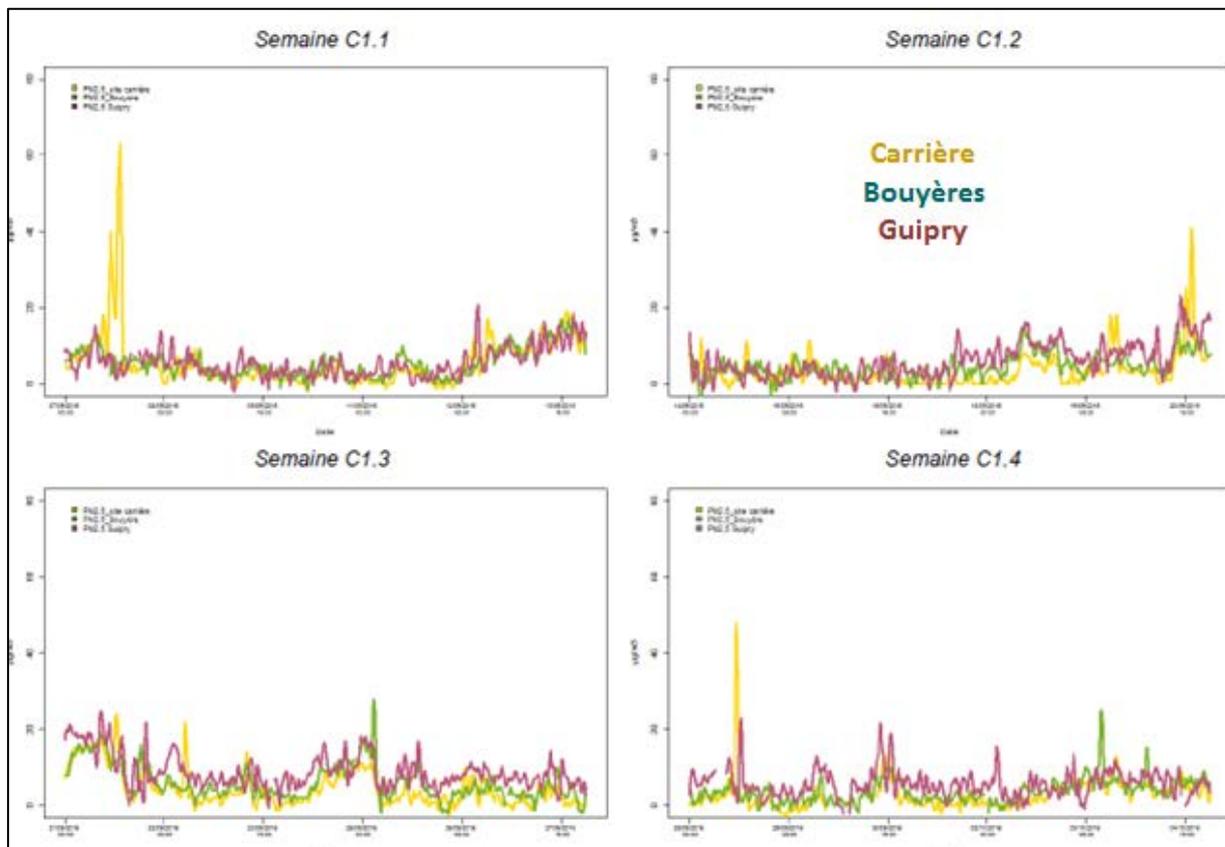


Figure 154 : Données 1/4h en PM2.5 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant la campagne 1 ESTIVALE



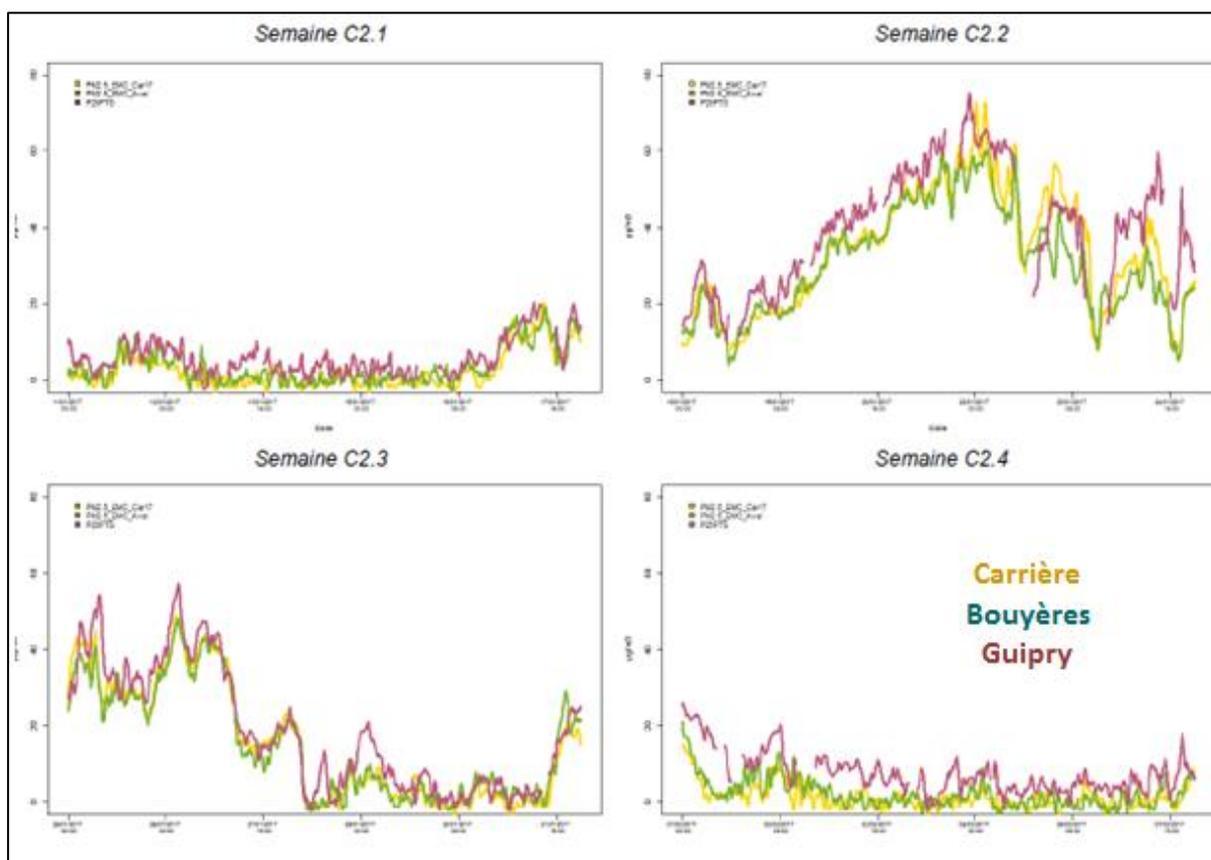


Figure 155 : Données 1/4h en PM2.5 (en µg/m3) durant la campagne 2 HIVERNALE

Durant la campagne estivale et la majorité de la campagne hivernale, les résultats sont proches sur les trois sites de mesures. Le site de Guipry présente même des niveaux souvent supérieurs à ceux des deux autres sites. Des pics ponctuels sont toutefois visibles lors de la campagne estivale pour les sites carrière (le 7/09 par exemple) et Bouyère (le 25/09 et le 03/10).

Pour la campagne 2 hivernale, l'influence de l'épisode de pollution régionale est très marquée contribuant à une élévation du niveau de fond. Contrairement à ce qui a été observé en campagne 1, les sites de mesure carrières et Bouyère ne présentent pas de pics ponctuels (en dehors de ceux mesurés à Guipry) qui pourraient être liés à l'activité de la carrière.

Les PM2.5 sont produites majoritairement par les processus de combustion dont le résidentiel tertiaire et l'agriculture représentent 72% des émissions régionales. Les pics observés durant la campagne 1 pourraient correspondre à une ou des source(s) de combustion. Ce point sera vérifié par analyse des ratios PM10/PM2.5 dans la suite du rapport. En préalable, les graphiques ci-après présentent les évolutions des données quart-horaires sur le site de la carrière pour mettre en évidence la fréquence et l'ampleur des pics observés.



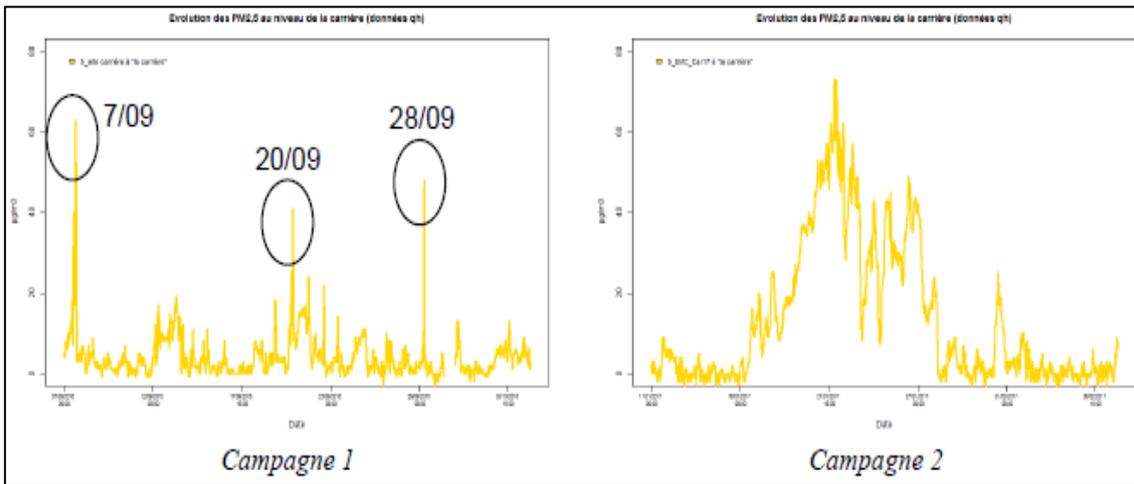


Figure 156 : Evolution des données PM2.5 quart-horaires (en µg/m³) sur le site carrière

Sur le site de la carrière, les pics en campagne 1 estivale sont récurrents (journaliers) mais d'amplitudes faibles (<20 µg/m³). Trois d'entre eux présentent toutefois des amplitudes plus élevées à savoir le 7/09 (63 µg/m³), le 20/09 (41 µg/m³) et le 28/09 (39 µg/m³).

Durant la campagne hivernale, en dehors de l'influence liée à l'épisode de pollution régionale contribuant à l'élévation du niveau de fond (augmentation des particules produites par le chauffage), un pic est observé le 31/01 d'amplitude modérée (25 µg/m³) au regard du niveau de fond. Toutefois ce pic a également été observé à Guipry ce qui permet d'écarter l'influence de la carrière. L'origine de ces pics en campagne 1 fera l'objet d'une analyse détaillée dans le cadre du § 3.4.5.

Analyses statistiques des données quart-horaires

Les données de mesures PM2.5 sont présentées ci-après sous forme de 'boxplot' permettant d'illustrer la distribution statistique des jeux de données. Les données brutes quart-horaires ont été retenues pour cette analyse. De même que pour les PM10, ces graphiques ont été réalisées sans les valeurs aberrantes.

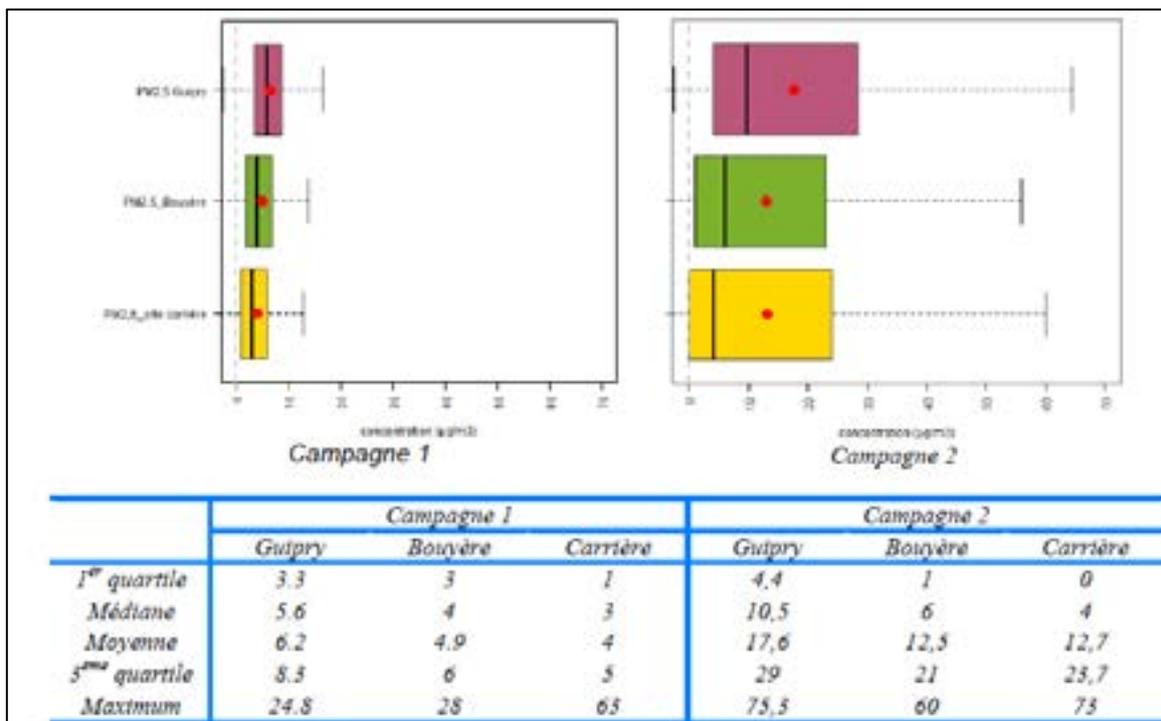


Figure 157 : Distribution statistique des données PM2.5 des deux campagnes de mesures (données 1/4h en µg/m³)

A l'image des PM10, les distributions statistiques des données entre les deux campagnes sont différentes du fait de l'épisode de pollution.

Lors des deux campagnes, les médianes des données sur la carrière et à proximité (Bouyère) sont inférieures à celle du site témoin de Guipry. Les différences entre les médianes et moyennes pour chacun des sites et pour chaque campagne, sont également identiques ce qui montre l'absence de pic additionnels sur la carrière pour ce paramètre.

L'influence de la carrière sur le site à proximité est donc non significative pour ce paramètre.

Evolution des concentrations journalières

Il n'existe pas à ce jour de valeur limite ou seuil d'information/alerte pour un pas de temps journalier pour les PM2.5. L'évolution des moyennes journalières n'est donc pas étudiée pour ce paramètre.

Estimation des valeurs moyennes annuelles

Les particules PM2.5 disposent d'une valeur limite annuelle de 25 µg/m³ prescrite dans la Directive 2008/50/CE à respecter en moyenne annuelle.

De la même manière que pour les particules PM10, nous avons estimé une moyenne annuelle à partir des deux campagnes de mesures. Seules les mesures des points Bouyère et Guipry (hors carrière) sont comparées à la valeur limite.

PM2.5 en µg/m ³	Moyenne campagne 1	Moyenne campagne 2	Moyenne annuelle estimée	Valeur limite réglementaire
Carrière	4,0	12,7	8,4	X
Bouyère (aval)	4,9	12,5	8,7	25
Guipry - site rural national (témoin)	6,2	17,6	11,9	

Tableau 46 : Estimation des moyennes annuelles et comparaison à la valeur limite réglementaire

Les moyennes annuelles estimées sur les points hors emprise de la carrière sont bien inférieures à la valeur limite réglementaire. Le point carrière présente une moyenne annuelle estimée proche de celle du site de Bouyère et inférieure de celle du site témoin de Guipry.

En synthèse de cette analyse pour les PM2.5, nous concluons sur le fait que l'activité de la carrière ne semble pas affecter les niveaux de ce paramètre. Les résultats sur le site et à proximité étant très proches. Quelques pics d'amplitudes modérées ont été observés sur la carrière pendant la campagne 1. Une analyse détaillée sera réalisée dans la suite du rapport pour tenter d'en déterminer l'origine.

3.4.4.3. Comparaison des mesures PM10 et PM2.5

En préalable de l'approche par les ratios qui sera développée dans le chapitre suivant, les figures de la page suivante présentent la comparaison des niveaux de PM10 et PM2.5 mesurés par site et lors des deux campagnes de mesures.

L'objectif de cette présentation n'est pas de comparer les niveaux entre les sites mais plutôt d'étudier l'écart entre les mesures PM10 et PM2.5 par site et leur évolution durant les campagnes. Dans le cadre de cette analyse, les mesures du site amont peuvent être utilisées puisque les niveaux de particules PM10 et PM2.5 sur ce site ont été mesurés avec le même dispositif.

En première approche, on observe que les profils journaliers PM10 et PM2.5 sont assez proches sur chaque site et pour les deux campagnes. Une exception toutefois pour le site carrière durant la campagne 1 qui présente des décrochements réguliers de la courbe PM10 par rapport à celle des PM2.5. Ce point met en évidence des apports ponctuels plus importants en PM10 par rapport au PM2.5 durant l'activité sur la carrière ce qui confirme les analyses des chapitres précédents. Lors de la campagne 2, les profils PM2.5 et PM10 sont assez proches.

Le point amont durant la campagne 1 présente des profils proches. De légers décrochages sont toutefois observés ponctuellement le 12/09, le 19/09 qui pourraient être à l'origine d'un apport en PM10. Notons que pour ces journées, des pics importants de PM10 ont été mesurés sur la carrière.



Des vents en direction du site amont lors de cette journée pourraient expliquer ce décalage. Une analyse détaillée sera réalisée dans la suite du rapport.

Pour le site aval, les profils sont très proches durant les 2 campagnes.

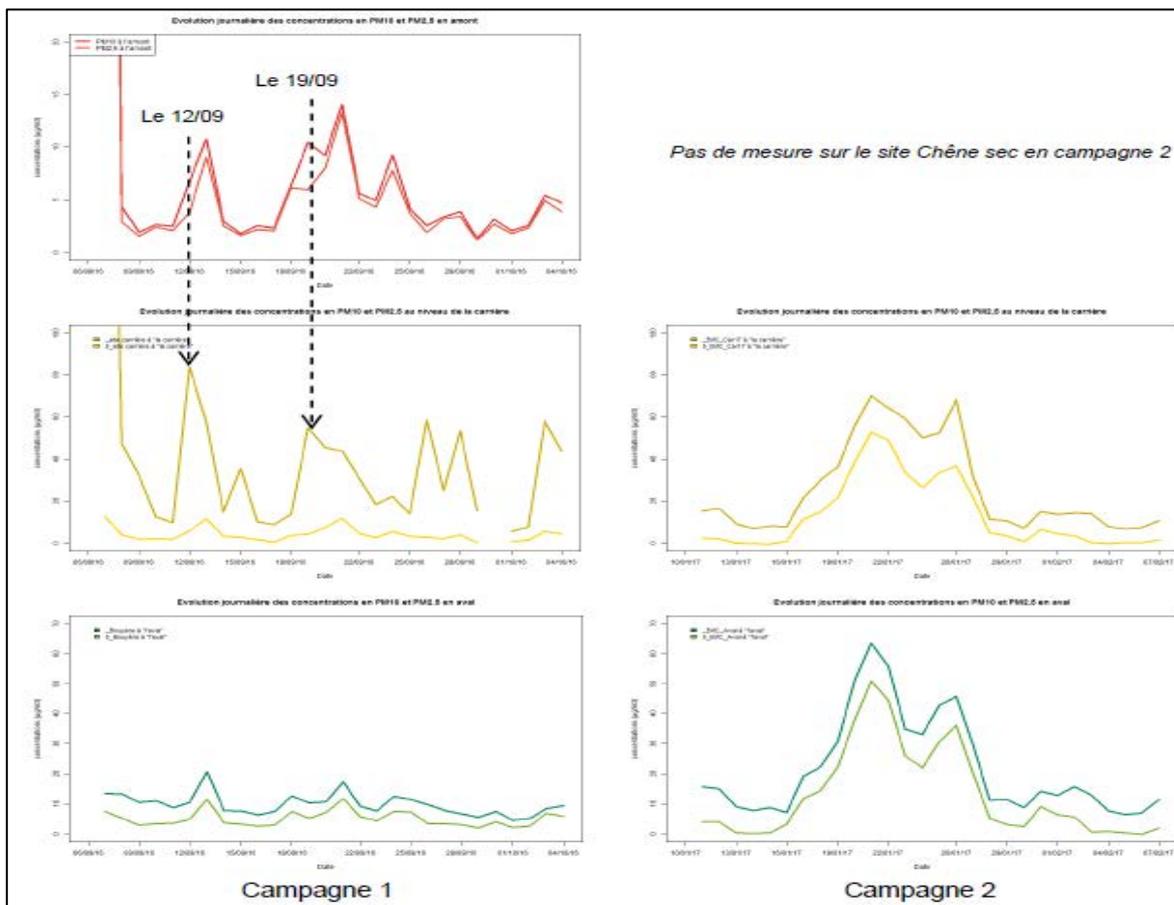


Figure 158 : Evolution des mesures PM10 et PM2.5 par site de mesures durant les deux campagnes (en moyennes journalières- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

3.4.4.4. Analyse des ratios PM2.5/PM10

Le calcul du ratio des niveaux de PM2.5 sur PM10 permet de s'affranchir des différences liées aux méthodes de mesures entre les sites et donc d'être en mesure de les comparer entre eux. Les résultats des ratios doivent être interprétés en tenant compte des analyses précédentes à savoir que les particules PM10 constituent le principal paramètre traceur de l'activité de la carrière contrairement aux particules PM2.5.

Le tableau suivant présente les ratios moyens calculés sur chaque campagne et pour chacun des sites.

	Moyenne campagne 1	Moyenne campagne 2
Guipry - site rural national (témoin)	0,73	0,68
Chêne sec (amont)	0,85	X
Carrière	0,17	0,25
Bouyère (aval)	0,51	0,38

Tableau 47 : ratios PM2.5/PM10 moyens par campagne et par site



Pour le site rural de Guipry, les ratios moyens sur chaque campagne sont de l'ordre de 0,7. Cela signifie sur les deux périodes, que les particules PM2.5 représentent 70% en moyenne des particules PM10.

Pour les 3 autres sites, les répartitions sont différentes.

- Pour le site amont, le ratio est légèrement plus élevé que sur le site témoin (ce qui pourrait être lié à la méthode de mesure).
- Pour le site carrière, le ratio est significativement plus faible puisque les PM2.5 représentent en moyenne seulement 20% des PM10 dû à un apport important en PM10.
- Pour le site Bouyère, les ratios sont différents sur les deux campagnes et intermédiaires entre le site amont et le site carrière.

Ces moyennes masquent toutefois des disparités importantes entre les semaines notamment sur le site de Guipry. Les graphiques ci-après présentent les ratios moyens par semaine pour les sites de mesures.

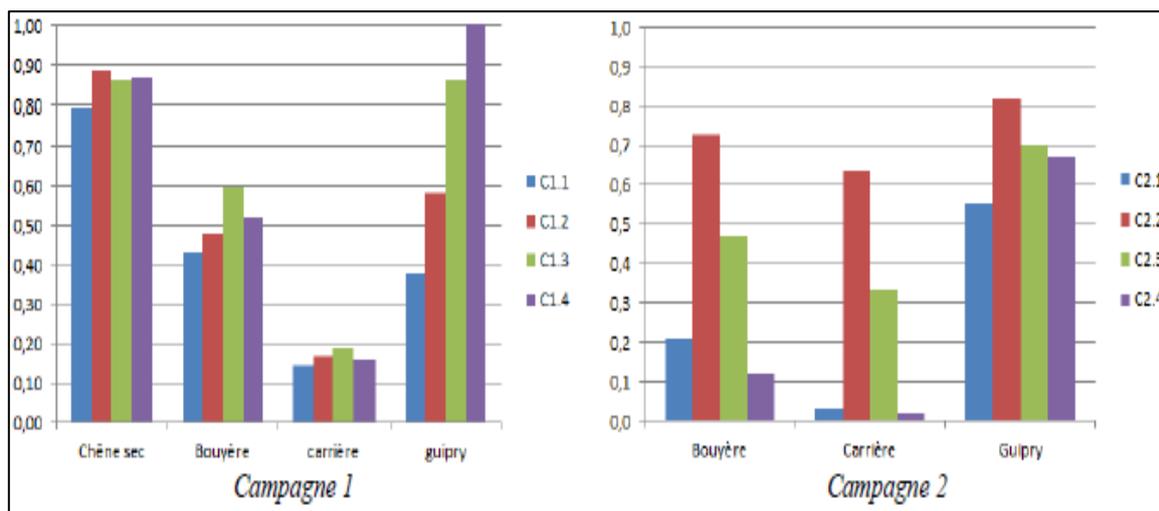


Figure 159 : Evolution des ratios PM2.5/PM10 par semaine et pour chacun des sites

Durant la campagne 1, les ratios sont assez stables sur les sites Chêne sec, Bouyère et carrière contrairement au site de Guipry qui présente des ratios moyens compris entre 0,4 et 1. Cela permet ainsi de constater qu'en dehors de l'influence d'une source prédominante comme c'est le cas sur le site de Guipry, le ratio PM2.5/PM10 peut varier considérablement. Sur les semaines C1.1 et C1.2, les ratios des sites Bouyère et Guipry sont proches contrairement aux deux dernières semaines (C1.3 et C1.4) pour lesquels les ratios mesurés sur le site Bouyère sont bien inférieurs à ceux de Guipry ce qui pourrait témoigner d'un apport plus important en PM10. Cette observation coïncide avec les données météorologiques puisque le site Bouyère a été préférentiellement sous les vents de la carrière durant ces deux semaines comparativement au reste de la période.

Le site amont présente des ratios élevés stables durant la campagne 1.

Durant la campagne 2, les semaines 2.2 et 2.3 présentent des ratios plus élevés pour chacun des sites du fait de l'épisode de pollution régionale (apport en PM2.5). **Pour les sites carrières et Bouyère, les ratios sont exceptionnellement faibles en semaines C2.1 et C2.4.** Une réserve peut toutefois être apportée en raison des faibles teneurs mesurées et des incertitudes importantes à ces niveaux.

Les graphiques suivants présentent l'évolution journalière des ratios PM2.5/PM10 pour chacune des campagnes.



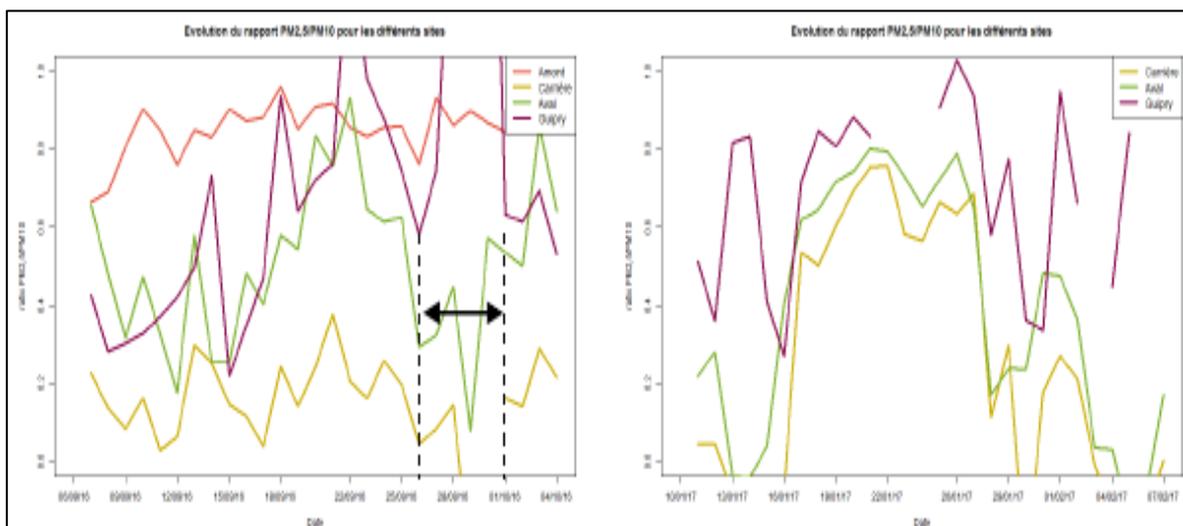


Figure 160 : Evolution des ratios PM2.5/PM10 par site et pour les deux campagnes

Les variations de ces ratios sont importantes même pour le site de Guipry hors influence de la carrière.

Pour la campagne 1 sur la carrière, cela permet de confirmer l'influence des apports en PM10 qui se traduit par un ratio faible qui oscille entre 0,1 et 0,4 (soit 10% à 40% des PM2.5 au sein des PM10). Le site Bouyère (aval) présente des amplitudes de variation des ratios plus importantes qui suivent globalement celles du site de Guipry bien que toujours inférieures. Un décalage entre les profils des ratios de Guipry et Bouyère est toutefois observé du 26/09 au 01/10 (semaines C1.3 et C1.4). Le profil du site de Bouyère marque alors une baisse contrairement à celui de Guipry et simultanée à celle observée sur le site en carrière. L'exposition du site Bouyère aux envois de particules sur le site de la carrière pourrait être l'une des explications.

Pour la campagne 2, les profils des deux sites de la zone d'étude (carrières et Bouyère) suivent globalement la même tendance. Un décrochage de ces deux profils avec celui de Guipry, considéré comme témoin, est observé en début de campagne (du 13 au 15/01) qui est lié à des teneurs insignifiantes mesurées en PM2.5. Ce décrochement n'est pas retenu.

L'analyse des ratios PM2.5/PM10 permet de mettre en évidence un ratio caractéristique sur le site carrière (de l'ordre de 0.2) qui varie peu entre les semaines et les saisons excepté durant l'épisode de pollution (du fait d'apport en PM2.5).

Le site Chêne sec ne semble pas influencé par des apports en PM10 venant du site.

Le site Bouyère marque un profil intermédiaire entre Guipry et la carrière avec un ratio assez stable qui peut être ponctuellement abaissé par un apport en PM10 comme lors des semaines C1.3 et C1.4 ce qui mérite d'être analysé en fonction des données météorologiques.

Les figures ci-après présentent en complément l'évolution des ratios en fonction des concentrations en PM10. L'objectif est ici d'identifier la valeur du ratio pour les plus fortes concentrations en PM10.



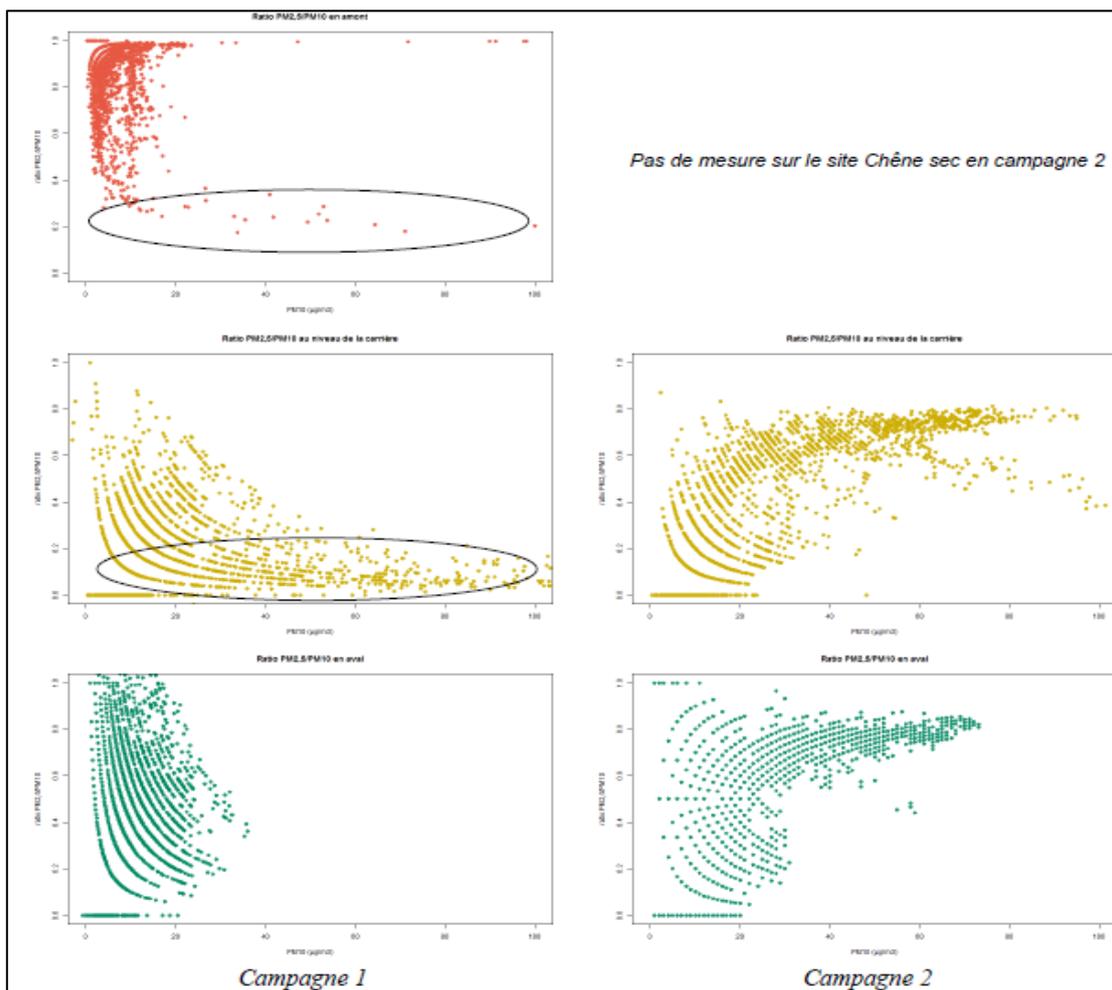


Figure 161 : ratio PM2.5/PM10 en fonction des PM10 pour les deux campagnes de mesures

On observe pour le site carrière lors de la campagne 1 que le ratio se rapproche de zéro lorsque les concentrations en PM10 augmentent. La représentation est très caractéristique ce qui est moins vrai en campagne hivernale pour laquelle les valeurs fortes en PM10 sont accompagnées par des valeurs également élevées en PM2.5 (épisode de pollution) donnant un ratio plus important.

Hors site, les ratios du point amont sont majoritairement élevés excepté toutefois pour quelques épisodes ou des ratios faibles sont associés à des mesures PM10 plus élevées.

Pour le site aval, la représentation est intermédiaire en campagne 1. Les ratios les plus faibles sont associés aux concentrations les plus fortes en PM10.

En conclusion de ce chapitre relatif à l'analyse des ratios PM2.5/PM10, on distingue que le site carrière présente un ratio faible comparé aux autres sites ce qui témoigne d'apports importants en PM10.

- Pour le site chêne sec amont, les ratios sont généralement supérieurs à 0,6. Certains ratio sont très rarement faibles ce qui témoignerait d'impact ponctuelle en PM10.
- Pour le site Bouyère aval, la représentation est différente. Les ratios sont intermédiaires entre les sites carrière et amont ce qui signifierait un impact PM10 plus fréquent dans des niveaux de concentrations en PM10 qui restent toutefois modérés (<40µg/m3).

3.4.4.5. Origine des particules PM10 : les roses des pollutions

La représentation sous forme de roses de pollution permet d'associer les niveaux de concentrations en PM10 aux conditions météorologiques et ainsi en déterminer l'origine.



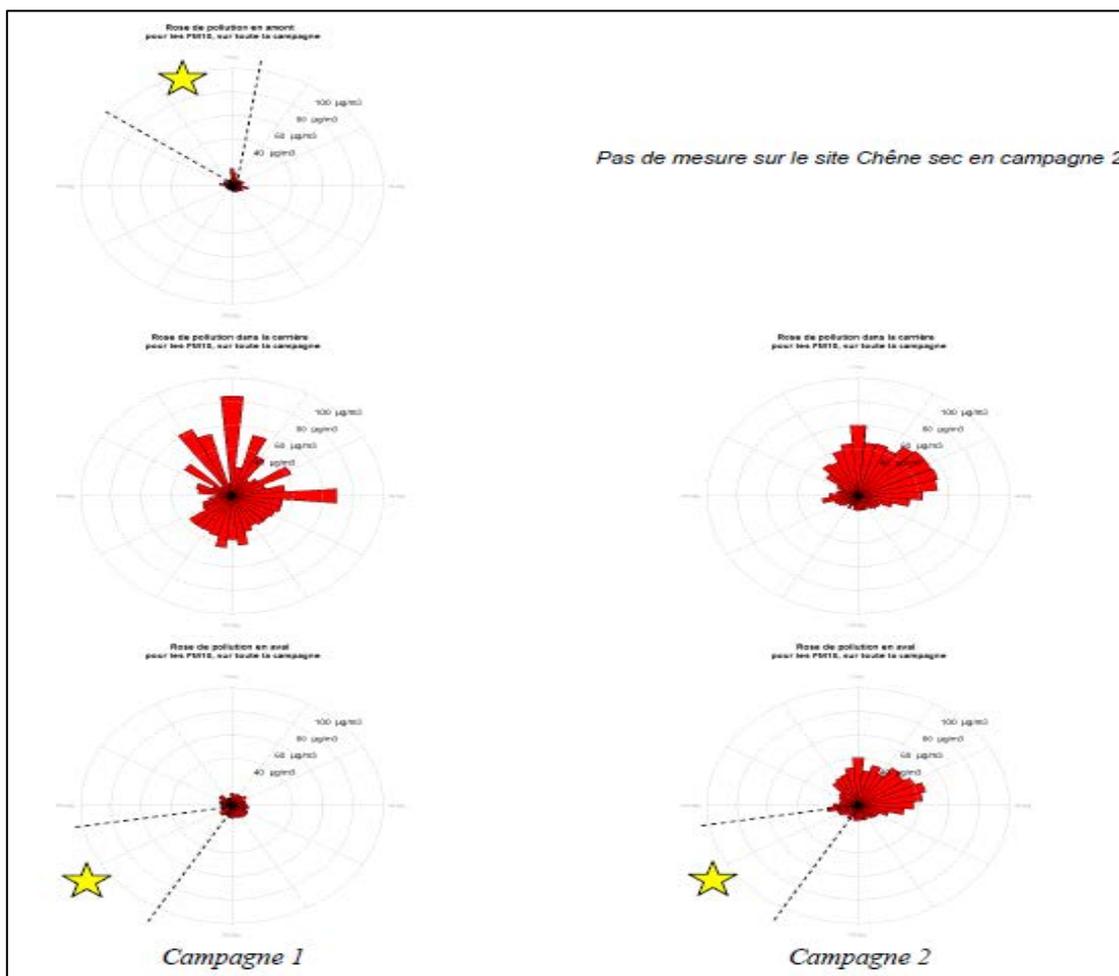


Figure 162 : Rose des pollutions des PM10 durant les 2 campagnes

Pour le site carrière en campagne 1, les concentrations les plus fortes sont mesurées par vent en provenance des secteurs Nord-Est à Nord soit des installations de traitement, ainsi que de l'Est (zone de stockage). Il s'agit probablement de sources ponctuelles au regard des différences de niveaux observées selon chaque direction pour ces secteurs. Par ailleurs, on observe par vent de Sud-Ouest à Est des concentrations plus faibles mais plus constantes en fonction des secteurs de vent. Ces concentrations pourraient être liées à des sources diffuses (ré-envols, circulation, etc.).

Pour la campagne 2, les concentrations les plus élevées sont mesurées par vents de Nord-Est. Cette rose est très influencée par l'épisode de pollution régionale (par vent de Nord-Est). En dehors de la carrière, les roses de pollution du site Bouyère sont nettement différentes et ne permettent pas d'identifier des sources d'émissions. Pour le site amont, par vent de Nord soit en provenance de la carrière, les concentrations sont légèrement supérieures. Toutefois les niveaux moyens dans cette direction restent très faibles (<20µg/m³) et sans doute influencés par un pic ponctuel.

En complément de cette présentation, nous avons superposé la rose des pollutions issue des mesures durant la campagne 1 au niveau du site carrière, à une photographie aérienne afin de visualiser les sources de particules PM10.



Figure 163 : Rose des pollutions des PM10 sur le site carrière durant la campagne 1

Trois sources sont identifiées à proximité du point de mesures :

- les installations de traitement au Nord,
- la piste reliant les installations de traitement à la zone de stockage des produits finis à l'Ouest,
- le convoyeur avec la zone de stockage de granulats à l'Est.

Cette représentation sous forme de pollution pour les PM10 permet d'identifier la présence des sources d'émissions pendant la campagne 1 sur le site carrière.

Pour les autres sites et durant les deux campagnes, il n'y a pas de directions préférentielles ce qui justifie le fait que ces derniers n'ont pas été influencés significativement pendant la campagne. Des impacts ponctuels sont possibles mais non identifiables sur ce type de représentation par campagne.

3.4.4.6. Les poussières sédimentables

Les retombées atmosphériques, ou poussières sédimentables, ont été mesurées à partir des Jauges Owen installées au sein de la carrière et en dehors de celle-ci, au niveau des sites Bouyère et Chêne sec. La détermination des matières en suspension a ensuite été effectuée par le laboratoire INAESCO. Les échantillons ont ensuite été envoyés pour analyses chimique complémentaire au LSCE. Les résultats pour les deux campagnes sont présentés dans le tableau ci-après. Pour les mesures hors site, les résultats sont comparés à l'objectif défini dans l'arrêté du 30/09/16.

	Campagne 1	Campagne 2	Objectif à respecter
Carrière	652,4	242,5	X
Chêne sec (amont)	52,9	6,5	500
Bouyère (aval)	40,0	2,2	

Tableau 48 : Niveaux de retombées mesurés sur les sites (en mg/m²/jr)

Ces résultats mettent en évidence une variabilité importante des résultats. Sur le site de la carrière, les niveaux moyens de retombées varient d'un facteur 2.6 entre les deux campagnes. Hors site, la décroissance est très importante puisque les mesures sur les deux points sont comprises entre 40 et 50 mg/m²/jr en campagne 1 soit moins de 10% de la valeur observée sur site. En campagne hivernale, les niveaux sont quasi insignifiants par rapport à la mesure sur site (<3%).



Les taux d'exposition moyens des points Bouyère et Chêne sec par campagne sont relativement proches (respectivement de 5% et 4% en campagne estivale et 2% et 4% en période hivernale) ce qui ne permet pas d'interpréter les différences des niveaux entre les deux sites et la contribution de la carrière en poussières sédimentables au regard du bruit de fond.

Dans les deux cas, les résultats des mesures en poussières sédimentables hors carrière sont inférieurs à la valeur de l'objectif fixé par l'arrêté du 26/09/16 (modifiant l'arrêté du 22 septembre 1994).

3.4.4.7. Synthèse de l'analyse descriptive

Les éléments suivants sont tirés de cette partie descriptive des résultats des mesures :

Particules PM10

Ce composé est jugé traceur de l'activité de la carrière. L'enregistrement en continu sur le point de mesure carrière révèle des pics journaliers lors de la période d'activité de la carrière dont certains sont très élevés au regard des valeurs habituellement rencontrées dans l'environnement.

Une différence importante a été mise en évidence entre les valeurs enregistrées en semaine et le week-end (facteur 5). Les concentrations en PM10 le week-end sont légèrement supérieures à celles mesurées hors site du fait des ré-envols.

La représentation sous forme de rose des pollutions a permis de mettre en évidence plusieurs sources majoritaires à savoir les bâtiments de traitement, la voie de circulation proche et le convoyeur et la zone de dépotage de granulats.

En dehors du site, les résultats du site proche (Bouyère), équipé d'un dispositif de suivi réglementaire, sont voisines de celles du site choisi comme référence (Guipry) et bien inférieures au seuil réglementaire (hors épisode de pollution régionale).

Particules PM2.5

Les différences des enregistrements sur les points de mesure carrière et Bouyère sont peu significatives sur l'ensemble des deux campagnes ce qui nous permet de conclure sur l'impact négligeable de l'activité de la carrière pour ce paramètre. Quelques pics d'ampleurs modérées ont été observés au niveau des points carrière et Bouyère qui feront l'objet d'une analyse pour en déterminer l'origine.

Les ratios PM2.5/PM10

Partant du constat que l'activité exercée génère majoritairement des PM10 par rapport au PM2.5, une analyse complémentaire a été réalisée en interprétant les ratios PM2.5/PM10. Cette analyse par site, permet de comparer les trois sites d'études entre eux puisqu'elle s'affranchit des différences de technique de mesure entre les sites.

On tire de cette analyse une signature très particulière du site carrière avec un ratio très faible de l'ordre de 0.2 comparativement au site de référence de Guipry par exemple qui démontre l'impact fort des émissions de PM10 par rapport au PM2.5.

Hors site, les ratios sont stables et assez élevés sur le site Chêne sec témoignant d'un impact faible des émissions de la carrière.

Pour le site Bouyère, les ratios moyens par campagne sont intermédiaires entre la carrière et le site chêne sec avec des semaines où le ratio s'approche de celui de la carrière.

Les particules sédimentables

En l'absence de référentiel, il est difficile de qualifier les niveaux mesurés sur site.

Hors site, une décroissance forte est observée sur les deux sites avec des niveaux représentant 10% des valeurs mesurées sur site en campagne estivale et moins de 5% en campagne hivernale.

Ces niveaux mesurés hors site sont bien inférieurs à la valeur d'objectif fixée par l'arrêté du 22 septembre 1994 modifié.

A l'issue de cette analyse descriptive, bien que les mesures des PM10 soient élevées sur le site, on s'accorde sur le fait qu'en moyenne sur les périodes de mesure, l'impact hors site de l'activité sur son environnement proche est peu significatif.



Toutefois, une réserve a été soulevée au regard des temps d'exposition des sites de mesures relativement faibles durant ces campagnes.

Par conséquent, une analyse approfondie est réalisée par la suite pour affiner ces propos.

3.4.5. Analyse approfondie des résultats

Durant la partie descriptive précédente, des pics de concentrations ont été mis en évidence en dehors du site qui pourraient traduire un impact ponctuel des émissions de la carrière du fait de conditions d'expositions particulières. Par ailleurs, sur site, des pics fréquents en PM10 et plus rares en PM2.5, ont été observés.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer l'origine de ces pics observés :

- Hors site, pour vérifier si ponctuellement, un impact des émissions de la carrière est possible ;
- Sur le site, pour déterminer les activités à l'origine de ces pics.

3.4.5.1. Analyse détaillée HORS SITE

Les cas de figure suivants ont été identifiés précédemment et méritent une analyse complémentaire :

1. Déséquilibre du ratio PM2.5/PM10 sur le point Bouyère par rapport au site de référence Guipry du 26/09 au 30/09/16.
2. Pics ponctuels en PM10 sur le site Chêne sec (06/09, 12/09 et le 19/09).
3. Pics ponctuels en PM2.5 sur le site Bouyère le 25/09 et le 3/10;

Cas 1 : analyse du ratio PM10/PM2.5 du 26/09 au 30/09/16 à Bouyère

Sur cette période du lundi 26/09 au vendredi 30/09 2016, une baisse du ratio PM2.5/PM10 a été observée sur le site Bouyère, non corrélée aux évolutions du site de référence de Guipry

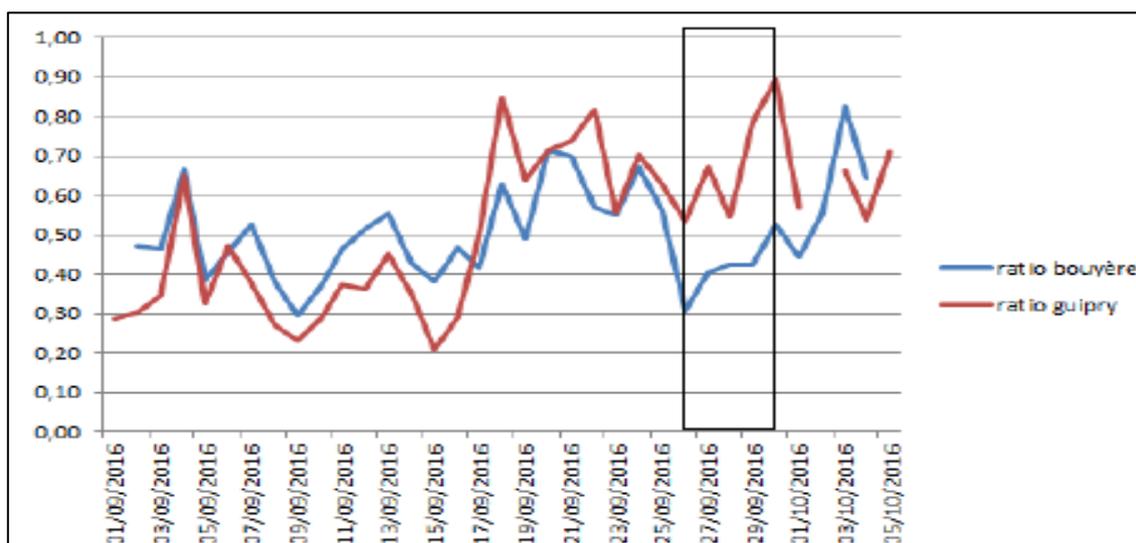


Figure 164 : Evolution des ratios PM2.5/PM10 sur les sites Bouyère et Guipry

L'objectif de l'analyse qui suit est d'étudier conjointement les conditions météorologiques (direction du vent) lors de ces journées, les résultats des mesures en carrière et sur le site Bouyère. Les graphiques suivants synthétisent ces données pour ces journées. Une bande colorée a été ajoutée lorsque les conditions de vents sont susceptibles d'entraîner l'exposition du site Bouyère aux envols de la carrière (entre 210 et 260°). Les données de mesures pour les particules sont des valeurs 1/4h.



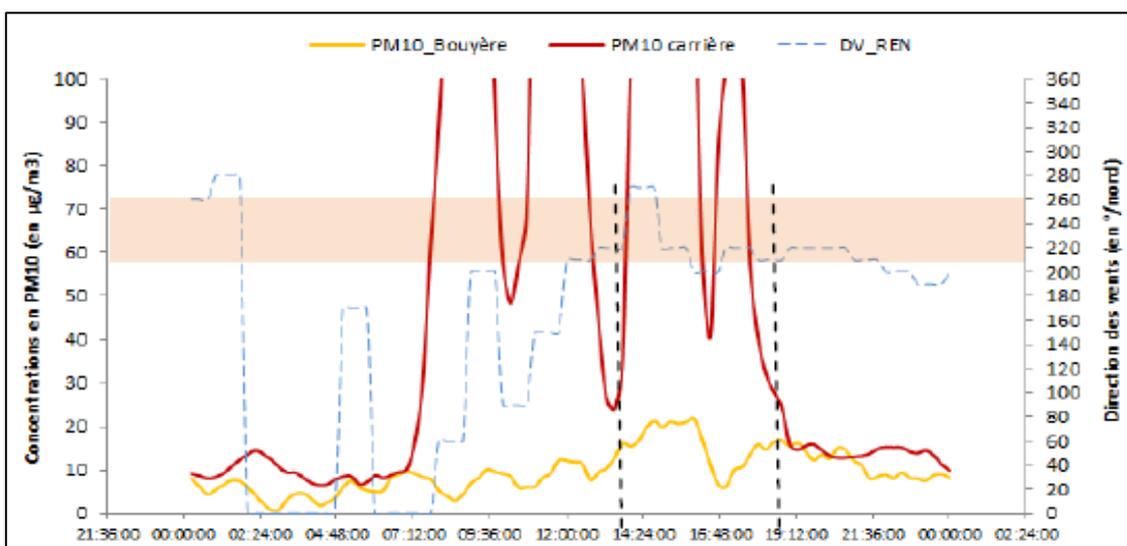


Figure 165 : Episode du lundi 26 septembre 2016

Commentaires :

Sur le site de la carrière, les concentrations oscillent fortement avec deux pics le matin (max 254 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) puis deux l'après-midi (max 213 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Sur le site Bouyère, contrairement aux pics du matin, une légère élévation des niveaux est constatée l'après-midi lorsque les vents sont favorables.

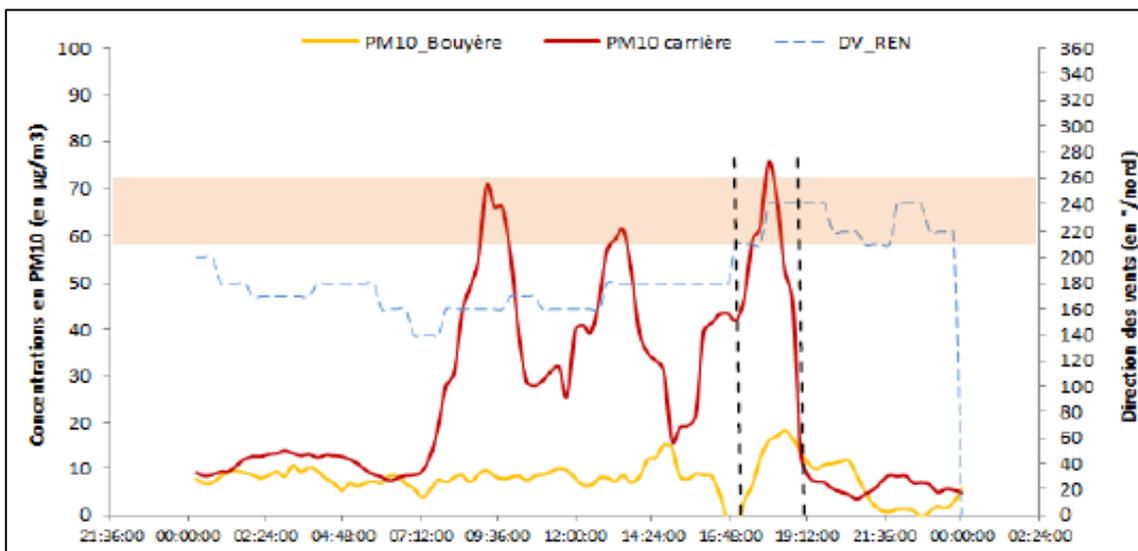


Figure 166 : Episode du mardi 27 septembre 2016

Commentaires :

Les pics sont d'amplitude moins élevée pour cette journée. Celui de l'après-midi, par vent exposant le site Bouyère, entraîne une augmentation des niveaux mesurés sur ce point hors site.



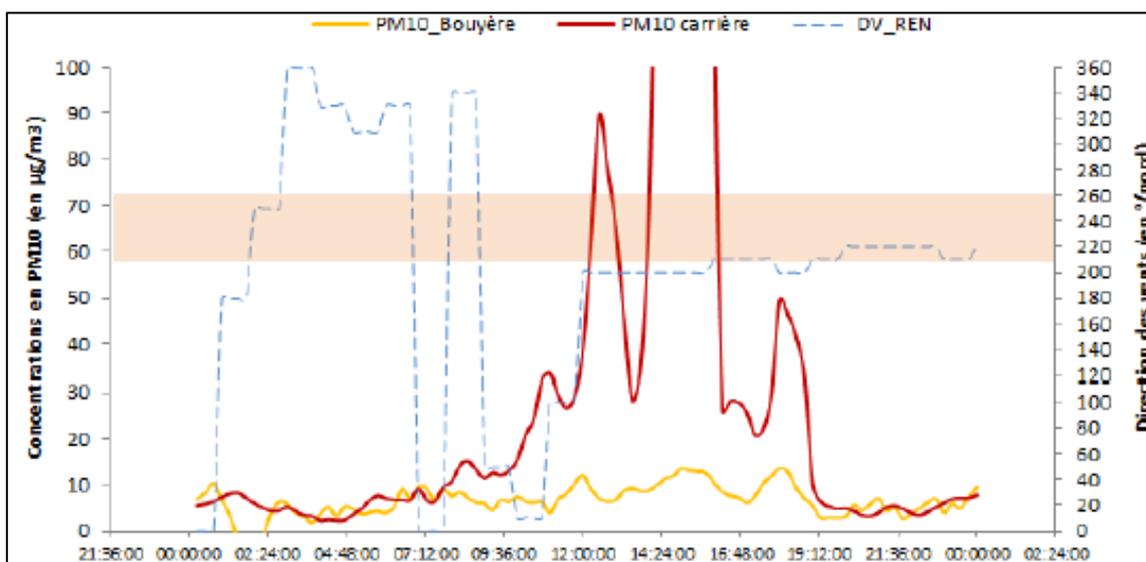


Figure 167 : Episode du mercredi 28 septembre 2016

Commentaires :

Pour cette journée, des pics élevés ont été mesurés sur site durant l'après-midi.

En raison des conditions de vents non favorables, aucune incidence n'a été observée sur le point hors site Bouyère.

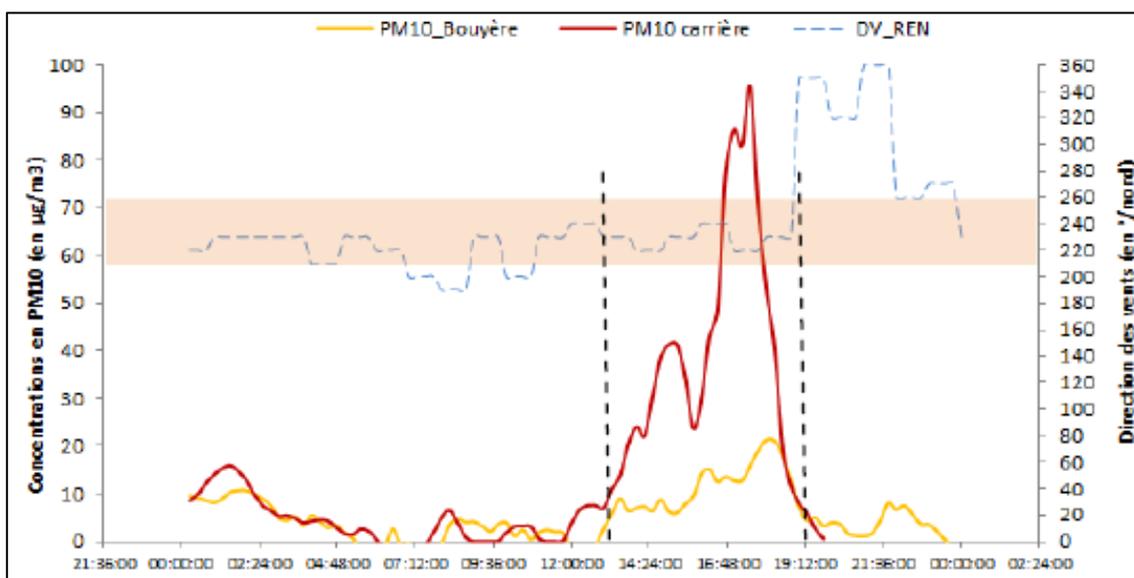


Figure 168 : Episode du jeudi 29 septembre 2016

Commentaires :

Le point Bouyère a été exposé aux vents du site une majeure partie de la journée. L'élévation des teneurs en PM10 a été mesurée sur la carrière dans l'après-midi. Elle est associée à une élévation des niveaux hors site. La baisse des niveaux hors site est corrélée à une baisse des teneurs sur la carrière ainsi qu'à un changement de vents.



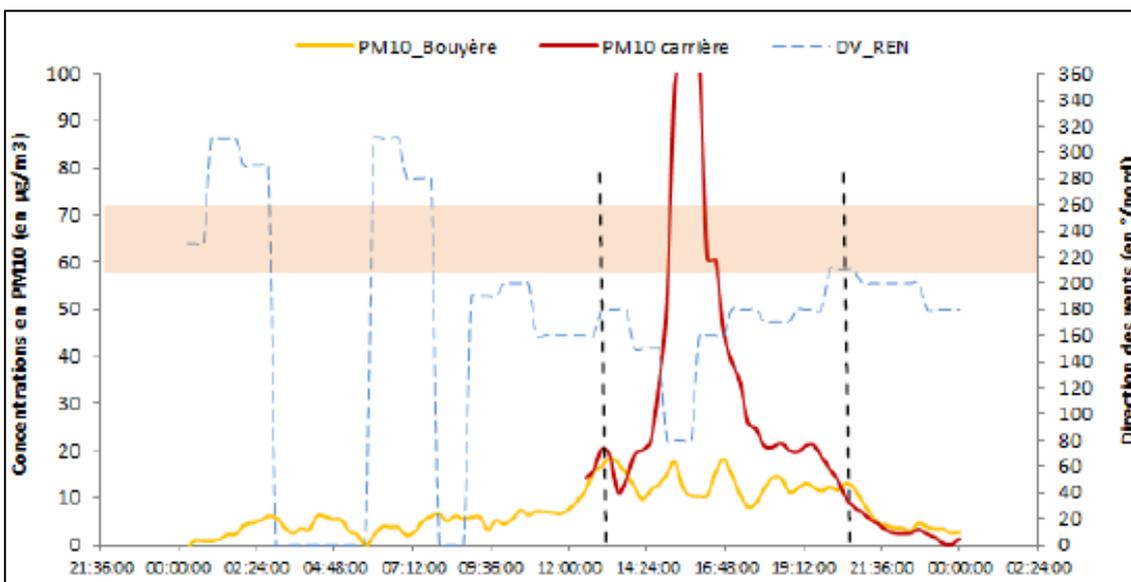


Figure 169 : Episode du vendredi 30 septembre 2016

Commentaires :

Pour cette journée, un pic en carrière a été mesuré l'après-midi. Les conditions de vents n'ont pas été favorables à l'exposition du point Bouyère. Toutefois une légère élévation est constatée avec une diminution associée à une baisse des niveaux également sur la carrière.

Ces cas de figure permettent de constater qu'en situation favorable à l'exposition du site Bouyère aux envols de la carrière, le déséquilibre du ratio PM2.5/PM10 pourrait s'expliquer par un apport en PM10 en provenance de la carrière.

L'impact ponctuel hors site (à une distance de 500 m) des envols de PM10 pendant l'activité de la carrière serait donc possible.

Cas 2 : pics ponctuels en PM10 au Chêne sec

La comparaison des mesures PM2.5 et PM10 sur le site Chêne sec a permis de mettre en évidence un décalage significatif entre les deux moyennes journalières pour les journées du 6/09, 12/09 et 19/09.

La figure ci-après, représentant l'évolution du ratio PMP2,5/PM10, illustre ces propos.

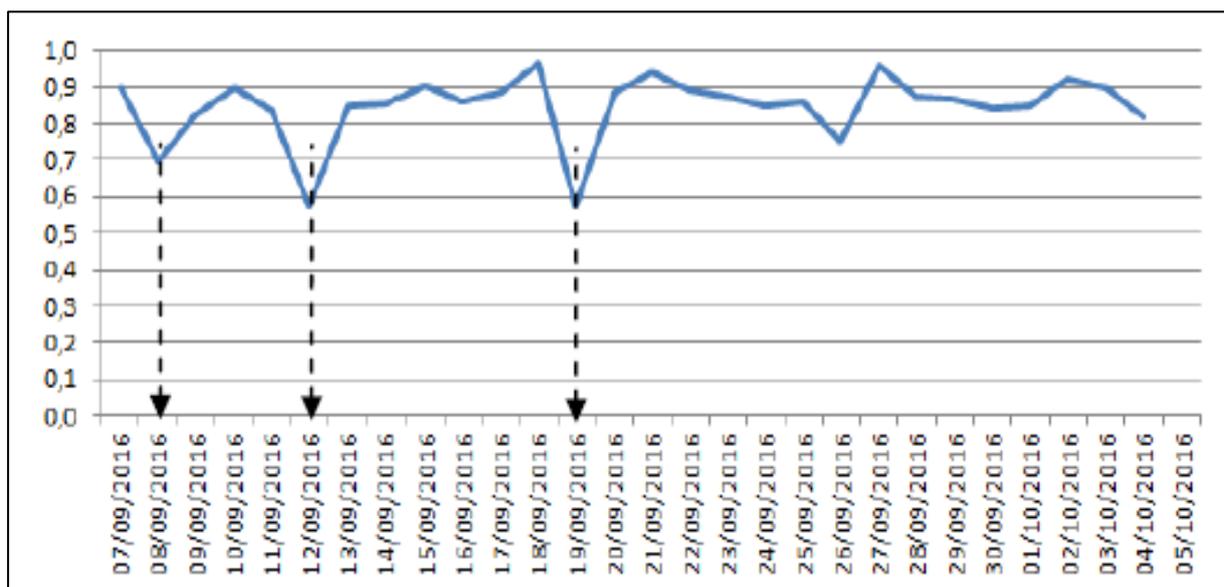


Figure 170 : Evolution des ratios moyens journaliers en PM2.5/PM10 sur le site Chêne sec en période estivale

Pour ces trois journées, les ratios marquent une baisse contrairement aux autres journées.

Une analyse fine de l'évolution des mesures PM10 et PM2.5 sur le site Chêne sec et sur le point carrière ainsi que des conditions météorologiques, est présentée ci-après. Une bande colorée a été ajoutée lorsque les conditions de vent sont susceptibles d'entraîner l'exposition du site Chêne sec aux envols de la carrière (entre 310 et 10°). Les données de mesures pour les particules sont des valeurs horaires (fréquence de mesure sur le point Chêne sec).

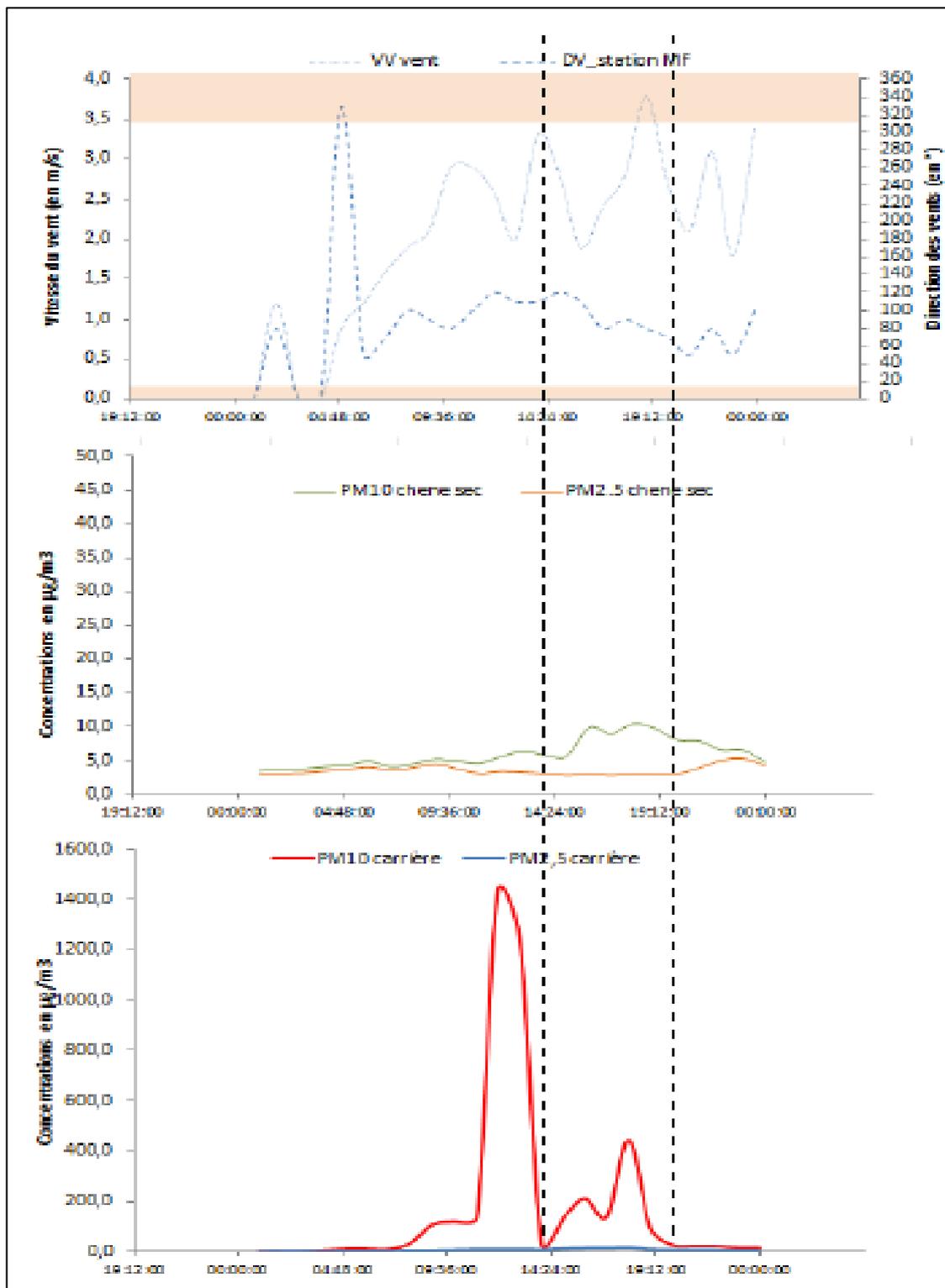


Figure 171 : Episode du 8 septembre 2016

Commentaires de l'épisode du 8 septembre 2016:



Pour cette journée, la diminution du ratio sur le site Chêne sec est liée à une légère augmentation des PM10 entre 14h et 19h. Cette augmentation est corrélée à une hausse des teneurs PM10 au niveau du point carrière. Toutefois, les conditions météorologiques ne sont pas favorables à l'exposition du site chêne sec aux envols de la carrière : les vents durant cette période provenant de l'Est/Sud-Est soit des parcelles agricoles.

La contribution de la carrière dans cette augmentation des niveaux de PM10 sur le site Chêne sec n'est donc pas avérée. En outre, les niveaux restent modérés.

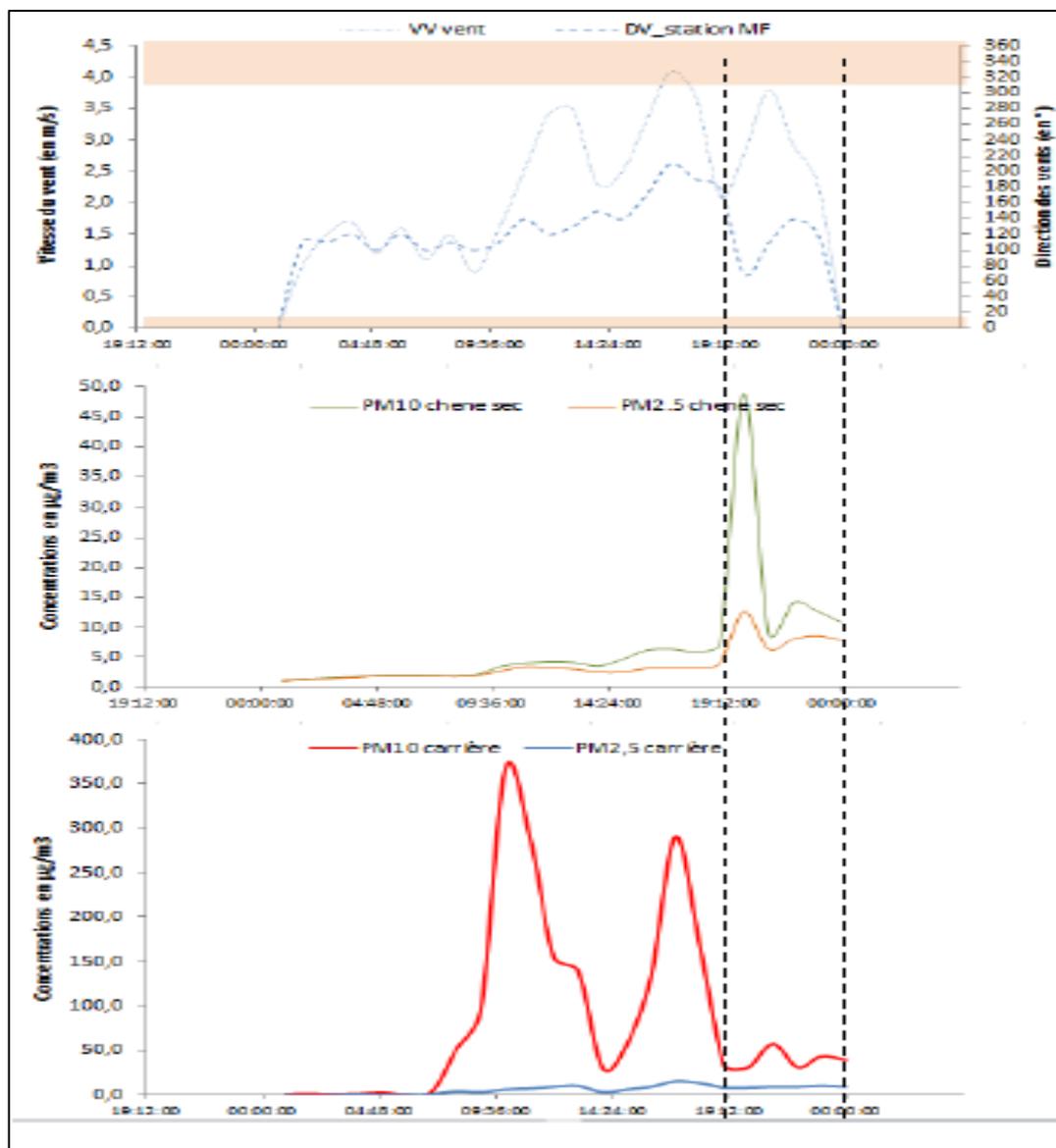


Figure 172 : Episode du 12 septembre 2016

Commentaires :

Un pic ponctuel en PM10 a été mesuré sur le site Chêne sec en soirée (20h). Ce dernier n'est pas corrélé à un pic en carrière du fait d'un arrêt de l'activité à cette période. Les conditions météorologiques ne sont pas favorables à l'exposition du site Chêne sec aux envols de la carrière : les vents durant cette période provenant de l'Est/Sud-Est soit des parcelles agricoles.

La contribution de la carrière pour cette journée n'est pas avérée au regard des conditions météorologiques et des enregistrements en parallèle sur le point carrière.



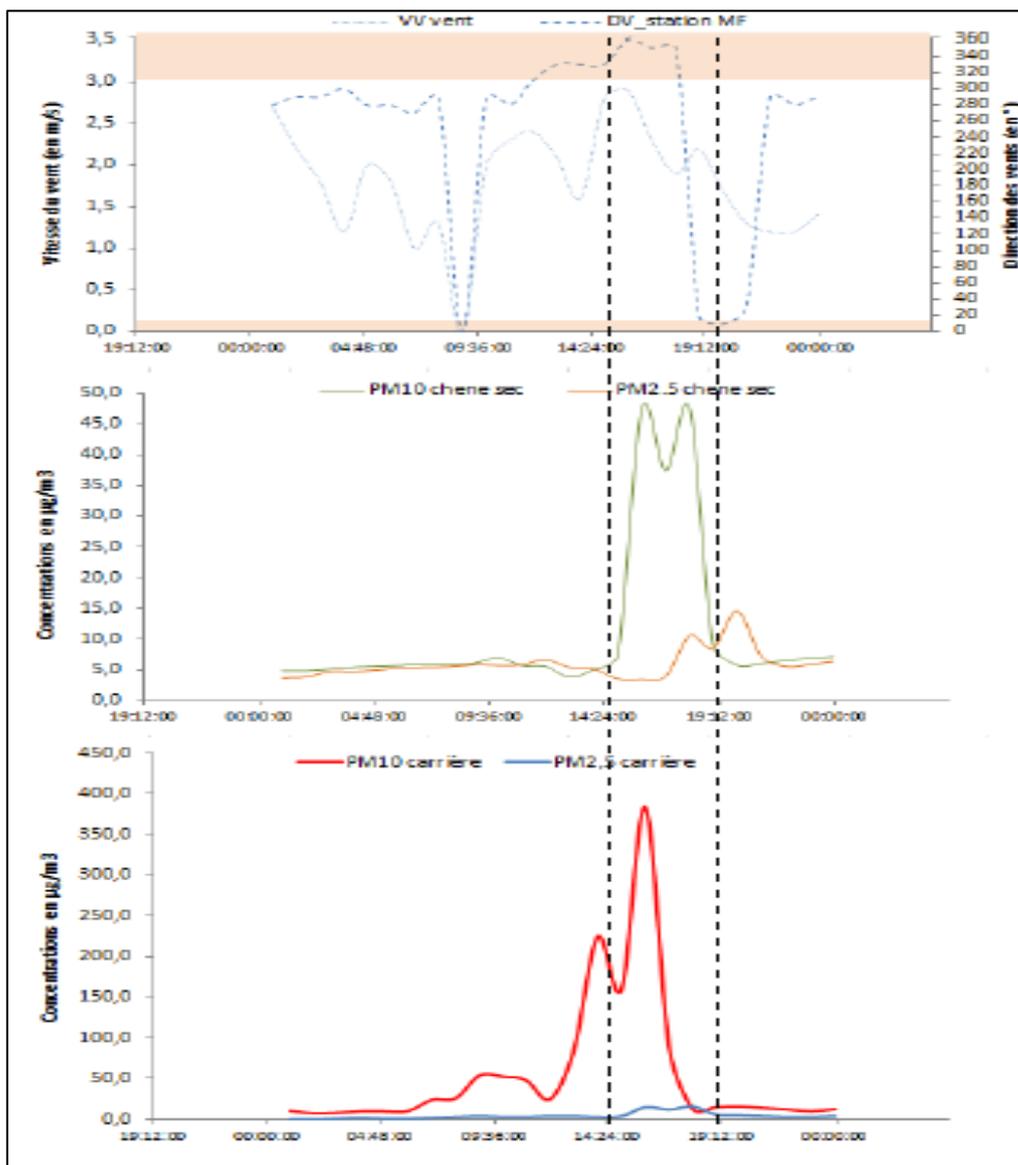


Figure 173 : Episode du lundi 19 septembre 2016

Commentaires :

Lors de cette journée, un pic PM10 a été mesuré sur le site Chêne sec entre 14h et 19h. Cette hausse est associée à un pic ponctuel mesuré simultanément sur le point carrière. Lors de ces pics, le site Chêne sec était exposé aux envols de la carrière puisque les vents provenaient du secteur Nord-Ouest/Nord.

Dans ce cas de figure, la contribution de la carrière sur les mesures PM10 au niveau du point Chêne sec est possible.

Cette analyse de quelques journées présentant des ratios PM2.5/PM10 faibles au regard des autres journées, montre que dans certains cas, la contribution de la carrière est écartée en raison des conditions météorologiques et/ou des mesures en carrière sur la même période.

Dans un autre cas, le pic sur le site Chêne sec est corrélé à un pic en carrière dans des conditions météorologiques où ce point hors site est sous les vents en provenance de la carrière.

L'impact des émissions de la carrière sur le site Chêne sec est donc possible lors de conditions favorables.

Cas 3 : pics ponctuels en PM2.5 à Bouyère le 25/09 et le 3/10

Les particules PM2.5 n'ont pas été jugées comme paramètre caractéristique des émissions de la carrière au regard des niveaux mesurés. Toutefois, quelques pics ponctuels ont été mesurés sur le site Bouyère que nous analysons ci-après pour tenter d'en déterminer l'origine. Deux journées sont concernées à savoir dimanche 25/09 et le lundi 3/10. Le site Bouyère est exposé aux envols de la carrière par vent de Sud-Ouest (zone colorée sur les figures ci-après).

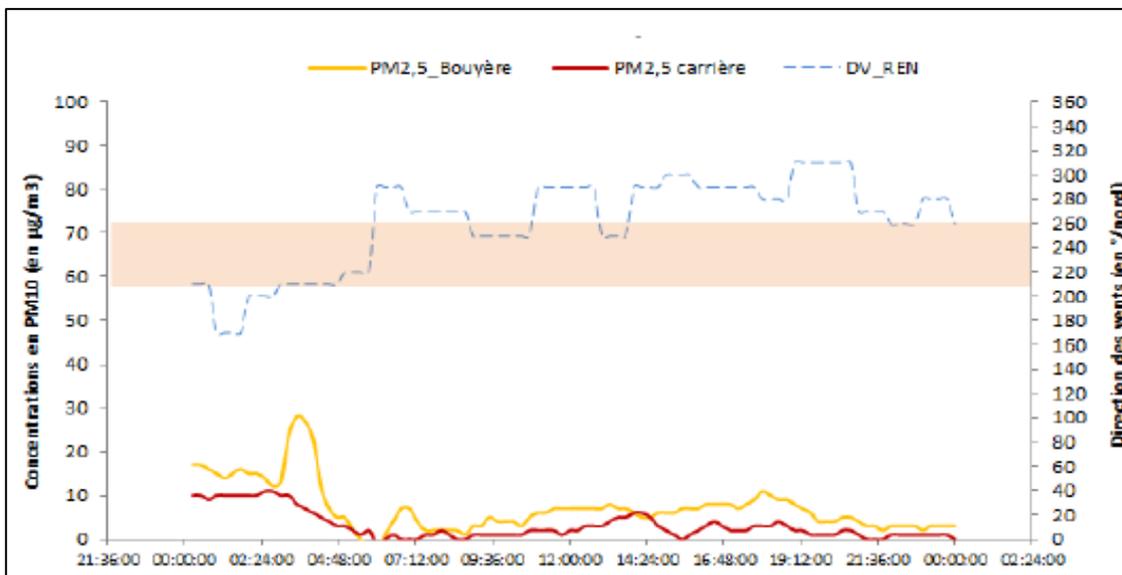


Figure 174 : Episode du dimanche 25 septembre 2016

Commentaires :

Le pic PM2.5 mesuré sur le point Bouyère est intervenu dans la nuit du 24 au 25/09. Malgré une direction de vent favorable à l'exposition du point Bouyère aux envols de la carrière, aucun pic pour ce même paramètre n'est constaté sur le point carrière (pas d'activité le week-end). La participation d'éventuels envols en provenance de la carrière n'est donc pas avérée dans ce cas. Ce pic pourrait être lié à une autre source (combustion ?).

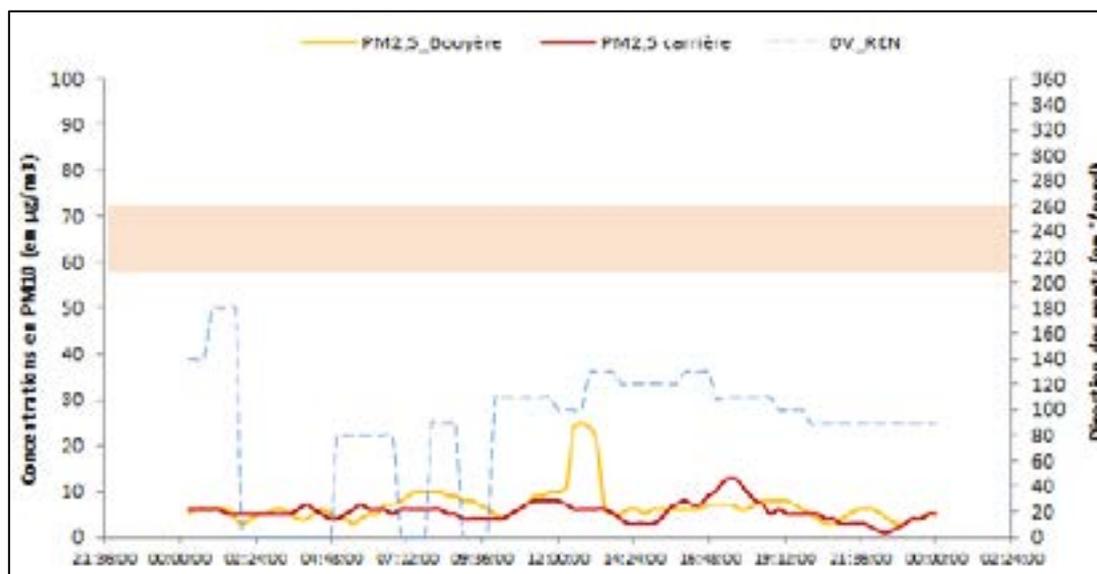


Figure 175 : Episode du lundi 3 octobre 2016

Commentaires :

Le pic PM2.5 a été mesuré le lundi après-midi (à 13h) par vent d'Est (hors influence de la carrière). Ce pic n'est pas associé à une élévation des niveaux en carrière.



Bien que les particules PM2.5 n'aient pas été considérées comme paramètre traceur de l'activité sur la carrière, quelques pics ont été observés dans des niveaux toutefois modérés.

Une analyse fine des conditions lors de ces pics a été réalisée dans le présent paragraphe qui a permis d'écarter la contribution de la carrière. D'autres sources sont possibles comme le brûlage de déchets, les barbecues, etc.

Synthèse impact ponctuel hors site

L'analyse détaillée de quelques conditions particulières révèle que les émissions de PM10 en période d'activité de la carrière peuvent entraîner une augmentation simultanée des niveaux mesurés hors site (Bouyère et Chêne sec situés à environ 500 m de la carrière) lorsque les conditions de vents sont favorables. Pour les PM2.5, les seuls pics (d'ampleur modérée) constatés à Bouyère ne sont pas liés à l'activité de la carrière.

3.4.5.2. Analyse détaillée sur site

L'objectif de cette partie est de déterminer les sources majoritaires de particules PM10 au niveau de la carrière sur la base des mesures réalisées sur site. Pour ce faire, différentes approches ont été suivies à savoir :

- La corrélation des données 1/4h en PM10 avec les observations vidéo au niveau du point de mesure de la carrière ;
- La corrélation des données journalières en PM10 avec quelques indicateurs d'activités.

Corrélation des niveaux en PM10 avec les observations vidéo :

Le traitement des données d'observations vidéo représente un travail important. Par conséquent, le visionnage de la totalité de l'enregistrement n'a pu être réalisé. Deux journées présentant des pics significatifs et une absence de précipitations ont été retenue pour ce travail : le mardi 6/09/16 et le lundi 23/01/17.

Analyse du 06/09/16

Pour cette journée du mardi 6 septembre 2016, l'augmentation des concentrations en PM10 correspond au début de l'activité sur la carrière passant d'un bruit de fond avant 7h d'environ 10 µg/m³ à un niveau de l'ordre de 140 µg/m³ à 9h. Une diminution des niveaux est observable entre 9h et 10h qui pourrait correspondre aux passages successifs de la tonne à eau au niveau des voies de circulation. L'impact a toutefois été de courte durée. Un pic très important a été enregistré à partir de 11:15. Le graphique permet de visualiser l'ampleur de ce pic.



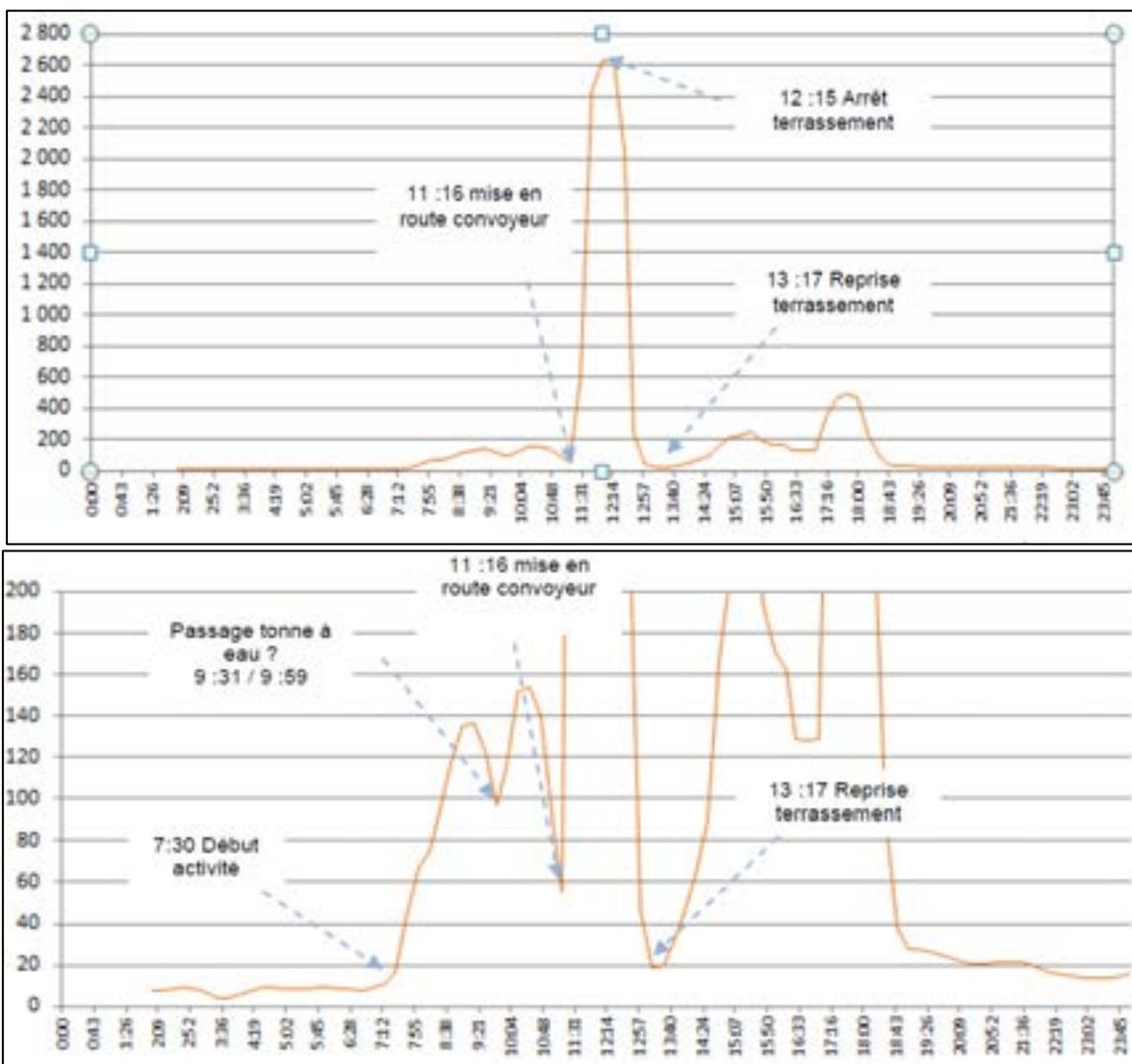


Figure 176 : Evolution des concentrations en PM10 au niveau du point carrière (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) -6 septembre 2016 (deux représentations d'échelle des concentrations pour détailler les événements)

Au vu des données d'activités, ce pic enregistré en fin de matinée pourrait être lié à une combinaison d'activités comme le terrassement exercé à proximité, le passage d'engins sur les voies de circulation proche et le fonctionnement du convoyeur. Une nouvelle augmentation des concentrations semble être corrélée à la reprise du terrassement exercée à proximité.

heure locale	PM10 (en µg/m3)	Activité
6/9/16 7:30	16,1	Début activité
6/9/16 7:45	44,3	
6/9/16 8:00	66,6	
6/9/16 8:15	75,2	
6/9/16 8:30	96,6	
6/9/16 8:45	116,3	
6/9/16 9:00	134,7	
6/9/16 9:15	136,4	9:07 arrivée tonne à eau 2 passages engins à prox.
6/9/16 9:30	123,0	1 passage engins à prox
6/9/16 9:45	96,9	9:31 passage tonne à eau voie principale 2 passages engins à prox
6/9/16 10:00	114,9	9:59 passage tonne à eau voie prox station 3 passages engins à prox
6/9/16 10:15	151,5	1 passage engins à prox
6/9/16 10:30	154,2	3 passages engins à prox
6/9/16 10:45	140,2	
6/9/16 11:00	90,4	
6/9/16 11:15	54,9	11:07 Début terrassement 2 passages engins à prox
6/9/16 11:30	603,0	11:16 - 11:18 fonctionnement convoyeur 1 passage engin à prox
6/9/16 11:45	2438,6	11:29 - 11:32 fonctionnement convoyeur
6/9/16 12:00	2623,9	1 passage engins à prox
6/9/16 12:15	2639,4	12:13 arrêt terrassement
6/9/16 12:30	2046,6	
6/9/16 12:45	239,6	
6/9/16 13:00	46,5	
6/9/16 13:15	19,1	
6/9/16 13:30	19,6	13:17 Reprise terrassement 1 passage engin à prox 13:29- 13:30 fonctionnement convoyeur

Tableau 49 : Relevé des données d'activités (selon observations vidéo) avec les concentrations en PM10



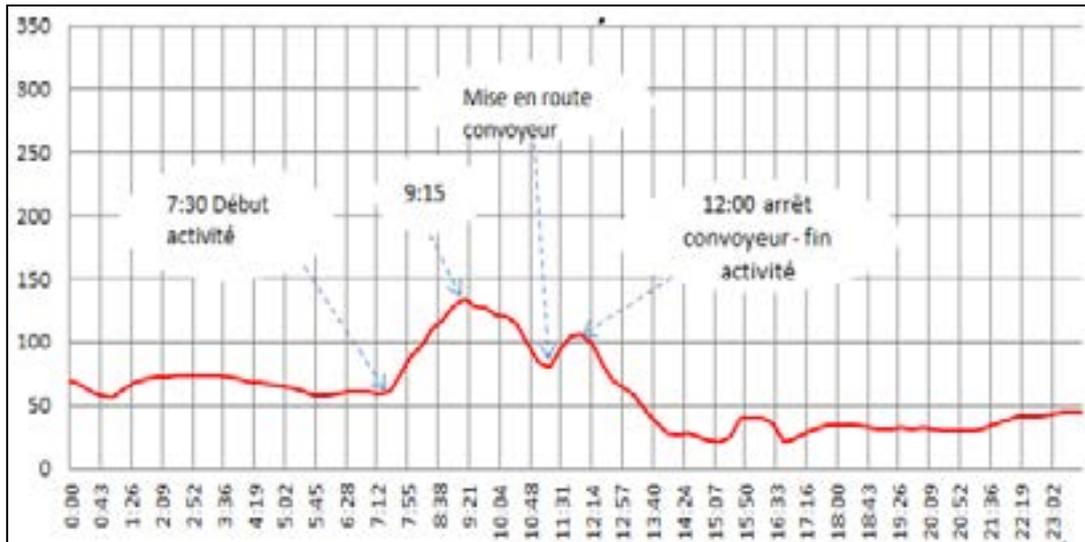


Figure 177 : Evolution des concentrations en PM10 au niveau du point carrière (en µg/m3)

Heure locale	PM10 (µg/m3)	Activités selon observation webcam
23/01/2017 07:30	60,5	Début activité
23/01/2017 07:45	74,3	3 passages engins à prox + 1 chargement export produits finis
23/01/2017 08:00	88,9	2 passages engins à prox + 1 chargement export produits finis
23/01/2017 08:15	95,5	
23/01/2017 08:30	110,6	4 passages engins à prox + 1 déchargement installation vers stocks + 1 chargement export produits finis
23/01/2017 08:45	116,4	5 passages engins à prox + 2 déchargements installation vers stocks
23/01/2017 09:00	128	9 passages engins à prox
23/01/2017 09:15	134,5	6 passages engins à prox + 1 déchargement installation vers stocks
23/01/2017 09:30	129,1	09:17 fin de l'export des graves non traitées, 3 passages engins à prox
23/01/2017 09:45	127,3	3 passages engins à prox + 2 déchargements installation vers stocks
23/01/2017 10:00	120,8	7 passages engins à prox + 1 chargement export produits finis + 1 déchargement installation vers stocks
23/01/2017 10:15	119,3	6 passages engins à prox + 1 export des graves non traitées + 1 déchargement installation vers stocks
23/01/2017 10:30	113,4	5 passages engins à prox
23/01/2017 10:45	97,9	
23/01/2017 11:00	84,8	
23/01/2017 11:15	79,8	
23/01/2017 11:30	93,5	11:13-11:29: fonctionnement du convoyeur, 6 passages engins à prox + 2 déchargement installation vers stocks
23/01/2017 11:45	104,4	6 passages engins à prox + 1 déchargement installation vers stocks + 1 chargement export des graves non traitées
23/01/2017 12:00	106,2	11:46-12:06: fonctionnement du convoyeur, 1 chargement export produits finis + 1 passages engins à prox
23/01/2017 12:15	99,3	
23/01/2017 12:30	80,6	
23/01/2017 12:45	69,4	
23/01/2017 13:00	63,6	
23/01/2017 13:15	57,7	
23/01/2017 13:30	46,2	

Tableau 50 : Comparaison des données d'activités (selon observations vidéo) avec les concentrations en PM10

Pour cette journée du 23/01/17 en période hivernale, les niveaux mesurés en PM10 sont nettement moins élevés que la journée précédemment analysée et le niveau de fond plus élevé en raison de

l'épisode de pollution régionale, malgré cela, les niveaux mesurés en PM10 sont de nouveau bien corrélés aux observations vidéo :

- augmentation des niveaux au lancement de l'activité à 7:30 : chargement d'engins, circulation, etc.)
- baisse des niveaux (9:15) qui pourrait correspondre à la fin des opérations de chargement de granulats ;
- mise en route du convoyeur qui a entraîné une hausse des niveaux en PM10 en fin de matinée.

En synthèse, l'analyse de ces deux journées a permis d'identifier certaines activités émettrices de particules PM10 et exercées à proximité du point de mesure.

Il s'agit notamment :

- des passages d'engins à proximité liés aux transferts entre le front de taille et les installations et des installations vers la zone de stockage de produits finis ;
- des opérations de chargements/déchargements de matériaux sur la plateforme de produits finis ;
- de la mise en route du convoyeur : d'après nos observations et les informations communiquées par l'exploitant, les émissions de particules au niveau de cette installation sont importantes au lancement de l'installation car l'humidification des matériaux intervient parfois quelques minutes après sa mise en route.
- les opérations de terrassement.

La dissociation des activités est complexe car elles interviennent de manière simultanée. Cette analyse permet de confirmer l'origine des particules sur l'emprise du site mais reste limitée aux activités exercées à proximité immédiate du point de mesure. Pour cette raison, une analyse complémentaire est réalisée ci-après sur la base d'indicateurs d'activités et des données de mesures journalières.

Corrélation des niveaux journaliers en PM10 avec les indicateurs d'activités :

Durant les campagnes de mesures, l'exploitant a renseigné un journal d'activités. Après échanges avec ce dernier et nos observations détaillées sur deux journées (chapitre précédent), les activités suivantes ont été identifiées comme les plus émettrices de particules :

1. Roulage des engins sur les pistes
 - Roulage des dumpers du front de taille vers les installations
 - Roulage des dumpers des installations vers la plateforme de stockage de produits finis
 - Roulage des engins vers la plateforme de stockage des stériles
2. Fonctionnement du convoyeur – stockage graves non traités
3. Export de produits finis

L'objectif de ce chapitre est de corréliser ces activités (sous la forme d'indicateurs) avec les données de mesures PM10 à l'échelle de la journée. Cette analyse est réalisée successivement pour chacun des indicateurs sur la campagne 1 en raison de nombreux pics observés, de l'absence de précipitation et d'épisode de pollution régionale.

Indicateur 1 : roulage sur piste

Le graphique suivant présente l'évolution des concentrations journalières en PM10 mesurées sur le point carrière en fonction de la distance parcourue par les engins sur les pistes.



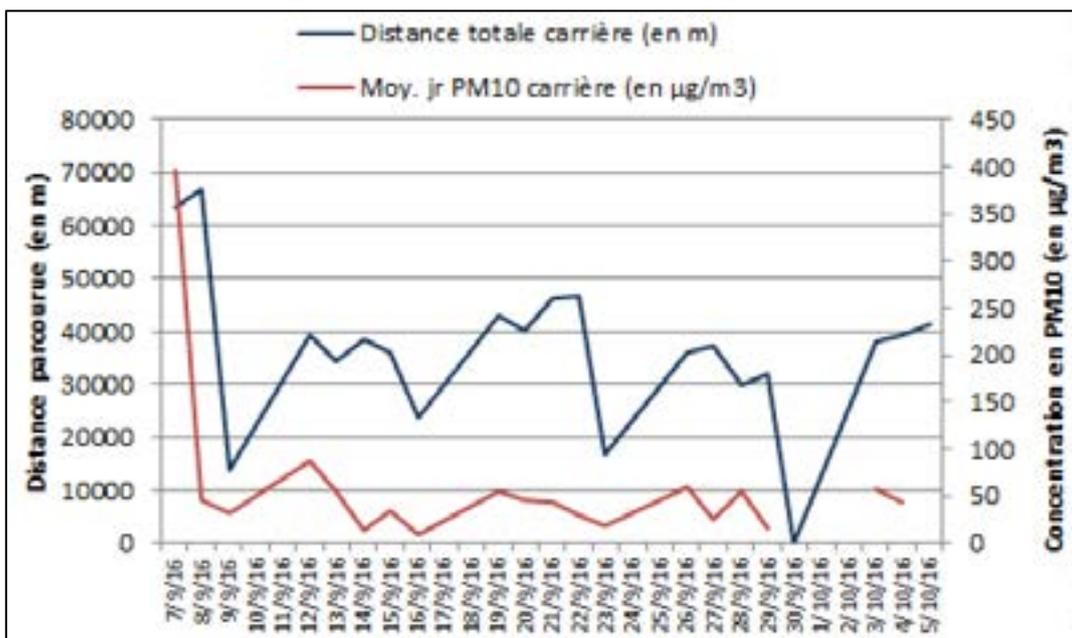


Figure 178 : Comparaison des distances parcourues par les engins par jour et des concentrations moyennes journalières en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Les cumuls journaliers des distances parcourues sont assez bien corrélés aux moyennes journalières en PM10. La plus forte concentration a été mesurée lors d'une journée présentant également une distance parcourue par les engins la plus importante. Notons qu'en début de campagne, lors de ces journées à fortes concentrations, les trajets vers les stériles représentaient 60 à 100% des distances parcourues contre 20% sur le reste de la période.

Indicateur 2 : fonctionnement du convoyeur

Le graphique ci-après présente l'évolution du tonnage traité par jour par le convoyeur comparé aux mesures PM10.

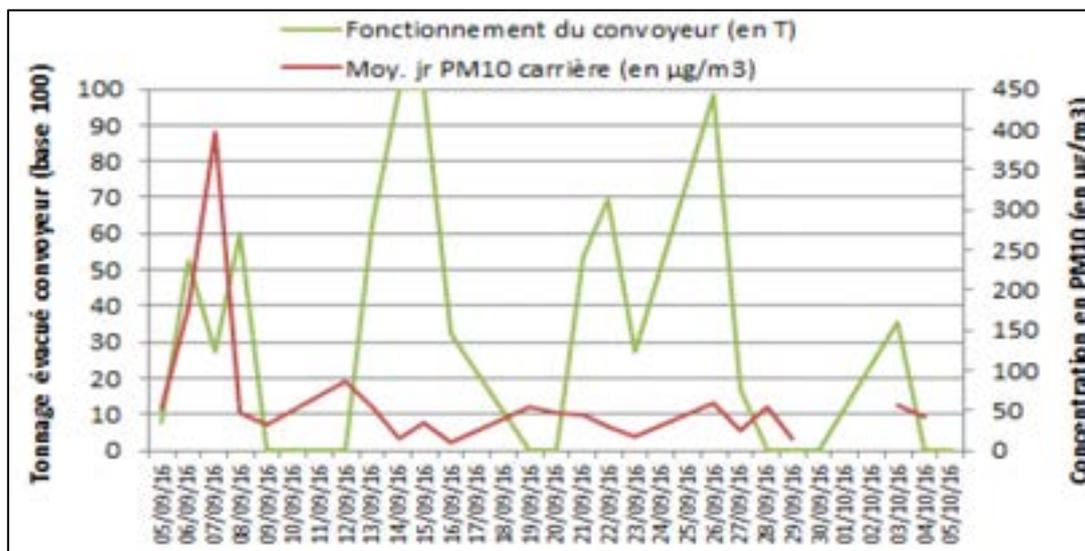


Figure 179 : Comparaison du fonctionnement du convoyeur avec les concentrations en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Les corrélations sont peu significatives pour cet indicateur notamment pour les journées ayant présenté un fonctionnement important du convoyeur (14 et 15/09). Ce constat est lié au fait que les émissions du convoyeur sont plus importantes dans les 1ères minutes après la mise en route de l'installation dans l'attente du démarrage de l'humidification des matériaux. Ces émissions ponctuelles contribuent probablement peu à la hausse de la moyenne journalière.

Indicateur 3 : export de produits finis

Le graphique ci-après présente les tonnages de produits finis chargés sur la plateforme, comparés aux mesures PM10.

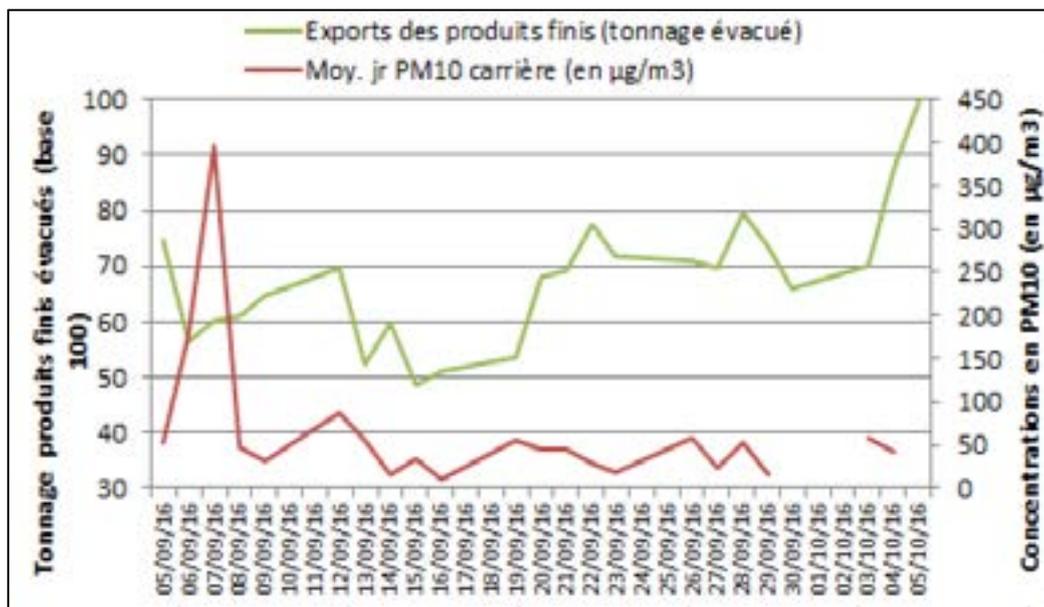


Figure 180 : Comparaison des opérations de chargements de produits finis avec les concentrations en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

La corrélation de niveaux de PM10 avec cet indicateur est peu significative ce qui peut s'expliquer notamment par l'éloignement de la plateforme de stockage de produits finis par rapport au point de mesure.

En **synthèse** de cette comparaison des données de mesures PM10 au niveau de la carrière avec trois indicateurs d'activités identifiés comme sources d'émissions majeures par l'exploitant, **le roulage des pistes** semble être **le mieux corrélé aux mesures**. Trois types de trajet ont été identifiés sur la carrière parmi lesquels les transferts du front vers les installations représentent la majeure partie des distances parcourues (40 à 60% des cumuls journaliers). Une exception toutefois durant la 1ère semaine pour laquelle les transferts des installations vers la zone de stockage des stériles ont été majoritaires. C'est également à cette période que les concentrations moyennes journalières ont été les plus importantes.

Synthèse de l'analyse détaillée sur site

L'objectif de ce chapitre était d'identifier les activités exercées en carrières à l'origine des émissions de particules PM10 mesurées sur le site.

La première approche suivie a permis de confirmer la contribution de certaines activités exercées à proximité du point de mesure comme la mise en route du convoyeur, le passage d'engins à proximité ou encore le chargement/déchargement de matériaux.

La seconde approche, basée sur la comparaison d'indicateurs d'activités avec les niveaux mesurés, a permis de mettre en évidence une corrélation significative des distances parcourues par les engins sur les pistes avec les concentrations moyennes journalières en PM10.

3.4.6. Analyse chimique BRETAGNE

Dans cette section, les résultats d'analyse des échantillons des roches extraites en carrière et des jauges OWEN (dépôts) seront présentés tout d'abord. Puis nous procéderons à une analyse métrologique des résultats d'analyse dans laquelle nous vérifierons la cohérence de la méthodologie de calcul des PM. L'interprétation des analyses chimiques se focalisera d'abord sur les fractions réglementées PM2.5 et PM10 et nous verrons dans ces fractions l'importance des poussières crustales à la fois en champ proche et en carrière. Ensuite, nous focaliserons notre attention sur la fraction « poussières crustales » ; nous évaluerons dans un premier temps les espèces chimiques majeures émises par la carrière à partir de la méthode dite des « facteurs d'enrichissement » ; nous tenterons d'évaluer la distribution granulométrique PM2.5/PM10 des émissions des carrières. Finalement, nous reprendrons ici la méthode de Lenschow pour estimer la part des émissions de carrière en champ proche.

3.4.6.1. Composition chimique des roches (prélèvements carrière) et dépôts (Jauges OWEN)

Échantillons de roches (prélèvements carrière) : l'analyse chimique de ce type de prélèvement doit nous aider à identifier les éléments chimiques susceptibles d'être émis par les activités d'extraction. Ils sont présentés ci-dessous pour le site carrière.

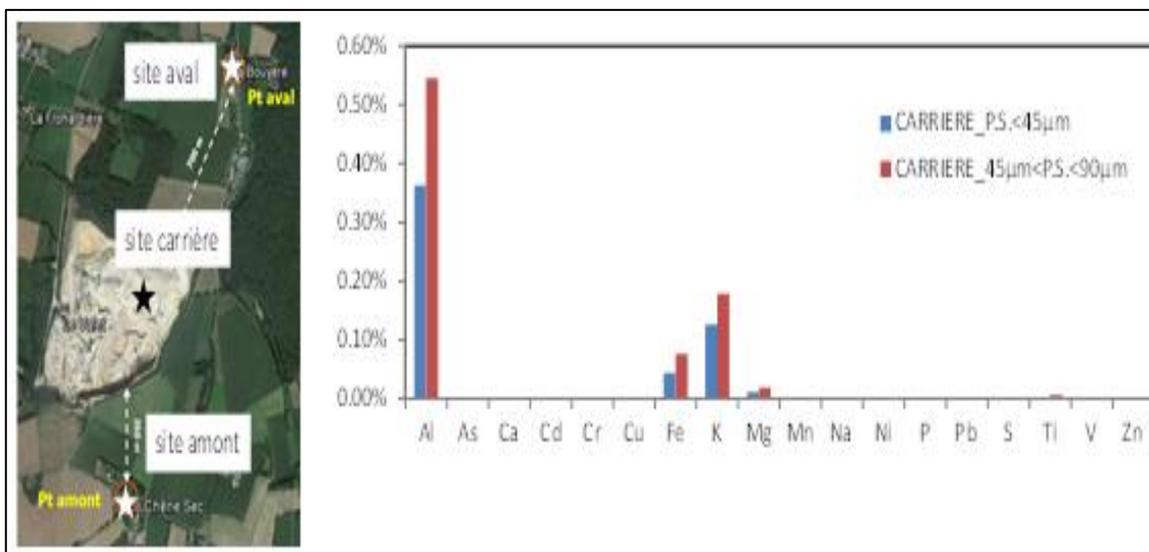


Figure 181 : Pourcentage massique de la composition en métaux trace des 2 échantillons de roche prélevés en carrière.

Comme attendu pour le type de roche exploitée, les 4 éléments dominants détectés dans les échantillons de sol sont (par ordre d'abondance) 1) Al, 2) K, 3) Fe, 4) Mg

Site carrière	Rapport
K/Al	0.35
Fe/Al	0.12
Mg/Al	0.03

Tableau 51 : Rapports caractéristiques entre les différents éléments pour le site carrière

Jauges OWEN : l'analyse de la composition élémentaire des matières collectées par les jauges OWEN sur l'ensemble de la première campagne (Sept.-Oct. 2016) est rapportée dans la figure ci-dessous. **La signature chimique des retombées sèches/humides en champs proche et en carrière est très différente.** La signature chimique en carrière est, comme attendu à partir des analyses chimiques de roche, enrichie en Al et K qui sont les éléments chimiques dominant des roches analysées par ICP-MS (pour mémoire Si n'est pas analysé ici car les prélèvements aérosols sont réalisés sur filtre quartz).

Afin de vérifier la spécificité (empreinte chimique caractéristique) de la carrière, nous avons réalisé sur ces échantillons de Jauge Owen un calcul de facteur d'enrichissement comme réalisé précédemment sur les autres campagnes EMCAIR. On remarque que Al et K se retrouvent avec des facteurs d'enrichissement bien supérieurs à 1 qui définissent clairement la carrière comme émettrice de ces éléments. A l'exception du Vanadium, aucune autre espèce chimique analysée par ICP-MS n'est suffisamment discriminante pour être utilisée par la suite comme « traceur » des émissions carrière.



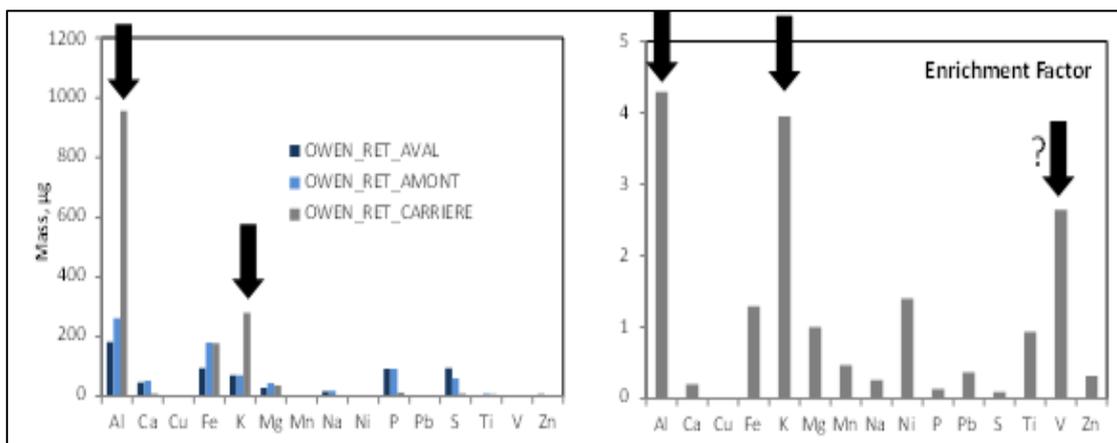


Figure 182 : (Gauche) Composition élémentaire des dépôts mesurés par les jauges OWEN sur les 3 sites d'étude (aval, amont, carrière) et facteurs d'enrichissement (EF) des dépôts en carrière par rapport aux sites de fond (aval, amont)

Même si nous avons des teneurs enrichies en Al et K qui nous permettent de travailler sur ces composés pour « tracer » les émissions de la carrière, nous avons tenté de voir s'il était possible de discriminer ces émissions à partir de rapports élémentaires caractéristiques. Pour cela, nous avons mis en relation des rapports caractéristiques (K/Al, Fe/Al, Mg/Al) des échantillons de roche et des jauges Owen (Tableau ci-dessous) :

	K/Al	Fe/Al	Mg/Al
Site rural aval	0,39	0,53	0,16
Site rural amont	0,27	0,69	0,17
Site Carrière	0,29	0,19	0,04
Echantillon Carrière	0,35	0,12	0,03

Tableau 52 : Rapports élémentaires obtenus sur les jauges Owen et comparaison avec les échantillons carrière.

Comme attendu ces rapports élémentaires sont comparables entre les prélèvements de roche et les jauges Owen, ce qui montre la bonne représentativité des Jauges Owen pour tracer les dépôts de la carrière. Même si les éléments K et Al ont été identifiés comme traceurs des émissions des carrières, leur rapport (K/Al) n'est lui pas discriminant. En revanche, les rapports Fe/Al et Mg/Al sont eux très caractéristiques des émissions de carrière et pourront être éventuellement utilisés par la suite comme tels.

3.4.6.2. Contrôle métrologique des résultats d'analyse aérosol

Bilan d'analyse : le bilan des analyses chimiques (été + hiver) est présenté dans le tableau ci-dessous. Seuls les filtres PM10 PARTISOL et PM2.5 DEKATI permettent de reconstruire la masse des PM suivant l'équation E1 (§3.1.5). En raison de leur dépôt hétérogène d'aérosols, les filtres DEKATI PM2.5-10 et TSP n'ont été analysés qu'en métaux.

L'ensemble des préleveurs a fonctionné correctement sur les campagnes ETE (Sept/Oct 2016) et HIVER (Jan/Fév. 2017) à l'exceptions de :

- Non fonctionnement des PARTISOL CARRIERE + AVAL sur semaine 1
- Fonctionnement partiel du PARTISOL AMONT UM2 sur semaine 2 (60%)

Aucun problème n'est à relever sur l'analyse chimique ; 100% des filtres reçus ont été analysés. A savoir un total de 58 analyses ioniques, 58 analyses de carbone, et 129 analyses de métaux. Nous avons décidé d'écarter l'échantillon semaine 4 PARTISOL PM10 du site aval car les concentrations détectées présentaient des valeurs très faibles (non réalistes en comparaison des données des autres sites. Les données de métaux semaine 4 PARTISOL PM10 du site carrière ne sont pas non disponibles (problème d'analyse).

	Filtres PM ₁₀ (PARTISO L)	Filtres PM _{2.5} (DEKATI)	Filtres PM _{2.5-10} (DEKATI)	Filtres TSP (DEKATI)	Jauges OWEN	Roches
Carrière	I,C,M,S	I,C,M	M	M	M	M
Aval	I,C,M,S	I,C,M	M	M	M	
Amont	I,C,M,S	I,C,M	M	M	M	
Nombre échantillon s analysés	I = 28 C = 28 M = 28 S = 15	I=30 C = 30 M = 30	M =30	M = 30	M = 3	M = 2

Tableau 53 : Tableau récapitulatif des prélèvements et analyses chimiques réalisées sur les campagnes ETE et HIVER.

NB : I = Ions, C= carbone (EC, OC), M = Métaux, S=sucres. Le nombre d'échantillons intègrent les analyses de blanc de terrain. Les cellules grisées correspondent au site « CARRIERE ». Les cellules hachurées correspondent aux sites en « champ proche » (AVAL, AMONT).

Neutralité ionique : La balance ionique permet de vérifier la neutralité de la solution d'aérosol et de confirmer la qualité des mesures anions/cations. Elle est réalisée quand on obtient une pente de 1 entre d'un côté les anions (Cl, NO₃, SO₄) et de l'autre les cations (Na, NH₄, K, Mg, Ca).

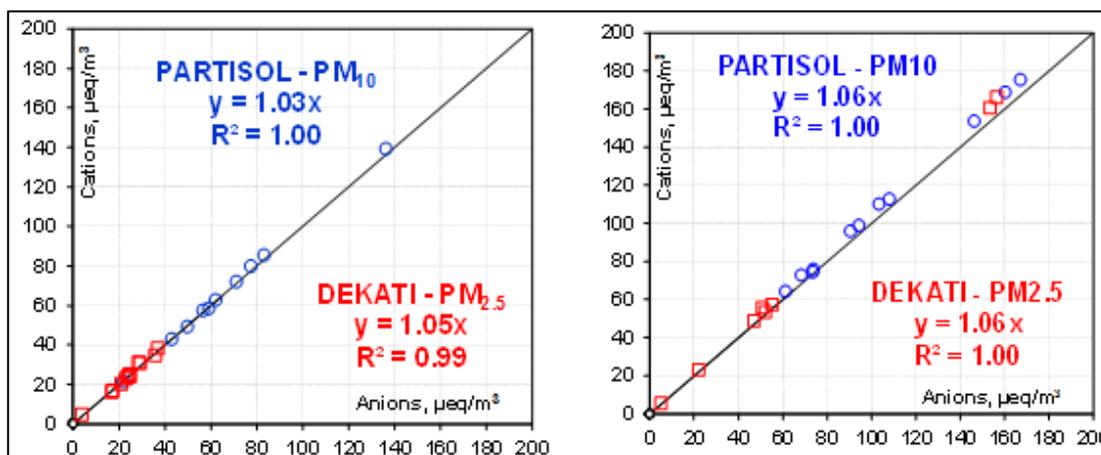


Figure 183 : Balance ionique en rouge pour les prélèvements PM_{2.5} (DEKATI) et en bleu pour les prélèvements PM₁₀ (PARTISOL). (Gauche = ETE ; Droite – HIVER)

Cohérence des mesures ioniques inter-sites : L'analyse des échantillons en carrière (roches, jauges Owen) nous a permis de montrer que les espèces dominantes (Al, K, Fe, Mg) émises par les activités d'extraction. Nous avons souhaité vérifier la cohérence de ces résultats avec l'analyse des éléments ioniques présents sur les différents sites. Nous présentons à ce titre une comparaison intersite des ions sur les 2 sites d'étude (figure ci-dessous).



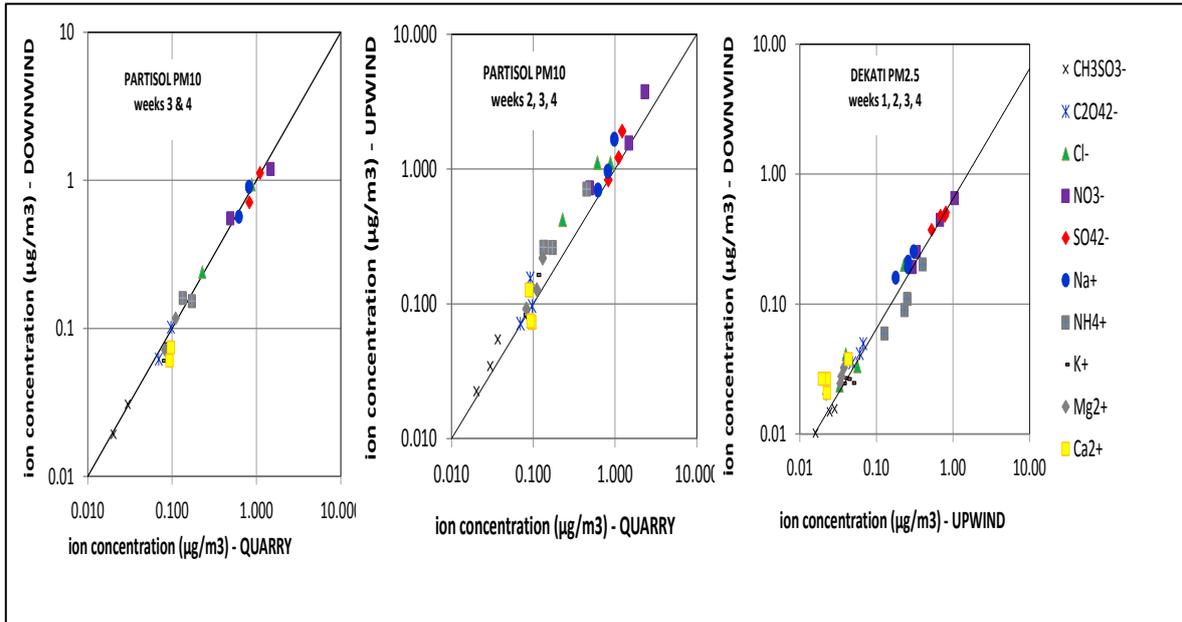


Figure 184 : Intercomparaison des concentrations en espèces ioniques (anions, cations) sur les 3 sites- carrière (QUARRY), aval (DOWNWIND), amont (UPWIND) pour la campagne été 2017.

La très bonne cohérence de l'ensemble de ces jeux de données montre d'une part la bonne qualité des mesures ioniques mais aussi l'absence de traceurs spécifiques de la carrière sur ces espèces ioniques.

Cohérence des mesures inter-sites de la composition en éléments trace : Le même travail de comparaison inter-sites a été réalisé sur les espèces élémentaires (non solubles) analysées par ICP-MS.

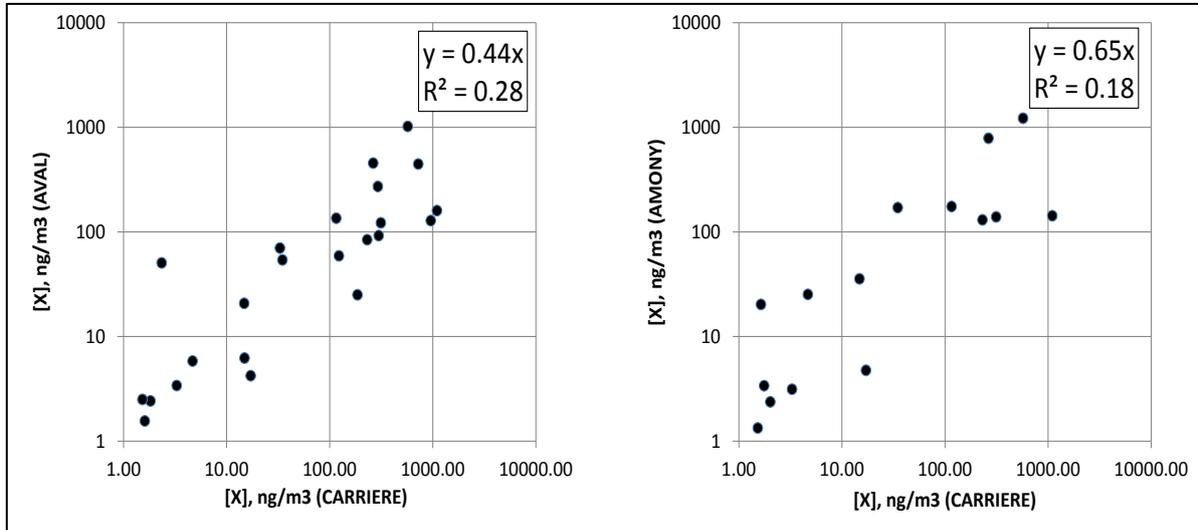


Figure 185 : Intercomparaison des concentrations en espèces élémentaires entre les 2 sites de fond (campagne été 2017).



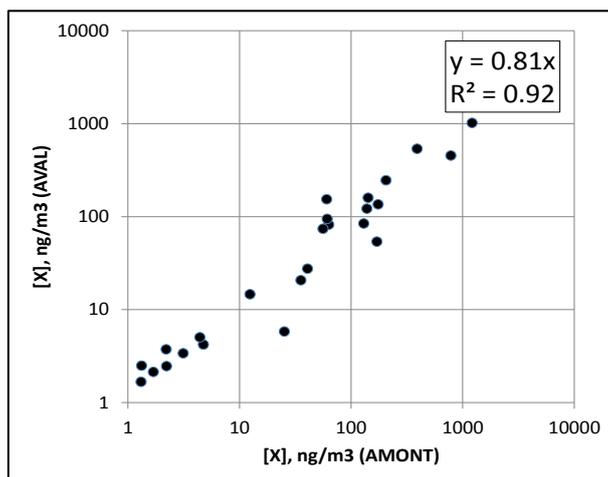


Figure 186 : Intercomparaison des concentrations en espèces élémentaires (Pb, As, Cu, Cd, Ni, Hg, Cr, Zn, Al, Co, Fe, Mn, V) entre le site CARRIERE et les 2 sites de fond (campagne été 2017).

L'absence de corrélation (0.18 et 0.28) des espèces élémentaires entre la carrière et les sites de fond montre que la variabilité des concentrations de ces espèces est déconnectée entre ces sites ce qui suggère des émissions de carrière qui ne se retrouvent pas en site de fond. A l'inverse la corrélation (0.92) obtenue entre les 2 sites de fond montre qu'ils sont connectés entre eux (par la variabilité atmosphérique du fond régional) et donc, l'un comme l'autre, peu influencés par les émissions des carrières.

3.4.6.3. Composition chimique moyenne de la fraction PM2.5

Note sur la composition chimique des granulats extraits sur la carrière :

Nous reprenons ici pour le calcul de la composition chimique de la fraction PM2.5 les hypothèses précédentes. Pour le calcul de la concentration massique des poussières émises par la carrière H, en l'absence d'informations précises sur grès-quartzite (roche exploité) nous avons conservé les données gneiss (carrière E) assez proche au plan de la géochimie. Rappelons les éléments chimiques contenus dans le gneiss : SiO₂ à 69.68%, Al₂O₃ à 14.58%, Fe₂O₃ à 4.26%, MgO à 1.63%, CaO à 1.61%, Na₂O à 3.25%, K₂O à 2.93%. Cette composition typique du gneiss est donc légèrement différente des résultats obtenus sur nos analyses de roche comme le présente le tableau ci-dessous :

	K/Al	Fe/Al	Mg/Al
Gneiss (littérature)	0.31	0.39	0.25
Jauge Owen CARRIERE	0.29	0.19	0.04
Echantillon ROCHE	0.35	0.12	0.03

Tableau 54 : Rapports élémentaires obtenus sur jauge Owen (carrière) et comparaison avec les échantillons roche de carrière et données de littérature

Ces différences s'expliquent par le fait que le grès exploité présente très peu de micas et minéraux ferromagnésiens. Elles vont impacter de seulement quelques % (max 5%) le calcul de la masse totale des PM liées aux poussières des carrières.

En raison de sa richesse dans le grès (et de son caractère « traceur » des émissions de la carrière), nous avons pris ici l'Al pour calculer les concentrations de PM des carrières (e.g. **[PM]dust (carrières) = 25.92 [Al]**). Il est important de noter ici que cette valeur de 25.92 est très proche des valeurs que l'on retrouve dans la littérature pour les poussières crustales (valeur aux alentours de 27). C'est pour cette raison que nous avons choisi ce facteur de 25.92 à la fois pour la carrière mais aussi pour les sites de fond.

Nous présentons dans les figures ci-dessous la composition chimique moyenne des sites « champ proche » (fond rural) et « carrière » pour **la fraction PM2.5**. Les concentrations des différentes espèces chimiques sont calculées suivant la méthodologie décrite en section III.1.

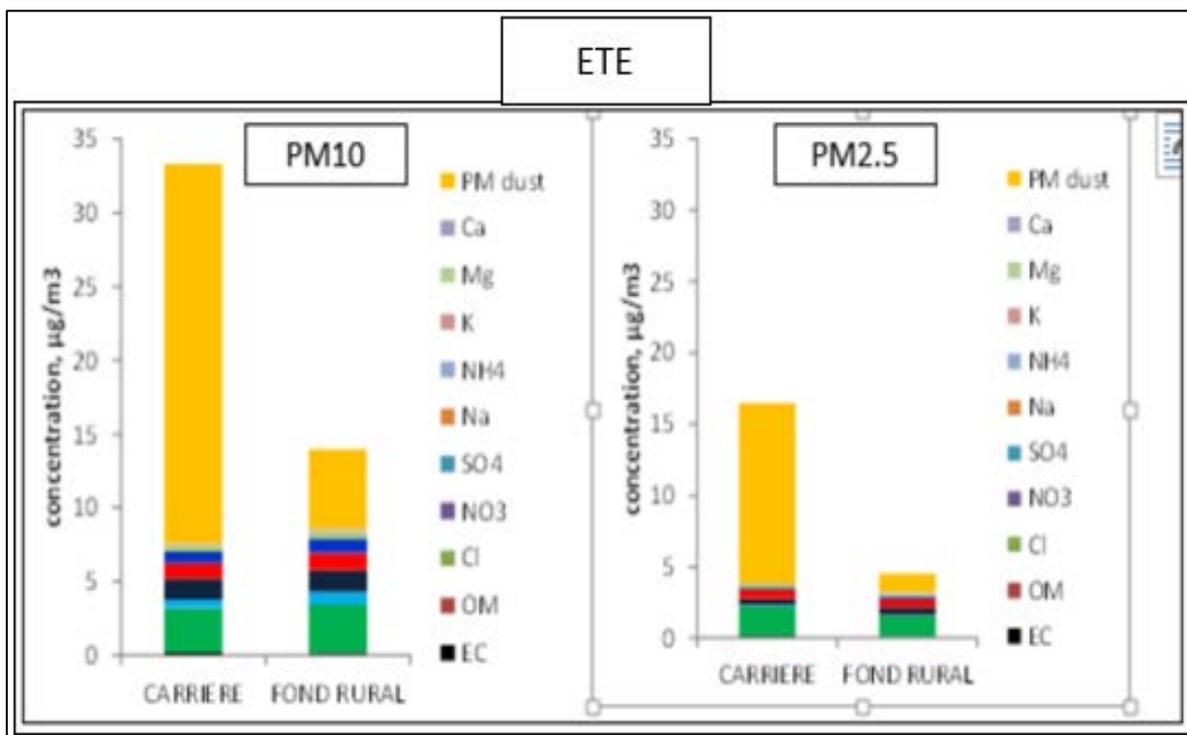


Figure 187 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM10 (**Gauche**) et PM2.5. (**Droite**) en site CARRIERE et en fond rural (stations de fond amont/aval). Campagne ETE

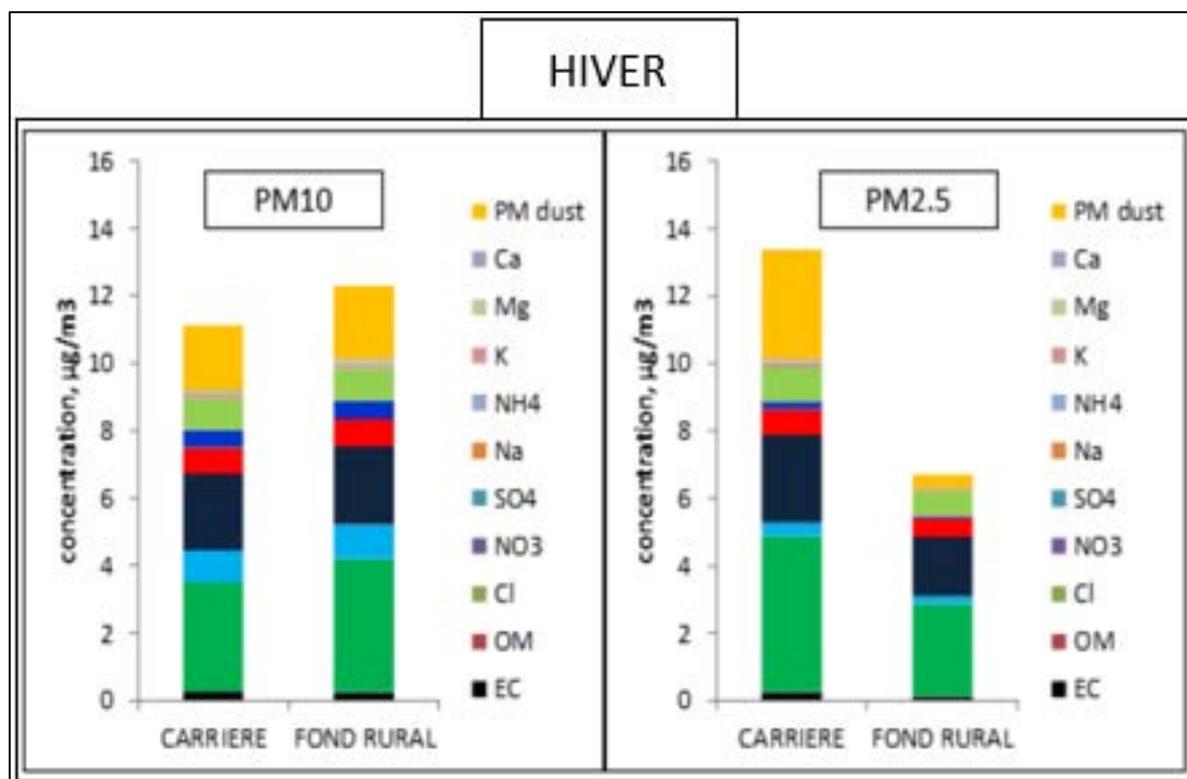


Figure 188 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM10 (**Gauche**) et PM2.5. (**Droite**) en site CARRIERE et en fond rural (stations de fond amont/aval). Campagne HIVER

Si l'on s'intéresse aux espèces chimiques constituant les PM2.5, on remarque que dans **l'ensemble les concentrations en espèces chimiques sont très voisines entre champ proche et carrière**, à l'exception des poussières crustales, plus élevées en carrière. L'homogénéité des concentrations des espèces chimiques est attendue en raison de la nature régionale de l'ensemble de ces composantes chimiques (EC, OM, NO3, SO4, NH4, sels de mer). Voir par exemple (al B. e., 2013) pour la région Ile de France.

Hors concentrations de poussières minérales (notées ici PM_{dust}), on note que les concentrations chimiques des PM_{2.5} et PM₁₀ sont très semblables entre les sites de fond et la carrière, ce qui traduit ici l'absence d'émission atmosphérique autre que les poussières minérales en carrière. Comme attendu, on retrouve davantage de poussières minérales dans les PM₁₀ par rapport au PM_{2.5}. Enfin, on voit ici très clairement l'impact des activités des d'extraction dans la carrière par rapport aux stations de fond (amont/aval).

Le tableau ci-dessous rapporte les concentrations en PM_{2.5} et PM₁₀ ainsi que les poussières minérales (PM_{dust}) dans ces fractions pour les sites carrières/champ proche et pour les deux campagnes, sachant que la plus significative en terme d'impact est celle d'été.

ETE	[PM _{2.5}] (µg/m ³)	[PM _{dust}] (µg/m ³) et %PM _{2.5}	ETE	[PM ₁₀] (µg/m ³)	[PM _{dust}] (µg/m ³) et %PM _{2.5}
Champ proche (Amont)	5.3	1.48 (28%)	Champ proche (Amont)	16.3	6.7 (39%)
Champ proche (Aval)	3.3	1.14 (30%)	Champ proche (Aval)	10.4	3.9 (37%)
Carrières	16.5	12.6 (77%)	Carrières	33.3	25.8 (77%)

Tableau 55 : Concentrations PM_{2.5} et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche. Campagne ETE.

HIVER	[PM _{2.5}] (µg/m ³)	[PM _{dust}] (µg/m ³) et %PM _{2.5}	HIVER	[PM ₁₀] (µg/m ³)	[PM _{dust}] (µg/m ³) et %PM _{2.5}
Champ proche (Amont)	10.5	0.49 (5%)	Champ proche (Amont)	20.4	2.21 (11%)
Champ proche (Aval)	10.1	0.47 (5%)	Champ proche (Aval)	16.0	2.11 (13%)
Carrières	21.7	7.3 (34%)	Carrières	16.1	2.88 (18%)

Tableau 57 : Concentrations PM_{2.5} et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche. Campagne HIVER.

Tableau 58 : Concentrations PM₁₀ et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche. Campagne HIVER.

Conclusions Campagne ETE : Les concentrations de PM_{2.5} et de PM₁₀ sont calculées suivant l'équation 1. Ces valeurs de PM_{2.5} et PM₁₀ déterminées chimiquement en champs proche sont proches de celles mesurées par AIR BREIZH à partir des mesures automatiques.

Elles sont respectivement pour les PM_{2.5}, de 5.3 et 3.3 µg/m³ pour les sites en champ proche, 16.5 µg/m³ pour le site carrière. Elles sont respectivement pour les PM₁₀, de 16.3 et 10.4 µg/m³ pour les sites en champ proche, 33.3 µg/m³ pour le site carrière. On trouve plus de PM_{2.5} et PM₁₀ en carrière qu'en champ proche. A savoir :

+ 12µg/m3 de PM_{2.5} en carrière par rapport au champ proche

+ 19.3µg/m3 de PM₁₀ en carrière par rapport au champ proche

Les valeurs plus élevées de PM_{2.5} et de PM₁₀ en carrière sont attribuables aux activités d'extraction. Elles restent malgré tout bien en dessous des valeurs limites Européennes fixées (25µg/m³ en moyenne annuelle pour le PM_{2.5}; 40µg/m³ en moyenne annuelle pour les

PM10 . Les conditions sèches observées en été (propices à la remise en suspension des poussières dans la carrière) pourraient en partie expliquer ces fortes valeurs observées entre carrière et champ proche.

Si l'on s'intéresse aux espèces chimiques constituant les PM2.5, on remarque que dans l'ensemble **les concentrations en espèces chimiques sont très voisines entre champ proche et carrière, à l'exception des poussières crustales, plus élevées en carrière. Pour les PM2.5**, le poids des poussières est plus important en carrière (77% des PM2.5) par rapport au champ proche (28-30% des PM2.5). **Pour les PM10**, le poids des poussières est plus important en carrière (77% des PM10) par rapport au champ proche (37-39% des PM10).

L'homogénéité des concentrations des espèces chimiques est attendue en raison de la nature régionale de l'ensemble de ces composantes chimiques (EC, OM, NO₃, SO₄, NH₄, sels de mer). Voir par exemple (al B. e., 2013) pour la région Ile de France.

Conclusion campagne HIVER : Les concentrations de PM2.5 et de PM10 sont calculées suivant l'équation 1. Ces valeurs de PM2.5 et PM10 déterminées chimiquement en champs proche sont proches de celles mesurées par AIR BREIZH à partir de mesures automatiques.

Elles sont respectivement pour le PM2.5, de 10.5 et 10.1 µg/m³ pour les sites en champ proche, 21.7 µg/m³ pour le site carrière. Elles sont respectivement pour le PM10, de 20.4 et 16.0 µg/m³ pour les sites en champ proche, 16.1 µg/m³ pour le site carrière. On trouve plus de PM2.5 en carrière qu'en champ proche.

+ 11.5µg/m3 de PM2.5 en carrière par rapport au champ proche

C'est moins évident sur la fraction PM10, sans doute en raison des conditions météo (pluie, vent) qui ne permettent pas de mettre en évidence le poids des émissions de la carrière sur les PM10 en carrière.

Les valeurs plus élevées de PM2.5 en carrière sont attribuables aux activités d'extraction. Elles restent malgré tout bien en dessous des valeurs limites Européennes fixées (25µg/m³ en moyenne annuelle pour le PM2.5 ; 40µg/m³ en moyenne annuelle pour le PM10). Les conditions sèches observées en été (propices à la remise en suspension des poussières dans la carrière) pourraient en partie expliquer ces fortes valeurs observées entre carrière et champ proche.

3.4.6.4. Information Granulométrique des différentes composantes chimiques/ Facteur d'enrichissement lié aux activités d'extraction

Les analyses des roches et des dépôts (Jauges Owen) ont démontré l'importance des émissions de composés traceurs de gneiss (Al, Fe, K, Mg). Pour évaluer si d'autres composés terrigènes ont été co-émis, nous avons évalué les facteurs d'enrichissement (EF = Enrichment Factor) lié aux activités d'extraction pour l'ensemble des éléments trace analysé par ICP-MS.

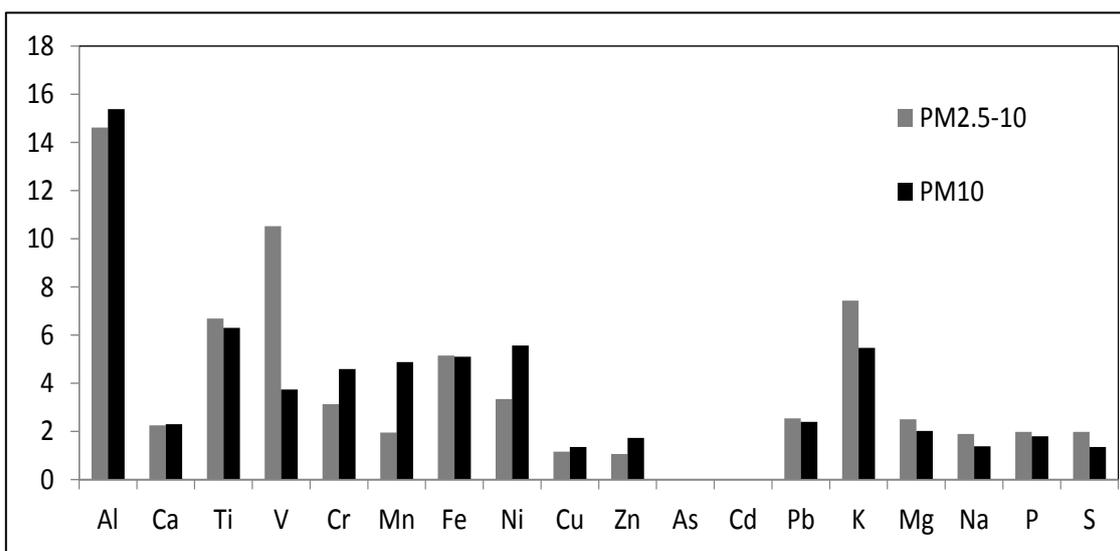


Figure 189 : Facteurs d'Enrichissement en éléments trace en site carrières. Données DEKATI (fractions PM10 et fraction grossières PM2.5-10) – CAMPAGNE ETE



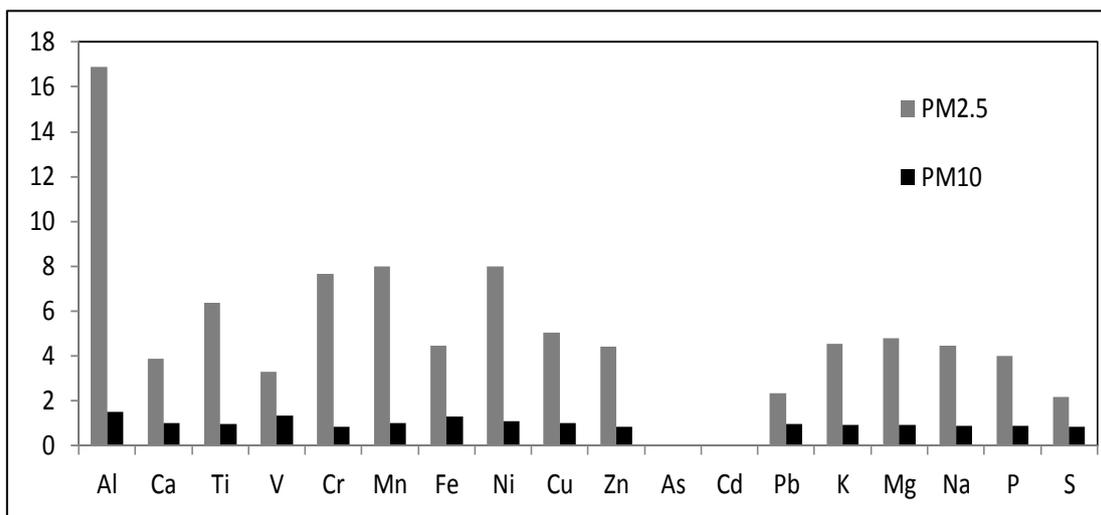


Figure 190 : Facteurs d'Enrichissement en éléments trace en site carrières. Données PARTISOL (fractions PM10) et données DEKATI (fraction PM2.5) – CAMPAGNE HIVER

On retrouve ici un enrichissement très marqué en Al, K que l'on avait observé sur les jauges Owen. La répartition des valeurs entre PM10 et PM2.5-10 est peu différente. On retrouve également des valeurs élevées de Vanadium qui s'expliquent difficilement (le grès n'en contient pas normalement). Ce composé (avec Ni) est traceur de combustion de fuel lourd, mais les engins et machines d'extraction en carrière ne fonctionnent qu'au GNR qui ne comporte pas ces éléments (cf analyses). Les valeurs de EF d'Al (aux alentours de 15) viennent confirmer ici notre choix d'utiliser préférentiellement ce traceur pour marquer les émissions de la carrière.

Les résultats de calcul d'enrichissement (EF) en hiver donnent des résultats proches en **PM2.5** (pour Al). En revanche les données PM10 ne mettent pas en évidence un EF supérieurs à 1. Ceci tient au fait que les concentrations de poussières crustales en carrière sur l'hiver sont particulièrement faibles (proches de stations de fond).

Granulométrie des émissions de carrière

Comme mentionnée en introduction de ce rapport, l'information granulométrique (PM2.5/PM10) des émissions carrière est une donnée très importante dans la contrainte de leur facteur d'émission (inventaires du CITEPA). La figure ci-dessous rapporte la variabilité de ce rapport sur les 4 semaines des campagnes été, sur les sites champ proche/carrière.

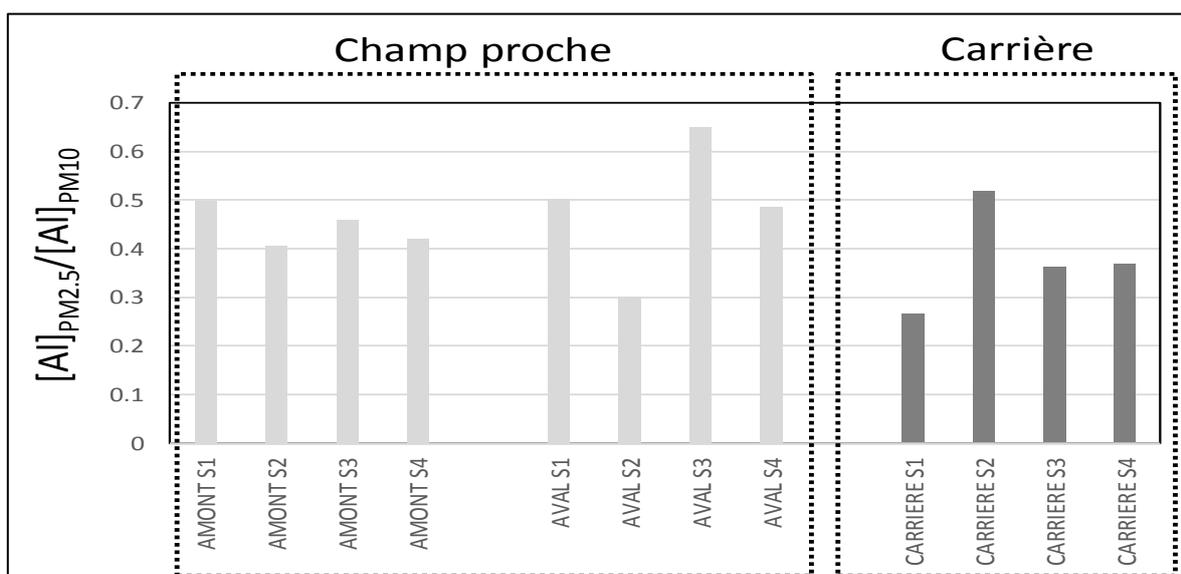


Figure 191 : Rapport de concentration PM2.5/PM10 du calcium en champ proche et carrières sur les 4 semaines des campagnes été



D'une façon générale, ce rapport en moyenne très légèrement inférieur en carrière par rapport au champ proche mais n'apparaît pas très discriminant des émissions de carrière. Ce résultat est en cohérence avec l'étude des rapports PM2.5/PM10 réalisés à partir des mesures en ligne et qui montre qu'en été ce rapport est plus faible en carrière.

Quantification de l'impact des carrières en champ proche

La méthodologie retenue ici pour la quantification de l'impact des carrières en champ proche est celle dite de « Lenschow » (al L. e., 2001) et utilisée précédemment sur EMCAIR (Hauts de France et Pays de la Loire).

Dans le cas qui nous concerne ici, nous ferons **l'hypothèse que le site en champ proche présentant la concentration la plus faible en Aluminium est représentatif du fond régional**. Et donc la concentration en Aluminium sur le 2ème site en champ proche est la somme du fond régional et d'une possible influence de la carrière. Cette hypothèse suppose que le site présentant la concentration la plus faible en Aluminium n'est pas impacté par les carrières. Si cela peut s'avérer être le cas sur une période de quelques heures, cela est moins évident sur une période d'une semaine (comme c'est le cas de nos prélèvements). Cela conduirait à une sous-estimation de l'impact des émissions carrières sur le champ proche. Pour cette raison, nous donnerons une fourchette pour chaque semaine. La valeur minimale (de la contribution de la carrière en champ proche) sera calculée comme décrit ci-dessous. La valeur maximale (de la contribution de la carrière en champ proche) sera calculée en considérant qu'il n'y a pas de source régionale significative d'Aluminium en dehors des émissions de carrière. Ce calcul sera fait pour les fractions PM2.5 et PM10. Une fois calculée la contribution en Al de la carrière sur le champ proche, nous calculerons cette contribution en termes de poussières crustales.

Les figures ci-dessus illustrent les concentrations dans les fractions PM2.5 et PM10 pour les 4 semaines des campagnes été/hiver des sites en champ proche et carrière. Ce sont ces données qui vont être utilisées par la méthodologie de Lenschow décrite précédemment



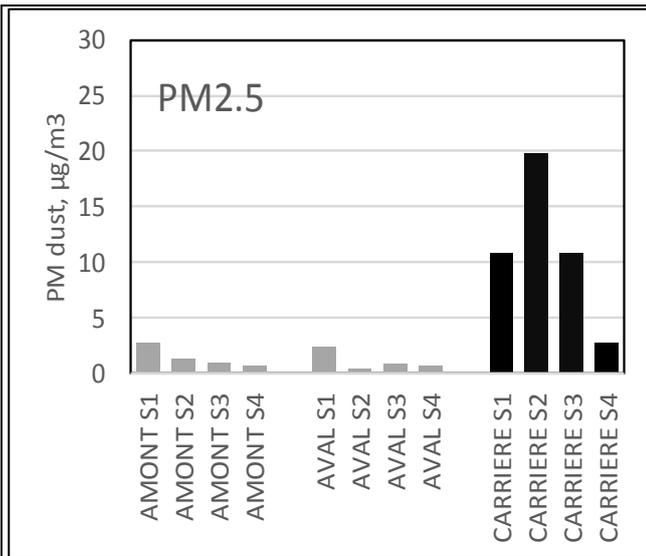


Figure 192 : Variation des concentrations de PM de poussières minérales dans la fraction PM2.5 - CAMPAGNE ETE.

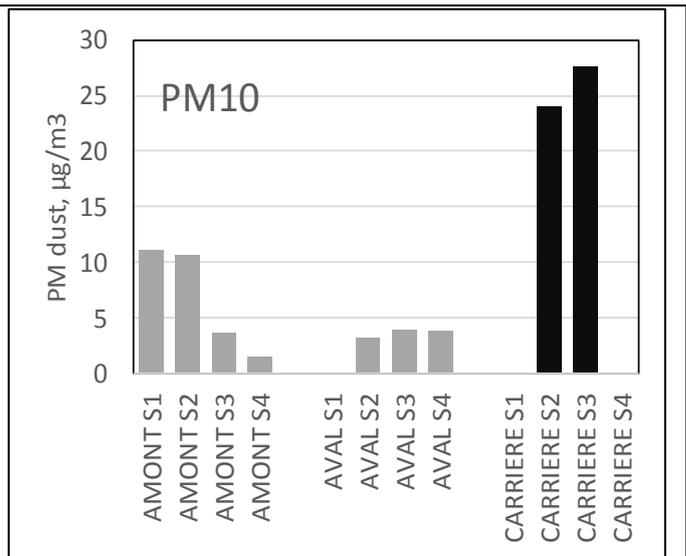


Figure 193 : Variation des concentrations de PM de poussières minérales dans la fraction PM10 - CAMPAGNE ETE.

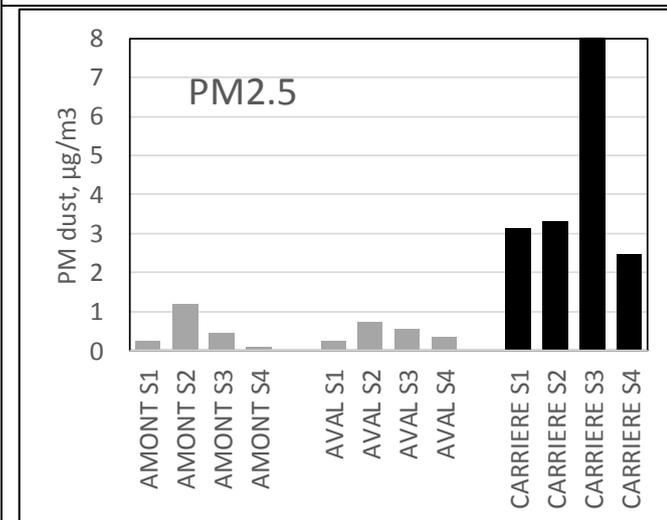


Figure 194 : Variation des concentrations de PM de poussières minérales dans la fraction PM2.5 - CAMPAGNE HIVER.

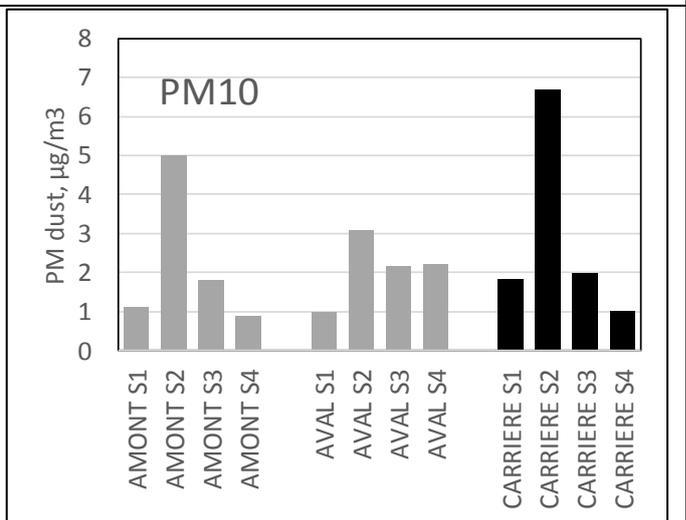


Figure 195 : Variation des concentrations de PM de poussières minérales dans la fraction PM10 - CAMPAGNE HIVER.

Nous présentons ci-dessous, pour chaque semaine, chaque site en champ proche (amont/aval) impactés par les émissions carrières, et chaque campagne (été/hiver), l'apport (minimum/maximum) en µg/m3 des poussières crustales des carrières sur ces sites dans les fractions PM2.5 et PM10, et enfin la contribution en % de cet apport par rapport aux concentrations de PM2.5 et PM10 sur ces sites :

Site en champ proche	Contribution des émissions carrière sur [PM _{2.5}] en champ proche	Contribution des émissions carrière sur [PM ₁₀] en champ proche
----------------------	--	---



	MIN-MAX	MIN-MAX	MIN-MAX	MIN-MAX
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(%)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(%)
AMONT-ETE-S1	0.29-2.75	5-44	-11.15	-57
AMONT-ETE-S2	0.97-1.37	17-24	7.54-10.74	30-43
AMONT-ETE-S3	0.06-0.99	1-21	0.00-3.56	0-33
AMONT-ETE-S4	0.00-0.62	0-15	0.00-1.51	0-15
AVAL-ETE-S1	0.00-2.45	0-48		
AVAL-ETE-S2	0.00-0.40	0-12	0.00-3.20	0-49
AVAL-ETE-S3	0.00-0.93	0-26	0.42-3.98	4-37
AVAL-ETE-S4	0.00-0.62	0-20	2.32-3.83	23-38
AMONT-HIVER-S1	0.00-0.24	0-4	0.11-1.11	1-8
AMONT-HIVER-S2	0.46-1.19	2-5	1.92-5.01	4-12
AMONT-HIVER-S3	0.00-0.45	0-5	0.00-1.82	0-11
AMONT-HIVER-S4	0.00-0.10	0-8	0.00-0.88	0-10
AVAL-HIVER-S1	0.00-0.24	0-4	0.00-1.00	0-9
AVAL-HIVER-S2	0.00-0.73	0-3	0.00-3.09	0-10
AVAL-HIVER-S3	0.11-0.56	1-7	0.33-2.15	3-17
AVAL-HIVER-S4	0.26-0.35	9-12	1.33-2.21	16-26
MOYENNE-ETE	0.17-1.27	3-26	1.71-5.42	9-39
MOYENNE-HIVER	0.10-0.48	1-6	0.46-2.16	3-13

Tableau 59 : Contribution des émissions de la carrière en champs proche. La numérotation des sites est similaire aux précédentes figures. Sx est la xème semaine.

L'analyse détaillée (semaine par semaine) sur chacun des sites (amont/aval) montre ponctuellement une influence marquée des émissions des carrières en champ proche ; c'est le cas par exemple du site amont sur quasiment toute la campagne ETE qui montre des contributions maxima de près 26 et 37% des PM2.5 et PM10, respectivement, dû aux émissions de la carrière. On retrouve ponctuellement ce phénomène sur la campagne HIVER (site aval en semaine 4 ; 16-26% des PM10 dû aux émissions carrière). L'ensemble de ces observations est en cohérence avec les données météorologiques (directions de vent) présentées précédemment dans ce rapport.

En moyenne, on note que

- **L'impact des émissions carrières de [PM2.5] en champ proche reste faible (0.17-1.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en été ; 0.10-0.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en hiver).**



- **L'impact des émissions carrières de [PM10] en champ proche est lui aussi très faible avec malgré des contributions légèrement supérieures (1.71-5.42µg/m³ en été ; 0.46-2.16µg/m³ en hiver).**

Ces résultats montrent finalement que l'impact des émissions carrières reste très limité et ne présente pas de variabilité saisonnière marquée. Leur poids (en %) sur les sites de fond est visible principalement parce que ces sites présentent des concentrations régionales de fond qui sont très faibles.

3.4.7. Conclusions et enseignement en BRETAGNE

En Bretagne, deux campagnes de mesures d'un mois chacune ont été menées - octobre 2016 et janvier 2017 – sur la carrière H (Ille et Vilaine, gisement de grès armoricain -tonnage annuel de 350 000 tonnes).et dans son environnement proche. Elles ont permis de suivre :

- les concentrations et des granulométries des particules émises en périodes mensuelles sur deux saisons contrastées (été/hiver) ;
- les évolutions horaires/journalières afin de caractériser les pics relevés et leurs impacts en champs proches ;
- la composition chimique des particules par classe de taille afin de mieux quantifier l'empreinte de la carrière sur les concentrations de PM en champ proche.

Particularité pour ces deux campagnes en BRETAGNE, les conditions climatiques ont fait que les deux stations localisées en champ proche (450-520 mètres) ont été peu sous l'influence permanente de la carrière. Néanmoins, un certain nombre de constats peuvent être faits en carrière d'une part, puis en champ proche en raisonnant sur les épisodes où la carrière influence ce champ proche.

A signaler, un épisode de pollution en période hivernale où les conditions anticycloniques ont limité la dispersion des polluants (notamment dû au chauffage résidentiel) du fait de vents faibles et d'une couche d'inversion marquée (période du 20 au 2 Janvier 2017).

En carrière :

les poussières sédimentables à l'intérieur de la carrière (proximité d'une mise en stock et d'une piste de circulation des engins) présentent des valeurs élevées, du même ordre que ce qui a pu être rencontré au cours des autres campagnes EMCAIR sur les autres carrières avec une composition chimique qui reflète la nature de la roche exploitée.

les particules PM10 représentent le paramètre traceur de l'activité exercée sur la carrière, contrairement aux particules PM2.5 dont les niveaux restent modérés ; les mesures révèlent des niveaux importants surtout en campagne estivale avec des pics récurrents correspondant en période sèche à chaque jour d'activité. En dehors des périodes d'activité, les niveaux diminuent significativement mais restent supérieurs à ceux mesurés hors site, ce qui pourrait s'expliquer par des épisodes de ré-envols.

L'analyse détaillée a identifié les **postes à l'origine des émissions majoritaires** dans la carrière H du fait de l'implantation de la station ; bien que complexe du fait de la superposition des différentes activités : la mise en stocks des granulats et le roulage des engins sur le pistes sont ici dominants. Des corrélations avec les tonnages transportés en fonction des horaires, apparaissent logiquement, soulignant pour l'exploitant la manière de réduire les émissions, et apportant pour d'éventuels travaux sur les facteurs d'émissions les éléments de cadrage méthodologique.

En champ proche :

- Dans la **fraction PM10**, l'influence de la carrière n'est visible que sur les mesures intégrées de chimie, en été (37 à 39% des PM10) comme hiver (11 à 13%) avec des pointes estivales liées aux envois pouvant donner + 43% sur une semaine.
- Dans la **fraction PM2,5**, l'influence de la carrière n'est également quantifiable que par la mesure chimique : marquée en été (28-30%), faible en hiver (5%) ;
- En « valeurs absolues », les analyses chimiques permettent par la méthode dite de « Lenschow » déjà utilisées au cours des autres campagnes en Hauts de France puis en Pays de la Loire d'apporter des fourchettes de valeurs significatives sur les semaines où la carrière influe :



- En PM10, contributions évoluant en moyenne estivale de 0.71 à 5.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en été à 0.46-2.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en hiver, avec une pointe relevée à 7.54-10.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (semaine 2 de la campagne d'été).
- En PM2,5 contributions plus faibles entre +0.17-1.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne estivale et 0.10-0.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en hiver ; le maximum a été enregistré au cours de la semaine 2 de la campagne d'été avec 0.97 à 1.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

L'analyse des **ratios PM2.5/PM10** permet de mettre en évidence un ratio caractéristique sur le site carrière (de l'ordre de 0.2) dès que la concentration en PM10 dépasse 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ratio qui varie peu entre les semaines et les saisons 'excepté durant l'épisode de pollution (du fait d'apport en PM2.5).

Ces résultats montrent finalement que l'impact des émissions carrières reste très limité et ne présente pas de variabilité saisonnière marquée. Leur poids (en %) sur les sites de fond est visible principalement parce que ces sites présentent des concentrations régionales de fond qui sont très faibles.

3.5. Essais microcapteurs

3.5.1. Cadre et objectif de l'essai

Afin d'identifier de nouveaux outils pratiques permettant aux industriels une meilleure surveillance environnementale de leurs activités, un test de micro-capteurs a été organisé pendant trois campagnes, en rapprochant les résultats de ces nouveaux moyens métrologiques avec ceux obtenus sur les appareils de référence (AASQAs). L'idée était aussi d'utiliser les micro-capteurs comme enregistreurs secondaires à l'intérieur des carrières pour mieux caractériser certaines sources au cours des campagnes. Suite à un premier test réalisé sur une carrière de sable siliceux dans le sud-est de la France l'UNPG a décidé de poursuivre les investigations en sollicitant le groupe TERA et la société BioMonitor pour réaliser ces tests sur carrières par une location d'appareils avec assistance pour suivis et comparaison avec les enregistreurs mis en place par les AASQAs. Nous présenterons ici de manière résumée les résultats du premier réalisé au sein de la carrière B du bassin de Marquise à partir du rapport de la société BioMonitor.

3.5.2. Méthodes et moyens mis en œuvre

L'e-PM est un préleveur automatique à lecture optique permettant une mesure en temps réel de la concentration des poussières en suspension dans l'air ambiant. L'appareil, fabriqué par EcologicSense, est automatique, ce qui permet de réaliser des échantillonnages sur des durées de prélèvement programmables, sans intervention. Dans le cadre de cette étude, un pas de temps de 15 minutes a été programmé.

e-PM	
Gamme d'utilisation (T°C, HR)	-5°C - +50°C 0 - 95% T < 0°C 0 - 70% T < 0°C
Précision (T°C, HR)	± 0.5°C (de 5 à 40°C) ± 3% (de 20 à 80% HR)
Gamme de mesure (PM2.5, PM10)	PM 2.5 (0 - 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) - PM 10 (0 - 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$); Qualité F au-delà
Limite de quantification	PM 2.5 : 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM 10 : 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Incertitude	PM 2.5 : 25% (minimum : 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) PM 10 : 15% (minimum : 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Technologie	Détection par Dispersion de lumière
Communication	Sans-fil Radio fréquence 802.15.4 (IEEE 802.15.4) Portée : jusqu'à 200m en champ libre, extensible avec l'émetteur de signal (Repeat Air)
Energie	Secteur et batterie rechargeable
Périodicité	Ajustable Optimale : 5 min sur secteur
Mémoire interne	3 mois de mesure (avec périodicité de 30 min)
Autonomie sur batterie	1 semaine avec périodicité de 30 minutes
Mise en marche	Par aimant - 10 min lumineux LED
Etalonnage	Annuel - Sable d'ARIZONA
Dimensions boîtier - Poids	16 x 16 x 6 (cm) Boîtier couleur beige - 800 g

Figure 196 : Caractéristiques du préleveur e-PM testé en carrière au cours des campagnes EMCAIR

Le capteur de particules e-PM est utilisé pour mesurer simultanément et en temps réel la concentration des poussières en suspension PM10 et PM2.5. Il fonctionne sur le principe de la diffraction de la lumière. Les particules passent devant un faisceau de lumière infra-rouge et diffractent la lumière sur un angle de 45°C. La quantité de lumière diffractée est proportionnelle à la concentration en particules du milieu. La fiche descriptive du produit est présentée ci-dessus. Les e-PM installés sur le site ont été reliés à des panneaux solaires permettant l'autonomie en énergie des



dispositifs durant la durée des mesures (1 mois). Une transmission des données par GSM est réalisée régulièrement et permet de calculer à distance les données transmises.

3.5.3. Déroulement des mesures

Les e-PM, appareils de mesure à lecture optique ont été installés du **21 mars au 18 avril 2016**, soit sur une durée d'exposition de 28 jours sur l'ensemble des stations. Les jauges radiométriques (MP101/BAM) mises en place par Atmo Nord-Pas de Calais dans le cadre de l'étude EMCAIR ont fonctionné du **07 mars au 18 avril 2016** sur la station en carrière et du **07 mars au 05 avril 2016** pour celle située à l'extérieur de la carrière, à Ferques.

3.5.4. Localisation des stations de mesures

Cinq stations de mesures ont été réparties sur la carrière B. Elles couvrent les différentes zones d'activités de la carrière (exploitation, transport, concassage). La figure ci-après présente leur localisation. La description des aires de prélèvements est présentée ci-après.

Deux stations sont communes avec celles du réseau de la qualité de l'air, la station à l'entrée de la carrière (station 1) et la station située à Ferques (station 5).



Figure 197 : Localisation des micro-capteurs sur la carrière B et en périphérie

Station 1 : Entrée



Le micro-capteur 1 a été installé au sud/est à l'entrée de la carrière à côté du camion laboratoire d'Atmo Nord-Pas-de-Calais.



Figure 198 : microstation 1 aux côtés de station carrière B

Station 2 : Centre

Le micro-capteur 2 est localisé au centre du site au niveau du passage des camions reliant les fronts de taille en exploitation et le concasseur.



Figure 199 : microstation 2 – proximité du concasseur primaire (carrière B)

Station 3 : Rive ouest



Le micro-capteur a été installé à l'ouest de la carrière sur une plateforme de la butte à stériles au-dessus du front de taille principal.



Figure 200 : microstation 3 sur la zone de stockage des stériles - butte Ouest (carrière B)

Station 4 : Rive nord

La microstation 4 a été localisé au Nord-Est de la carrière au-dessus du front de taille principal, de façon à être dans l'axe d'un des vent dominant (SO-NE) avec la station 3.



Figure 201 : micro-capteur 4 limite Nord-Est



Station 5 : Ferques

La microstation 5 a été installée au nord/est de la carrière sur la commune de Ferques à proximité du camion labo d'Atmo Nord-Pas-de-Calais.



Figure 202 : Micro-capturer 5 Ferques – A proximité de la station ATMO Ferques

3.5.5. Conditions d'exposition des stations de mesures

L'AASQAs Atmo Nord-Pas-de-Calais a fourni les données météorologiques recueillies sur la zone d'étude par des stations météo placées sur les camions laboratoires à l'entrée de la carrière et à Ferques.

3.5.6. Comparaison des résultats entre micro-captureurs et stations de référence

De l'ensemble des mesures des particules en suspension PM10 et PM2.5 réalisées sur les différentes stations de la carrière B, ne seront présentées que celles réalisées en doublon avec les stations AASQAs. Le tableau ci-dessous résume les paramètres de mesures des deux techniques utilisées. Les résultats sont détaillés sur la période commune à l'installation des deux dispositifs de mesure soit du 21 mars au 18 avril pour la station 1 et du 21 mars au 05 avril pour la station 5.

	Station 1 - Entrée de la carrière		Station 5 - Ferques	
	Jauge radiométrique	e-PM	Jauge radiométrique	e-PM
Nombre de jours de mesures commun	28 jours	28 jours	15 jours	15 jours
Pas de temps de mesure	2 h	15 min	2 h	15 min
Nombre de données traitées	328	2488	174	1390

Tableau 60 : Eléments de comparaison micro-captureurs / stations ATMO

PM2,5 Sur la station 1



La comparaison entre les deux méthodes de mesure a été faite sur la base d'un pas de temps de deux heures, en considérant la jauge AASQA comme référence. La figure ci-après présente les profils chronologiques en poussière en suspension PM2.5 établis au moyen de l'e-PM et de la jauge radiométrique (MP101/BAM) obtenus sur la station Carrière B.

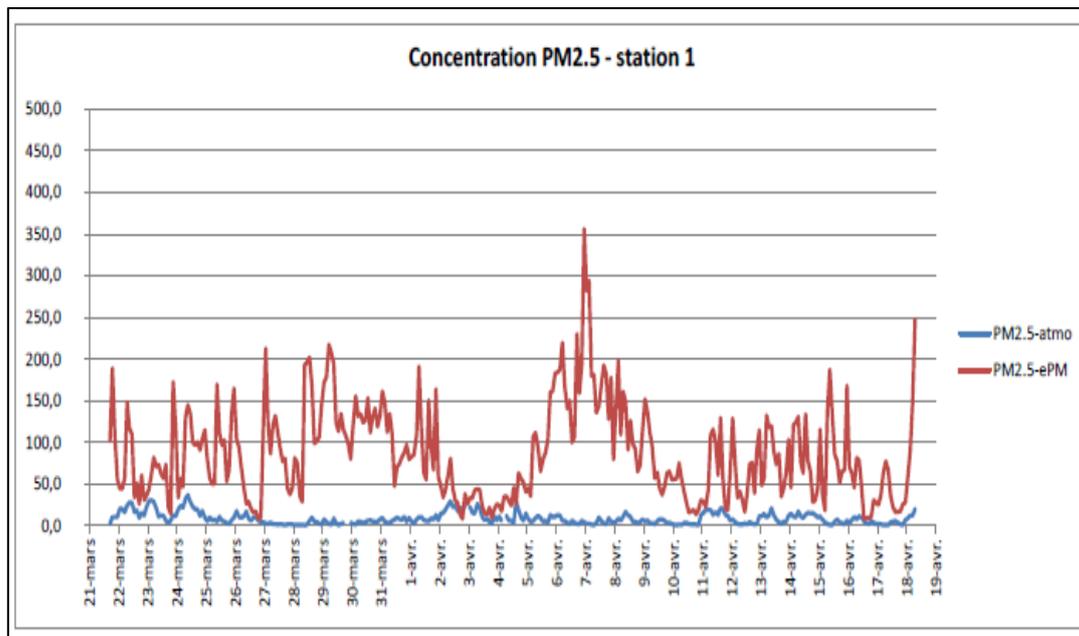


Figure 203 : Concentrations PM2,5 micro-capteur et station ATMO – station 1

La corrélation entre les séries de mesure est présentée ci-après :

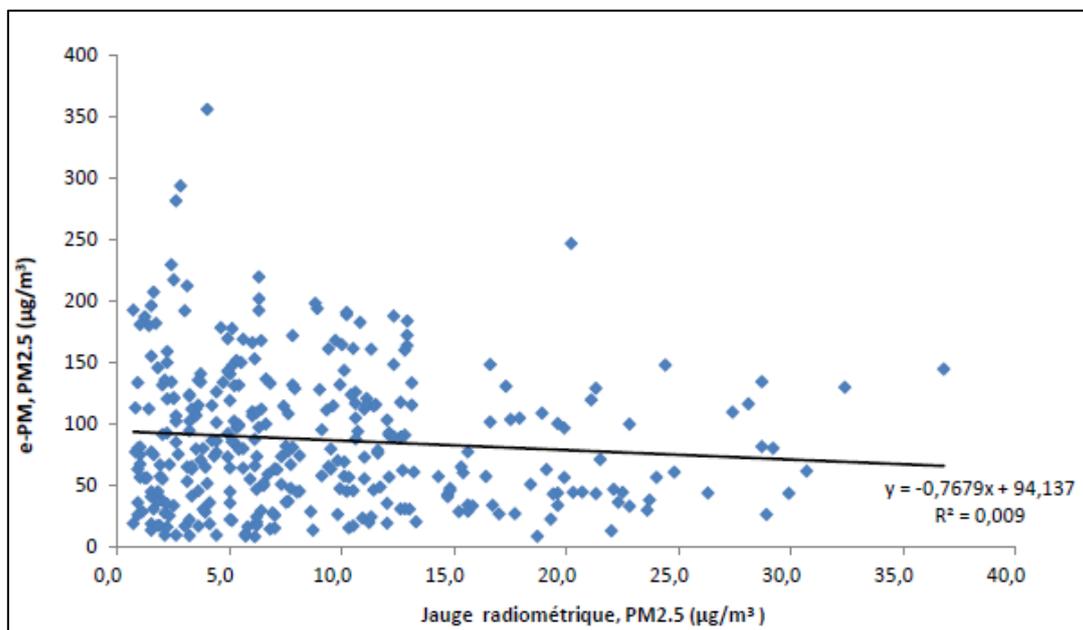


Figure 204 : Test de corrélation entre les concentrations PM2,5 micro-capteur et station ATMO – station 1



Appareil	Jauge radiométrique	e-PM
Nombre de paires de données traitées	328	
Minimum	0,7	8,4
Maximum	36,8	356,2
Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8,8	87,1
Droite de régression	$Y = -0,7679x + 94,137$	
Coefficient de corrélation	0,095	

Tableau 61 : corrélation entre les concentrations PM2,5 micro-capteur et station ATMO – station 1

Les profils montrent peu de synchronisation entre les techniques de mesure. En comparaison avec la jauge ATMO de référence, l'e-PM montre une nette surestimation des concentrations. Aucune corrélation ne peut être établie (coefficient de corrélation = 0,095).

PM2,5 Sur la station 5

Les figures ci-après présentent les profils chronologiques en poussière en suspension PM2.5 établis au moyen de l'e-PM et des jauges radiométriques (MP101/BAM) obtenus sur la station 5 sur la base d'un pas de temps de deux heures.

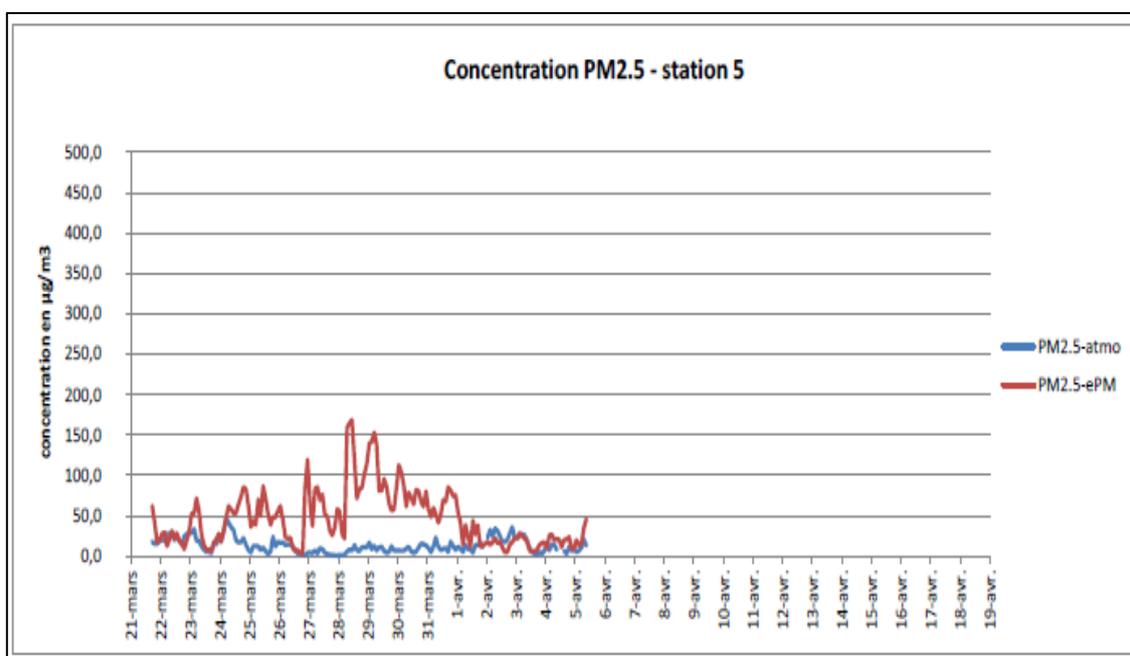


Figure 205 : Concentrations PM2,5 micro-capteur et station ATMO – station 5

La corrélation entre les séries de mesure est présentée ci-après.



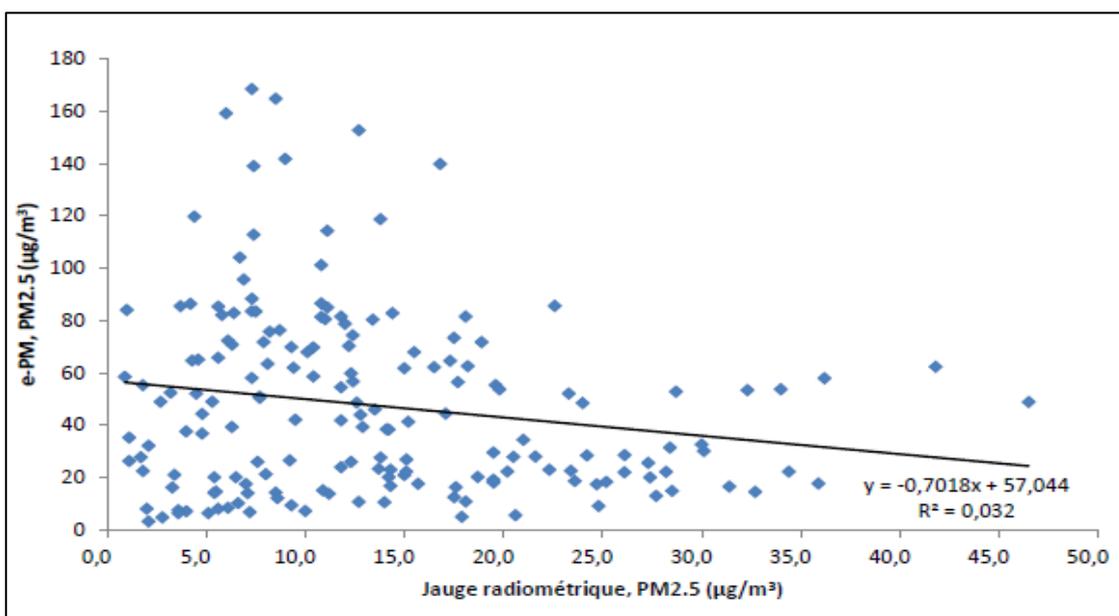


Figure 206 : Test de corrélation entre les concentrations PM2,5 micro-captur et station ATMO – station 5

Appareil	Jauge radiométrique	e-PM
Nombre de paires de données traitées	174	
Minimum	0,9	3,1
Maximum	46,5	168,5
Moyenne (µg/m ³)	13,5	47,6
Droite de régression	$Y = 0,7018x + 57,044$	
Coefficient de corrélation	0,179	

Tableau 62 : corrélation entre les concentrations PM2,5 micro-captur et station ATMO – station 5

Les résultats mettent en évidence les **mêmes constats que ceux observés sur la station 1 : aucune corrélation ne peut être établie entre les deux méthodes de mesures.**

PM10 Sur la station 1

La comparaison entre les deux méthodes de mesure a été faite sur la base d'un pas de temps de deux heures, en considérant la jauge radiométrique comme référence. La figure ci-après présente les profils chronologiques en poussière en suspension PM10 établis au moyen de l'e-PM et de la jauge radiométrique (MP101/BAM) obtenus sur la station 1.

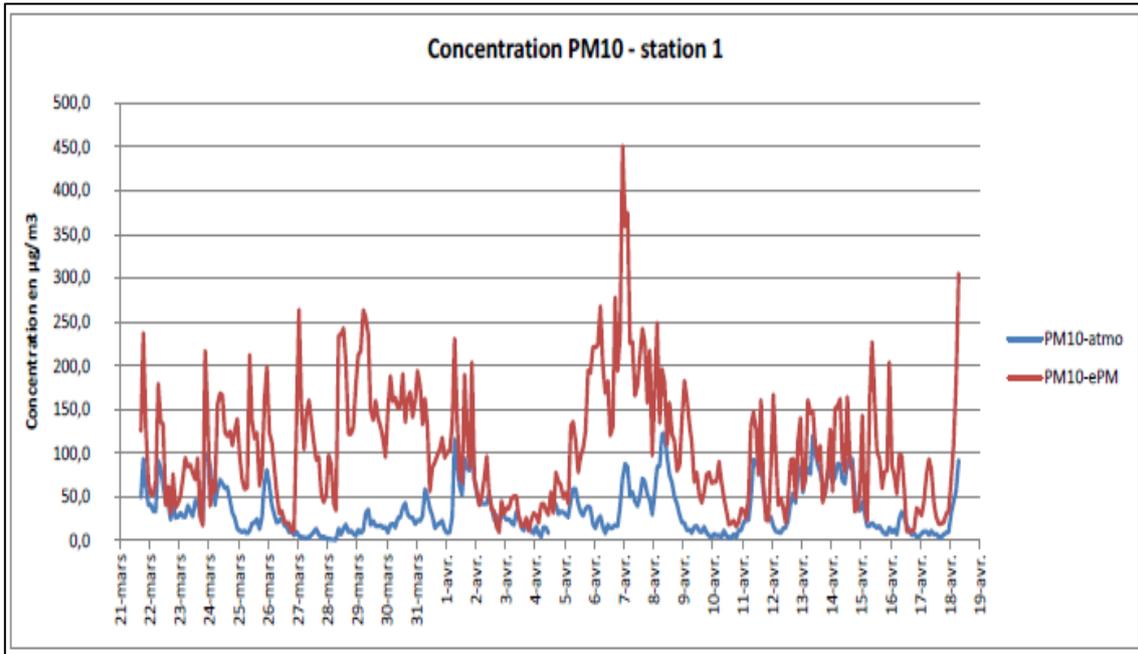


Figure 207 : Concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 1

La corrélation entre les séries de mesure est présentée ci-après :

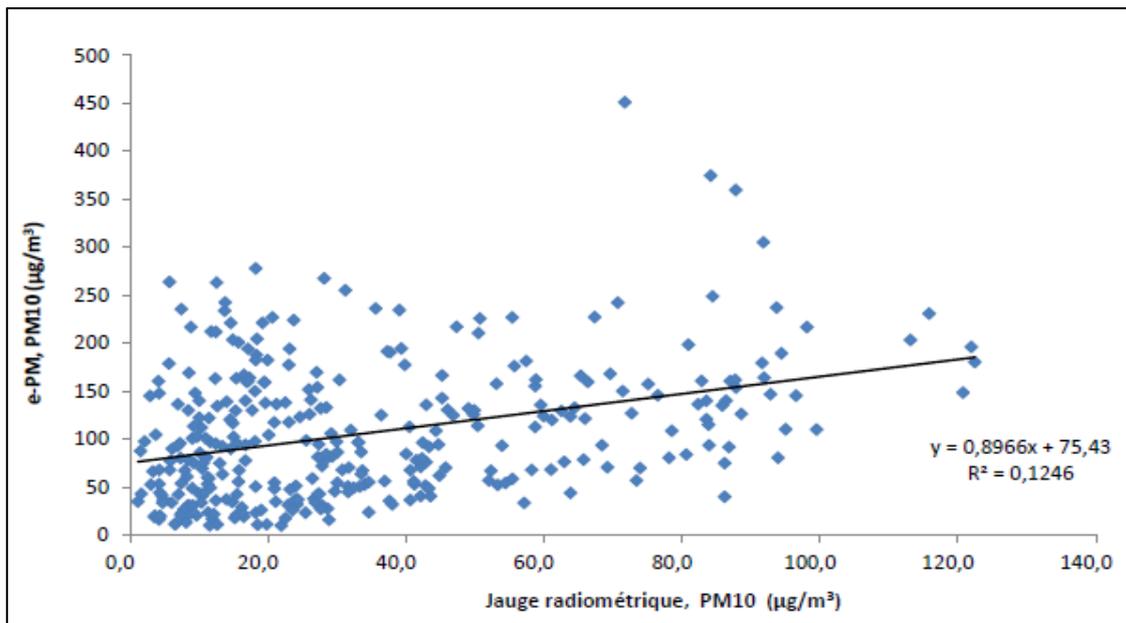


Figure 208 : Test de corrélation entre les concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 1



Appareil	Jauge radiométrique	e-PM
Nombre de paires de données traitées	328	
Minimum	1,1	10,0
Maximum	122,4	451,1
Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	34,2	106,0
Droite de régression	$Y = -0,8966x + 75,43$	
Coefficient de corrélation	0,353	

Tableau 63 : corrélation entre les concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 1

Les profils des concentrations en poussière en suspension PM10 montrent peu de synchronisation entre les techniques de mesure. En comparaison avec la jauge radiométrique, l'e-PM montre une **nette surestimation** des concentrations. Aucune corrélation ne peut être établie, le coefficient de corrélation est de 0,353.

PM10 Sur la station 5

La figure ci-après présente les profils chronologiques en poussière en suspension PM10 établis au moyen de l'e-PM et des jauges radiométriques (MP101/BAM) obtenus sur la station 5 sur la base d'un pas de temps de deux heures.

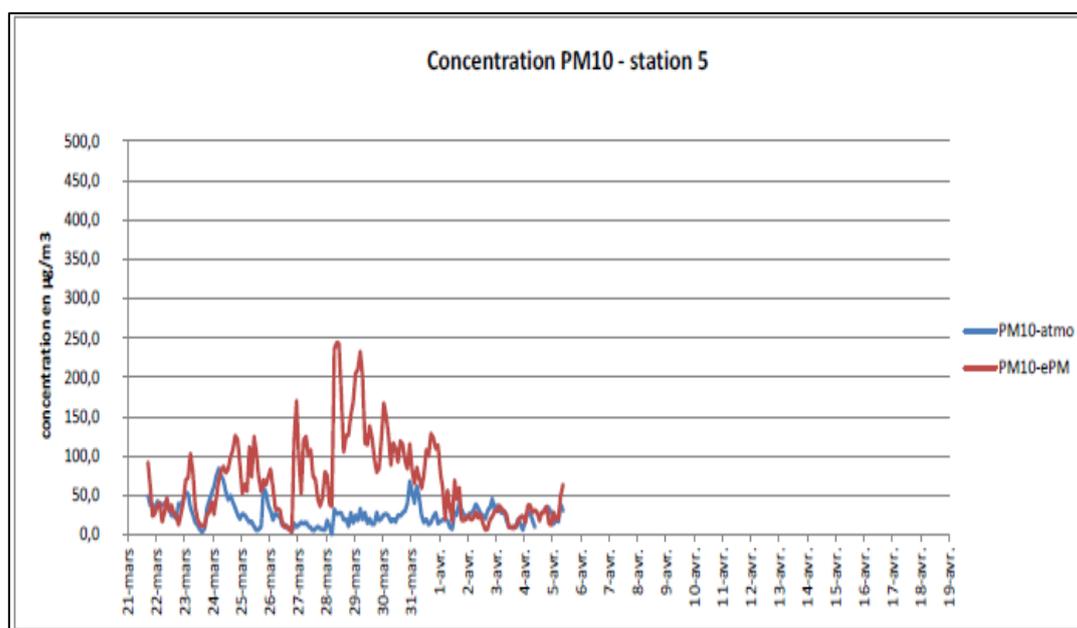


Figure 209 : Concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 5



La corrélation entre les séries de mesure est présentée ci-après :

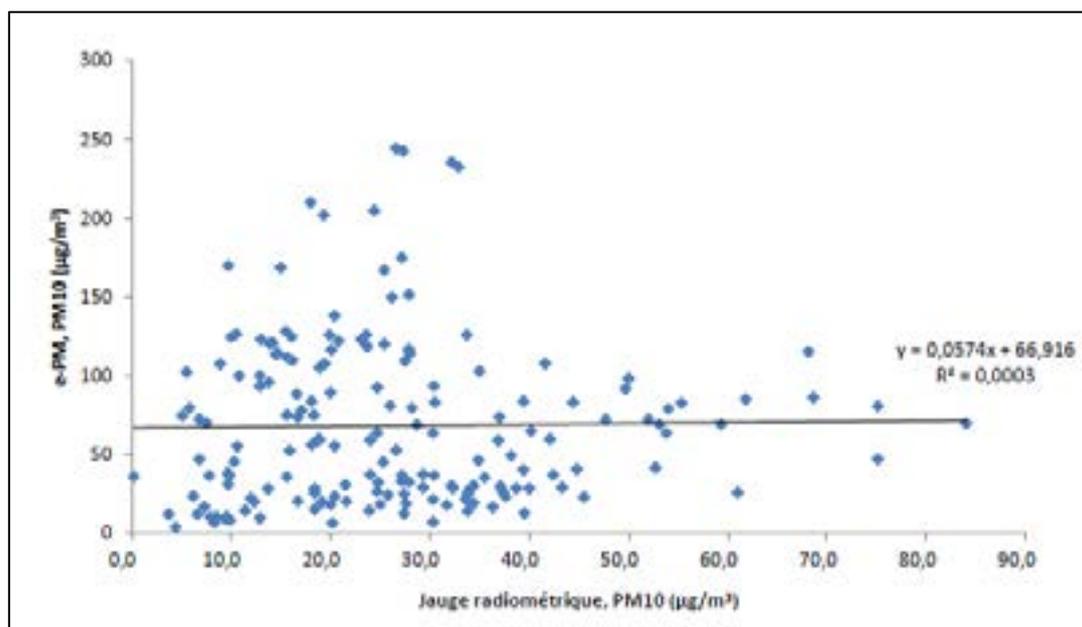


Figure 210 : Test de corrélation entre les concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 5

Appareil	Jauge radiométrique	e-PM
Nombre de paires de données traitées	174	
Minimum	0,2	4,0
Maximum	84,0	244,3
Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	26,1	68,4
Droite de régression	$Y = 0,0574x + 66,916$	
Coefficient de corrélation	0,017	

Tableau 64 : corrélation entre les concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 5

Les résultats mettent en évidence les mêmes constats que ceux observés sur la station 1. Aucune corrélation ne peut être établie entre les deux méthodes de mesures.

L'ensemble des résultats montre, pour deux environnements différents (carrière et péri-urbain), **une absence de correspondance entre les deux méthodes de mesures quelles que soient les particules PM2,5 et PM10**. Cette différence peut avoir au moins deux origines. D'abord le pas de temps de mesure différent pour les deux méthodes de mesures (2h pour la jauge radiométrique et 15 minutes pour l'e-PM) peut être une cause probable. Puis l'étalonnage de l'e-PM peut être également évoqué. Le matériel de référence utilisé pour l'étalonnage de l'appareil est un sable majoritairement composé de silice et dont la structure ne correspond pas à celle des particules mesurées sur la carrière de l'étude.



3.5.7. Bilan

Le test mené en partenariat avec le groupe TERA visait à tester le comportement et la fiabilité de micro-capteurs dans le contexte des carrières en les intégrant dans certaines campagnes EMCAIR. Les mesures ont été réalisées dans des conditions représentatives de l'exploitation. Le programme de mesures a été construit de manière à évaluer les émissions de particules en suspension PM10 et PM2.5 sur la base de cinq stations dont quatre placées sur la carrière en tenant compte des différentes zones d'activités présentes. Les opérations ont été réalisées au printemps 2016. Deux e-PM ont été installés sur deux stations ATMO (stations 1 et 5). Les trois autres e-PM ont été implantés à l'intérieur de la carrière.

Malgré les efforts de calibrage, les résultats d'inter-comparaison des deux méthodes de mesures mises en œuvre sur la station à l'entrée de la carrière et sur la station témoin montrent **l'absence de synchronisation des mesures ainsi qu'une surestimation** des concentrations mesurées par l'e-PM et des réponses différentes aux événements identifiés sur les stations de référence. De ce fait, nous n'avons pas pu utiliser les données recueillies à l'intérieur de la carrière B pour compléter l'interprétation des événements de l'ensemble de la campagne 2 en Hauts de France.

Deux autres tentatives aux cours des campagnes EMCAIR 2016 en Pays de la Loire et Bretagne ont été opérées dans de nouvelles configurations, en utilisant les mêmes capteurs, et sur chaque carrière une des stations AASQA comme référence afin de pouvoir caler les fonctionnements autant en PM10 qu'en PM2,5. Outre de nouvelles difficultés liées cette fois à la maintenance des appareils, réduisant les enregistrements valides, les mesures ont montré une forte sensibilité aux conditions météorologiques (humidité, ...), ainsi que des profils divergents sans explications notamment hors périodes d'activité des sites avec toujours une surestimation des émissions.

3.6. Poussières sédimentables (dépôts atmosphériques)

Au cours des campagnes réalisées, les poussières sédimentables (dépôts secs et humides) ont été recueillies dans des jauges sur chaque station de mesures. Les résultats ont été présentés avec les synthèses régionales pour la partie pondérale, par les AASQAs et pour la chimie par le LSCE/Cyprus Institute. On aura retenu que les jauges situées dans les carrières – à proximité des sources d'émissions – enregistrent logiquement les plus forts taux de dépôts, avec une empreinte chimique caractérisée par la roche exploitée en fonction de l'activité dans la carrière et des conditions météorologiques ; les sites en champ proche confirment, quant à eux, les observations faites pour les PM10 avec une influence plus limitée de la carrière, voire non visible (Bretagne). Le tableau ci-après rassemble toutes les valeurs pour toutes les campagnes en les mettant en parallèle avec les concentrations moyennes journalières des particules en suspension, PM10 et PM2,5.

Les retombées atmosphériques sont, par définition, le résultat du transfert des matières et substances en suspension dans l'atmosphère à des surfaces, telles le sol et la végétation (cf paragraphe 3.6.4) La manière dont ces matières et substances en suspension se comportent, évoluent et se déposent, dépend principalement de leur nature (principalement la taille), des conditions atmosphériques (vent pour les dépôts secs, pluie pour les dépôts humides) et des caractéristiques des surfaces. La relation entre ces indicateurs est donc a priori complexe. Cependant, du fait que cet indicateur soit retenu par la réglementation sur les carrières, avec désormais la méthode des jauges (norme NF X 43-014), il est apparu nécessaire de tenter de mieux en comprendre les interdépendances des résultats obtenus avec ces jauges avec ceux de la surveillance de la qualité de l'air.



Campagnes			Site	Pous. Sédi. mg/m2/jour	PM 10 moyenne µg/m3	PM 2,5 moyenne µg/m3
dates	nb de jours	n°				
7/09 au 5/10/2015	29	1	Carrière A 1	521	46,6	9,1
7/09 au 5/10/2015	29	1	Carrière B 1	45	33,7	11,2
7/09 au 5/10/2015	29	1	Ferques 1 (proche)	339	18,8	9,4
7/09 au 5/10/2015	29	1	Landrethun-le-Nord 1 (aval)	16	16,2	8,1
7/09 au 5/10/2015	29	1	Marquise 1 (amont)	42	20,3	9,3
7/03 au 3/04/2016	28	2	Carrière A 2	1152	53,9	25,5
7/03 au 3/04/2016	28	2	Carrière B 2	317	33,8	15,7
7/03 au 3/04/2016	28	2	Ferques 2 (proche)	165	29,8	18,2
7/03 au 3/04/2016	28	2	Landrethun-le-Nord 2(aval)	126	22,2	17,8
7/03 au 3/04/2016	28	2	Marquise 2 (amont)	100	24,9	19,8
15/06 au 13/07/2016	29	1	Carrière E 1	1019	73	4,8
15/06 au 13/07/2016	29	1	Les Bechis 1 (amont)	26	10,4	4,5
15/06 au 13/07/2016	29	1	Les Rinières 1 (aval)	27	13	5
16/11 au 14/12/2016	29	2	Carrière E 2	97	29	13,9
16/11 au 14/12/2016	29	2	Les Bechis 2 (amont)	28		
16/11 au 14/12/2016	29	2	Les Rinières 2 (aval)	12	25,5	18,1
7/09 au 5/10/2016	29	1	carrière H 1	652	47,1	4,1
7/09 au 5/10/2016	29	1	Chêne sec 1 (amont)	53	12,3	
7/09 au 5/10/2016	29	1	Bouyère 1 (aval)	40	9,7	4,9
11/01 au 8/02/2017	29	2	carrière H 2	243	25,2	12,8
11/01 au 8/02/2017	29	2	Chêne sec 2 (amont)	7	20,9	
11/01 au 8/02/2017	29	2	Bouyère 2 (aval)	2	21,4	12,6

Tableau 65 : tableau récapitulatif des campagnes EMCAIR : poussières sédimentables, et particules en suspension PM10 et PM2,5 en moyennes journalières et cumul de données journalières (quart horaire).

Ce chapitre est ainsi construit :

- recherches de corrélations avec les PM10 et PM2,5 en valeur moyenne ;
- caractérisation de la granulométrie des poussières sédimentaires en carrières ;
- comportement des aérosols et physique des dépôts (synthèse bibliographique) appliqués aux carrières.

3.6.1. Recherche de corrélation entre poussières sédimentables et PM10

La représentation de l'ensemble des campagnes montre que globalement plus les concentrations dans l'air sont élevées, plus les dépôts atmosphériques sont importants, ce qui est cohérent avec le fait que la très grande majorité des particules dans l'atmosphère est ici issue des carrières, de taille (et donc de poids) élevée, entraînant très rapidement leur dépôt. Cependant on observera que pour les faibles empoussièrtements, si cette proportionnalité demeure, elle semble obéir à de multiples paramètres par la très grande dispersion des points.



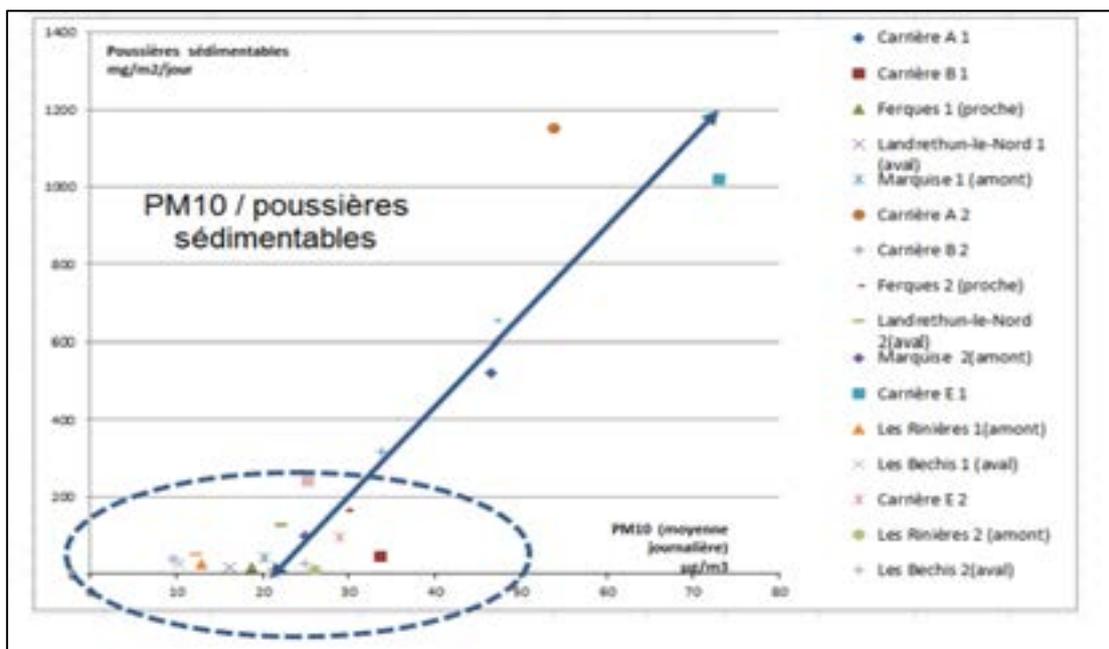


Figure 211 : Recherche de corrélation entre poussières sédimentables et PM10 – ensemble des campagnes EMCAIR

En ne représentant que les données des stations situées à l'intérieur des carrières, une certaine proportionnalité apparaît (coefficient de corrélation $r^2= 0,87$ pour les 8 valeurs) :

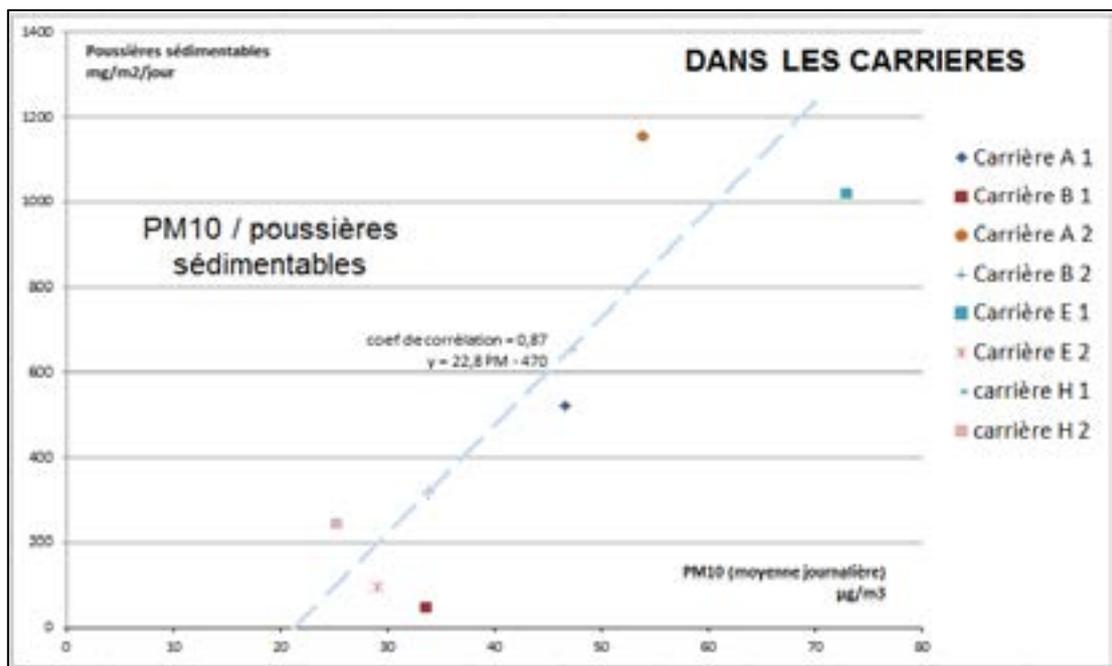


Figure 212 : Corrélation entre poussières sédimentables et PM10 – ensemble des campagnes EMCAIR

Par contre, les autres données en champ proche, donc hors des limites des carrières, montrent toujours une très grande dispersion. Il n'y a pas de corrélation directe : de multiples facteurs interviennent dans le déclenchement du phénomène de sédimentation.



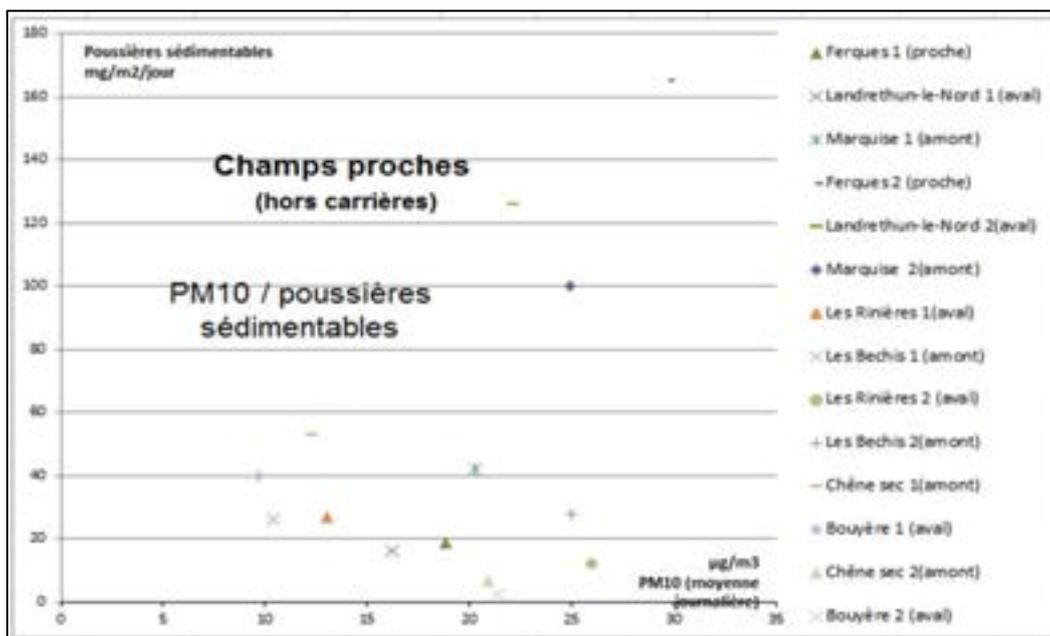


Figure 213 : Recherche de corrélation entre poussières sédimentables et PM10 – ensemble des campagnes EMCAIR

La représentation par zone géographique montre plus de cohérence, que ce soit pour le Bassin de Marquise ou pour les deux carrières de l'Ouest. Ainsi, il semblerait qu'après les caractéristiques physiques des particules (taille, masse volumique, concentrations), **les conditions locales** (topographie, météorologie) soient **dominantes** dans le phénomène de sédimentation des particules émises par les carrières.

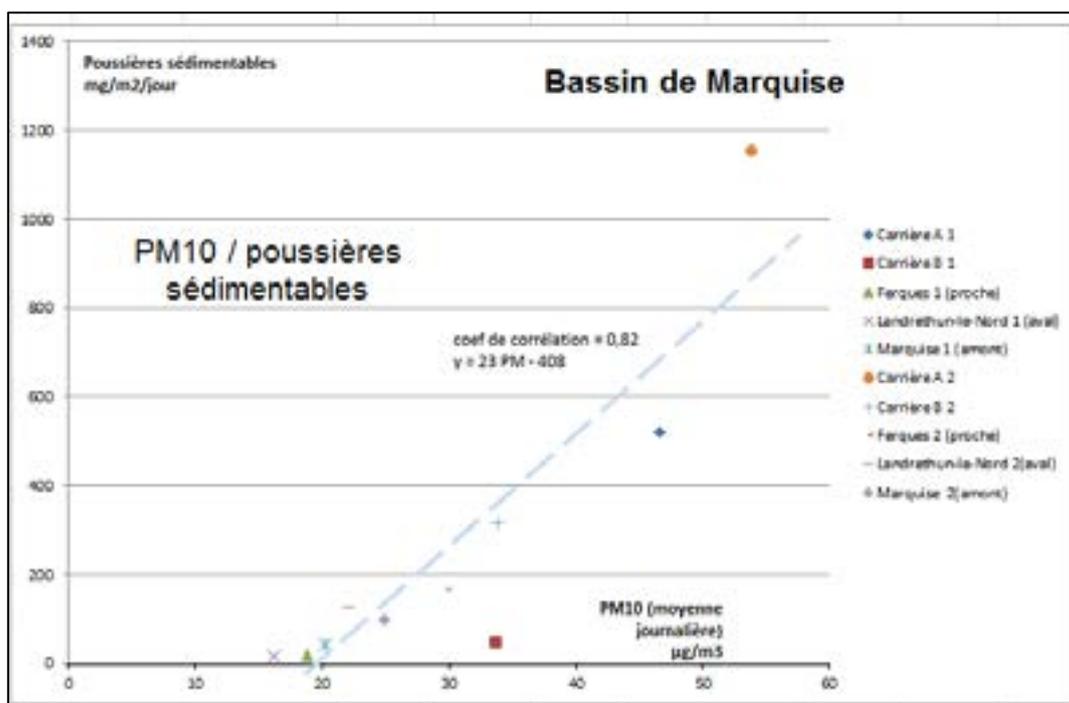


Figure 214 : Corrélation entre poussières sédimentables et PM10 –campagnes bassin de Marquise



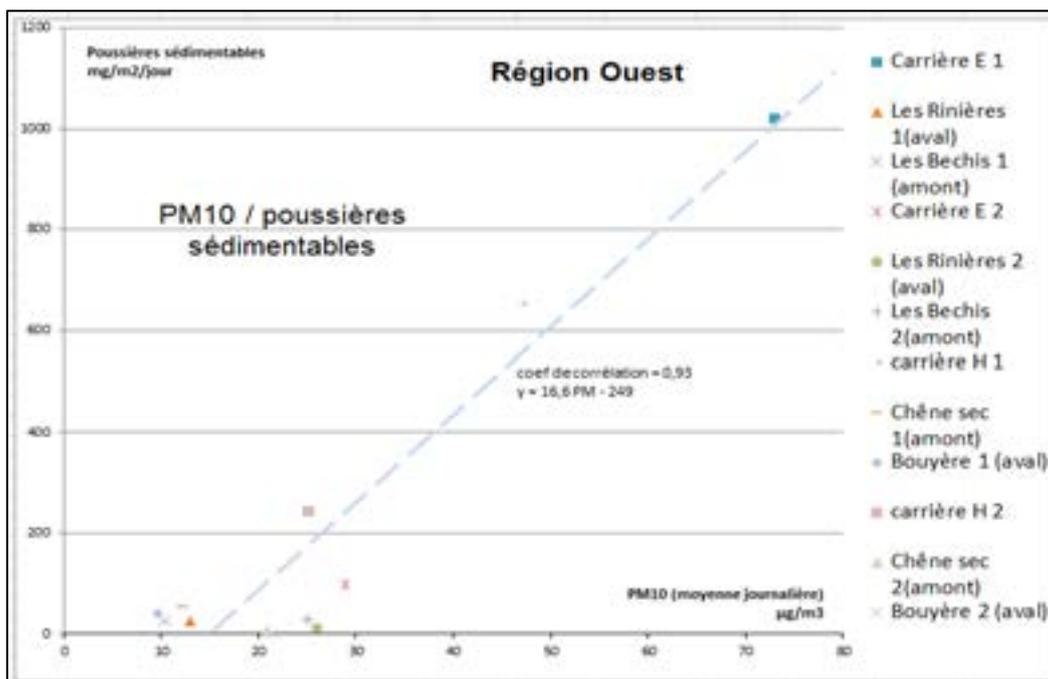


Figure 215 : Corrélation entre poussières sédimentables et PM10 –campagnes Pays de la Loire et Bretagne

3.6.2. Recherche de corrélation entre poussières sédimentables et PM2.5

Le graphique des poussières sédimentables en fonction des concentrations moyennes en PM2.5 montre une très grande dispersion. Aucune corrélation simple n'apparaît ni dans les carrières, ni en champs proches, ni par zones géographique (Bassin de Marquise/Ouest), ni par campagne. Cela est en cohérence avec le fait que les carrières sont faiblement émettrices de PM2.5 (cf campagnes EMCAIR – concentrations, analyses chimiques -, facteurs d'émission du CITEPA, modélisation).

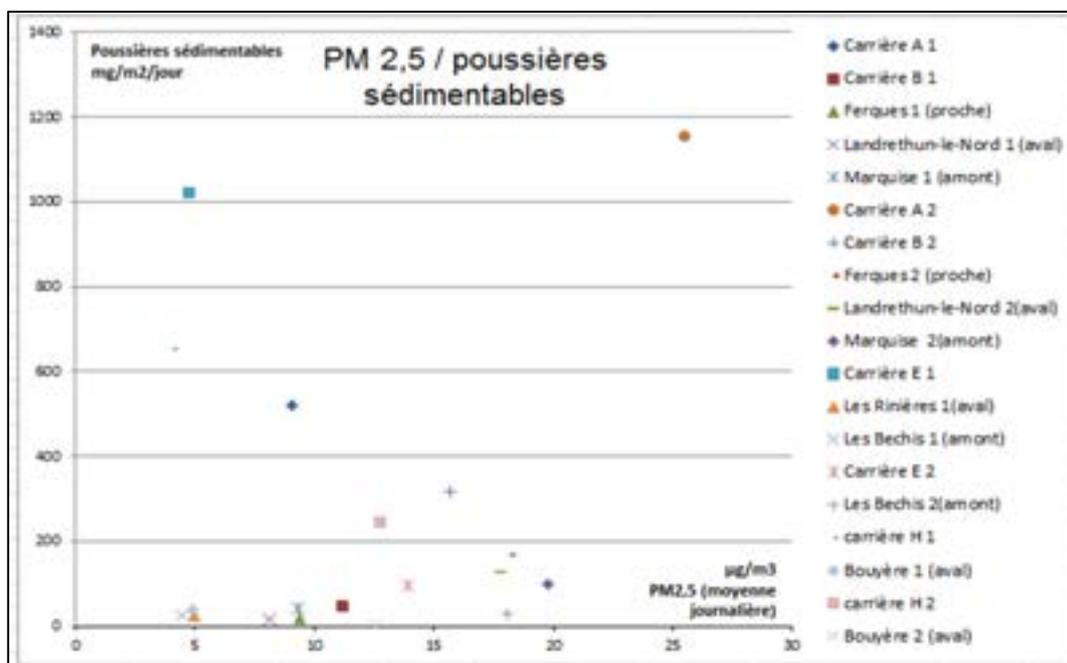


Figure 216 : récapitulatif des campagnes - relation poussières sédimentables/ PM 2,5 ensemble des campagnes

3.6.3. Granulométrie des poussières sédimentables en carrières

Pour prolonger les réflexions, il nous est alors paru intéressant de chercher à connaître la composition granulométrique des poussières sédimentables des carrières. Une détermination directe par les quantités recueillies dans les jauges au moment des prélèvements se heurte au fait que les quantités

sont trop faibles pour une qualification par les instruments dont nous pouvons facilement disposer dans le cadre de cette étude (granulomètres optiques⁹). Nous avons alors procédé différemment en commençant par prélever à l'intérieur du périmètre d'une carrière des dépôts sur des surfaces présentant une exposition favorable à un cumul de retombées atmosphériques, sans risque d'apports de matières d'autres provenances.

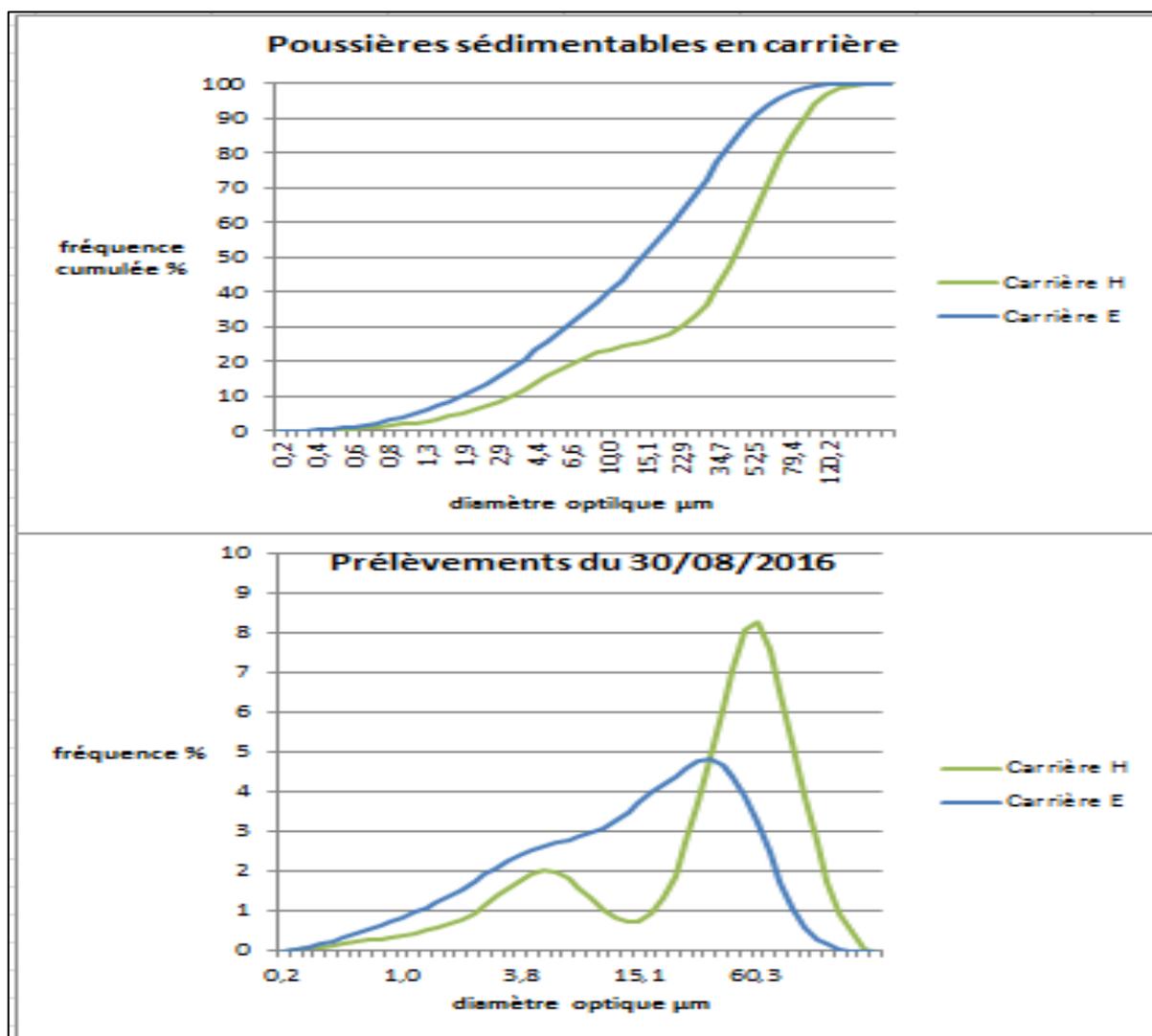


Figure 217 : Poussières sédimentables en carrières : granulométrie optique pour 2 prélèvements (carrières E, H)

Pour les deux carrières échantillonnées, on observe :

- des tailles de grains allant de 0,2 µm à 120 µm de diamètre ;
- des courbes de fréquence bimodales :
 - o très marquée pour le site H, avec une famille de particules autour de 60µm, une autre autour de 5µm,
 - o moins marquée pour le site E avec la famille grossière autour de 35µm et la même famille plus fine autour de 5µm ;

un d50 (seuil au-delà duquel plus de 50% des particules se trouvent) évoluant entre 15µm (carrière E) et 42µm (carrière H).

⁹ Le fonctionnement d'un granulomètre optique est basé sur la mesure de la diffraction d'un faisceau lumineux (laser) par des particules. L'angle de dispersion varie avec l'inverse du diamètre des particules. Ces appareils sont utilisés dans l'industrie pour contrôler les répartitions granulaires des poudres. L'appareil employé ici est un Mastersizer 2000 de Malvern Instruments calé sur la plage 0,01-800 µm).



Au-delà du biais méthodologique (prélèvement et type d'analyse granulométrique), l'approche par caractérisation granulométrique permet de replacer dans le contexte ce que l'approche statistique a mis en évidence plus haut : les PM10 dans les poussières sédimentables en carrières sont certes présentes, mais, rapportées à la masse globale, elles sont marginales. De même, la granulométrie montre que les PM2.5 sont également présentes dans ces dépôts, comme nous l'avait déjà montré les analyses chimiques. On observera que la limite de caractérisation du granulomètre optique employé étant à 0,1µm, la représentation du pied de courbe est tronquée.

Contrairement à beaucoup d'idées reçues – y compris au sein des acteurs de l'industrie extractive – des particules fines sont présentes dans les dépôts de poussières : par exemple, les particules représentées en pied de courbe appartiennent à la fraction alvéolaire définie dans le code du travail (PM4.5 µm), soulignant ainsi le risque sanitaire par remobilisation des dépôts.

Cette approche, réalisée en 2016 à la faveur de la préparation des campagnes dans l'Ouest, a été complétée par d'autres prélèvements en 2017 afin de mieux comprendre dans quelles proportions évoluent les poussières dans leur fraction sédimentaire :

- à la source dans les installations de traitement pour les deux carrières E et H (mai 2017)
- en périphérie et à la source des installations de traitement pour la carrière E (août 2017)

Carrière H	17-mai-17	Carrière E	12-mai-17	Carrière E	04-août-17
Primaire	H1	Primaire	E11	Primaire	E21
Secondaire	H2	Secondaire concassage	E12A	Secondaire concassage	E22A
		secondaire criblage	E12B	secondaire criblage	E22B
Tertiaire	H3	Tertiaire concassage	E13A	Tertiaire concassage	E23A
		Tertiaire criblage	E13B	Tertiaire criblage	E23B
Chargement	H4	Chargement	E14	Chargement sous trémies	E24A
				Chargement devant trémies	E24B
				Chargement au-dessus trémies	E24C
				Locaux	E25A
				Belvédère	E25B
				Pompes (station carrière AASQA)	E25C
				Bascule	E25D
nb d'échantillons	4		6		12

Tableau 66 : Poussières sédimentables : échantillonnage en carrière à proximité des sources (2017)



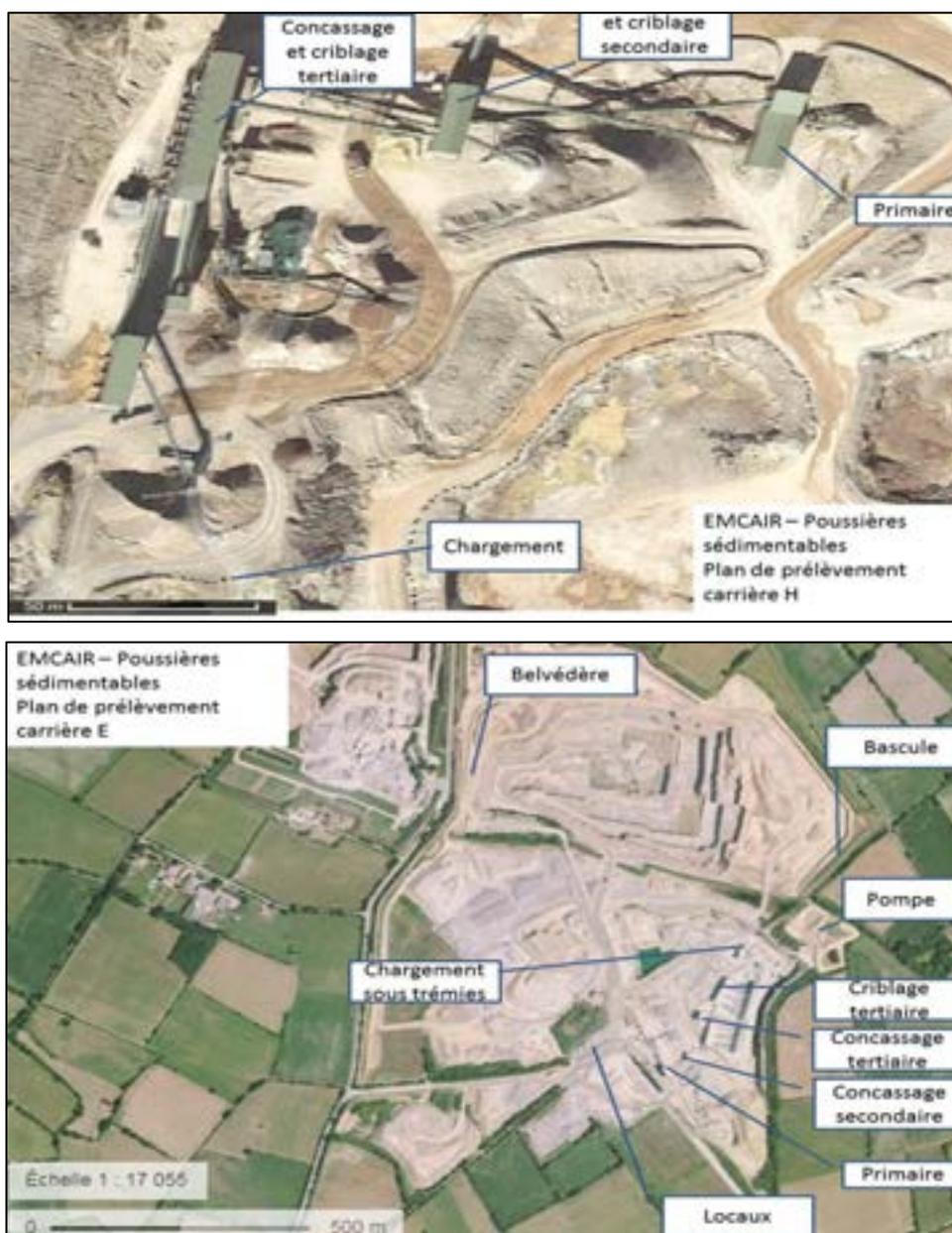


Figure 218 : Poussières sédimentables : échantillonnage en carrières E et H à proximité des sources (2017)

Les campagnes 2016-2017 (22 échantillons) prolongent les tendances enregistrées :

- des tailles de grains allant de 0,2 μm à 400 μm (après correction pour éliminer certaines aberrations) ;
- ydes courbes de fréquence multimodales :
 - un mode dans la taille moyenne dominant de 25 à 80 μm ;
 - un mode secondaire autour de 5 μm ;
 - un autre mode secondaire pour quelques échantillons autour de 150-200 μm ;
- un d50 évoluant entre 13 μm et 52 μm .
- une proportion de particules à 10 μm variant de 7 à 43%

Les différentes activités au sein des carrières génèrent une **large gamme de particules en taille**, dont la partie grossière domine et au sein de laquelle se retrouvent des PM10 et PM2,5 qui ont sédimenté. Rapportée à la masse globale des dépôts, cette part est naturellement très faible, mais les particules étant toutes produites en même temps, **la fraction PM10 identifiée par ailleurs comme représentative des émissions des carrières peut être utilisée comme « indicateur » des flux de dépôts secs des carrières.**



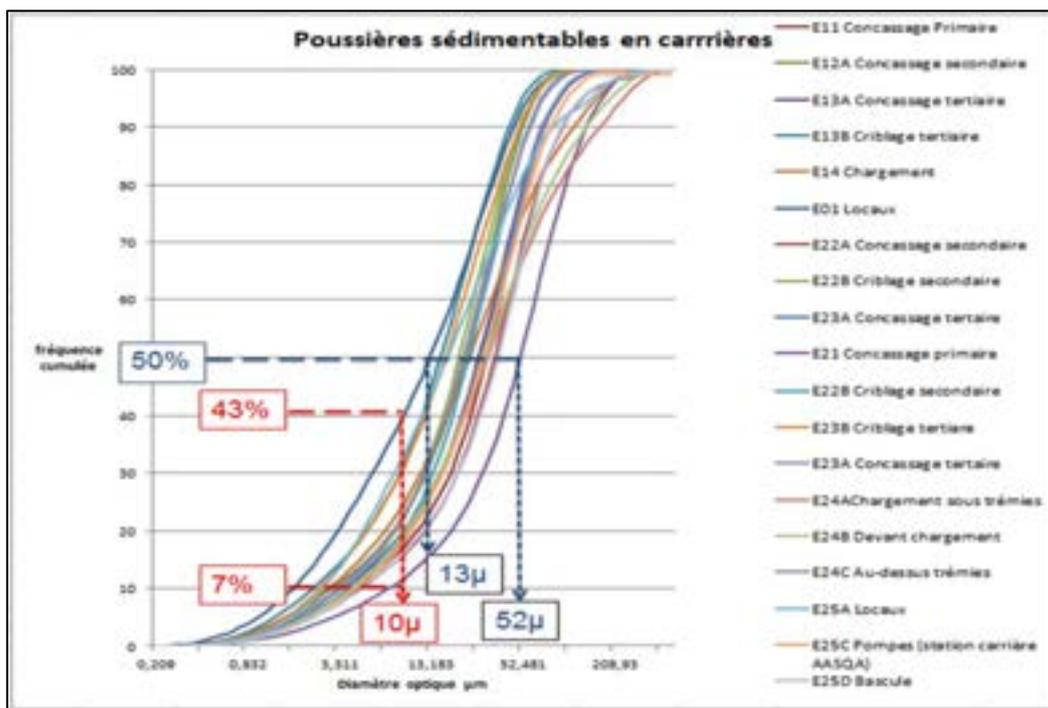


Figure 219 : Poussières sédimentables en carrières : granulométrie optique - courbe en fréquences cumulées (carrières E et H - 2017)

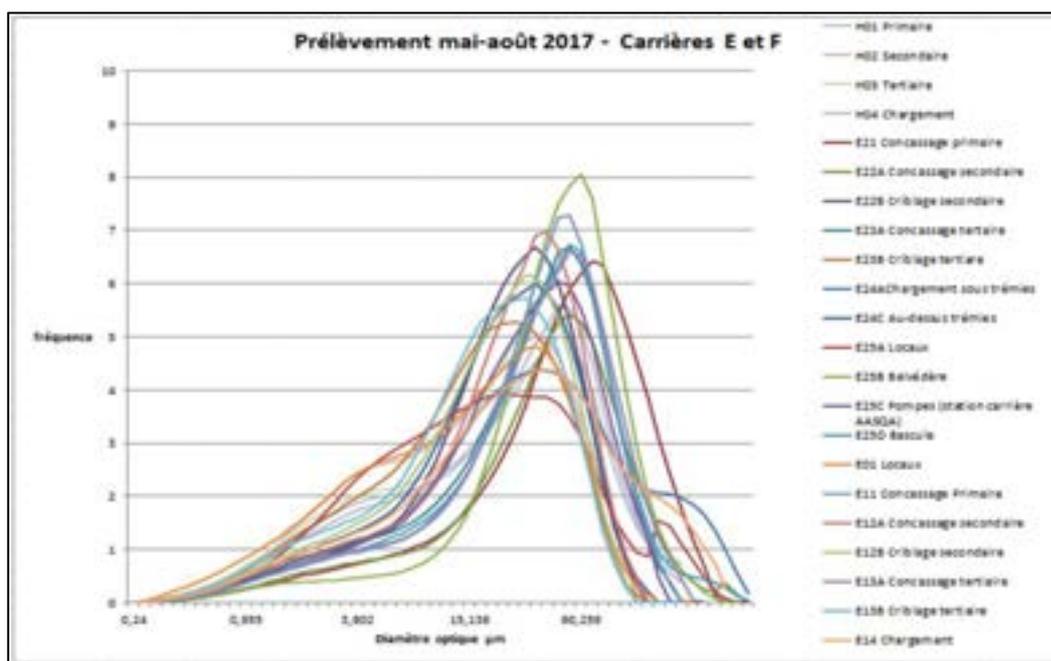


Figure 220 : Poussières sédimentables en carrières : granulométrie optique - courbe en fréquences (carrières E et H - 2017)

Ces figures permettent en outre de préciser les tailles des particules générées par type de sources dans un périmètre de carrière :

- concassage primaire (à mâchoires dans les deux carrières) : 50 à 70 µm
- concassages-criblages secondaires et tertiaires (giratoires dans les deux cas) : 25 à 50 µm

Indépendamment du type de traitement, les roches semblent avoir une réponse différente en termes d'émission de particules sous le même type de sollicitation. Cette observation devra naturellement être confirmée sur d'autres carrières, en cherchant à la relier à la minéralogie et aux concentrations dans l'air.



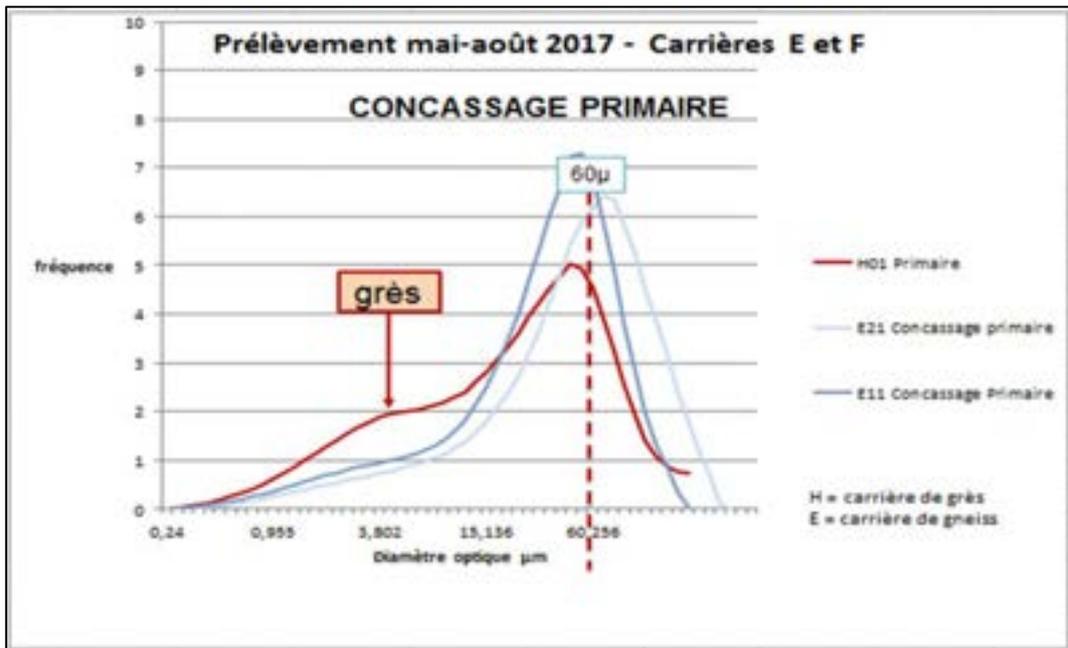


Figure 221 : Poussières sédimentables : granulométrie optique par type de source –concassage primaire (carrières E et H - 2017)

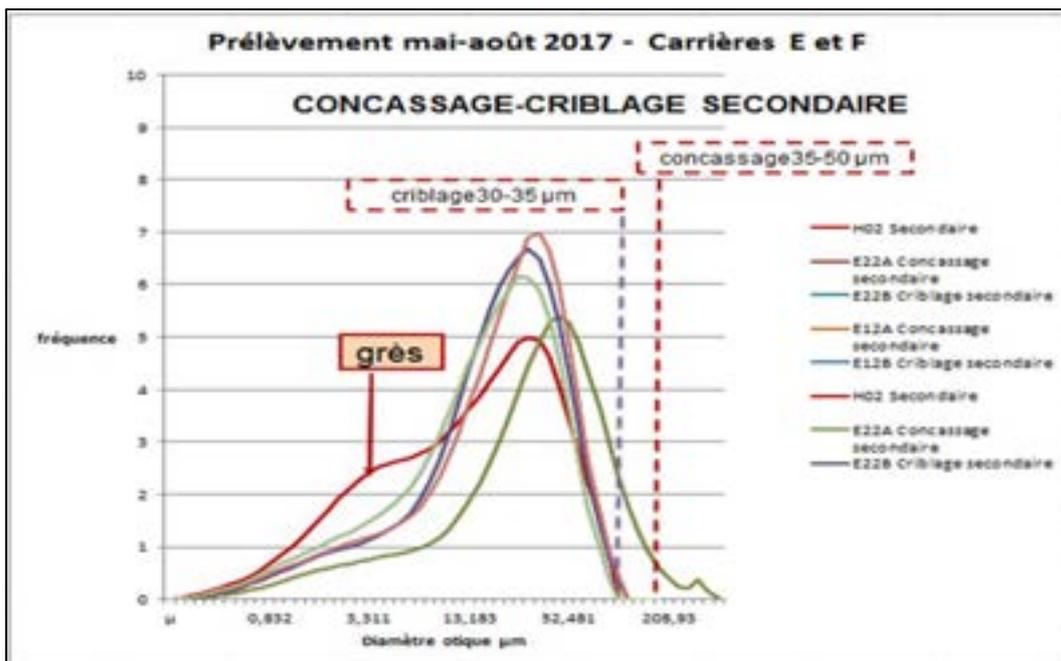


Figure 222 : Poussières sédimentables : granulométrie optique par type de source –concassage et criblage secondaire (carrières E et H - 2017)

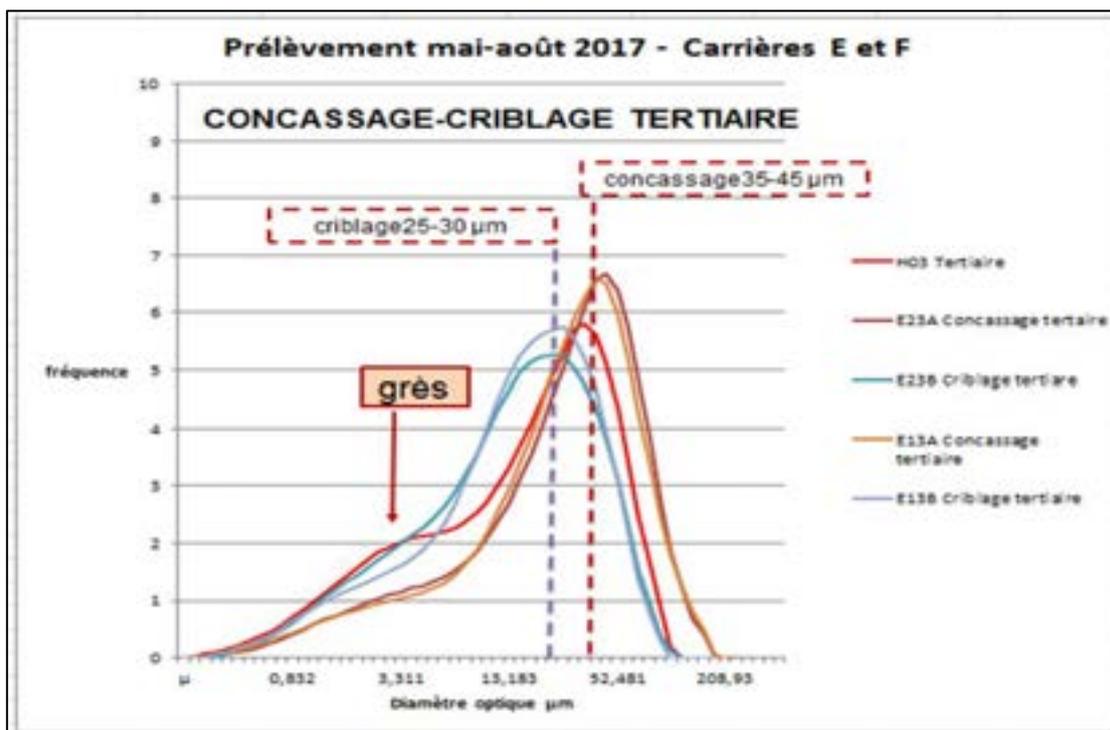


Figure 223 : Poussières sédimentables : granulométrie optique par type de source –concassage et criblage tertiaire (carrières E et H - 2017)

On remarque également que la distribution granulométrique des poussières issues des postes de concassage et de criblage est homothétique avec un décalage vers des tailles plus réduites pour le criblage. L'explication doit être recherchée dans la mécanique des opérations : la fragmentation par concassage fabrique des grains dont la distribution est en fonction du type de roche et d'appareil (P. Blazy, 2006). Les poussières font naturellement partie de cette production de particules en obéissant aux mêmes lois de distribution ; ensuite, il semblerait que le criblage génère, probablement par attrition, des particules secondaires plus petites – d'où l'homothétie des courbes décalées d'environ 5 µm, tant pour le criblage secondaire, que pour le tertiaire – en favorisant la dispersion des particules créés.

Cette constatation se reproduit pour les autres postes échantillonnés sur la carrière E, en particulier pour le chargement des camions sous trémies et stations sous cette influence – E25C pompes situées à l'implantation de la station carrière des campagnes Atmo Pays de la Loire. Là aussi, il s'agit de postes de dispersion de particules. Quant aux stations situées en périphérie des sources de traitement et de chargement -comme le belvédère ou les locaux, on constate un enrichissement en particules plus fines que l'on peut interpréter comme pouvant être lié à l'attrition des dépôts et des matériaux par la circulation des engins.



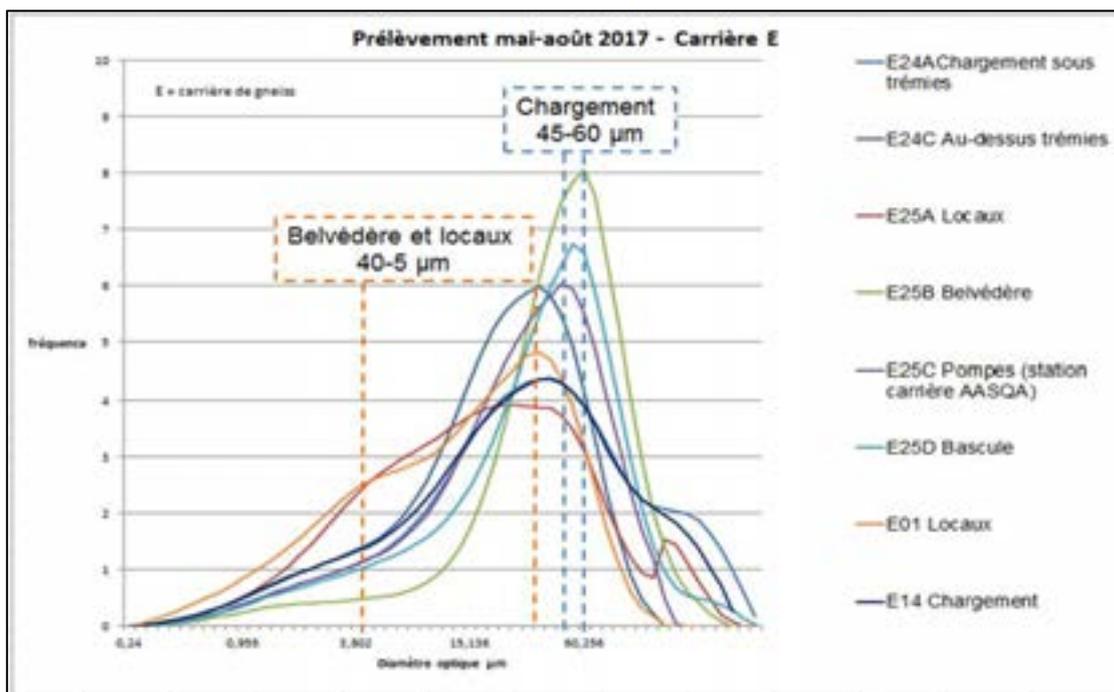


Figure 224 : Poussières sédimentables : granulométrie optique par type de source (carrières E - 2017)

Ces observations sur les poussières sédimentables, basées sur un nombre encore limité d'échantillons en carrière et avec une méthodologie qui reste à être développée, doivent être vues comme des pistes pour poursuivre les études nécessaires à l'exploitant afin d'employer des techniques appropriées de réduction à la source et d'en déterminer leur efficacité. Il apparaît également nécessaire d'effectuer ultérieurement sur chacun de ces postes une « empreinte granulométrique » atmosphérique (à partir de compteurs optiques spécifiques) afin de mieux relier les données de dépôts aux observations dans l'air ambiant. C'est ainsi qu'il sera possible d'alimenter le CITEPA en données pour actualiser les facteurs d'émissions propres aux carrières (cf chapitre 3.7.1).

3.6.4. Dépôts atmosphériques : un peu de théorie

Pour prolonger les réflexions autour des observations des poussières sédimentables et de leurs relations avec les particules en suspension dans l'air en carrières, il nous est paru nécessaire de donner quelques éléments issus de la physique des aérosols. En effet, et notamment parce que les phénomènes de pollution appelaient des explications, les scientifiques ont développé de nombreuses approches théoriques autour de ces phénomènes.

Les physiciens appellent « aérosol » l'ensemble des particules liquides ou solides en suspension dans un gaz comme l'air. Le comportement des particules dans le temps et l'espace dépend de leur nature, de leur taille, ainsi que des mouvements et propriétés du gaz porteur.

Dans l'absolu, la gamme de dimension des particules couvre six ordres de grandeur (J.C.LABORDE) s'étendant de la molécule (10-4 µm) à la particule massive (100 µm) réparties en

- particules fines < 2µm elles-mêmes subdivisées en ultrafines pour celles inférieures à 0,1 µm
- les particules grossières >2µm

En fonction de cette classification, l'origine et les grands mécanismes de formation des particules sont synthétisés dans le schéma ci-dessous (Cantrell, 1976).



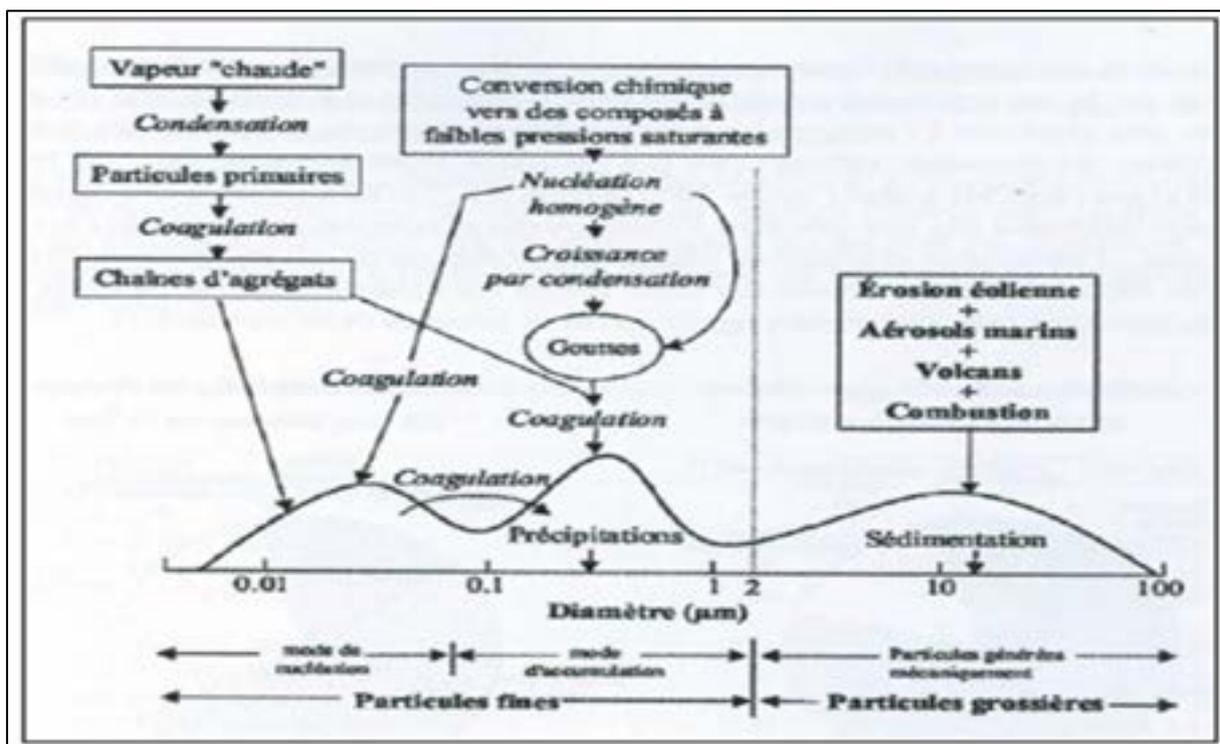


Figure 225 : Représentation schématique de la distribution granulométrique des aérosols et de leurs mécanismes de formation et de dépôts. Adapté de Whitby et Cantrell (1976)

On comprend que la qualité de l'air est la résultante de phénomènes d'origine naturelle (embruns marins, feux de biomasse, activité volcanique, érosion éolienne des sols) ou anthropique (combustions, incinérations, échappements des moteurs, broyages de matières, pulvérisations de substances, utilisation des sols, etc.)

- les particules grossières (de 100 à 2µm) sont efficacement éliminées par dépôt sec sous l'action de la gravité ; leur durée de vie est donc faible, de quelques heures à quelques jours ; elles contribuent peu à la concentration en nombre de particules, mais de façon notable à la masse.
- les particules fines (inférieures à 2µm) contribuent aux risques sanitaires des aérosols dans l'atmosphère.
- bien que le plus grand nombre des particules ultrafines apparaissent dans le mode nucléation – c'est-à-dire constituent les germes d'agrégats - ces particules contribuent peu à la masse totale des particules en raison de leur très petite taille, mais beaucoup par la chimie.

La gamme de concentration couverte des aérosols est également très vaste, s'étendant de 10-15 kg/m³ à 1 kg/m³. A titre d'exemple, on peut citer le transport de poudres et les incendies (concentrations fortes entre 10-3 et 1 kg/m³), les rejets de cheminée (entre 10-6 et 10-3 kg/m³), les aérosols atmosphériques (entre 10-10 et 10-5 kg/m³), les milieux ultra propres (entre 10-15 et 10-9 kg/m³) (LABORDE).

On comprend ainsi, par la combinaison « dimension/concentration », les difficultés à surmonter pour décrire le comportement des aérosols et les mesurer, sachant qu'aucun modèle ni aucun appareil de mesure unique n'est capable de couvrir ces deux dynamiques.

Pour décrire les particules, trois diamètres caractéristiques sont souvent utilisés :

- le diamètre équivalent en volume (de) qui correspond au diamètre de la sphère possédant la même masse m et la même masse volumique ρ_p que la particule considérée de forme quelconque;
- le diamètre de Stokes qui correspond au diamètre d'une sphère ayant la même vitesse limite de chute (ou vitesse de sédimentation) et la même masse volumique que la particule considérée;
- le diamètre aérodynamique (d_a) qui correspond au diamètre d'une sphère ayant la même vitesse limite de chute que la particule et une masse volumique de 1 000 kg.m⁻³.



Le diamètre aérodynamique est le paramètre essentiel intervenant dans les processus de dépôt de particules, de filtration, etc ; il décrit le comportement aérodynamique d'un aérosol. Dans de nombreux cas, il n'est pas nécessaire de connaître la dimension vraie, la forme et la densité de la particule si des moyens métrologiques ont permis d'accéder directement à son diamètre aérodynamique. Il est donné par la relation suivante : $d_a = d_p \cdot (\rho_p / 1000 \cdot \chi)^{1/2}$ où χ est le facteur de forme dynamique et ρ_p la masse volumique de la particule.

Le schéma suivant illustre ces notions pour une particule de masse volumique de 4 kg/m³ présentant ainsi le comportement en vitesse de chute dans l'air.

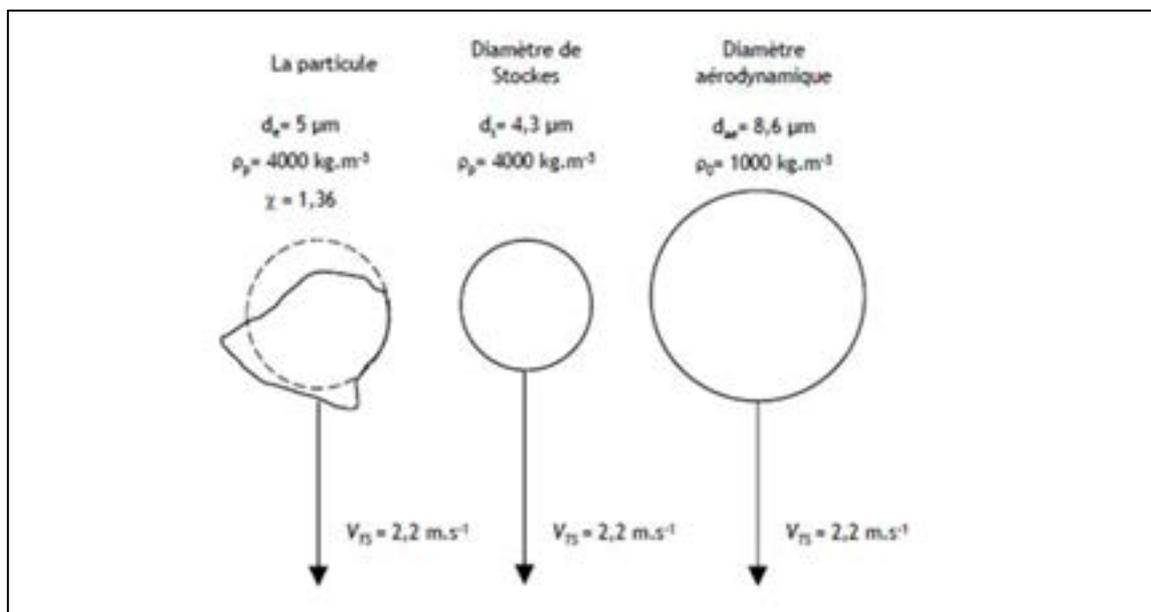


Figure 226 : diamètres équivalents pour une particule quelconque V_{Ts} correspondant à la vitesse terminale de chute (Hinds,1999)

Lorsqu'on fait le calcul pour des roches employées pour la production de granulats, les masses volumiques sont plutôt dans la fourchette 2,4 à 2,8 kg/m³, avec des facteurs de forme évoluant entre 1,0 pour une sphère lisse, 1,36 pour le quartz, 1,57 pour les sables, jusqu'à 2,04 pour du talc. Ainsi dans le rapprochement qui a été fait précédemment entre les tailles des poussières sédimentables mesurées au granulomètre optique – proche d'un diamètre de particule – et les concentrations dans l'air – diamètre aérodynamique d_a – il serait en théorie nécessaire d'introduire cette double correction :

- Masse volumique et forme. Le calcul pour une roche concassée pour faire du sable (masse volumique 2,6 kg/m³ et forme à 1,57) donne un facteur de correction égal à 1,29.

Les dépôts atmosphériques recouvrent divers domaines que l'on peut schématiser en :

- dépôts humides = ensemble des particules qui sédimentent avec les eaux atmosphériques (pluie, brouillard, neige,)
- dépôts secs = transfert de matière de l'atmosphère à des surfaces principalement par sédimentation, mais également pour les ultrafines par adsorption, absorption, dissolution, et réaction chimique.

Les dépôts humides se produisent (SEIGNEUR, 2013):

- dans les nuages (« rainout ») par formation de gouttelettes à partir de particules (noyaux de nucléation d'Aitken) et collision de particules avec les gouttes ;
- et sous les nuages (« washout ») par lessivage et collision des particules avec les gouttes de pluie.

Des méthodologies pour calculer le flux de dépôt humides ont été développées avec des approches explicites très complètes par nature de polluant et typologie atmosphérique ; des approches empiriques par coefficient de lessivage existent. Pour les cas qui nous concernent directement, retenons que le flux déposé est directement proportionnel à la concentration dans l'air avant l'épisode de pluie. Ce flux de dépôt est fonction de l'évènement météorologique (intensité de la pluie, taille des gouttes...) et du polluant (nature, taille des particules,).



Les dépôts secs sont fonction de :

- la turbulence atmosphérique
- des caractéristiques du polluant : taille, masse volumique et forme pour les particules, solubilité et réactivité pour les gaz ;
- des caractéristiques de la surface : lisses, naturelles (végétation...).

Le premier phénomène est la **sédimentation** (loi de Stokes) auquel il faut associer l'inertie, l'interception et la diffusion. L'expression complète de la vitesse de dépôt V_d est la suivante :

$$V_d = V_s / (1 - \exp(-r V_s))$$

Où V_s est la vitesse de sédimentation, r est la résistance au dépôt par diffusion, interception et inertie.

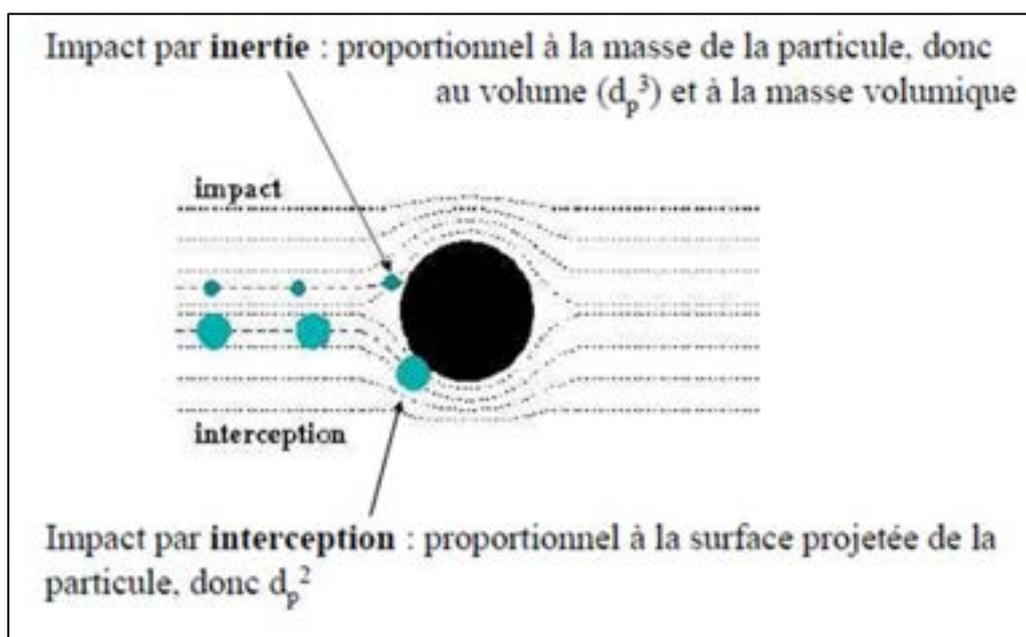


Figure 227 : Schéma illustrant les types de comportements des particules dans l'air (SEIGNEUR, 2013)

Les vitesses de dépôt sec varient selon les polluants (molécules gazeuses et particules de différentes tailles), les conditions météorologiques (qui affectent la turbulence) et le type de surface (sol, végétation, bâti, eau...). Des particules fines auront une vitesse de dépôt de l'ordre de 0,1 cm/s pendant la journée. Pendant la nuit, les conditions atmosphériques stables peuvent réduire les vitesses de dépôt d'un ordre de grandeur ou plus. En général, les vitesses de dépôt sont plus élevées en milieu forestier qu'en rase campagne car, pour une même superficie au sol, la surface des feuilles des arbres est beaucoup plus importante que la surface du sol. Les figures suivantes illustrent l'évolution de ces vitesses en fonction des tailles des particules et pour différents états de surfaces. Le profil des courbes reste typiquement en « V » avec trois domaines : sédimentation, inertie-interception et diffusion.



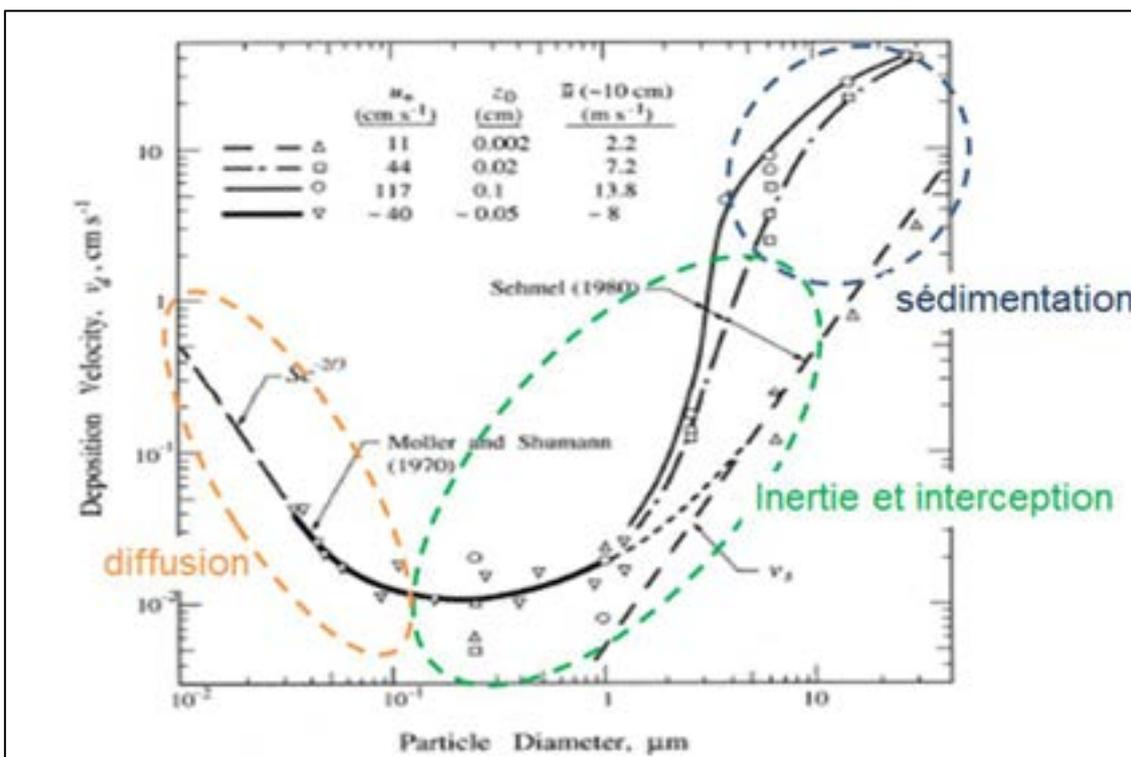


Figure 228 : Dépôts secs : vitesse en fonction de la taille des particules (Moller & Shumann, Schmel) – C Seigneur

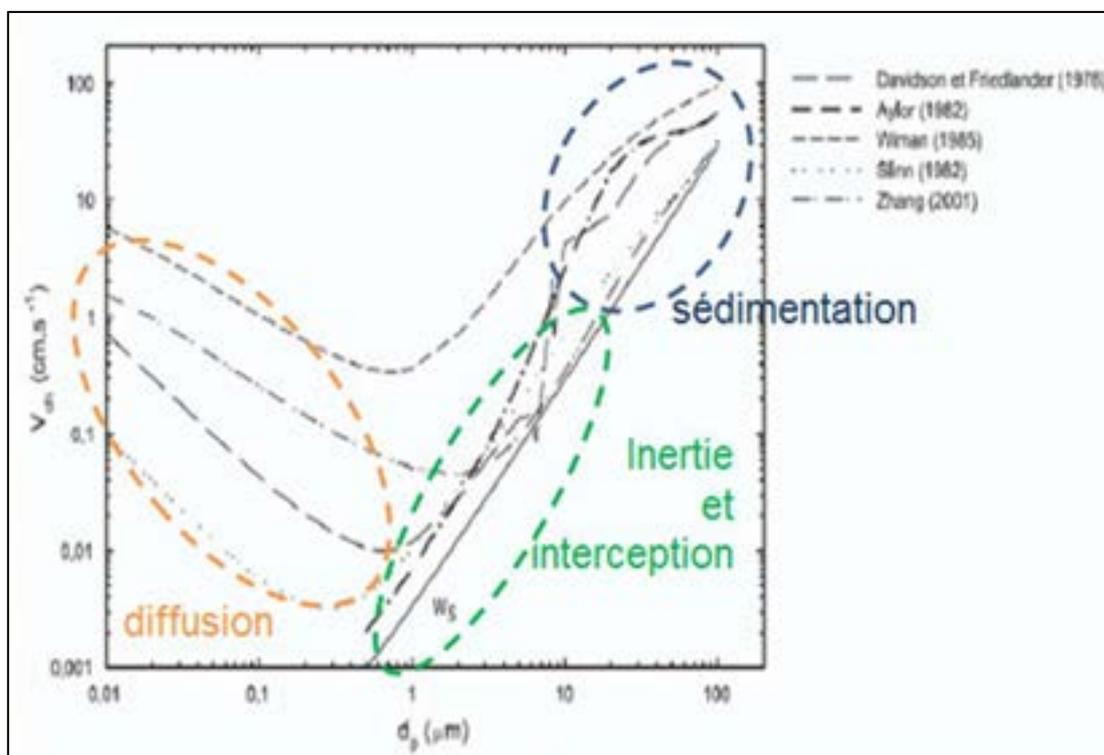


Figure 229 : Dépôts secs : vitesse en fonction de la taille des particules pour cinq cas sur un champ d'avoine (Petroff 2005)

3.6.5. Dépôts atmosphériques et particules en suspension : conclusion

Ces différents rappels permettent de conclure sur les dépôts secs et humides dans le cas des carrières :

- ils sont constitués de particules de **taille étendue** – de 0,1 à 250 μm –
- leur **masse est dictée par celle des particules de plus de 10 μm** , les plus concernées par les phénomènes de sédimentation;
- des **corrélations entre dépôts et particules en suspension existent pour les PM10** ; ces dernières, représentatives des émissions de carrières, sont **co-émises** avec toutes les autres par les différentes sources ; ces corrélations sont clairement liées à la configuration de chaque site ; le suivi des poussières sédimentables peut ainsi être utilisé comme indicateur de tendance des PM10 des carrières;
- Il n'y a **pas de corrélations entre dépôts et PM2,5** car leurs proportions sont très faibles dans les émissions de carrières et que, même présentes dans les dépôts, leur masse est non significative par rapport à la masse globale;
- la **mobilisation des poussières sédimentables peut remettre en suspension des fractions comme les PM10 et les PM2,5**.

Par ailleurs, les mécanismes qui décrivent les comportements de particules sont importants à connaître pour mettre en œuvre et perfectionner les techniques de prévention et de réduction des émissions : développer les contacts particules/gouttes d'eau, augmenter l'attraction des gouttes d'eau/particules, renforcer les caractéristiques des médias filtrants par rapport à des tailles de particules, utiliser des systèmes de piégeages électrostatiques comme c'est déjà le cas sur les émissions de cheminées industrielles, etc.

Ces conclusions sur les particules en suspension et les phénomènes de dépôts permettent de **synthétiser la problématique des TSP en carrières** ainsi (hors phénomènes météorologiques):

- pour les particules de **taille supérieure à 10 μm** les phénomènes de sédimentation sont dominants : les particules sédimentent sur de courtes distances ;

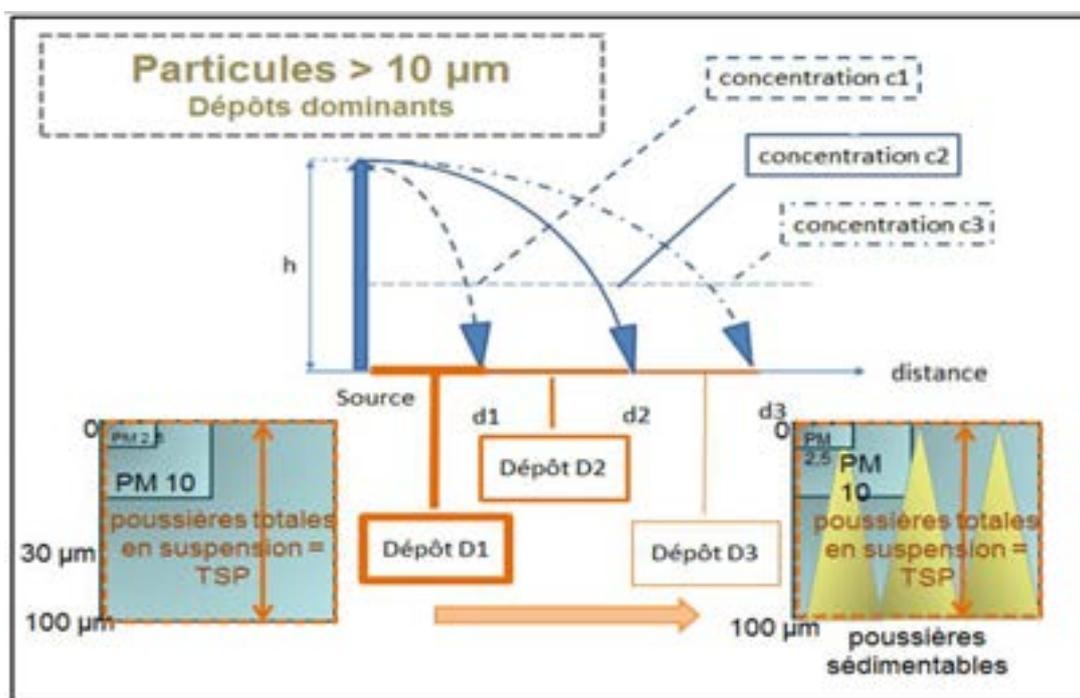


Figure 230 : Schéma de la problématique des TSP en carrières = cas des particules de taille supérieure à 10 μm

- pour les particules de **taille inférieure à 10 μm** , le phénomène de sédimentation est de moins en moins dominant ; les granulométries des dépôts montrent des particules inférieures à 10 μm , mais d'autres restent en suspension ;

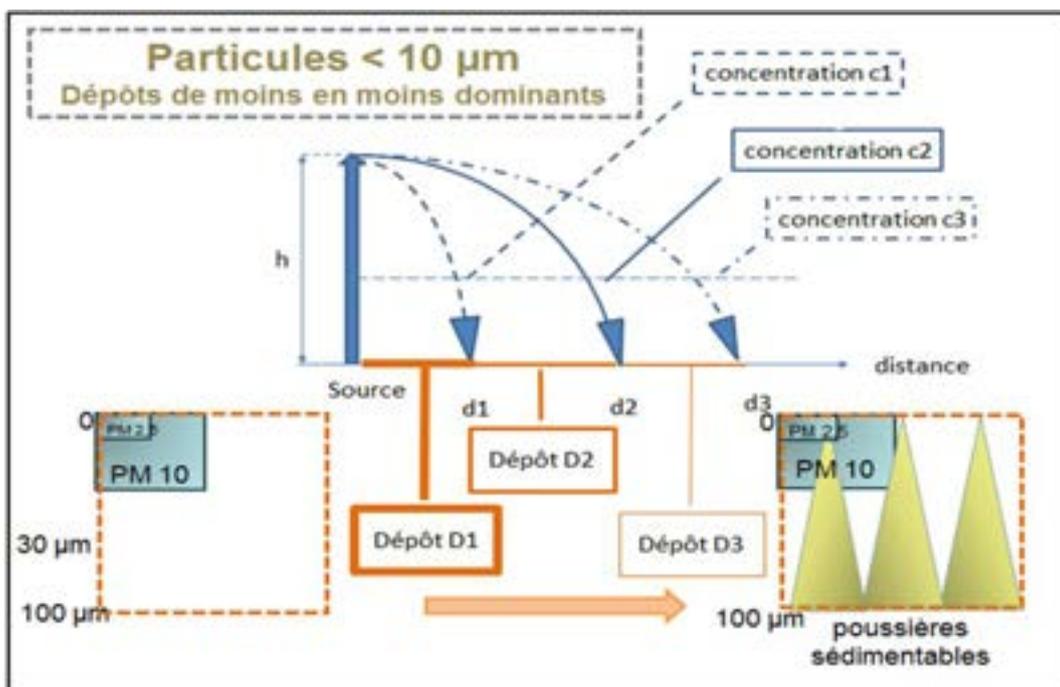


Figure 231 : Schéma de la problématique des TSP en carrières = cas des particules de taille inférieure à 10 µm

3.7. Facteurs d'émission

3.7.1. Inventaire national des émissions atmosphériques

Un **inventaire d'émission** est une représentation qualitative et quantitative des rejets d'une ou de plusieurs substances (gaz à effet de serre, polluants atmosphériques) provenant d'un ensemble de sources émettrices anthropiques ou naturelles répondant à des critères précis. Un inventaire est un indicateur de pression sur l'environnement. Les données d'émission du CITEPA sont annuelles et non ventilées dans le temps, le CITEPA estime les émissions et non les concentrations.

Les émissions correspondent aux quantités de polluants directement rejetées dans l'atmosphère par les activités humaines dans les différents secteurs économiques ou par des sources naturelles. Même si la qualité de l'air [c'est-à-dire les concentrations] dépend des émissions, il n'y a pas de lien simple et direct entre les deux. La qualité de l'air résulte de l'interaction complexe entre la quantité de polluants émise et toute une série de phénomènes physico-chimiques. Ainsi, une fois ces polluants dans l'atmosphère, différents paramètres, notamment météorologiques, entrent en jeu et agissent sur les concentrations de ces polluants : transport et dispersion par le vent et la pluie, dépôt ou réactions chimiques des polluants entre eux (formation notamment de particules secondaires) ou sous l'action des rayons du soleil, topographie, remise en suspension de particules déjà émises, etc. Ainsi, il n'y a pas de corrélation linéaire entre les quantités de polluants émises et les niveaux de concentrations de ces polluants dans l'air ambiant. L'inventaire national est mis à jour annuellement et les méthodes de calcul utilisées dans le cadre de son estimation peuvent être mises à jour à cette occasion. Pour le secteur des carrières, une révision en profondeur de la méthode a eu lieu en 2012 grâce à une collaboration entre le CITEPA et la profession.

La méthodologie AP-42 développée par l'US-EPA (Environmental Protection Agency) a été appliquée pour cette révision. Afin d'estimer les émissions des carrières, une schématisation de l'activité extractive a été réalisée avec la description de 5 postes :

- le forage/minage,
- l'installation de traitement,
- le transport interne,
- la manutention des stocks,
- l'érosion éolienne des stocks.

La méthode a été adaptée au cas français en intégrant un ensemble de paramètres qui influent sur les émissions (conditions climatiques locales, volumes de production, moyens mis en œuvre pour la réduction des émissions, etc.) d'après les statistiques transmises par l'UNICEM sur la base d'un échantillon représentatif des différents types d'exploitation françaises.



Toutes les émissions de ces 5 postes sont estimées à la sortie des différentes sources (postes d'activité) de la carrière sans se soucier des phénomènes de retombées des poussières suite à l'émission. Il est donc à noter que lorsque l'on se place à l'extérieur du périmètre de la carrière, une partie des émissions estimées est retombée dans l'enceinte de la carrière.

Selon l'inventaire national des émissions atmosphériques réalisés par le CITEPA pour l'année 2016 (édition 2017), les facteurs d'émission nationaux pour le secteur des carrières (SNAP 040623) sont présentés par polluant (TSP, PM10 et PM2.5) et type de roche dans le tableau suivant.

Type de roches	Facteur d'émission (en g/t de granulats produits)		
	TSP	PM10	PM2.5
Roches massives	178,81	55,24	6,70
Granulométrie	100%	31%	4%
Roches meubles	11,33	3,27	0,37
Granulométrie	100%	29%	3%
Recyclage	43,69	16,02	2,24
Granulométrie	100%	37%	5%

Tableau 67 : Facteurs d'émission mis en œuvre dans le cadre de l'inventaire national des émissions atmosphériques réalisé annuellement par le CITEPA (édition 2017)

Les émissions nationales liées aux carrières en 2016 (édition 2017) issues de l'inventaire national des émissions atmosphériques réalisé annuellement par le CITEPA sont présentées dans le tableau suivant :

	TSP	PM10	PM2.5
Emissions nationales des carrières (toutes roches confondues) en t / (SNAP 040623)	23 202	7 214	880
% du total des émissions nationales	2,7%	2,8%	0,5%
Facteur d'émission moyen en 2016 g/t de granulats produits	104,22	32,40	3,95

Tableau 68 : Émissions nationales en TSP, PM10 et PM2.5 liées à l'activité des carrières estimées dans l'inventaire national des émissions atmosphériques réalisé annuellement par le CITEPA (édition 2017)

Il convient de noter que le facteur d'émission national est adapté à l'échelle nationale uniquement et ne peut être représentatif à une autre échelle (à l'échelle d'une carrière notamment).

3.7.2. Outil d'aide à la déclaration des émissions–GEREP

L'outil GEREP développé par le CITEPA en collaboration avec l'UNICEM et l'ATILH a pour vocation l'estimation du potentiel de production d'émissions de TSP et de PM10 au niveau d'une carrière. Il a été développé dans le cadre de la déclaration annuelle des émissions polluantes sur le portail GEREP suivant les exigences réglementaires de l'Arrêté du 31 janvier 2008 modifié relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions et de transferts de polluants et des déchets.

L'arrêté du 31 janvier 2008 modifié fixe des seuils de déclaration en termes de rejet dans l'air pour les PM10 et les poussières totales (respectivement 50 000 kg/an et 100 000 kg/an). Les émissions de PM2.5 n'ont pas été intégrées dans l'outil car elles n'ont pas de seuil associé dans l'Arrêté du 31 janvier 2018 modifié.

L'outil est conçu suivant la même logique que le facteur d'émission national, la méthodologie d'estimation des émissions de TSP et PM10 est basée sur l'AP-42 (US-EPA) et l'activité extractive est schématisée selon les 5 postes d'émissions retenus :

- le forage/minage,



- l'installation de traitement,
- le transport interne,
- la manipulation des stocks,
- l'érosion éolienne des stocks.

Les facteurs d'émission déduits de l'outil GEREP intègrent de nombreux paramètres spécifiques à chaque carrière comme :

- le type de roche extraite,
- le type d'extraction (hors d'eau ou en eau),
- les conditions climatiques (le nombre de jours de pluie ou de neige, le nombre de jours où le vent dépasse la vitesse de 16 m/s, la vitesse moyenne du vent),
- les techniques d'abattement mises en place sur le site (arrosage, bardage au niveau de l'installation de traitement, filtre à manche, électrofiltre, lavage, etc.)
- la configuration du site (distances à parcourir entre le gisement et l'installation de traitement, proportion de route revêtue, les conditions de stockage, le type de matériaux stockés à l'extérieur (sans protection ou partiellement protégés, etc.)

Comme pour le calcul de l'inventaire national, chacune des différentes émissions identifiées de ces 5 postes est estimée à la sortie directe de la source. Cela donne donc les émissions générées par les activités de la carrière sans s'intéresser au bilan à la frontière de la carrière, en tenant compte des retombées des poussières qui se font à l'intérieur du périmètre.

Une synthèse des facteurs d'émission et les émissions annuels (2015 ou 2016) par poste pour chaque carrière est présentée dans les paragraphes suivants pour les TSP et les PM10.

3.7.2.1. Carrière A – Bassin de Marquise (Région Hauts-de-France) - profil annuel du potentiel d'émissions de poussières

D'après le remplissage de l'outil GEREP (v.5.0) par l'exploitant de carrière, pour l'année 2015, les principaux résultats en termes d'émissions sont les suivants :

Région Hauts-de-France Carrière A	TSP		PM10	
	Facteurs d'émission	Potentiel d'émissions annuelles (t/an)	Facteur d'émission	Potentiel d'émissions annuelles (t/an)
Forage/minage	0,8 g/tonne extraite	1,9	0,4 g/tonne extraite	1,0
Installations de traitement (concassage, criblage, transfert)	146,0 g/tonne traitée	372,9	51,8 g/tonne traitée	134,5
Transport interne	13,7 g/tonne extraite et transportée	27,4	2,8 g/tonne extraite et transportée	5,6
Gestion des stocks	4,2 g/tonne stockée	39,8	6,5 g/tonne stockée	18,8
Erosion des stocks	41,5 g/tonne stockée	0,6	20,7 g/tonne stockée	0,3
Facteur d'émission moyen /Total des émissions	162,4 g/tonne produite	408,9	57,4 g/tonne produite	144,5

Tableau 69 : Facteurs d'émission et potentiel émissions de TSP et PM10 estimés avec l'outil GEREP v.5.0 - carrière A du bassin de Marquise dans la région Hauts-de-France

La répartition des différentes sources d'émission sont représentées graphiquement dans les figures suivantes.



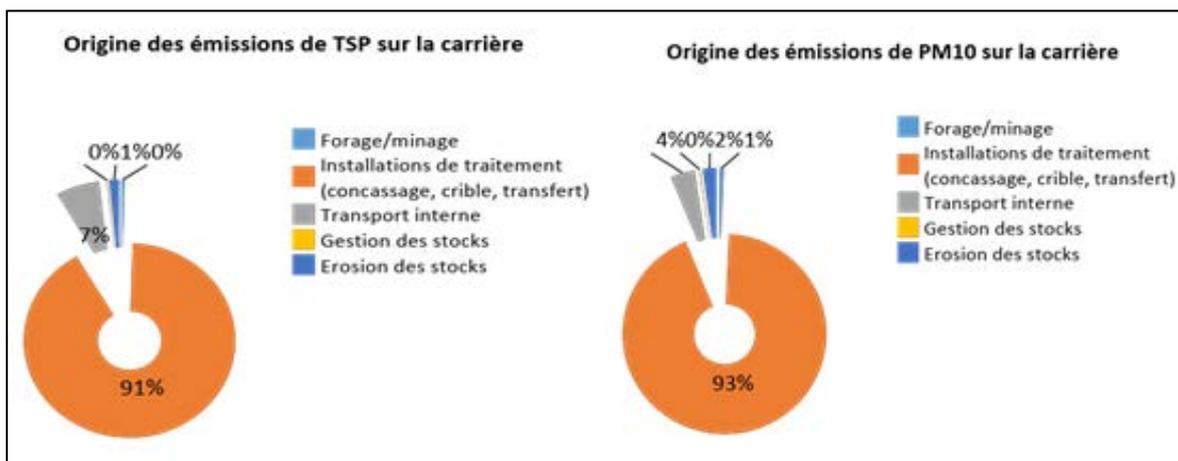


Figure 232 : Répartition du potentiel des émissions de TSP et PM10 par source d'émission (outil GEREPE v.5.0) – carrière A du bassin de Marquise dans la région Hauts-de-France

Il convient de noter qu'avec les systèmes d'abattement mis en place sur la carrière, les émissions évitées annuellement sont estimées à 298,5 t et 98,6 t respectivement pour les TSP et les PM10.

3.7.2.2. Carrière B – Bassin de Marquise (Région Hauts-de-France) - profil annuel du potentiel d'émissions de poussières

D'après le remplissage de l'outil GEREPE (v.5.0) par l'exploitant de carrière, pour l'année 2015, les principaux résultats en termes de potentiel d'émissions sont les suivants :

Région Hauts-de-France Carrière B	TSP		PM10	
	Facteurs d'émission	Potentiel d'émissions annuelles (t/an)	Facteur d'émission	Potentiel d'émissions annuelles (t/an)
Forage/minage	0,5 g/tonne extraite	3,3	0,3 g/tonne extraite	1,7
Installations de traitement (concassage, criblage, transfert)	62,6g /tonne traitée	164,5	23,7g/tonne traitée	64,1
Transport interne	13,8 g/tonne extraite et transportée	75,5	2,8 g/tonne extraite et transportée	15,4
Gestion des stocks	13,8 g/tonne stockée	39,8	6,5 g/tonne stockée	18,8
Erosion des stocks	39,7g/tonne stockée	114,3	19,9 g/tonne stockée	57,2
Facteur d'émission moyen/Total des émissions	137,3 g/tonne produite	397,4	54,4 g/tonne produite	156,6

Tableau 70 : Facteurs d'émission et émissions de TSP et PM10 estimés avec l'outil GEREPE v.5.0 - carrière B du bassin de Marquise dans la région Hauts-de-France



La répartition des différentes sources du potentiel d'émission sont représentées graphiquement dans les figures suivantes.

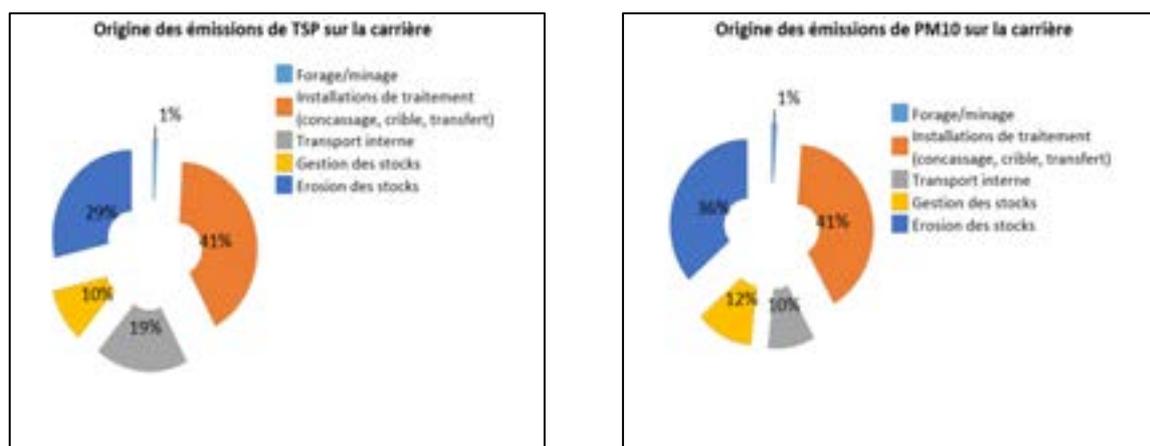


Figure 233 : Répartition du potentiel d'émissions de TSP et PM10 par source d'émission (outil GEREP v.5.0) – carrière B du bassin de Marquise dans la région Hauts-de-France

Il convient de noter qu'avec les systèmes d'abattement mis en place sur la carrière, les émissions évitées annuellement sont estimées à 411,7 t et 135,0 t respectivement pour les TSP et les PM10.

On remarque qu'avec des niveaux de production sensiblement différents, les carrières A et B présentent des facteurs d'émission proches notamment en ce qui concerne les PM10. Par contre, chaque exploitation révèle des disparités notamment par les installations de traitement et la disposition des stocks, disparités qui apparaissent pour des valeurs très différentes dans l'outil GEREP.

3.7.2.3. Carrière E (Région Pays de la Loire) – profil annuel du potentiel d'émissions de poussières

D'après le remplissage de l'outil GEREP (v.5.0) par l'exploitant de carrière, pour l'année 2016, les principaux résultats en termes d'émissions sont les suivants :

Région Pays de La Loire Carrière E	TSP		PM10	
	Facteurs d'émission	Potentiel d'émissions annuelles (t/an)	Facteurs d'émission	Potentiel d'émissions annuelles (t/an)
Forage/minage	1,2 g/tonne extraite	0,9	0,6 g/tonne extraite	0,5
Installations de traitement (concassage, criblage, transfert)	39,9 g/tonne traitée	30,5	14,9 g/tonne traitée	11,4
Transport interne	30,7 g/tonne extraite et transportée	21,3	6,3 g/tonne extraite et transportée	4,4
Gestion des stocks	5,0 g/tonne stockée	1,9	2,3 g/tonne stockée	0,9
Erosion des stocks	46,9 g/tonne stockée	18,1	23,4 g/tonne stockée	9,1
Facteur d'émission moyen/Total des émissions	95,0 g/tonne produite	72,7	34,4 g/tonne produite	26,3

Tableau 71 : Facteurs d'émission et émissions de TSP et PM10 estimés avec l'outil GEREP v.5.0 - carrière E dans la région Pays de la Loire

La répartition des différentes sources d'émission sont représentées graphiquement dans les figures suivantes :

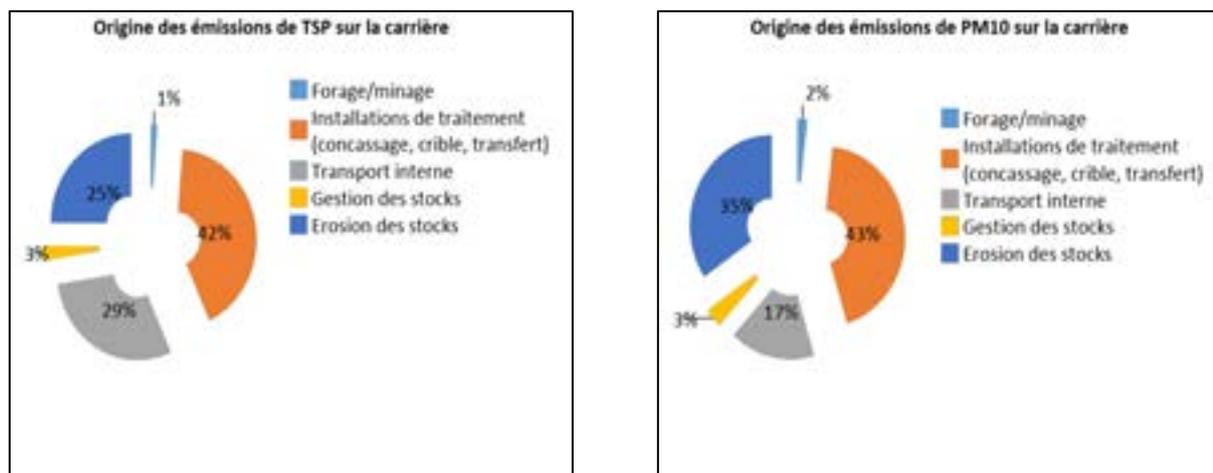


Figure 234 : Répartition du potentiel des émissions de TSP et PM10 par source d'émission (outil GEREPE v.5.0) – carrière E dans la région Pays de la Loire

Il convient de noter qu'avec les systèmes d'abattement mis en place sur la carrière, les émissions évitées annuellement sont estimées à 167,2 t et 52,6 t respectivement pour les TSP et les PM10.

3.7.2.4. Carrière H (Région Bretagne) - profil annuel du potentiel d'émissions de poussières

D'après le remplissage de l'outil GEREPE (v.5.0) par l'exploitant de carrière, pour l'année 2016, les principaux résultats en termes de potentiel d'émissions sont les suivants :

Région Bretagne Carrière H	TSP		PM10	
	Facteurs d'émission	Potentiel d'émissions annuelles (t/an)	Facteurs d'émission	Potentiel d'émissions annuelles (t/an)
Forage/minage	1,9 g/tonne extraite	0,7	0,6 g/tonne extraite	0,3
Installations de traitement (concassage, criblage, transfert)	6,7 g/tonne traitée	2,3	14,9 g/tonne traitée	1,2
Transport interne	9,5 g/tonne extraite et transportée	3,3	6,3 g/tonne extraite et transportée	0,7
Gestion des stocks	3,4 g/tonne stockée	0,1	2,3g/tonne stockée	0,1
Erosion des stocks	19,7g/tonne stockée	0,6	23,4 g/tonne stockée	0,3
Facteur d'émission moyen/Total des émissions	20,0 g/tonne produite	7,0	7,4 g/tonne produite	2,6

Tableau 72 : Facteurs d'émission et émissions de TSP et PM10 estimés avec l'outil GEREPE v.5.0 - carrière H dans la région Bretagne



La répartition des différentes sources d'émission sont représentées graphiquement dans les figures suivantes.

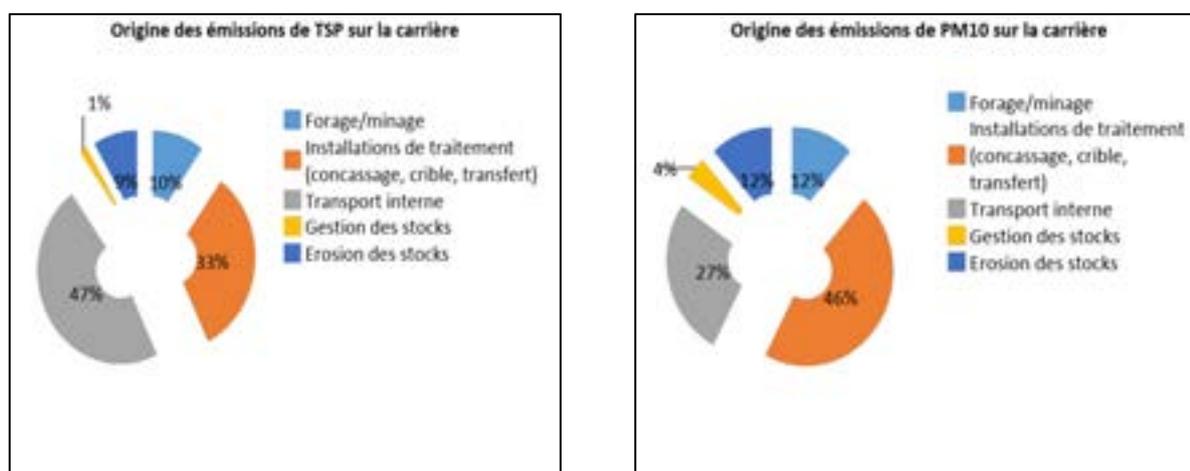


Figure 235 : Répartition du potentiel des émissions de TSP et PM10 par source d'émission (outil GEREP v.5.0) – carrière H dans la région Bretagne

Il convient de noter qu'avec les systèmes d'abattement mis en place sur la carrière, les émissions évitées annuellement sont estimées à 52,0 t et 18,6 t respectivement pour les TSP et les PM10.

Les résultats observés au niveau de chaque carrière, et notamment les FE moyens TSP et PM10 de chaque carrière, confirment bien des **situations très variables entre les carrières et la nécessité de réaliser cet exercice d'estimation avec l'outil au niveau de chaque site** et non pas d'appliquer les facteurs d'émission nationaux.

3.7.3. L'apport des connaissances EMCAIR dans l'amélioration des facteurs d'émission

3.7.3.1. Mesures des concentrations dans l'air ambiant réalisé par les AASQAs

Le protocole de mesures mis en place pour EMCAIR et réalisé par les AASQAs permet d'estimer les impacts sur la qualité de l'air à l'échelle d'une carrière entière. Les résultats obtenus et les analyses chimiques réalisées montrent que, pour un point de mesure unique dans la carrière, le nombre de paramètres sur le site influençant les concentrations mesurées est trop important. En effet, pouvoir relier une variation de concentration à une activité précise sur la carrière et donc à une source d'émission demande une organisation de mesure beaucoup plus fine de façon à enregistrer spécifiquement chaque catégorie de paramètres (conditions climatiques, activités de chaque source, ...). Dans ce contexte, l'ajustement des facteurs d'émission tels qu'ils sont définis dans la méthode d'inventaire national ou dans l'outil GEREP n'a pas été possible à partir des mesures réalisées. En effet, les facteurs d'émission sont liés à une source précise d'émission (forage, concasseur, stockage, transport, etc.) qui n'a généralement pas été identifiable parmi les séries de mesures de concentrations réalisées, puisque l'approche EMCAIR était à l'échelle plus large du contexte de la carrière.

Les mesures réalisées ont permis d'aboutir à de nombreuses autres conclusions mais dans le cadre de l'amélioration des facteurs d'émission, cette expérience a montré qu'il faudrait déterminer un protocole de mesures différent et très spécifique. En effet, **un protocole de mesures qui serait non plus à l'échelle d'une carrière entière mais au niveau d'une source d'émission localisée** (exemple : un stock non protégé) permettrait d'affiner un facteur d'émission. Le plan expérimental devrait aussi considérer des mesures avec ou sans abattement (exemple : arrosage du stock ou non). Des mesures des concentrations en TSP, PM10 et PM2.5, à partir de plusieurs points proches de la source d'émission et sur une période de mesure suffisamment longue pour être représentative, pourraient permettre la déduction d'un facteur d'émission/d'abattement en s'exonérant d'autres variables influençant les concentrations mesurées.

Le test des micro-capteurs comportait des plans d'expérience suivant les principes exposés plus haut pour enregistrer spécifiquement les concentrations à différentes distances de certaines de ces



sources comme les pistes et les stocks aériens. Malheureusement les incidents techniques et le manque de fiabilité dans les enregistrements obtenus ont conduits à renoncer à exploiter les données pour cette partie du programme.

3.7.3.2. Modélisation de dispersion des émissions de PM10

Une modélisation de dispersion des émissions de PM10 des carrières du bassin de Marquises a été réalisée par ATMO Hauts-de-France à partir des émissions de PM10 estimés par l'outil GEREP et des données d'inventaire régional pour les sources d'émission hors carrières. Selon les conclusions apportées par ATMO Hauts-de-France, la modélisation de dispersion sur la base de ces données a permis de retrouver des concentrations en PM10 sur le site de la carrière du même ordre de grandeur que celles mesurées sur le terrain. Cet exercice semble donc **confirmer la pertinence des facteurs d'émission de PM10** proposés par l'outil GEREP.

Il est à noter que ces résultats sont basés sur une unique modélisation et que les données d'entrée ont été détaillées sur la base des facteurs d'émission en rassemblant forage-minage et transport interne pour constituer une unité géographique « extraction », les autres unités étant les installations de traitement et les stocks.

Enfin, des améliorations seraient à intégrer pour de prochains exercices de modélisation autour d'une carrière ou plus détaillé au sein même d'une carrière pour calculer par exemple un bilan d'émission en périphérie ou procéder à une modélisation inverse afin de mieux recouper certaines hypothèses. Ainsi, la **nature particulaire** du polluant spécifique à l'activité des carrières et sa sédimentation sous forme de dépôts secs et humides pourraient être mieux pris en compte. En effet, comme il est précisé dans les hypothèses de départ (tableau des paramètres ADMS §3.2.1), cette option n'avait pas été retenue faute de connaissance sur ce sujet. Or, les analyses des suivis réalisés sur les différents sites au cours du programme EMCAIR soulignent dans leurs conclusions cette particularité des carrières à la fois sources et puits pour les particules. Cette prise en compte aura d'autant plus d'impact si la modélisation s'étend sur la gamme des particules grossières qu'émet une carrière.

3.7.3.3. Comparaison des granulométries mesurées et celles issues de l'AP-42

Les facteurs d'émission de l'inventaire national des émissions atmosphériques réalisé par le CITEPA (édition 2017), présentés dans le tableau 3.8.1, intègrent les granulométries disponibles dans l'AP-42 pour les différentes sources d'émission. Des ratios PM_{2,5}/PM₁₀ moyens peuvent être déduits par type de roche, ils sont présentés dans le tableau suivant.

Typologie de granulats	Ratios PM _{2,5} /PM ₁₀
Roches massives	12,1%
Roches meubles	11,2%
Recyclage	14,0%

Tableau 73 : Ratios PM_{2,5}/PM₁₀ moyens utilisés dans l'inventaire national des émissions réalisé par le CITEPA (édition 2017), issues des granulométries par source d'émission disponible dans l'AP-42



Des ratios PM2.5/PM10 représentatifs des émissions de carrières ont été estimés à partir des mesures et analyses chimiques. Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant.

Synthèse des résultats obtenus au cours des campagnes EMCAIR	Ratios PM _{2,5} /PM ₁₀
A partir des mesures des concentrations en PM10 et PM2.5 et des analyses chimiques	
Roches massives – bassin de Marquise (ATMO Hauts-de-France)	7 – 17%
A partir des mesures des concentrations en PM10 et PM2.5	
Roches massives – carrière E (Air Pays de la Loire)	0 – 20%
Roches massives – carrière F (Air Breizh)	17% – 25%

Tableau 74 : Ratios PM2,5/PM10 estimés à partir des mesures réalisées au cours des campagnes EMCAIR

Ce ratio PM2,5/PM10 moyen pour les roches massives estimé à 12,1% utilisé dans le cadre de l'inventaire et de l'outil GEREP est en cohérence avec les résultats obtenus dans les régions Hauts-de-France et Pays de la Loire. Concernant la carrière H (région Bretagne), la valeur moyenne est légèrement supérieure mais demeure du même ordre de grandeur que le ratio moyen utilisé par le CITEPA.

Les résultats obtenus à partir des mesures ne contredisent pas la valeur actuellement utilisée dans l'inventaire national ou l'outil GEREP mais la dispersion des résultats (0% à 25% d'après le tableau ci-dessus) ne permet pas non plus de réviser ce ratio PM2,5/PM10. Cette révision est d'autant moins envisageable que, comme précédemment, les mesures réalisées concernent l'ensemble de la carrière alors que les **facteurs d'émission se réfèrent à des postes précis de la carrière** où le ratio PM2,5/PM10 peut être significativement différent d'un poste à l'autre. Enfin, rappelons les observations des AASQAs – Pays de la Loire et Bretagne notamment- qui ont mis en évidence les variations de ce ratio en fonction des épisodes d'émissions analysés : cette proportion semble variable en fonction de la nature des sources, ce qui souligne qu'une valeur moyenne est encore difficile à préciser.

3.7.3.4. Pistes d'amélioration des connaissances des émissions

Au cours du déroulé des campagnes EMCAIR et surtout lors des réunions entre experts et exploitants, de nombreuses questions autour de l'estimation du potentiel d'émission de particules et de leur représentativité se sont posées. De plus, le fait de s'intéresser à la fois aux émissions dans l'air et aux dépôts atmosphériques, en cherchant à recouper les suivis par la chimie et par la granulométrie, a permis de mieux cerner une spécificité des carrières, à la fois site émetteur et site de capture pour une grande partie des particules produites au cours des différentes phases d'exploitation. Ainsi plusieurs domaines ont été explorés et méritent d'être approfondis à l'avenir

Poussières TSP :

L'ensemble des particules en suspension, quelle que soit leur taille, est appelé TSP pour Total Suspended Particulates (l'acronyme français (PTS = Poussières Totales en Suspension) est peu utilisé). Les facteurs d'émission correspondent à cette définition théorique qui en pratique est difficile à calculer car il n'existe pas d'appareil capable de mesurer directement toutes les particules sur une gamme de taille aussi large. De fait, les valeurs de TSP correspondent généralement à une mesure de PM100 comme montre l'exemple tiré de l'AP42 de l'US-EPA qui sert de base aux estimations des émissions en carrières.



Source ^b	Total Particulate Matter ^{c,d}	EMISSION FACTOR RATING	Total PM-10	EMISSION FACTOR RATING	Total PM-2.5	EMISSION FACTOR RATING
Primary Crushing (SCC 3-05-020-01)	ND		ND ^e		ND ^e	
Primary Crushing (controlled) (SCC 3-05-020-01)	ND		ND ^e		ND ^e	
Secondary Crushing (SCC 3-05-020-02)	ND		ND ^e		ND ^e	
Secondary Crushing (controlled) (SCC 3-05-020-02)	ND		ND ^e		ND ^e	
Tertiary Crushing (SCC 3-050030-03)	0.0054 ^d	E	0.0024 ^g	C	ND ^e	
Tertiary Crushing (controlled) (SCC 3-05-020-03)	0.0012 ^d	E	0.00054 ^g	C	0.00010 ^h	E
Fines Crushing (SCC 3-05-020-05)	0.0390 ^d	E	0.0150 ^g	E	ND	
Fines Crushing (controlled) (SCC 3-05-020-05)	0.0030 ^d	E	0.0012 ^g	E	0.000070 ^h	E
Screening (SCC 3-05-020-02, 03)	0.025 ^c	E	0.0087 ⁱ	C	ND	
Screening (controlled) (SCC 3-05-020-02, 03)	0.0022 ^d	E	0.00074 ^h	C	0.000050 ^h	E
Fines Screening (SCC 3-05-020-21)	0.30 ^d	E	0.072 ^d	E	ND	
Fines Screening (controlled) (SCC 3-05-020-21)	0.0036 ^d	E	0.0022 ^g	E	ND	
Conveyor Transfer Point (SCC 3-05-020-06)	0.0030 ^b	E	0.00110 ^b	D	ND	
Conveyor Transfer Point (controlled) (SCC 3-05-020-06)	0.00014 ^d	E	4.6 x 10 ^{-5k}	D	1.3 x 10 ^{-5k}	E

Tableau 75 : Facteurs d'émission pour les points de transfert (conveyeur) : PM2,5, PM10 et PM100 = TSP Extrait du chapitre « 11.19.2 Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing »

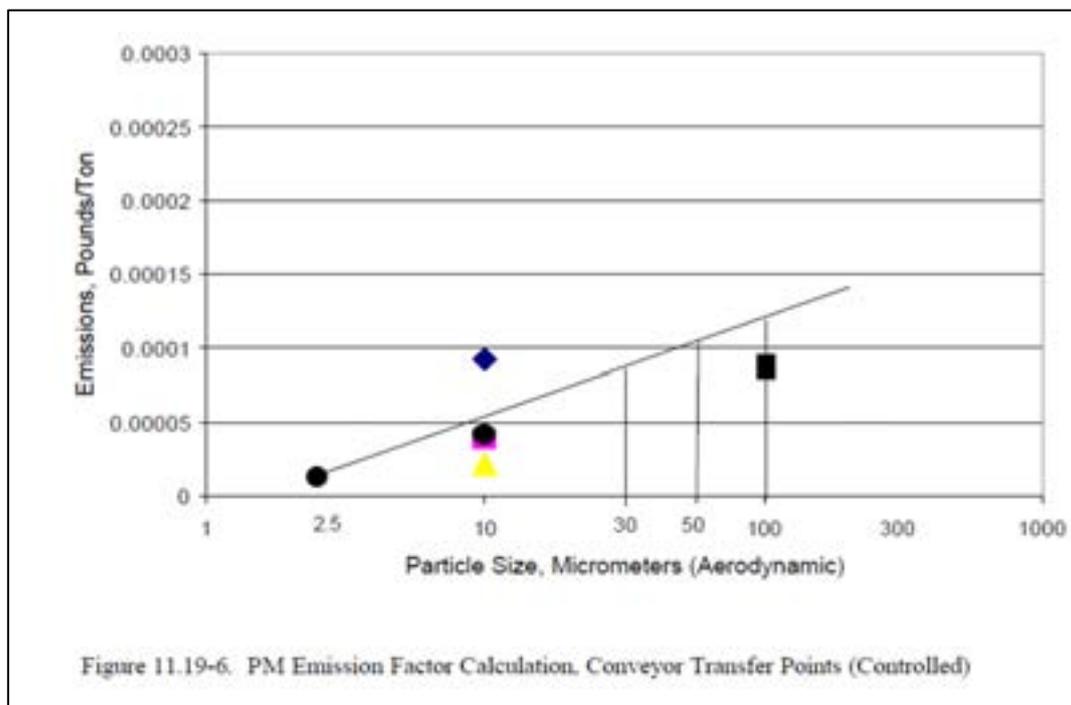


Figure 236 : Facteurs d'émission pour les points de transfert (conveyeur) : PM2,5, PM10 et PM100 = TSP Extrait du chapitre « 11.19.2 Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing »

Dans l'industrie extractive, les particules minérales émises présentent des densités élevées (2 à 4 pour les minéraux les plus répandus), ce qui implique en fait une sédimentation rapide peu après leur émission dans l'air.

Dans le cadre d'EMCAIR, une estimation des proportions des PM10 et PM2,5 par rapport aux TSP avait été imaginée en analysant ces trois fractions sur préleveur DEKATI. Ce préleveur a un débit constant de 30L/min (ou 10L/min suivant les modèles) sur une période de 7 jours (en parallèle des prélèvements PARTISOL). Cependant, la fraction TSP n'est pas collectée de façon quantitative et cette approche a eu surtout pour résultat de collecter la fraction PM2.5-10 sans interférence d'aérosols de plus grosse taille. L'interprétation des proportions des données TSP n'a donc pas pu être faite par mesure directe.

Fragmentation et énergie en carrière :

Une carrière est par définition un lieu de production de grains de nature minérale par fragmentation pour en valoriser les différentes familles : sables, gravillons, etc. avec deux extrêmes en taille : les enrochements et les fillers (grains inférieurs à 100 µm). Les particules dans l'air font partie de ces fragments de matières produits qui s'échappent le plus souvent au cours des processus. Quelques fois, la production de fines est valorisée. Dans tous les cas, les poussières – particules en suspension, dépôts - constituent une nuisance pour le personnel, pour les riverains et pour l'environnement.

En carrières, les étapes de la fragmentation sont bien connues et peuvent être associées à des paramètres dont l'exploitant dispose :

a)- Foration et tirs de mines :

- La foration produit sa part de poussières par action de l'outil sur la roche en réalisant le trou de mine au diamètre prévu pour le chargement de l'explosif. La quantité de matière correspondant à ce volume est donc la première source qui va alimenter les émissions de poussières. Les débris de roches arrachés (cuttings) par l'outil remontent à la surface par circulation d'air. Par exemple, des mesures réalisées sur ce poste en Finlande (Oudwater, 2017) ont montré que les concentrations pouvaient être divisées par un facteur 12 en passant de 5 à 50 mètres. Cet air est aujourd'hui dépoussiéré (obligation réglementaire de l'arrêté du 22 septembre 1994 modifié) et les poussières sont redéposées en tas le plus souvent sur le terrain qui va être abattu. Les émissions de poussières de la foration sont donc directement liées au diamètre, profondeur et nombre de trous ; les facteurs d'abattement seront déterminés par les performances des équipements liés à l'engin de foration.
- Le minage est la fragmentation assurée par l'explosif dont le type et la quantité sont déterminés en fonction de la nature de la roche, du gisement, et des paramètres d'exploitation (géométrie de la carrière, blocométrie, etc.). Il y a une relation entre les quantités d'explosifs mises en œuvre sur un tir et la dimension moyenne des fragments dans le volume de roches abattues par un tir de mines. Les émissions de particules dans l'air en font partie, sachant qu'en plus de la matière minérale, l'explosion libère des gaz ponctuellement. Des études existent sur ce sujet et notamment sur une meilleure compréhension de cette émission spécifique. Ces travaux n'ont pas encore été considérés dans les outils d'estimation des émissions d'une carrière et pourraient être étudiés afin de les améliorer (outil GEREP et inventaire national des émissions).
- Dans les étapes de traitement des matériaux, le concassage est essentiel puisque qu'il réalise, après la première étape du minage, la fragmentation qui conduira aux produits finis. La relation entre granulométrie et énergie nécessaire à la fragmentation a fait l'objet de recherches depuis de nombreuses années par la profession, notamment de manière empirique et scientifique en modélisant les lois de la mécanique des roches. Ces travaux sont toujours en cours mais il est à retenir que les conclusions et corrélations qui en seront tirées pourraient être d'une grande utilité dans l'amélioration des facteurs d'émission et donc dans l'amélioration de l'estimation des émissions de carrières au plan local (outil GEREP) ou national (inventaire national).



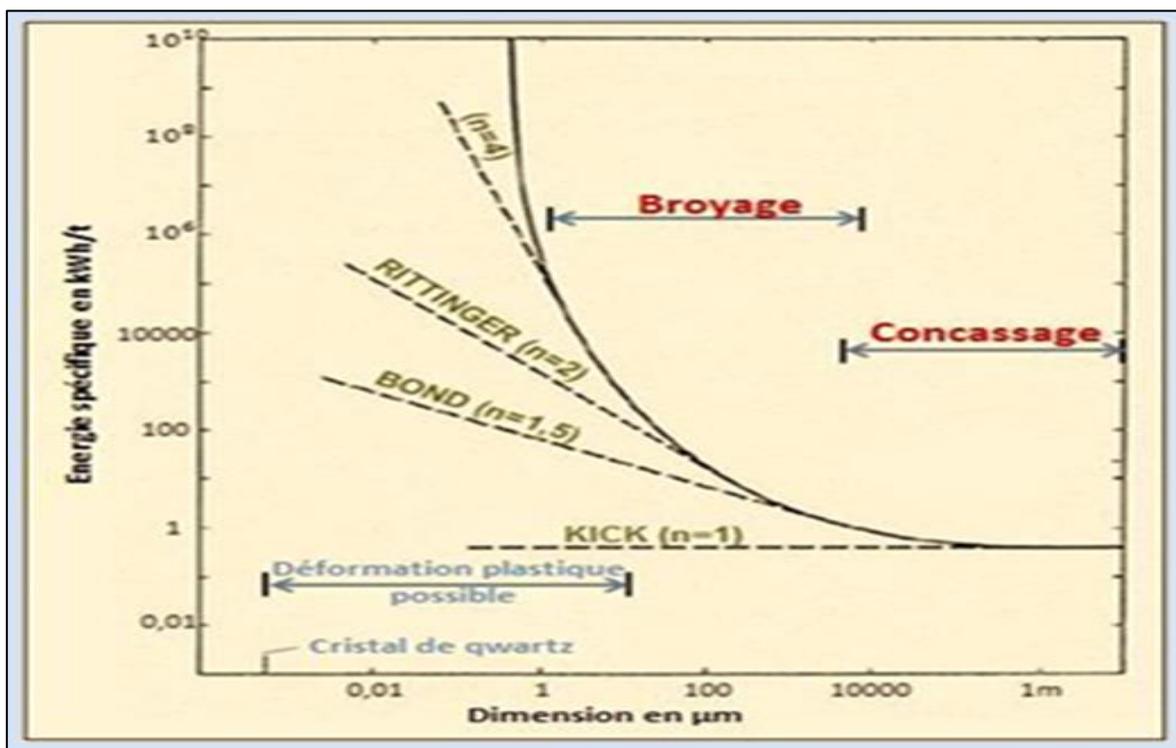


Figure 237 : relations entre énergie et dimension des particules d'après Charles Holmes (1957) et Hukki (1961)

Pour rappel (voir § 3.7.1), la méthode de l'inventaire national adoptée par le CITEPA pour les carrières avec 5 postes d'émissions ne comporte pas de recoupement du potentiel d'émissions avec les données d'exploitation (énergie consommée, masse d'explosifs mise en œuvre, quantité forée, etc.). Exemple : les émissions du concassage sont calculées sur les tonnages x FE du concassage avec des réductions suivant les équipements, la puissance consommée du concasseur pourrait être également intégrée.

Par ailleurs, remarquons qu'en dehors de la fragmentation, les autres étapes d'émission sont principalement de la dispersion (de ce qui a été fragmenté) doublée d'une attrition des grains, soit par des forces extérieures comme le roulage des engins sur une piste, soit par l'énergie potentielle comme la chute des matériaux en cas de mise en stock ou de vidage d'une trémie. Compte tenu de la diversité des fonctionnements sur les exploitations, des reprises de matériaux et mises en stocks, la question de possibles sur ou sous estimations par comptages multiples peut se poser. En effet, l'outil actuel d'estimation des émissions pour ces postes prend en compte des hypothèses moyennes censées être représentatives de l'ensemble des sites mais le fonctionnement spécifique de chaque site a une grande influence sur ce poste. Il pourrait être envisagé de détailler cette estimation notamment en demandant à l'exploitant de remplir des paramètres de fonctionnement supplémentaires (s'ils sont connus et suivis sur la carrière) afin d'améliorer la représentativité de ces émissions.

Prise en compte de la disposition des sources dans le volume d'une carrière :

Les différentes campagnes EMCAIR ont contribué à caractériser les émissions à l'intérieur des carrières en soulignant la multiplicité des sources et de leur comportement en fonction de leur localisation à l'intérieur de la carrière. La modélisation réalisée en Hauts de France sur le bassin de Marquise a souligné ce fait, même de façon schématique, en montant les sources les plus significatives à l'intérieur du périmètre de chaque carrière et en expliquant l'origine probable des concentrations les plus élevées (§3.2.3). Or, dans la méthode d'évaluation du potentiel des émissions mise au point par le CITEPA, l'inventaire des sources ne tient pas compte de leur localisation par rapport aux limites de la carrière, ni de leur côté altimétrique par rapport au sol ou par rapport à celle du périmètre. Le fait d'estimer ce potentiel sans intégrer la volumétrie des sources revient à toutes les considérer au même point, en résumant la carrière en ce seul point. Or le carrier a besoin également de mieux connaître les émissions de son activité à la frontière de son périmètre.



4. Synthèse générale et conclusions

4.1. Amélioration des connaissances

Le premier objectif d'EMCAIR était de mieux comprendre l'empreinte des carrières dans leur environnement par rapport à la qualité de l'air. Cette approche a été centrée sur l'environnement proche – appelé champ proche (400 à 2500 m) – et a permis suivant une même méthodologie répétée dans différentes régions, appliquée à différentes tailles de sites, différentes roches et différents moments de l'année de dégager des tendances caractéristiques de cette activité.

Ainsi, six mois de mesures ont été organisés par campagne unitaire d'un mois en essayant d'alterner périodes sèches et périodes humides de 2015 à 2017 autour de trois ensembles de carrières volontaires dans trois régions françaises. Le but était d'en cerner les caractéristiques par les suivis des particules en suspension (PM10 et PM2,5) et des dépôts atmosphériques en fonction des conditions météorologiques et d'exploitation des carrières concernées. La méthode consiste à enregistrer l'empreinte chimique de la carrière et d'en suivre l'influence en champ proche en disposant d'au moins un site de référence (hors influence de la carrière).

Le champ proche est naturellement fonction de la taille des carrières et de leur contexte respectif : 400 à 600 m pour une carrière isolée de 0,35 Mt de capacité annuelle (cas Bretagne – carrière H), 300 à 1500 mètres pour une carrière de 1 Mt de capacité annuelle avec deux autres carrières voisines (cas Pays de la Loire – carrière E), jusqu'à 2500 mètres autour de deux des quatre carrières du bassin de Marquise pour une capacité totale de plus de 10 Mt (cas Hauts de France – carrières A et B). Les stations ont été implantées en tenant compte des vents dominants afin que l'une soit en amont de la carrière et l'autre en aval. Cette diversité de situation et de conditions d'exposition aux facteurs climatiques locaux est complétée par une autre diversité, celle de la géologie des roches exploitées : grès quartzite (carrière H), gneiss (carrière E), calcaire (carrières A et B).

L'exploitation des données recueillies au cours des campagnes de mesures organisées permet de mieux comprendre les émissions de poussières en carrière et en champ proche par analyses et recoupements :

- des **concentrations** et des **granulométries** des particules émises en périodes mensuelles sur deux saisons contrastées (été/hiver);
- des **évolutions horaires/journalières** afin de caractériser les pics relevés et leurs impacts;
- de la **composition chimique** des particules par classe de taille afin de mieux quantifier l'empreinte de la carrière par les concentrations, en se référant à la composition des roches exploitées.

Les premières améliorations dans les connaissances commencent **par les carrières**. Certes le programme n'avait pas l'ambition de détailler les émissions poste par poste, mais le fait d'implanter systématiquement une station à l'intérieur du périmètre d'une carrière, donc nécessairement à proximité de certaines des sources d'un site a permis de mieux en caractériser les traits dans diverses conditions d'exploitation et de météorologie et ainsi de dégager les grandes tendances suivantes :

- les stations en carrières, enregistrent logiquement les plus forts taux de dépôts (sec/humide), ainsi que les plus fortes concentrations en PM; les profils de ces concentrations sont caractérisés par des pics journaliers corrélés à l'activité ; l'empreinte chimique de ces PM et des dépôts est bien celle de la roche exploitée; le fait que les carrières enregistrent les dépôts les plus importants, souligne qu'elles fonctionnent également comme « puits » des particules les plus grosses qu'elles produisent.
- les sources identifiées en carrière produisent majoritairement des PM10, peu de PM2,5 avec un ratio PM2,5/PM10 évoluant typiquement en dessous de 0,2 et ce quel que soit le type de roche exploitée.

En champs proches, les stations enregistrent :

- une influence des émissions de carrière très **limitée pour les dépôts atmosphériques, visible en concentrations de PM10** au moment de certains épisodes météorologiques, influence déterminable par la chimie ou par le rapport PM2,5/PM10;
- influence **non visible en concentrations de PM2,5**, uniquement « décelable par la chimie » des particules fines et sur des prélèvements intégrés sur une semaine;
- pour les **dépôts atmosphériques** (résultats des jauges « Owen »), la dispersion en champ proche reste limitée. La chimie souligne l'empreinte de la carrière par les marqueurs des



roches exploitées (Ca dans le Nord pour le calcaire, Fe/Al et Mg/Al dans l'Ouest pour le gneiss et le grès) tout en pointant d'autres influences (maritimes avec Na⁺ et Cl⁻ rencontrées sur le bassin de Marquise, agricoles dans les Pays de la Loire avec des éléments comme P);

- dans la **fraction PM10**, l'influence des carrières en champ proche est visible à la fois sur les mesures en ligne (quart horaire) et sur les mesures intégrées (hebdomadaires) de chimie indépendamment des saisons avec des contributions qui évoluent dans l'intervalle **+ 0,9 à 11,15 µg/m³** avec des pointes estivales liées aux envois pouvant en représenter des pics de concentration importants : + 57% sur une semaine;
- dans la **fraction PM2,5**, l'influence de la carrière sur les sites en champs proches n'est pas significative ; la mesure chimique intégrée sur la semaine permet de préciser qu'elle évolue en moyenne entre +0,14 et 1,48 µg/m³ avec des pics en période sèche comme ceux mesurés à 2,75 µg/m³ en été;
- comme attendu, la **composante minérale** des particules est dominante en carrière par rapport au fond rural ; elle est davantage marquée dans la fraction PM10 (jusqu'à 57% et notamment l'été) que dans la fraction PM2.5 (44% pointe estivale);
- Il convient de noter que par rapport aux critères de qualité de l'air, les mesures réalisées en champs proches et extrapolées sur une année entière ne montrent aucun dépassement de seuil réglementaire (en moyenne journalière ou en moyenne annuelle), ni en PM10, ni en P2,5.

Le dépouillement des enregistrements réalisés en carrière et leur interprétation en réunissant experts et exploitants a permis de relever la diversité des fonctionnements :

- les **situations de dilution** pour lesquelles les concentrations diminuent en s'éloignant des sources en fonctionnement, avec des masses d'air en mouvement qui ne laissent que les fractions les plus grossières des particules sédimenter;
- les **situations de confinement** pour lesquelles les concentrations augmentent lorsque les conditions sont favorables au blocage des masses d'air autour des sources qui sont en cours de production : topographie encaissée du site, vents faibles, absence de précipitation, etc. Dans ces situations, on observe des **phénomènes de dépôts secs** : typiquement dans un bâtiment, même bardé partiellement, ou encore la nuit par caméra infra-rouge dans un site encaissé lorsque le vent tombe et que les températures des couches atmosphériques s'inversent. Ces phénomènes peuvent osciller avec des ré-envois dès qu'un courant d'air survient ou qu'un engin circule;
- les **situations d'envois ou de panaches** pour lesquelles les concentrations augmentent par ré-envoi massif des dépôts secs et érosion éolienne des matières minérales exposées en carrières (stocks de granulats, pistes de circulation, fronts de taille, etc.) Du point de vue métrologique, ces situations sont difficiles à quantifier. On a pu ainsi observer que l'éloignement (de quelques mètres) des différents préleveurs atmosphériques (mesure en continue des PM et échantillonneurs filtres en Hauts de France) relève des différences importantes de concentrations en poussières; Des différences importantes ont été également mises en évidence entre les valeurs enregistrées en semaine et le week-end (facteur 5 en Bretagne) avec des concentrations en PM10 le week-end supérieures en carrières à celles mesurées hors site du fait des ré-envois ; la bibliographie indique que l'emploi de certains dispositifs de mesures comme le LIDAR pourrait aider à leur quantification;
- les **situations de dépôts humides** pour lesquels les précipitations vont naturellement provoquer la chute des matières dont les particules en suspension dans l'air et leur dépôt sur le sol ou sur la végétation. L'exploitant qui asperge ou arrose des pistes, des stocks reproduit à petite échelle le phénomène de dépôts humides. A noter que dans les carrières, les dépôts humides donnent lieu en séchant à un phénomène de croûtage qui va limiter le ré-envoi par érosion éolienne tant que la croûte est maintenue intacte.

Les carrières sont donc caractérisées par **des points d'émissions multiples de poussières minérales**, le plus souvent **diffuses et comprenant des particules grossières** dont la plus grande masse reste sur le périmètre de la carrière sous forme de dépôts et dont la **fraction en suspension se retrouve majoritairement dans la fraction PM10**.

Rapport PM_{2,5}/PM₁₀ :



Ce rapport peut être un bon indicatif de caractérisation des émissions primaires de particules en carrière. Ainsi, 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. Pour mémoire, certains épisodes de pollution régionale ont montré dans l'agglomération de Lille des ratios supérieurs à 0,85 (cf § 3.1.3).

En carrière (extraction et traitements), l'analyse des ratios PM_{2.5}/PM₁₀ a permis de mettre en évidence une valeur **caractéristique inférieure à 0.2** qui varie peu entre les semaines, les saisons et les sites, excepté durant les épisodes de pollution régionale (du fait d'apports en PM_{2.5}). Ce point vient conforter le fait que les carrières émettent peu de particules PM_{2,5}.

- **En région Hauts de France**, les mesures horaires permettent de noter des rapports évoluant entre 0,07 et 0,17 sur les 2 carrières (indépendamment de la saison) dès que les concentrations en PM₁₀ sont significativement influencées par les émissions de la carrière (supérieures à un seuil fixé à 150 µg/m³);
- **En Pays de la Loire**, l'asymptote à 0,07 se retrouve en période estivale pour les pics d'émissions, alors qu'en période hivernale, la limite se situerait plutôt à 0,15;
- **En Bretagne**, le ratio des 0,20 se retrouve en carrière dès que les concentrations de PM₁₀ sont supérieures à (un seuil fixé ici à 70 µg/m³ en période estivale) ; sur ce site l'évolution du ratio en période hivernale est plus complexe.

Ce constat du ratio « caractéristique » PM_{2,5}/PM₁₀ pour les émissions primaires des carrières avait déjà été fait au cours des premiers suivis dans le Sud de la France (CEREGE-CNRS-AirPACA). De même, les conclusions sur la nature des particules émises par les carrières et les installations de premier traitement confirment les premières déductions faites en PACA au cours des suivis expérimentaux de deux carrières calcaires sur la période 2012-2014.

Poussières sédimentables :

Les dépôts secs et humides dans le cas des carrières ont été caractérisés expérimentalement de façon plus poussée :

- ils sont constitués de particules **de taille étendue de 0,1 à 250 µm de diamètre;**
- leurs **masse est dictée par celle des particules de plus de 10 µm de diamètre**, c'est-à-dire les plus concernées par les phénomènes de sédimentation;
- des **corrélations entre dépôts et particules en suspension existent pour les PM₁₀**; ces dernières, représentatives des émissions de carrières, sont co-émises avec toutes les autres par les différentes sources ; ces corrélations sont clairement liées à la configuration de chaque site ; le suivi des poussières sédimentables pourrait ainsi être utilisé comme indicateur de tendance des PM₁₀ des carrières (à calibrer pour chaque carrière);
- il n'y a **pas de corrélations entre dépôts et PM_{2,5}** car leurs proportions sont très faibles dans les émissions de carrières et que, même présentes dans les dépôts, leur masse est non significative par rapport à la masse globale;
- la **mobilisation des poussières sédimentables peut remettre en suspension des fractions comme les PM₁₀ et, dans une moindre mesure, les PM_{2,5}.**

Pour les poussières total en suspension (TSP), les essais de mesure directe n'ont pas abouti en raison de la difficulté métrologique intrinsèque liée à leur collection quantitative; cependant de manière indirecte, les résultats de mesure permettent de comprendre qu'au-delà de quelques (dizaine de mètre) d'une source (hors influence météorologique) les **TSP en carrière sont des PM₁₀** puisque les particules de diamètre supérieur ont sédimenté et donc ne sont plus en suspension.

La modélisation :

La modélisation a porté uniquement sur le **bassin de Marquise** (Hauts de France) représentant une surface de 48 km² avec les données des campagnes de septembre 2015 et mars 2016. Le modèle de dispersion et de transport des polluants utilisé par **ATMO Hauts de France est ADMS-Urban (version 4.0)** en s'appuyant :

- ❖ sur des données d'émissions de l'inventaire régional 2012 pour l'ensemble des secteurs identifiés sur la zone d'étude;
- ❖ sur un inventaire des émissions des activités extractives détaillant qualitativement l'emplacement des sources et leurs caractéristiques d'émission (géométrie, hauteur etc.) complété par un plan de situation validé par les différents exploitants du bassin. Par rapport à la méthode mise en place par le CITEPA (issue de l'AP-42 -US EPA), l'échelle du modèle a conduit à une simplification du schéma d'émission selon trois zones : foration-tirs de mines, transport interne, traitement et stockage;
- ❖ sur la prise en compte de la topographie et de l'occupation des sols du bassin.



Les cartographies réalisées à l'issu des simulations montrent l'influence des activités extractives sur le champ proche du domaine d'étude. En utilisant comme critère la moyenne annuelle en PM10, on retrouve l'influence limitée aux abords des carrières en concordance avec les mesures des campagnes, sans pour autant atteindre de dépassement de la valeur limite. La simulation des épisodes relevés au cours des campagnes vient corroborer les enregistrements opérés (voir détails § 3.1.3.4) illustrant pour certains épisodes l'impact de l'activité des carrières sur les concentrations en particules en suspension PM10 vers les sites de Ferques et Marquise.

La cartographie par **groupe de points sources d'émission** a permis de déterminer la contribution de chacune des activités d'extraction/traitement des carrières à l'impact global du site sur son environnement proche. Il apparaît ainsi tout l'intérêt à développer la **modélisation à l'intérieur d'un périmètre de la carrière** afin de mieux comprendre les interactions des divers points sources d'émission, ainsi que les résultats, dans une première étape au sein du périmètre du site, puis, dans un second temps au-delà, afin d'anticiper l'impact sur le voisinage. Dans le cas modélisé, on a ainsi observé que les points source d'émission **qui contribuent le plus au gradient de concentration** autour des carrières, sont celles appartenant aux **traitement** et **stockage** (maximales de PM10 en moyenne annuelle : 147,7 µg/m³ « pour le traitement » et 108,3 µg/m³ pour les stockages), il est utile, par le modèle de se rappeler que :

- beaucoup de bâtiments atteignent de **grandes hauteurs** (+ 30 mètres);
- certains d'entre eux présentent des rejets canalisés dont la hauteur est du même ordre de grandeur.

Pour ce qui est des **stocks**, l'impact premier se concentre autour des stocks de la carrière B, où les hauteurs moyennes des volumes (même simplifiés) ont été limitées à 4 mètres par type de granulats.

Pour les **transports internes et l'extraction**, leurs influences sur la répartition des concentrations au sein de la carrière apparaissent secondaires : au niveau des fosses d'exploitation les concentrations modélisées sont à peine plus élevées que la concentration en situation de fond, mais pas assez pour que l'on puisse l'observer sur les cartographies. Malgré une configuration topographique enclavée, les **émissions se dispersent dans un volume d'air très important car la géométrie du site est très ouverte**. Les seules émissions visibles sont celles émises par l'évacuation des matériaux par voie ferrée au niveau de la carrière B avec une concentration maximale calculée en moyenne annuelle de 25,3 µg/m³, beaucoup plus modeste que les niveaux enregistrés autour des stocks ou des installations. La zone d'influence directe de cette source est limitée.

Les résultats détaillés, pour chacun des sites régionaux traités, modélisation comprise, font l'objet de rapports d'étape par secteur géographique et par thème.

Comparaison avec des travaux similaires dans d'autres pays :

Une revue bibliographique des publications sur les aérosols et plus spécifiquement des articles concernant les carrières et les poussières, a pu être réalisée au moment de la consolidation des travaux régionaux d'EMCAIR. Elle montre que les sujets abordés par le programme EMCAIR font aussi l'objet de travaux et de publications (pour les études d'intérêt général et libres de droit que nous avons pu consulter) dans bien des pays. Ainsi, nous pouvons relever (cf § Etat de l'art1.3) la **grande convergence des résultats** publiés avec ceux issus des différentes étapes d'EMCAIR. En particulier nous retiendrons principalement :

- la quantification des émissions liées à certaines sources caractéristiques des carrières (roulage, foration) pour une modélisation précise, montrant la forte atténuation des concentrations en fonction de l'éloignement (Ian LOWNDES, Joseph DOCX, Sam KINGMAN Déc 2006- Suzanne Oudwater, sept 2017);
- l'importance de disposer de facteurs d'émission pertinents évalués sur la base de données locales pour représenter les émissions des carrières avec la mise en œuvre des données de l'US-APE 42 pour une carrière (UK);
- la modélisation ADMS semble apporter une bonne approche des émissions en carrière et de leur dispersion en champ proche.

Enfin, nous avons pu noter que certaines techniques (LIDAR) pouvaient être employées en carrières avec succès notamment pour réaliser des suivis non seulement en termes de concentrations mais également de nature de particule (quartz). Cela pourra être mis à profit dans le cadre de nouvelles études, en particulier si elles s'orientaient sur une meilleure caractérisation des facteurs d'émission et des flux associés.



4.2. Amélioration des techniques de mesure :

Pour les exploitants de carrière, un des enseignements importants de ces travaux de recherche appliquée réside dans le recours aux analyses chimiques pour **quantifier l’empreinte d’un site**.

L’approche chimique commence par identifier les marqueurs des roches exploitées (Ca dans le Nord pour le calcaire, Fe/Al et Mg/Al dans l’Ouest pour le gneiss et le grès) qui vont permettre de tracer l’influence précise d’une carrière dans son environnement par rapport aux autres sources d’émissions. Les **analyses chimiques** étant réalisées sur prélèvements d’une semaine (un mois pour les jauges), celles-ci produisent un **lissage des valeurs** (jour/nuit; semaine/weekend) par-rapport aux moyennes des concentrations obtenues sur la base des données des enregistreurs qui fonctionnent sur un pas de temps quart horaire.

Ci-après est présenté le rapprochement de ces valeurs moyennes de concentrations obtenues pour l’ensemble des campagnes et l’ensemble des sites. Au-delà du **biais méthodologique** on peut ainsi vérifier la cohérence des interprétations menées en termes de tendances générales.

On remarquera que l’approche chimique aurait tendance à sous-évaluer les concentrations. Néanmoins, l’ensemble se caractérise par une très bonne convergence des résultats par familles de particules (PM10 et PM2,5) et par stations de mesure (carrières et champs proches). A ce stade il est bon de rappeler que les carrières suivies appartiennent non seulement à des types industriels variées mais également présentent des capacités de production très différentes. Il n’y a aucune corrélation directe des concentrations de particules en carrières avec leur facteur d’émission, ni aucune relation entre la production et l’empreinte de la carrière dans son environnement.

Moyennes mensuelles		µg/m3	carrière A	carrière B	carrière E	carrière H
ANALYSES CHIMIQUES (mesures intégrées)	CARRIERES	PM2,5 mini	8,6	7,8	16,5	
		PM2,5 maxi	10,4	13,3	21,7	
	CHAMPS PROCHES	PM2,5 mini	6,2	2,9	3,3	
		PM2,5 maxi	6,3	3,5	10,5	
	CARRIERES	PM10 mini	19,7	13,9	16,1	
		PM10 maxi	27,2	18,7	33,3	
	CHAMPS PROCHES	PM10 mini	12,4	5,6	10,4	
		PM10 maxi	25,1	9,8	20,4	
CONCENTRATIONS (mesures en ligne)	CARRIERES	PM2,5 mini	9,1	11,2	4,8	4
		PM2,5 maxi	25,5	25,5	13,9	12,7
	CHAMPS PROCHES	PM2,5 mini	8,1	17,8	4,5	4,9
		PM2,5 maxi	9,4	19,8	18,1	12,5
	CARRIERES	PM10 mini	46,6	33,7	29	25,2
		PM10 maxi	53,9	33,8	73	47,1
	CHAMPS PROCHES	PM10 mini	16,2	22,2	10,4	9,7
		PM10 maxi	20,3	29,8	25,5	21,4

Tableau 76 : Rapprochements des valeurs moyennes des concentrations par les analyses chimiques et par les mesures en lignes pour les différentes carrières du programme EMCAIR.



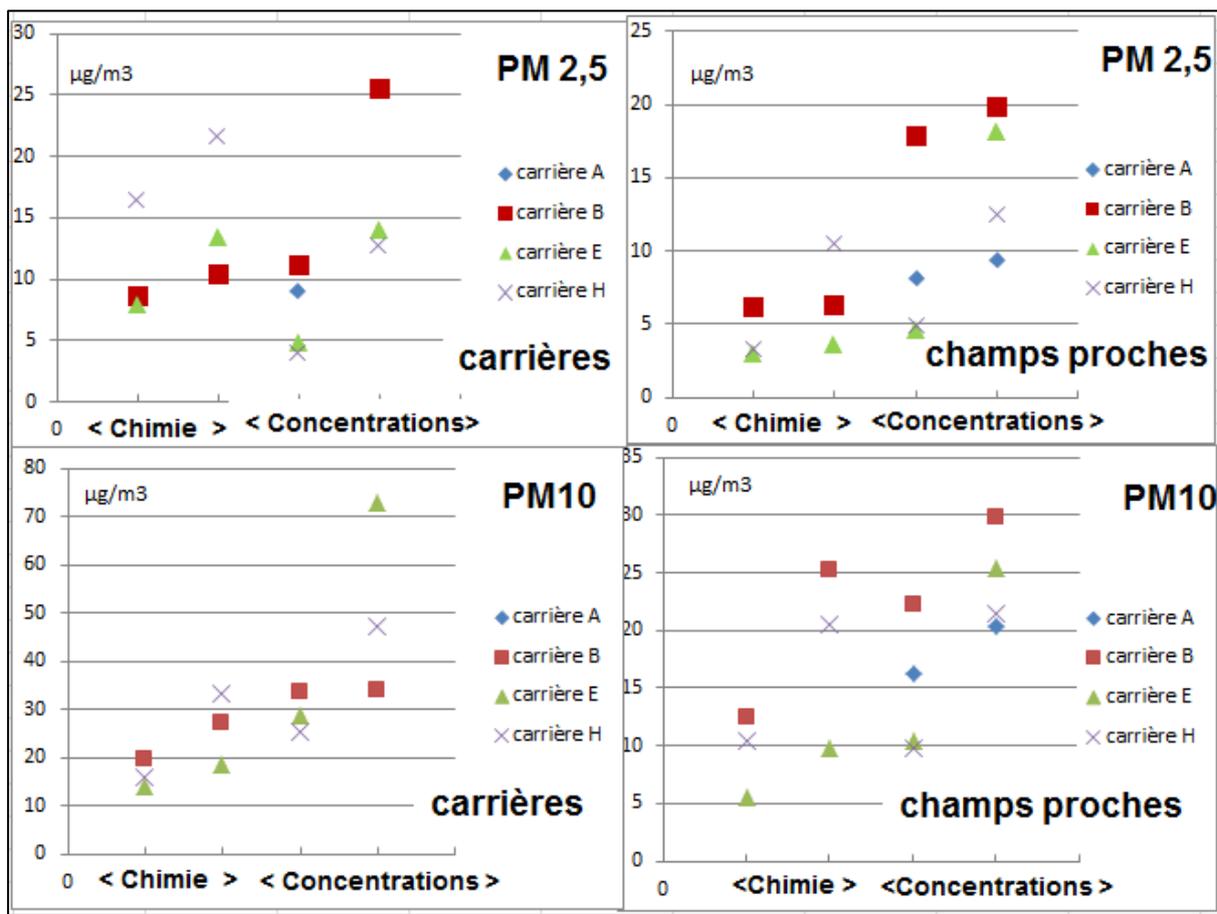


Figure 238: Rapprochement des tendances moyennes entre concentrations mesurées en ligne et calculées par la chimie pour les carrières (à gauche) et en champs proches (à droite), pour les PM_{2,5} en haut et les PM₁₀ en bas.

La méthode employée dite de « **Lenschow** » (Lenschow et al., 2001) a été notamment utilisée sur la région Ile de France afin de mieux distinguer (les experts utilisent le verbe **déconvoluer**) les parts fond régional/fond urbain/sites de proximité trafic (Gherssi et al., 2012). Son concept est détaillé (§ 3.1.5) et illustré (figure 84). Rappelons que cette méthode présente l'avantage de quantifier au cours des périodes sous influence des exploitations de carrières les dépassements par famille de particules PM₁₀ et PM_{2,5}.

Certes, la méthode est employée ici dans des études expérimentales qui vont bien au-delà de toute obligation réglementaire avec des coûts d'analyses et d'expertises que seul un travail d'intérêt collectif permet aujourd'hui. Mais en optimisant la méthode et en rationalisant l'approche, il devrait être possible à terme de suivre le développement d'un site, avec un pas de temps de plusieurs années adapté au contexte de manière à confirmer les progrès des pratiques environnementales pour la qualité de l'air, en levant les ambiguïtés liées aux mesures directes de concentrations qui ne permettent pas de distinguer l'origine des particules.

Des tests de **micro-capteurs** optiques pouvant assurer une télésurveillance instantanée des PM₁₀ et PM_{2,5} ont été réalisées à l'occasion de certaines des campagnes sur 3 des 4 carrières, mais les résultats n'ont pas été concluants. Cependant les efforts dans ce sens doivent être poursuivis car ce type de techniques est nécessaire pour l'exploitant afin de lui permettre la connaissance instantanée d'émissions dans l'air, connaissance qui peut être relayée automatiquement vers les actions correctives adaptées. Les émissions importantes sont détectables par des moyens simples, mais, l'étude EMCAIR l'a mis en évidence, beaucoup d'émissions donnent lieu à des concentrations de particules qui restent invisibles sans instrumentation : c'est en travaillant sur ces événements que les progrès seront enregistrés pour les carrières elles-mêmes et leur voisinage immédiat.

Les résultats détaillés, pour chacun des sites régionaux traités, modélisation comprise, font l'objet de rapports d'étape par secteur géographique et par thème.



4.3. Techniques de réduction des émissions

Au **plan théorique**, l'ajustement des **facteurs d'émission** tels qu'ils sont définis dans la méthode d'inventaire national ou dans l'outil GERP n'a pas été possible à partir des mesures ambiantes réalisées sur EMCAIR. En effet, les facteurs d'émission sont liés à une source précise d'émission (forage, concasseur, stockage, transport, etc.) qui n'a généralement pas été identifiable parmi les séries de mesures de concentrations réalisées, puisque l'approche EMCAIR était à l'échelle plus large du contexte de la carrière.

Au **plan pratique**, les campagnes de mesures réalisées, notamment par l'analyse des données issues des stations implantées en carrière donnent les premières clés aux exploitants pour réduire les émissions les plus massives avec les techniques reconnues. Ensuite, ces observations permettent de comprendre comment construire une méthode robuste pour évaluer par type de source, les différentes techniques et moyens de réduction des émissions en fonction des conditions météorologiques. Les essais de micro-capteurs ont été profitables dans ce sens : avec une technologie plus fiable ils pourraient contribuer à la maîtrise des émissions que l'exploitant cherche à optimiser.

4.4. Amélioration de la communication

Le programme EMCAIR s'inscrit pour l'UNPG dans une continuité d'amélioration des connaissances techniques et environnementales spécifiques aux industries des carrières et matériaux. C'est pourquoi, le volet communication n'est pas ignoré avec plusieurs niveaux :

Professionnel :

- Le Guide « Prévention des risques liés aux émissions de poussières en carrières » publié en 2014 pour expliquer aux exploitants des carrières la réforme du suivi sanitaire pour le personnel en carrière a été actualisé en mars 2017 en bénéficiant des apports que le programme d'étude EMCAIR a généré. Pour mémoire ce guide est publié avec l'appui technique de l'INERIS et les contributions d'autres acteurs des matières minérales (SFIC et MIF).
- Dans le même esprit, un nouveau guide plus spécifique « prévention du risque poussières pour les plateformes de recyclage » vient également d'être réalisé avec l'OPPBTP et l'USIRF.
- La Société de l'Industrie Minérale (SIM) rassemblant exploitants, fournisseurs, préventeurs, administrations organise des groupes de travail thématiques dont celui des poussières. Ainsi l'actualisation des documents techniques pour la réduction des émissions dans les exploitations de mines et carrières pourra prochainement intégrer les développements des connaissances comme celles issues du programme EMCAIR.
- Les études réalisées en France ont fait l'objet de présentation à l'échelle européenne auprès de l'UEPG. Les enjeux de la qualité de l'Air étant partagés, un groupe de travail, miroir de celui qui fonctionne en France, est maintenant en place depuis 2016 en réunissant les experts des différents pays de l'UE.

Local :

- A l'initiative d'ATMO Hauts de France, une brochure d'information sur l'étude EMCAIR a été réalisée et publiée à destination notamment des élus et riverains du bassin de Marquise (octobre 2016). Une version actualisée 2018 est en préparation.

Les rapports d'étape en Hauts de France, dont les données sont présentées de manière synthétique dans le présent rapport ont été publiés par ATMO Hauts de France ; ils sont disponibles sur leur site.

Scientifique :

- Publication à l'occasion de la conférence EAC (European Aerosol Conference) organisée par l'ASFERA (association française d'études et de recherches sur les aérosols) à Tours, (France) les 4-9 septembre 2016 : « Evaluation of the impact of quarrying activities on PM concentration and chemical » par J. Sciare1, S. Vermeesch2, A. Patron-Anquez2, K. Oikonomou1, M. Tsagaraki3, N. Mihalopoulos.
- Communication au congrès Atmos'fair prévue en Juin 2018 « Amélioration des connaissances des émissions de poussières liées aux activités extractives des carrières – Projet CORTEA EMCAIR / Improving knowledge of dust emissions from quarries – CORTEA EMCAIR project. »



Presse spécialisée :

- Article sur le sujet des poussières et des carrières en octobre 2015 dans « terrassements et carrières » avec une interview de Didier COLLONGE en tant que coordinateur du programme EMCAIR.

Site internet :

- L'UNPG prépare un site internet pour organiser le partage des enseignements acquis depuis 2012 sur les poussières en carrières, la caractérisation des sources d'émissions et les évaluations réalisées au cours des différentes phases d'études expérimentales dont EMCAIR. Il s'agit non seulement de présenter les travaux et les résultats obtenus mais également de permettre aux professionnels d'identifier les acteurs et partenaires, pouvoir échanger sur les techniques de réduction, tout en étant en veille active par rapport aux évolutions réglementaires et normatives autour de ces sujets.

5. Perspectives

Les émissions en carrières proviennent donc de **points sources multiples disséminés dans un espace vaste et changeant dans le temps du fait du fonctionnement des exploitations**. Elles sont constituées par des **particules grossières de nature minérale**, majoritairement au-dessus des PM10, dont le rayon d'influence est le plus souvent très limité : le nom de « panaches » est généralement attribué à ces émissions localisées. Les roches n'ont pas toutes le même comportement en termes de fragmentation ou d'attrition aux sollicitations mécaniques : EMCAIR a commencé à le mettre en évidence par la granulométrie des dépôts secs, ou encore par les rapports de concentration de certains événements. Il faut poursuivre en étendant les investigations et les recoupements avec un cadre méthodologique approprié.

Après ce premier programme d'études appliquées, plusieurs perspectives se présentent pour lesquelles la profession des industries de carrières devra se prononcer en fonction des enjeux et opportunités :

- AMELIORATION DES CONNAISSANCES – METHODES D'EVALUATION

Pour réduire l'influence des activités extractives il est donc important maintenant de progresser dans la **connaissance** détaillée et caractérisée de ces points sources situées à l'intérieur d'un périmètre de carrière . Les objectifs peuvent être établis par les étapes suivantes :

- **Affiner les données d'émission sur chaque type de point source** (approche statistique) en fonction des conditions d'exploitation (approche métier) et des mesures de réduction adoptées (approche prévention) : un cadre méthodologique nouveau est à bâtir;
- **Améliorer les facteurs d'émission** qui sont employés dans la méthode d'évaluation du potentiel d'émission des carrières (dite méthode GEREP mise au point avec le CITEPA) : c'est l'étape qui suivra la caractérisation des sources par des données fiabilisées.
- **Améliorer la méthode d'évaluation** du potentiel d'émission des carrières : les facteurs d'émission actualisés et précisés à l'étape précédente ne suffisent pas à eux seuls à l'amélioration de l'évaluation. Il y a besoin de perfectionner la méthode par exemple en recoupant les calculs avec les informations d'exploitation (énergie électrique consommée, masse d'explosifs utilisés, etc.) pour éviter certaines dérives ou surestimations.

L'intérêt de la **modélisation** a été testé avec succès une nouvelle fois autour des carrières. Plusieurs pistes de progrès ont été identifiées.

- **mieux estimer la temporalité** les pics et valeurs importantes de concentrations de PM10. Pour cela des informations sur l'activité de chaque source sont nécessaires afin d'établir des profils temporels d'émission. Ils traduiraient les périodes d'arrêt de l'activité, des périodes de production plus grande, les heures de chargement/déchargement etc.
- **mieux représenter les concentrations** réelles en périphérie des carrières. A partir des potentiels d'émissions évalués suivant la méthode CITEPA sur la base des facteurs d'émission, il s'agirait de tenir compte dans la modélisation des carrières de la nature particulière du polluant et de sa sédimentation sous forme de dépôts secs et



humides. En effet, comme il est précisé dans les hypothèses de départ (tableau des paramètres ADMS § 3.2.1), cette option n'avait pas été retenue faute d'expérience. Or, les analyses des suivis réalisés sur les différents sites au cours du programme EMCAIR soulignent dans leurs conclusions cette particularité des carrières à la fois sources et puits pour les particules.

- **mieux individualiser les points sources d'émission** au sein d'un périmètre de carrière en tenant compte de données issues de l'exploitation et d'autres plus spécifiques qui pourraient être mises en place dans le cadre d'un programme de travail sur les facteurs d'émission avec le CITEPA; ainsi la modélisation pourrait intervenir comme test pour valider plus finement les facteurs d'émission et la méthodologie retenue pour les carrières.

- AMELIORATION DES MOYENS ET TECHNIQUES DE REDUCTIONS DES EMISSIONS

On a vu à l'occasion des développements autour de la problématique des dépôts/particules en suspension que les mécanismes qui décrivent les comportements de particules sont importants à connaître non seulement pour expliquer les phénomènes relevés en carrières et autour des sites, mais également pour **mettre en œuvre les meilleures techniques de prévention et de réduction** des émissions par rapport aux types et tailles de particules émises (contacts particules/gouttes d'eau, caractéristiques des médias filtrants, effets électrostatiques, etc.) Deux objectifs se dégagent :

- **guider les exploitant vers les techniques et méthodes les plus efficaces** pour réduire leur impacts dans le domaine des poussières et particules en suspension;
- **inciter les partenaires de nos activités à développer des techniques innovantes** pour plus d'efficience.



6. Bibliographie

- A AIRPARIF Octobre 2008, Synthèse des connaissances sur les particules en suspension dans l'air et des travaux d'AIRPARIF sur ces polluants,
- BRIAND, J. DUPOUX. Paris, 1974, Influence de la dimension des particules et de la vitesse de filtration sur l'efficacité des filtres à air. 11ème colloque IRCHA sur les atmosphères polluées,
- AIR PACA -CARRIERES Juin 2016, Modélisation du transport des particules en suspension Alexandre Armengaud
- PETROFF. Étude mécanique du dépôt sec d'aérosols sur couverts végétaux. Thèse Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, 2005
- Air Pollution XIX (Transactions on Ecology and the Environment) (Wit Transactions on Ecology) 2011 =19ème conférence sur la modélisation, la surveillance et le management de pollution de l'air
- Aérosols et Climat - Loi de conservation et modélisation des sources, puits et processus Cours Pasquale Sellitto – LMD/ENS
- Air cleaning performance of a new environmentally controlled primary crusher operator booth J.A. Organiscak [National Institute for Occupational Safety and Health, Office of Mine Safety and Health Research, Pittsburgh, PA and all. Min Eng. 2016 February
- Aalto University Suzanne Oudwater European Mining Course, E. 2. (s.d.).
- Americas, Q. . (s.d.). Récupéré sur <http://www.qasac-americas.org>
- Americas, Q. . (s.d.). Récupéré sur <http://www.qasac-americas.org>
- ARMINES. (2008). *Amélioration et validation de la méthode de quantification des émissions diffuses de particules de plein air sur sites industriels.*
- Benjamin LOUBET. Dépôts de polluants et particules troposphériques –INRRMINES - Amélioration et validation de la méthode de quantification des émissions diffuses de particules de plein air sur sites industriels. ARCELOR-MITTAL et EDF (contrat ADEME 08-74-C0128 de décembre 2008).
- Bressi, M., Sciare, J., Ghersi, V., Bonnaire, N., Nicolas, J. B., Petit, J. E., ... & Féron, A. (2013). A one-year comprehensive chemical characterisation of fine aerosol (PM 2.5) at urban, suburban and rural background sites in the region of Paris (France). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(15), 7825-7844.
- BCMA. (2012, Mai). Bilan analyses des fuels et combustible .
- Bressi, e. a. (2013).
- Cavalli, F., Viana, M., Yttri, K. E., Genberg, J., & Putaud, J. P. (2010). Toward a standardised thermal-optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon: the EUSAAR protocol. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(1), 79-89.
- CEREGE-CNRS-AirPACA - Caractériser et évaluer l'exposition aux particules issues de carrières en région PACA étude 2012-2013 rapport Novembre 2014 Yves Noack
- Cloutier, G. e. (2012). An Evaluation of Several In-Lake Restoration Techniques to Improve the Water
- Quality Problem (Eutrophication) of Saint-Augustin Lake. Quebec.
- Christian SEIGNEUR. Dépôts des polluants atmosphériques CERE (2013)
- Cavalli, F., Viana, M., Yttri, K. E., Genberg, J., & Putaud, J. P. (2010). Toward a standardised thermal-optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon: the EUSAAR protocol. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(1), 79-89.
- Cloutier, G. e. (2012). An Evaluation of Several In-Lake Restoration Techniques to Improve the Water



- Quality Problem (Eutrophication) of Saint-Augustin Lake. Quebec.
- Cantrell, W. e. (1976).
- Caractérisation de la granulométrie Laboratoire de Technologie des Poudres (LTP), IMX, EPFL
- D. BOULAUD, A. RENOUX. Les aérosols : Physique et Métrologie. Technique et documentation - Éditions Lavoisier, 1998
- Daniel HUILIER. Vitesse de sédimentation particulaire. IMFS Equipe Instabilité-Turbulence-Diphase
- Dépôts de polluants et particules troposphériques- Cours Benjamin LOUBET INRA
- Dépôts des polluants atmosphériques Christian Seigneur Cerea Laboratoire commun École des PontsParisTech / EDF R&D
- Détermination expérimentale de la vitesse de dépôt sec des aérosols submicroniques en milieu naturel : Influence de la granulométrie, des paramètres micro-météorologiques et du couvert Thèse Pierre DAMAY Avril 2010
- Dockery. (1993). An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities
- E Vignati, MC Facchini, M Rinaldi, C Scannell, D Ceburnis, J Sciare, M Kanakidou, S Myriokefalitakis, F Dentener, CD O'DowdGlobal scale emission and distribution of sea-spray aerosol: Sea-salt and organic enrichment, 1^{er} février 2010, Atmospheric Environment
- Ecole des Mines de Douai, Centre ARMINES Douai ArcelorMittal Méditerranée -Amélioration et validation de la méthode de quantification des émissions diffuses de particules de plein air sur sites industriels – 2008 – 70 pages
- Environnement atmosphérique et qualité de l'air Dépôts atmosphériques Cours Christian Seigneur Cerea
- ÉPISODES DE POLLUTION PARTICULAIRE DE DÉBUT DÉCEMBRE Olivier Favez – Tanguy Amodeo (INERIS) 2016 LCSQA
- Ecological effect of airborne particulate matter on plants nov 2011 Santosh Kumar Prajapati
- Effects of desert dust on air quality and human health. What do we know about West Africa compared to other regions? Florence de Longueville*, Sabine Henry*, Pierre Ozer**
- GHERSI, V., ROSSO, A., MOUKHTAR, S., LÉGER, K., SCIARE, J., BRESSI, M., ... & BONNAIRE, N. (2012). Origine des particules fines (PM. Pollution atmosphérique, 189.
- Gao, Y., Nelson, E. D., Field, M. P., Ding, Q., Li, H., Sherrell, R. M., ... & Eisenreich, S. J. (2002).
- Characterization of atmospheric trace elements on PM 2.5 particulate matter over the New York–New Jersey harbor estuary. Atmospheric Environment, 36(6), 1077-1086.
- Impact of Air Pollution from Quarrying and Stone Cutting Industries on Agriculture and Plant Biodiversity Tahseen Sayara, Yamen Hamdan, Rezaq Basheer-Salimia – Resources and Environment 2016.
- INERIS. (2013). *projet EU ACTRIS* . Récupéré sur www.ineris.fr: http://www.ineris.fr/cil/documents/2013/air_ambiant/program_ILCs_2013_Actris_Levo_V2.pdf
- INERIS, 2011 : Evaluation des risques sanitaires liés aux substances chimiques dans l'étude d'impact des installations Classés pour la Protection de l'Environnement. INERIS, 30 novembre 2001, version 3.0 ; 181 pages.
- INERIS - Guide sur la surveillance dans l'air autour des installations classées - DRC - 16 - 158882 - 12366A ; 144 pages –
- INERIS 2017 Guide pour l'inventaire des émissions, rejets et pertes de micropolluants vers les eaux de Surface Edition juin 2017 DRC-17-136877-04137A ; 85 pages
- J.C. LABORDE Le comportement des aérosols: de l'installation à l'environnement - Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (sans date).



- J. CHARUAU. Étude du dépôt des particules dans les conduits : optimisation des tubes de prélèvement des aérosols radioactifs – Rapport CEA-R-5158, 1982
- J.C. GUICHARD. Les mécanismes de la filtration de l'air. Guide de la filtration de l'air - Édition IDEXPO, 1988
- Khillare, P. S., Balachandran, S., & Meena, B. R. (2004). Spatial and temporal variation of heavy metals in atmospheric aerosol of Delhi. *Environmental Monitoring and Assessment*, 90(1), 1-21.
- Krueger, B. J., Grassian, V. H., Cowin, J. P., & Laskin, A. (2004). Heterogeneous chemistry of individual mineral dust particles from different dust source regions: the importance of particle mineralogy. *Atmospheric Environment*, 38(36), 6253-6261.
- Lee, B. K., & Hieu, N. T. (2011). Seasonal variation and sources of heavy metals in atmospheric aerosols in a residential area of Ulsan, Korea. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(6), 679-688.
- Lenschow, P., Abraham, H. J., Kutzner, K., Lutz, M., Preuß, J. D., & Reichenbacher, W. (2001). Some ideas about the sources of PM10. *Atmospheric Environment*, 35, S23-S33.
- LE COMPORTEMENT DES AÉROSOLS : DE L'INSTALLATION À L'ENVIRONNEMENT JC LABORDE – Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire
- Lim, T. &. (2001).
- Lidar characterization of crystalline silica generation and transport from a sand and gravel plant Krystyna Trzepla-Nabaglo a, Ryoji Shiraki b, Britt A. Holm Janv 2006 USA Université de Californie
- Middleton, G. e. (2006). *Environmental and Human Consequences*.
- Monica Crippa, Imad El Haddad, Jay G Slowik, Peter F DeCarlo, Claudia Mohr, Maarten F Heringa, Roberto Chirico, Nicolas Marchand, Jean Sciare, Urs Baltensperger, André SH Prévôt Identification of marine and continental aerosol sources in Paris using high resolution aerosol mass spectrometry, 27 fév 2013. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*
- Malm, W. C., Schichtel, B. A., Pitchford, M. L., Ashbaugh, L. L., & Eldred, R. A. (2004). Spatial and monthly trends in speciated fine particle concentration in the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D3).
- Moreno, T., Querol, X., Castillo, S., Alastuey, A., Cuevas, E., Herrmann, L., ... & Gibbons, W. (2006).
- Geochemical variations in aeolian mineral particles from the Sahara–Sahel Dust Corridor. *Chemosphere*, 65(2), 261-270.
- MODELES DE DISPERSION DE PARTICULES EN MILIEU URBAIN Isabelle DESCAMPS, Michel-Ange MEUNIER, Jean-Luc HARIION L'Ecole des Mines de Douai nov 2000
- Modeling of dust emission in dimension stone quarry Suzanne Oudwater European Mining Course, EMC Thèse 30 sept 2017
- Modelling Dust Emissions from a Source Using Dust Monitoring and Meteorological Data John Bruce,, Jim Smith¹, Hugh Datson, Mike Fowler School of Earth and Environmental Sciences, University of Portsmouth, Portsmouth, UK DustScan Ltd, Oxford, UK janv 2016
- Mesure de la vitesse de sédimentation d'une suspension par absorption de rayons X M. Aidi, F. Feuillebois, A. Lasek, R. Anthore, C. Petipas, X. Auvray
- Normalisation, C. E. (2011, Version July .). Récupéré sur rapport CEN/TC 264/WG 34 "Ambient air quality- Guide for the measurement of anions and cations in PM_{2,5}": <https://www.cen.eu>
- Oudwater, A. U. (2017).
- Oluyemi, O. e. (2010). Effects of cement flue dusts from a Nigerian cement plant on air, water and planktonic quality.
- O Favez, I El Haddad, C Piot, A Boréave, E Abidi, N Marchand, J-L Jaffrezo, J-L Besombes, M-B Personnaz, J Sciare, Henri Wortham, C George, B D'anna - Inter-comparison of source



apportionment models for the estimation of wood burning aerosols during wintertime in an Alpine city (Grenoble, France), 16 juin 2010, Atmospheric Chemistry and Physics

- P. Blazy, E.-A. Jdid et J. Yvon, «Fragmentation : Technologie,» Techniques de l'ingénieur, 2006.
- Piper, H. e. (1996). Estimating the off-site costs of wind erosion in New Mexico.
- P. Blazy, E.-A. J. (2006). Techniques de l'ingénieur. *Fragmentation : Technologie*.
- PACA, C.-C. -A. (2014). *CARRIERES et PARTICULES dans l'AIR - Caractériser et évaluer l'exposition aux particules*.
- Pollution, E. (. (2011). *Guide for the measurement of elemental carbon (EC) and organic carbon (OC) deposited on filters*.
- Rodà, A. e. (2002). Assessing decadal changes in rainwater alkalinity at a rural Mediterranean site in the Montseny Mountains.
- *Rapport CEN/TC 264/WG 34 "Ambient air quality- Guide for the measurement of anions and cations in PM2.5"*. (2011, july). Récupéré sur <https://www.cen.eu>
- SEIGNEUR, C. (2013).
- Samet. (2000). Fine Particulate Air Pollution and Mortality.
- Scheuvens, D., Schütz, L., Kandler, K., Ebert, M., & Weinbruch, S. (2013). Bulk composition of northern African dust and its source sediments—A compilation. *Earth-Science Reviews*, 116, 170-194.
- Turpin, B. J., & Lim, H. J. (2001). Species contributions to PM2. 5 mass concentrations: Revisiting common assumptions for estimating organic mass. *Aerosol Science & Technology*, 35(1), 602-610.
- The application of computational fluid dynamics to improved prediction of dust emissions from surface quarrying operations Stephen SILVESTER, Ian LOWNDES, Joseph DOCX, Sam KINGMAN déc 2006-
- US-EPA, U. (s.d.). Chapitre 1 : Mineral Product Industry. *facteurs d'émissions de l'approche AP-42 de l'US EPA*
- US-EPA – AP42, 1995 : ch. 11 – Mineral product industry & ch13 – Miscellaneous sources, 1995
- US EPA – AP42 11.19.2 Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing
- US EPA – 13.2.2 Unpaved roads
- US EPA – 13.2.4 Aggregate handling and storage piles
- US EPA – 13.2.5 Industrial Wind Erosion
- Wang, X., Bi, X., Sheng, G., & Fu, J. (2006). Chemical composition and sources of PM10 and PM2. 5 aerosols in Guangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 119(1), 425-439.
- Yttri, K. E., J. Schnelle-Kreiss, W. Maenhaut, ..., J. Sciare et al., An intercomparison study of analytical methods used for quantification of levoglucosan in ambient aerosol filter samples, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 125-147, 2015

Normes :

- Norme NF EN 15445 Octobre 2008 Émissions fugitives et diffuses de problèmes communs aux secteurs industriels - Évaluation des sources fugitives de poussières par modélisation de dispersion inverse
- Norme NF ISO 7708 Mai 1996 Qualité de l'air - Définitions des fractions de taille des particules pour l'échantillonnage lié aux problèmes de santé.
- Norme NF X43-014 Novembre 2017 Qualité de l'air - Air ambiant - Détermination des retombées atmosphériques totales - Echantillonnage - Préparation des échantillons avant analyses





7. Annexes

7.1. Présentation des acteurs du programme

L'UNPG est le porteur du programme d'études avec un niveau national (coordination technique et financière) et des relais régionaux via les UNICEM régionales représentant les carrières volontaires.

Les acteurs sont :

- **ATMO-France par les 3 AASQA** localement impliquées pour la métrologie des sites de carrières qui se seront portées volontaires :
 - o **ATMO NORD PAS-de-CALAIS devenu ATMO Hauts de France**
 - o **AIR BREIZH**
 - o **AIR PAYS de la LOIRE**
- **CITEPA** avec une mission d'expertise globale notamment pour la cohérence de la méthode d'inventaire national ;
- **Jean SCIARE**, Directeur de recherche **CNRS, Professeur & Directeur de Centre au Cyprus Institute** pour la chimie des particules ;
- **l'INERIS** mandaté par le MEDDE avec une mission d'expertise sur la quantification et la modélisation des émissions diffuses dans le cadre de la surveillance dans l'air autour des ICPE.

7.2. Management du programme

La mise en œuvre du programme s'est organisé autour d'un **Comité de Pilotage** placé sous la responsabilité du coordinateur Technique et Administratif **Yves ADAM**, puis **Fadel BIO BERI** responsable environnement au sein de l'UNPG et du pilote professionnel, **Didier COLLONGE** (Responsable Environnement LAFARGEHOLCIM France), mandaté spécifiquement par la Commission Environnement de l'UNPG, au sein de laquelle il anime le pôle « prévention des risques et des pollutions ».

Ce **Comité de pilotage (COPIL) national** a eu pour missions :

- de définir en accord avec les différents partenaires la méthodologie et la stratégie des campagnes de mesures par la mise en place de groupes de travail regroupant les différents intervenants locaux (professionnels du secteur, services administratifs locaux, AASQA locale),
- de définir le calendrier des différentes prestations,
- de valider les rapports intermédiaires produits,
- d'organiser la diffusion des résultats obtenus,
- d'assurer le contrôle du suivi financier du programme
- d'assurer les relations avec le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.

Ce **COPIL** est composé :

- de représentants de l'UNPG dont en particulier les représentants des UNICEM régionales directement impliquées dans le programme par les carrières volontaires ;
- des représentants des AASQA partenaires du programme et tout autre représentant de la Fédération Nationale des ATMO ;
- de représentants des services des ministères (MEDDE, Santé) ou organismes mandatés ;
- d'un Comité Scientifique réunissant :
 - o le CITEPA ;
 - o le LSCE/The Cyprus Institute;
 - o l' INERIS mandaté par le MEDDE;

Ce Comité de Pilotage national est complété dans chacune des régions impliquées dans le programme par une commission régionale de suivi formée de représentants des sites volontaires, ceux des AASQA partenaires, des services des DREAL et ARS et du ou des bureaux d'études en charge des expérimentations et mesures in situ sous le pilotage de l'UNICEM régionale et de l'UNPG.

Le Comité Scientifique a été chargé plus particulièrement :



- de tirer enseignement des études antérieures et notamment de l'étude CEREGE-AIR PACA réalisée en PACA de 2012 à 2014 ;
- de valider les méthodologies de mesurage, les interprétations données et d'orienter la stratégie de mesurage en fonction des résultats ;
- de valider les interprétations finales, d'en tirer les recommandations pratiques vers les professionnels
- de proposer des pistes de travaux pour compléter les résultats obtenus.

Réunions du COFIL

- 8 juillet 2015
- 3 septembre 2015
- 19 février 2016
- 24 mars 2016
- 30 juin 2016
- 15 novembre 2016
- 28 avril 2017
- 7 novembre 2017
- 8 décembre 2017
- 7 février 2018

7.3. Données sites : journaux d'exploitation, évaluations GEREP, enregistrements des concentrations, analyses chimiques

Les données rassemblées autour des différentes carrières qui ont participé au programme EMCAIR sont regroupées dans des fichiers au format Excel. De plus, chacune des carrières ayant été appareillée a eu rempli un fichier de suivi d'exploitation au même format afin de disposer des principaux indicateurs de production (tonnes, heures, distances, tirs de mines,...) pendant sur la durée de chaque campagne. Il s'agit des:

- Carrières A et B pour les Hauts de France:
- Carrière E pour les Pays de la Loire:
- Carrière H pour la Bretagne.:

Evaluation des émissions

Les sites volontaires au programme d'étude EMCAIR ont chacun rempli un fichier de suivi d'exploitation au même format afin de disposer des principaux indicateurs de production (tonnes, heures, distances, tirs de mines, etc.) pendant chaque campagne :

- Carrières A, B, C, D (pour le Bassin de Marquise) :
- Carrière E : en Pays de la Loire
- Carrière H : en Bretagne

7.4. Le schéma chimique « Generic Reaction Set (GRS) »

Parmi les 3 schémas chimiques proposés dans le modèle ADMS-Urban, le schéma GRS simple permet de prendre en compte un certain nombre de réactions connues, expliquée ci-après.

Chimie des NOx :

Les sources industrielles et automobiles émettent un mélange complexe de composants chimiques incluant un grand nombre de composés organiques (par exemple des composés organique volatil, COV) et d'oxydes d'azote, qui sont impliqués dans des réactions conduisant à la formation d'ozone. Prendre en compte l'ensemble de ces réactions n'est pas approprié dans le cadre d'un modèle de dispersion rapide et efficace. Toutefois, ADMS-Urban utilise le schéma Generic Reaction Set



(Venkatram et al., 1994), qui modélise les réactions importantes impliquant les NO_x, les COV et l'ozone. Le schéma chimique GRS est un modèle photochimique semi-empirique qui réduit les réactions chimiques compliquées impliquant NO, NO₂, O₃ et de nombreux hydrocarbures aux 7 réactions suivantes :

1. $ROC + hv = RP + ROC$
2. $RP + NO = NO_2$
3. $NO_2 + hv = NO + O_3$
4. $NO + O_3 = NO_2$
5. $RP + RP = RP$
6. $RP + NO_2 = SGN$
7. $RP + NO_2 = SNGN$

Où : ROC = Composés Organiques Réactifs (équivalent de COV pour le modèle)

RP = Somme des radicaux

SGN = produits azotés gazeux stables

SNGN = produits azotés non-gazeux stables

Les équations (3) et (4) représentent les réactions chimiques exactes qui ont lieu, à une vitesse très rapide. Les autres équations sont des approximations.

Chimie des sulfates :

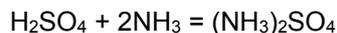
Le processus de réaction utilisé est issu du modèle EMEP (Tsyro, 2001) utilisé par le MSC-West-Norwegian Meteorological Institute en Norvège.

SO₂ est oxydé suivant la réaction : $2 SO_2 + O_2 = 2 SO_3$

Le taux de réaction dépend seulement du jour de l'année et le temps maximum de réaction est de 1h. Tout le SO₃ produit réagit immédiatement avec l'eau pour former de l'acide sulfurique selon :



L'acide sulfurique réagit avec l'ammoniac contenu dans l'atmosphère pour former du sulfate d'ammonium qui est additionné aux concentrations simulées en poussières PM₁₀ et PM_{2,5}



7.5. Informations techniques pour les analyses chimiques des particules

chemical ion	Sea salt concentration	part of salinity	Molecular Weight	Mass Fraction (relatively to Na)
	ppm, mg/kg	%	g/mol	%
Chloride (Cl ⁻)	19345	55.03	35.453	1.799
Sodium (Na ⁺)	10752	30.59	22.99	1.000
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	2701	7.68	96.062	0.251
Magnesium (Mg ²⁺)	1295	3.68	24.305	0.120
Calcium (Ca ²⁺)	416	1.18	40.078	0.039
Potassium (K ⁺)	390	1.11	39.098	0.036
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	145	0.41	61.016	0.013
Bromide (Br ⁻)	66	0.19	79.904	0.006
Borate (BO ₃ ⁻)	27	0.08	58.808	0.003
Strontium (Sr)	13	0.04	87.62	0.001
Fluoride (F ⁻)	1	0.003	18.998	0.000

Tableau des concentrations des espèces ioniques dans l'eau de mer

Liste des principaux minéraux constitutifs des roches et de leur composition chimique

Quartz	→ SiO ₂
Feldspath orthose	→ (Si ₃ AlO ₈)K
Feldspaths plagioclases	→ (Si ₃ AlO ₈)Na, (Si ₇ Al ₂ O ₂₂)Ca
Mica noir ou biotite	→ K(MgFe) ₃ {Si ₃ AlO ₁₀ (OH,F) ₂ }
Mica blanc ou muscovite	→ KAl ₂ {Si ₃ AlO ₁₀ (OH,F) ₂ }
Olivine	→ (Mg,Fe) ₂ (SiO ₄)
Amphibole	→ (Mg,Fe) ₇ (Si ₈ O ₂₂) (OH, F) ₂
Pyroxène	→ (Mg,Fe) ₂ (SiO ₃) ₂
Minéraux argileux (ex : kaolinite)	→ Al ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂
Calcite	→ CaCO ₃
Gypse	→ SO ₄ Ca, 2H ₂ O

Correspondance entre minéralogie et composition chimique

Analysis	Ion Chromatography (IC)
Anions Quantified	1. Fluoride (F ⁻) 2. Methane sulfonate (CH ₃ SO ₃ ⁻) 3. Chloride (Cl ⁻) 4. Bromide (Br ⁻) 5. Nitrate (NO ₃ ⁻) 6. Sulfate (SO ₄ ²⁻) 7. Oxalate (C ₂ O ₄ ²⁻) 8. Phosphate (HPO ₄ ²⁻)
Cations Quantified	1. Sodium (Na ⁺) 2. Ammonium (NH ₄ ⁺) 3. Potassium (K ⁺) 4. Magnesium (Mg ²⁺) 5. Calcium (Ca ²⁺)
Instrumentation	Thermo - Model ICS-5000 S/N (DC) = 1361479, S/N (pump) = 13070176, S/N (Auto-sampler) = 13061631 (property of Cyl)
Anion settings	Pre-column + column AS11-HC (2mm) Eluant : KOH Mode of elution : Gradient Loop size = 100µl
Cation settings	Pre-column + column CS-12 (2mm) Eluant : MSA Mode of elution : Isocratic Loop size = 25µl
Extraction procedure	Punch of 18mm diameter extracted in 10 ml of mQ water (sonication = 45 min). Chloroform = 50 µl Storage at +4°C prior analysis



Limit of Detection (LOD)		Anions Technic : Ion Chromatography Limit of Detection (LOD) expressed in ppb (10^{-6} g/g) of aqueous solution					
Limit of Quantification (LOQ)		Technic : Ion Chromatography Limit of Quantification (LOQ) expressed in ppb (10^{-6} g/g) of aqueous solution					
	CH_3SO_3^-	Cl^-	NO_2^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	$\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$	HPO_4^{3-}
LOD (ppb)	0.1	1	1	1	1	1	1
LOQ/2 (ppb)	1	5	5	5	5	7	7

Limit of Detection (LOD)		Cations Technic : Ion Chromatography Limit of Detection (LOD) expressed in ppb (10^{-6} g/g) of aqueous solution			
Limit of Quantification (LOQ)		Technic : Ion Chromatography Limit of Quantification (LOQ) expressed in ppb (10^{-6} g/g) of aqueous solution			
	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
LOD (ppb)	1	1	1	1	1
LOQ (ppb)	5	5	2	2	8



Analysis	EC-OC (thermo-optical)
Compounds Quantified	Elemental Carbon (EC) Organic Carbon (OC)
Instrumentation	OCEC Lab Instrument, Model 5 Sunset Laboratory Inc. S/N = 380 (property of Cyl)
Analytical method	EUSAAR 2 temperature program
Reference	Cavalli, F., Viana, M., Yttri, K. E., Genberg, J., & Putaud, J. P. (2010). Toward a standardised thermal-optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon: the EUSAAR protocol. Atmospheric Measurement Techniques, 3(1), 79-89.

		EC-OC	
Limit of Detection (LOD)		Technic : EC-OC Sunset Lab instrument Limit of Detection (LOD) expressed in $\mu\text{gC}/\text{cm}^2$ (cm^2 stands for filter area analyzed by the instrument)	
Limit of Quantification (LOQ)		Technic : EC-OC Sunset Lab instrument Limit of Quantification (LOQ) expressed in $\mu\text{gC}/\text{cm}^2$	
	EC	OC	
LOD ($\mu\text{gC}/\text{cm}^2$)	0.15	0.15	
LOQ ($\mu\text{gC}/\text{cm}^2$)	0.7	0.7	
Reference: Birch, M. E. and Cary, R. A.: Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust, Aerosol Sci. Tech., 25, 221-241, 1996.			



Analysis	Ion Chromatography Pulsed <u>Amperometric</u> Detection (IC-PAD)
Carbohydrates Quantified	<ol style="list-style-type: none"> 1. <u>Levoglucosan</u> 2. <u>Mannosan</u> 3. <u>Galactosan</u> 4. Myo-Inositol 5. Inositol 6. Mannitol 7. <u>Arabitol</u> 8. Mannose 9. Glucose 10. Galactose
Instrumentation	<u>Thermo</u> - Model ICS-3000 Auto-sampler – Model AS50 (property of <u>Cyl</u>)
settings	Pre- <u>column</u> + <u>column</u> MA1 (2mm) Eluant : KOH Mode of elution : isocratic Loop size = 100µl
Extraction procedure	Punch of 1.5cm ² extracted in 5 ml of <u>mQ</u> water (sonication = 45 min).

Limit of Detection (LOD)	Carbohydrates Technic : IC-PAD Limit of Detection (LOD) expressed in ppb (10 ⁻⁶ g/g) of aqueous solution				
Limit of Quantification (LOQ)	Technic : Ion Chromatography Limit of Quantification (LOQ) expressed in ppb (10 ⁻⁶ g/g) of aqueous solution				
	<u>Levoglucosan</u>	<u>Mannosan</u>	<u>Galactosan</u>	Myo-inositol	Inositol
LOD (ppb)	1	1	1	1	1
LOQ (ppb)	4	4	4	4	4
	Mannitol	<u>Arabitol</u>	Mannose	Glucose	Galactose
LOD (ppb)	1	1	1	1	1
LOQ (ppb)	4	4	4	4	4



Limit of Detection (LOD)	Metals Technic : ICP-MS Perkin Elmer <u>NexION 300X</u> , ICP-OES <u>Thermo Scientific ICAP 6000 series</u> Limit of Detection (LOD) expressed in µg/L of aqueous solution
Limit of Quantification (LOQ)	Technic : ICP-MS Perkin Elmer <u>NexION 300X</u> , ICP-OES <u>Thermo Scientific ICAP 6000 series</u> Limit of Quantification (LOQ) expressed in µg/L of aqueous solution

An acid microwave digestion procedure followed by ICP-OES (Thermo Scientific ICAP 6300 DUO) and ICP-MS (Perkin Elmer NexION 300X) is applied for the determination of major and trace elements (Pb, As, Cu, Cd, Ni, Hg, Cr, Zn, Al, Co, Fe, Mn, V). Filters are subjected to digestion with concentrated nitric acid under controlled conditions (Berghof Microwave System-2, Teflon vessels DAP – 60 K, 60mL 40 bar⁻¹). The heating program used is 30 min heating at 180 °C and 999W of microwave power. This first step is repeated and then it is followed by heating at 100 °C and 800W of microwave power for 20 min. After cooling to room temperature, the vessel contents are transferred to an acid-cleaned polyethylene container and stored in the freezer. Indium (In) and Yttrium (Y) are added as an internal standard to the samples before ICP-MS and ICP-OES analysis, respectively. Calibration curves are performed for each analytical batch using standard certified solutions by CPI International ($R^2 = 0.9999$). The overall accuracy for both, digestion and analysis, have been verified by certified reference materials (MESS-2, MESS-3, GBW 07313 and BCSS-1) and through intercomparisons with other analytical techniques (ICP-AES, ICP-MS, XRF and GF-AAS) applied by collaborating certified laboratories (Israel, Spain, Turkey, France). Metal recoveries obtained with the use of certified reference materials and verified by collaborating laboratories were found to be excellent, ranging from 90.0 to 104.1% for all studied elements.

	<u>Pb</u>	<u>As</u>	<u>Cu</u>	<u>Cd</u>	<u>Ni</u>	<u>Hg</u>
LOD (µg/L)	0.002	0.003	0.008	0.0003	0.005	0.001
LOQ (µg/L)	0.006	0.009	0.024	0.0009	0.015	0.003
	<u>Cr</u>	<u>Zn</u>	<u>Al</u>	<u>Co</u>	<u>Fe</u>	<u>Mn</u>
LOD (µg/L)	0.01	0.03	0.02	0.002	0.01	0.002
LOQ (µg/L)	0.03	0.09	0.06	0.006	0.03	0.006



Index des tableaux et figures

Tableaux

Tableau 1 : Région PACA - Evolution des émissions des carrières en proportion des émissions totales	17
Tableau 2 : Périodes de mesures.....	19
Tableau 3 : Equipement des stations de mesures pour les deux campagnes ATMO Hauts de France. Les carrières A et B ont également été équipées de Webcams. En phase 2, des pluviomètres ont été ajoutés sur tous les sites et un Microvol TSP au niveau de la C	25
Tableau 4 : conditions météorologiques des campagnes EMCAIR en Hauts de France	25
Tableau 5 : Limite de détection des analyseurs automatiques	30
Tableau 6 : Pics des concentrations PM10 de la phase 1 ATMO Hauts de France – carrière A	35
Tableau 7 : Pics des concentrations PM10 de la phase 2 ATMO Hauts de France – Carrière A.....	37
Tableau 8 : Pics des concentrations PM10 de la phase 1 ATMO Hauts de France – Carrière B.....	39
Tableau 9 : Pics des concentrations PM10 de la phase 2 ATMO Hauts de France – Carrière B.....	41
Tableau 10 : Concentrations moyennes PM10 – bilan phases 1 et 2	49
Tableau 11 : Valeurs réglementaires.....	49
Tableau 12 : Bilan des concentrations en PM2.5 des phases 1 et 2 entre les sites périurbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région	58
Tableau 13 : Valeurs réglementaires.....	59
Tableau 14 : Granulométrie des poussières prélevées en phase 1.....	65
Tableau 15 : Granulométrie des poussières prélevées en phase 2.....	66
Tableau 16 : Résultats de retombées de poussières de la phase 1 dans les Hauts de France	69
Tableau 17 : Poussières sédimentables (dépôts secs et humides) pour les campagnes 1 et 2 en Hauts de France	70
Tableau 18 : Rapports caractéristiques entre les différents éléments pour les 2 sites carrière (UM2 et UM3)	73
Tableau 19 : Tableau récapitulatif des prélèvements et analyses chimiques réalisées sur les campagnes ETE et HIVER.....	75
Tableau 20 : Concentrations PM2.5 et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche et sur les campagnes hiver / ETE	78
Tableau 21 : Concentrations PM10 et poussières crustales sur les sites carrières/champs proche et sur les campagnes été/hiver	80
Tableau 22 : Rapport des concentrations PM2.5/PM10 en carrières sur les périodes été/hiver	83
Tableau 23 : Contribution des émissions des carrières en champs proche. Les sites régulièrement sous le vent des carrières sont en bleu. Les sites régulièrement au vent sont en rouge	85
Tableau 24 : Tableau récapitulatif des paramètres ADMS.....	95
Tableau 25 : Critères statistiques exigés par type de station.....	96
Tableau 26 : Critères statistiques complémentaires pour le calage d'un modèle urbain	96
Tableau 27 : Résultats (modèle/mesure) campagne de mesures PM 10 - Phase 1	97
Tableau 28 : Résultats (modèle/mesure) campagne de mesures PM 10 - Phase 2	98
Tableau 29 : Equipement des stations de mesures pour les deux campagnes AIR Pays de la LOIRE. La carrière a été équipée de Webcams*.....	107
Tableau 30 : Normales de saison concernant les précipitations	110



Tableau 31 : Taux de fonctionnement pour les différents paramètres mesurés durant les deux campagnes	112
Tableau 32 : Poussières sédimentables ou « retombées atmosphériques totales » mesurées lors de la campagne estivale.....	120
Tableau 33 : Poussières sédimentables mesurées lors de la campagne hivernale	120
Tableau 34 : Liste des pics sélectionnés ; campagne estivale.....	122
Tableau 35 : Données d'activité de la carrière E le 29 juin 2016	123
Tableau 36 : Données d'activité de la carrière E le 7 juillet 2016.....	126
Tableau 37 : Rapports caractéristiques entre les différents éléments pour le site carrière	129
Tableau 38 : Rapports élémentaires obtenus sur les jauges Owen en été (à gauche) et en hiver (à droite) et comparaison avec les échantillons carrière	130
Tableau 39 : Tableau récapitulatif des prélèvements et analyses chimiques réalisées sur les campagnes ETE et HIVER.....	131
Tableau 40 : Rapports élémentaires obtenus sur jauge Owen (carrière) et comparaison avec les échantillons roche de carrière et données de littérature	132
Tableau 41 : Concentrations PM2.5/ PM10 et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche sur la campagne ETE.....	134
Tableau 42 : Concentrations PM2.5/ PM10 et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche sur la campagne HIVER.....	135
Tableau 43 : Contribution des émissions de la carrière en champs proche. La numérotation des sites est similaire aux précédentes figures. Sx est la xème semaine.....	138
Tableau 44 : Equipement des stations de mesures pour les deux campagnes AIR BREIZH. La carrière a été équipée de Webcams.	141
Tableau 45 : Estimation des moyennes annuelles et comparaison à la valeur limite réglementaire .	153
Tableau 46 : Estimation des moyennes annuelles et comparaison à la valeur limite réglementaire .	157
Tableau 47 : ratios PM2.5/PM10 moyens par campagne et par site	158
Tableau 48 : Niveaux de retombées mesurés sur les sites (en mg/m ² /jr).....	163
Tableau 49 : Relevé des données d'activités (selon observations vidéo) avec les concentrations en PM10	175
Tableau 50 : Comparaison des données d'activités (selon observations vidéo) avec les concentrations en PM10.....	176
Tableau 51 : Rapports caractéristiques entre les différents éléments pour le site carrière	180
Tableau 52 : Rapports élémentaires obtenus sur les jauges Owen et comparaison avec les échantillons carrière.	181
Tableau 53 : Tableau récapitulatif des prélèvements et analyses chimiques réalisées sur les campagnes ETE et HIVER.....	182
Tableau 54 : Rapports élémentaires obtenus sur jauge Owen (carrière) et comparaison avec les échantillons roche de carrière et données de littérature	184
Tableau 55 : Concentrations PM2.5 et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche. Campagne ETE.....	186
Tableau 56 : Concentrations PM10 et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche. Campagne ETE.....	186
Tableau 57 : Concentrations PM2.5 et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche. Campagne HIVER.....	186
Tableau 58 : Concentrations PM10 et poussières crustales sur les sites carrières/champ proche. Campagne HIVER	186



Tableau 59 : Contribution des émissions de la carrière en champs proche. La numérotation des sites est similaire aux précédentes figures. Sx est la xème semaine.....	191
Tableau 60 : Eléments de comparaison micro-capteurs / stations ATMO	197
Tableau 61 : corrélation entre les concentrations PM2,5 micro-capteur et station ATMO – station 1 199	
Tableau 62 : corrélation entre les concentrations PM2,5 micro-capteur et station ATMO – station 5200	
Tableau 63 : corrélation entre les concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 1 202	
Tableau 64 : corrélation entre les concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 5 203	
Tableau 65 : tableau récapitulatif des campagnes EMCAIR : poussières sédimentables, et particules en suspension PM10 et PM2,5 en moyennes journalières et cumul de données journalières (quart horaire).	205
Tableau 66 : Poussières sédimentables : échantillonnage en carrière à proximité des sources (2017)	210
Tableau 67 : Facteurs d'émission mis en œuvre dans le cadre de l'inventaire national des émissions atmosphériques réalisé annuellement par le CITEPA (édition 2017)	222
Tableau 68 : Émissions nationales en TSP, PM10 et PM2.5 liées à l'activité des carrières estimées dans l'inventaire national des émissions atmosphériques réalisé annuellement par le CITEPA (édition 2017).....	222
Tableau 69 : Facteurs d'émission et potentiel émissions de TSP et PM10 estimés avec l'outil GEREP v.5.0 - carrière A du bassin de Marquise dans la région Hauts-de-France.....	223
Tableau 70 : Facteurs d'émission et émissions de TSP et PM10 estimés avec l'outil GEREP v.5.0 - carrière B du bassin de Marquise dans la région Hauts-de-France.....	224
Tableau 71 : Facteurs d'émission et émissions de TSP et PM10 estimés avec l'outil GEREP v.5.0 - carrière E dans la région Pays de la Loire	225
Tableau 72 : Facteurs d'émission et émissions de TSP et PM10 estimés avec l'outil GEREP v.5.0 - carrière H dans la région Bretagne	226
Tableau 73 : Ratios PM2,5/PM1010 moyens utilisés dans l'inventaire national des émissions réalisé par le CITEPA (édition 2017), issues des granulométries par source d'émission disponible dans l'AP-42.....	228
Tableau 74 : Ratios PM2,5/PM10 estimés à partir des mesures réalisées au cours des campagnes EMCAIR.....	229
Tableau 75 : Facteurs d'émission pour les points de transfert (convoyeur) : PM2,5, PM10 et PM100 = TSP Extrait du chapitre « 11.19.2 Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing » 230	
Tableau 76 : Rapprochements des valeurs moyennes des concentrations par les analyses chimiques et par les mesures en lignes pour les différentes carrières du programme EMCAIR.	237



Figures

Figure 1 : Comparaison entre modélisation MFN (CFD en Anglais) et mesures dans le cas d'un dumper sur piste de carrière (à gauche) ; comparaison de deux types de modèles pour un même tir de mines (méthode lagrangienne MFN en haut et méthode gaussienne en bas sur le graphique - Stephen SILVESTER Ian LOWNDES Joseph DOCX Sam-KINGMAN.....	12
Figure 2 : évolution de la concentration PM10 en fonction de la distance par rapport à la source (foration) Suzanne Oudwater- sept 2017-.....	12
Figure 3 : comparaison des concentrations calculées par différents modèles avec les valeurs issues des suivis en carrière John Bruce, Jim Smith, Hugh Datson, Mike Fowler- 2016	14
Figure 4 : relations entre signal LIDAR concentrations et teneur en quartz des PM10 en carrière de sables et graviers (Krystyna Trzepla-Nabaglo a, Ryoji Shiraki b, Britt A. Holm Janv 2006).....	15
Figure 5 : évolution des concentrations (PM5) en extérieur et à l'intérieur d'une cabine de contrôle sur un poste de concassage primaire en carrière de granite (USA National Institute for Occupational Safety and Health– 2016).....	15
Figure 6 : Localisation des sites d'étude des émissions de poussières des carrières.....	18
Figure 7 : Points de mesure sur le bassin de Marquise (flèche bleue = vent dominant)	20
Figure 8 : Points de mesures sur la carrière E des Pays de la Loire (flèche bleue = vent dominant) .	20
Figure 9 : Points de mesures sur la carrière H de Bretagne (flèche bleue = vent dominant)	20
Figure 10 : Circuit d'analyse des échantillons aérosols collectés sur filtres	22
Figure 11 : Chromatographe ionique THERMO (Modèle ICS5000) utilisé pour l'analyse ionique des échantillons.....	23
Figure 12 : Analyseur de carbone par méthode thermo-optique (instrument Sunset Lab) utilisé pour la mesure EC-OC des échantillons	23
Figure 13 : Spectromètre de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) utilisé pour l'analyse des métaux dans les échantillons	24
Figure 14 : Rose des vents pour les campagnes EMCAIR dans les Hauts de France.....	26
Figure 15 : Cumul des précipitations journalières, données issues des stations Météo France	27
Figure 16 : Rétro-trajectoire pour le 2015.10.04	28
Figure 17 : Cartographie des épisodes de pollution du 3 au 4 octobre 2015	29
Figure 18 : Trajectoires des épisodes du 11 et 12 mars 2016	29
Figure 19 : Concentrations moyennes horaires de PM10 de la phase 1 dans les Hauts de France...	32
Figure 20 : Concentrations moyennes horaires de PM10 de la phase 2 dans les Hauts de France...	32
Figure 21 : Evolution des concentrations de PM10 en moyennes journalières de la phase 1 des Hauts de France.....	33
Figure 22 : Evolution des concentrations de PM10 en moyennes journalières de la phase 2 des Hauts de France.....	34
Figure 23 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 1 des Hauts de France	34
Figure 24 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) et vitesse du vent sur la carrière A - phase 1 Hauts de France	35
Figure 25 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 2 des Hauts de France – Carrière A	36
Figure 26 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) et vitesse du vent sur la carrière A - phase 2 Hauts de France	36
Figure 27 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 1 – Carrière B Hauts de France.....	38



Figure 28 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) et vitesse du vent sur la carrière B - phase 1 Hauts de France	39
Figure 29 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 2 Carrière B	40
Figure 30 : Pics des concentrations PM10 de la phase 2 ATMO Hauts de France – Carrière B	40
Figure 31 : Vue aérienne de la station carrière B.....	41
Figure 32 : Photos des caméras situées dans la Carrière A – Phase 1 – Pic n°1 nuit du 7 septembre 2015 vers 3h 00.....	42
Figure 33 : <i>Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 1 – Hors carrières Hauts de France.....</i>	43
Figure 34 : Pics des concentrations PM 10 (moyennes horaires) de la phase 2 – Hors carrières Hauts de France.....	45
Figure 35 : Evolution des concentrations PM10 entre les sites urbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région	48
Figure 36 : <i>Evolution des concentrations PM10 entre les sites urbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région</i>	48
Figure 37 : Rose de pollution Ferques Phase 1	50
Figure 38 : Rose de pollution Ferques - Phase 2.....	51
Figure 39 : Rose de pollution de Landrethun - phase 1	51
Figure 40 : Rose de pollution de Landrethun - phase 2	52
Figure 41 : Rose de pollution de Marquise – Phase 1	52
Figure 42 : Rose de pollution de Marquise – Phase 2	53
Figure 43 : Rose de pollution carrière B phase 1	53
Figure 44 : Rose des vents Carrière B phase 2	54
Figure 45 : Rose de pollution de la carrière A phase 2	54
Figure 46 : Rose de pollution de la carrière A - phase 2.....	55
Figure 47 : Evolution des concentrations des particules fines PM2,5 – Phase 1	55
Figure 48 : Evolution des concentrations des particules fines PM2,5 – Phase 2	56
Figure 49 : <i>Evolution des concentrations en particules fines PM2,5 - phase 1 (La bande grisée horizontale correspond à la limite de détection des appareils de mesures)</i>	56
Figure 50 : Concentration en particules fines PM2,5	57
Figure 51 : Evolution des concentrations entre les sites périurbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région-Phase 1	57
Figure 52 : Evolution des concentrations entre les sites périurbains du bassin de Marquise et les sites de référence de la région-Phase 2	58
Figure 53 : Rose de pollution PM2.5 Ferques de la phase 1	59
Figure 54 : Rose de pollution PM2.5 Ferques de la phase 2	60
Figure 55 : Rose de pollution PM2.5 Landrethun-le-Nord de la phase 1	60
Figure 56 : Rose de pollution PM2.5 Landrethun-le-Nord de la phase 2.....	61
Figure 57 : Rose de pollution PM2,5 de la phase 1 à Marquise.	61
Figure 58 : Rose de pollution PM2,5 de la phase 2 à Marquise.	62
Figure 59 : Rose de pollution PM2,5 de la phase 1 – carrière B.	62
Figure 60 : Rose de pollution PM2.5 de la phase 2 – carrière B.	63
Figure 61 : Rose de pollution PM2.5 de la phase 1 – carrière A.	63
Figure 62 : Rose de pollution PM2.5 de la phase 2 – carrière A.....	64



Figure 63 : Distribution de la granulométrie des poussières prélevées en phase 1	66
Figure 64 : Distribution de la granulométrie des poussières prélevées en phase 2	68
Figure 65 : Distribution des poussières sédimentables sur l'ensemble des sites - phase 1 Hauts de France.....	69
Figure 66 : Répartition des retombées de poussières sur l'ensemble des sites en phase 1 Hauts de France.....	70
Figure 67 : Distribution des poussières sédimentables sur l'ensemble des sites - phase 2 Hauts de France.....	71
Figure 68 : Répartition des retombées de poussières sur l'ensemble des sites en phase 2	71
Figure 69 : Résultats des analyses ioniques sur les poudres prélevées en carrières (UM2 et UM3). 73	
Figure 70 : Composition élémentaire des dépôts mesurés en champs proche (figure de gauche) et en carrières (figure de droite).	74
Figure 71 : Concentration des espèces ioniques analysées dans les dépôts humides (pluie).....	74
Figure 72 : Balance ionique en rouge pour les prélèvements PM2.5 (DEKATI) et en noir pour les prélèvements PM10 (PARTISOL).	75
Figure 73 : Comparaison des résultats de chimie obtenus sur plusieurs espèces chimiques (Na, Mg, Ca, SO ₄) analysés à la fois par IC et ICP-MS.	76
Figure 74 : Comparaison entre PM mesuré directement et en continu sur site et PM calculé par reconstruction chimique.....	76
Figure 75 : Comparaison entre les résultats MICROVOL et PARTISOL. Campagne HIVER, PM10, site UM2 (semaines 1,2,3,4).....	77
Figure 76 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM2.5. Campagne ETE	78
Figure 77 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM2.5. Campagne HIVER.....	78
Figure 78 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM10 – ETE	79
Figure 79 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM10 – HIVER	79
Figure 80 : Facteurs d'Enrichissement en éléments trace en site carrières. Données PM10 (PARTISOL)	81
Figure 81 : Oxydes métalliques principaux constitutifs des poussières terrigènes mesurées dans les fractions PM2.5 et PM10 en site carrière/champ proche sur les campagnes été/hiver.	81
Figure 82 Rapport de concentration PM2.5/PM10 du calcium en champ proche et carrières sur les 4 semaines des campagnes été/hiver.	82
Figure 83 : Rapport de concentration PM2.5/PM10 en fonction des concentrations PM10 en carrières. Valeurs horaires des campagnes été / hiver pour les épisodes > 100 µg/m ³	83
Figure 84 : Principe de la méthodologie de Lenschow. Les sites en champ proche des carrières ont des concentrations en PM qui sont la somme d'un fond régional et d'une contribution des carrières. 84	
Figure 85 : Variation des concentrations de calcium dans les fractions PM2.5 (figure du haut) et PM10 (figure du bas). Figure obtenue pour les 4 semaines des campagnes été/hiver et pour les sites en champ proche (UM8, UM9) et carrière (UM2). Sx est la x ^{ème} semaine. E pour été, H pour hiver. 85	
Figure 86 : Schéma de dispersion d'un panache sous ADMS-Urban.....	89
Figure 87 : Schéma général pour la construction d'une modélisation avec le modèle ADMS-Urban . 90	
Figure 88 : Périmètre de l'étude	91
Figure 89 : Grille des points de calcul du modèle	92
Figure 90 : Rose des vents à Boulogne sur Mer – 2015.....	93
Figure 91 : Localisation et typologie des stations fixes sur le territoire littoral	94
Figure 92 : Topographie de la zone d'étude – données reliefs IGN.....	94



Figure 93 : Percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 sur la zone d'étude – VL 50 µg/m3 en moyennes journalières à ne pas dépasser plus 35 jours par an.....	100
Figure 94 : Concentration en moyenne annuelle de PM10 en 2015 sur la zone d'étude – VL 40 µg/m3	100
Figure 95 : Concentration moyenne de PM10 sur la zone d'étude du 07/09/15 au 05/10/15.....	101
Figure 96 : Percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 sur la zone d'étude du 07/09/15 au 05/10/15.....	102
Figure 97 : Concentration moyenne de PM10 sur la zone d'étude du 07/03/16 au 04/04/16.....	102
Figure 98 : SEQ Figure * ARABIC 74 : Percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 sur la zone d'étude du 07/03/16 au 04/04/16	103
Figure 99 : Concentration en moyenne annuelle de PM10 pour les sources du groupe extraction/transport interne (à Gauche), Percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 pour les sources du groupe extraction/transport interne (à Droite).	104
Figure 100 : Concentration en moyenne annuelle de PM10 pour les sources du groupe traitement et transformation (à Gauche), Percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 pour les sources du groupe traitement et transformation (à Droite).	104
Figure 101 : Concentration en moyenne annuelle de PM10 pour les sources du groupe stockage (à Gauche), Percentile 90.4 des concentrations journalières en PM10 pour les sources du groupe stockage (à Droite).	105
Figure 102 : Roses des vents hebdomadaires dans la carrière E durant la campagne estivale	108
Figure 103 : Roses des vents hebdomadaires à Montoir-de-Bretagne durant la seconde campagne (16/11/2016 au 14/12/2016)	109
Figure 104 : Précipitations au cours de la campagne estivale – Pays de la Loire.....	110
Figure 105 : Précipitations au cours de la campagne hivernale – Pays de la	110
Figure 106 : Evolution des particules fines PM10 au sein de la carrière durant les campagnes 1 (à gauche) et 2 (à droite) – données quart-horaires.....	112
Figure 107 : Evolution des PM10 sur tous les sites durant les campagnes estivale (à gauche) et hivernale (à droite) en moyennes journalières	113
Figure 108 : Boîtes à moustache des concentrations de PM10 sur les différents sites, pour la campagne estivale (à gauche) et la campagne hivernale (à droite) réalisées avec les données quart-horaires.....	114
Figure 109 : Evolution des particules fines PM10 sur les sites des Béchis, des Rinières et à Saint-Denis-d'Anjou durant la campagne estivale, en données journalières	114
Figure 110 : Evolution des particules fines PM10 sur le site des Rinières et à Saint-Denis-d'Anjou durant la campagne hivernale, en données journalières	115
Figure 111 : Evolution des particules PM2,5 au sein de la carrière durant les campagnes estivale (à gauche) et hivernale (à droite) – données quart-horaires	115
Figure 112 : Evolution des particules PM2,5 au sein de la carrière durant les campagnes estivale (à gauche) et hivernale (à droite) – données journalières.....	116
Figure 113 : A gauche : boxplot du ratio PM2,5/PM10 pour les différents sites, lors de la campagne estivale. A droite : Evolution journalière de ce même ratio pour les différents sites, lors de la campagne estivale.....	116
Figure 114 : A gauche : boxplot du ratio PM2,5/PM10 pour les différents sites, lors de la campagne hivernale. A droite : Evolution journalière de ce même ratio pour les différents sites, lors de la campagne hivernale	117
Figure 115 : ratios PM2,5/PM10 en fonction des PM10 pour le site carrière, lors de la campagne estivale (graphe de gauche) et lors de la campagne hivernale (graphe de droite).....	117
Figure 116 : ratios PM2,5/PM10 en fonction des PM10 pour le site des Rinières, lors de la campagne estivale (graphe de gauche) et lors de la campagne hivernale (graphe de droite).....	118



Figure 117 : Roses de pollution des PM10 pour le site des Bechis, de la carrière et du site des Rinières lors de la campagne estivale.....	118
Figure 118 : Rose de pollution des PM10 au niveau du site mobile installé dans la carrière	119
Figure 119 : Roses de pollution des PM10 pour le site de la carrière et le site des Rinières lors de la première semaine de la campagne hivernale	119
Figure 120 : Evolution des particules PM10 sur les différents sites, semaine par semaine pour la campagne estivale ; les pics sélectionnés pour une étude approfondie sont marqués par des numéros, (sauf pour les pics 6 et 7 ne seront pas étudiés pour le présent rapport).....	121
Figure 121 : Evolution des particules fines PM10 en carrière au cours de la journée du 29 juin 2016, données quart-horaires	122
Figure 122 : Evolution des vitesse et direction du vent en carrière au cours de la journée du 29 juin 2016.....	123
Figure 123 : Rose de pollution pour les particules PM10 en carrière le 29 juin 2016.....	124
Figure 124 : Ratio PM2,5/PM10 en fonction du temps pour la journée du 29 juin 2016	125
Figure 125 : Evolution des particules PM10 en carrière au cours de la journée du 7 juillet 2016	125
Figure 126 : Evolution des vitesse et direction du vent en carrière au cours de la journée du 7 juillet 2016.....	126
Figure 127 : Rose de pollution pour les particules PM10 en carrière le 7 juillet 2016	127
Figure 128 : Evolution des PM10 le 7 juillet 2016- Les Bechis, Les Rinières et Saint-Denis-d'Anjou	127
Figure 129 : Evolution du ratio PM2,5/PM10 pour la journée du 7 juillet – Les Béchis, Les Rinières et Saint Denis d'Anjou	128
Figure 130 : Pourcentage massique de la composition en métaux trace des 2 échantillons de roche prélevés en carrière et suivant deux tailles de grain	129
Figure 131 : Composition élémentaire des dépôts mesurés par les jauges OWEN sur les 3 sites d'étude (fonds ruraux #1, #2 et carrière). Les données sont exprimées en µg par gramme de poussière collectée sur le filtre	130
Figure 132 : Balance ionique en rouge pour les prélèvement PM2,5 (DEKATI) et en bleu pour les prélèvement PM 10 (PARTISOL). (Gauche = ETE. Droite = HIVER)	131
Figure 133 : Comparaison entre PM mesuré directement et en continu sur site et PM calculé par reconstruction chimique.....	132
Figure 134 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM10 (à Gauche) et PM2.5. (à Droite) en site CARRIERE et en fond rural (stations de fond amont/aval). Campagne ETE	133
Figure 135 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM10 (gauche) et PM2.5. (Droite) en site CARRIERE et en fond rural (stations de fond amont/aval). Campagne HIVER	133
Figure 136 : Approche « macro-traceur » (levoglucosan) permettant de calculer la fraction de PM2.5 issue du chauffage au bois sur les 3 sites de mesure et sur les 4 semaines (S1 à S4) de la campagne HIVER.....	134
Figure 137 : Facteurs d'Enrichissement en éléments trace en site carrières. Données DEKATI (fractions PM10 et fraction grossières PM2.5-10).....	136
Figure 138 : Variation des concentrations de (PM dust dans la fraction PM2.5 à Gauche) et de (PM dust dans la fraction PM10 à Droite) durant la campagne ETE. Sx est la xème semaine.....	137
Figure 139 : Variation des concentrations de (PM dust la fraction PM2.5 à Gauche) et de (PM dust la fraction PM10 à Droite) durant la campagne HIVER. Sx est la xème semaine	137
Figure 140 : Evolution des cumuls journaliers des précipitations enregistrées à la station Météo France de Rennes St Jacques	142
Figure 141 : Comparaison de la situation locale de la carrière H avec les données régionales – Septembre 2016	143



Figure 142 : Comparaison de la situation locale de la carrière H avec les données régionales – Janvier 2017	143
Figure 143 : Roses des vents hebdomadaires campagnes1 et 2 [données MétéoFrance St Jacques]	144
Figure 144 : Secteurs de vents exposant les sites en dehors de la carrière aux éventuels envols de la carrière H.....	145
Figure 145 : Estimation des taux d'exposition des points hors site pendant les deux campagnes de mesures.....	145
Figure 146 : Extrait des cartes de prévision du modèle Prév'air du 20 au 25/01/17.....	147
Figure 147 : Evolution des concentrations moyennes journalières en PM10 mesurées au niveau des stations de surveillance réglementaire	147
Figure 148 : Données 1/4h en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant la campagne 1 ESTIVALE	148
Figure 149 : Données 1/4h en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant la campagne2 HIVERNALE	149
Figure 150 : Evolution des données 1/4h en PM10 sur le site de la carrière (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant les 2 campagnes	150
Figure 151 : Distribution statistique des données PM10 des deux campagnes de mesures (données 1/4h en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	151
Figure 152 : Evolution des moyennes journalières par site lors des deux campagnes de mesures .	152
Figure 153 : Evolution des moyennes journalières en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur la carrière durant la campagne1	152
Figure 154 : Données 1/4h en PM2.5 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant la campagne 1 ESTIVALE	154
Figure 155 : Données 1/4h en PM2.5 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant la campagne 2 HIVERNALE	155
Figure 156 : Evolution des données PM2.5 quart-horaires (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur le site carrière	156
Figure 157 : Distribution statistique des données PM2.5 des deux campagnes de mesures (données 1/4h en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	156
Figure 158 : Evolution des mesures PM10 et PM2.5 par site de mesures durant les deux campagnes (en moyennes journalières- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	158
Figure 159 : Evolution des ratios PM2.5/PM10 par semaine et pour chacun des sites.....	159
Figure 160 : Evolution des ratios PM2.5/PM10 par site et pour les deux campagnes.....	160
Figure 161 : ratio PM2.5/PM10 en fonction des PM10 pour les deux campagnes de mesures	161
Figure 162 : Rose des pollutions des PM10 durant les 2 campagnes	162
Figure 163 : Rose des pollutions des PM10 sur le site carrière durant la campagne 1.....	163
Figure 164 : Evolution des ratios PM2.5/PM10 sur les sites Bouyère et Guipry.....	165
Figure 165 : Episode du lundi 26 septembre 2016	166
Figure 166 : Episode du mardi 27 septembre 2016	166
Figure 167 : Episode du mercredi 28 septembre 2016	167
Figure 168 : Episode du jeudi 29 septembre 2016	167
Figure 169 : Episode du vendredi 30 septembre 2016	168
Figure 170 : Evolution des ratios moyens journaliers en PM2.5/PM10 sur le site Chêne sec en période estivale	168
Figure 171 : Episode du 8 septembre 2016	169
Figure 172 : Episode du 12 septembre 2016	170
Figure 173 : Episode du lundi 19 septembre 2016	171
Figure 174 : Episode du dimanche 25 septembre 2016	172
Figure 175 : Episode du lundi 3 octobre 2016.....	172



Figure 176 : Evolution des concentrations en PM10 au niveau du point carrière (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) -6 septembre 2016 (deux représentations d'échelle des concentrations pour détailler les événements)	174
Figure 177 : Evolution des concentrations en PM10 au niveau du point carrière (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	176
Figure 178 : Comparaison des distances parcourues par les engins par jour et des concentrations moyennes journalières en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	178
Figure 179 : Comparaison du fonctionnement du convoyeur avec les concentrations en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	178
Figure 180 : Comparaison des opérations de chargements de produits finis avec les concentrations en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	179
Figure 181 : Pourcentage massique de la composition en métaux trace des 2 échantillons de roche prélevés en carrière	180
Figure 182 : (Gauche) Composition élémentaire des dépôts mesurés par les jauges OWEN sur les 3 sites d'étude (aval, amont, carrière) et facteurs d'enrichissement (EF) des dépôts en carrière par rapport aux sites de fond (aval, amont)	181
Figure 183 : Balance ionique en rouge pour les prélèvements PM2.5 (DEKATI) et en bleu pour les prélèvements PM10 (PARTISOL). (Gauche = ETE ; Droite – HIVER)	182
Figure 184 : Intercomparaison des concentrations en espèces ioniques (anions, cations) sur les 3 sites- carrière (QUARRY), aval (DOWNWIND), amont (UPWIND) pour la campagne été 2017.	183
Figure 185 : Intercomparaison des concentrations en espèces élémentaires entre les 2 sites de fond (campagne été 2017).	183
Figure 186 : Intercomparaison des concentrations en espèces élémentaires (Pb, As, Cu, Cd, Ni, Hg, Cr, Zn, Al, Co, Fe, Mn, V) entre le site CARRIERE et les 2 sites de fond (campagne été 2017).	184
Figure 187 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM10 (Gauche) et PM2.5. (Droite) en site CARRIERE et en fond rural (stations de fond amont/aval). Campagne ETE	185
Figure 188 : Composition chimique des espèces principales constituantes des PM10 (Gauche) et PM2.5. (Droite) en site CARRIERE et en fond rural (stations de fond amont/aval). Campagne HIVER	185
Figure 189 : Facteurs d'Enrichissement en éléments trace en site carrières. Données DEKATI (fractions PM10 et fraction grossières PM2.5-10) – CAMPAGNE ETE	187
Figure 190 : Facteurs d'Enrichissement en éléments trace en site carrières. Données PARTISOL (fractions PM10) et données DEKATI (fraction PM2.5) – CAMPAGNE HIVER	188
Figure 191 : Rapport de concentration PM2.5/PM10 du calcium en champ proche et carrières sur les 4 semaines des campagnes été	188
Figure 192 : Variation des concentrations de PM de poussières minérales dans la fraction PM2.5 - CAMPAGNE ETE	190
Figure 193 : Variation des concentrations de PM de poussières minérales dans la fraction PM10 - CAMPAGNE ETE	190
Figure 194 : Variation des concentrations de PM de poussières minérales dans la fraction PM2.5 - CAMPAGNE HIVER	190
Figure 195 : Variation des concentrations de PM de poussières minérales dans la fraction PM10 - CAMPAGNE HIVER	190
Figure 196 : Caractéristiques du préleveur e-PM testé en carrière au cours des campagnes EMCAIR	193
Figure 197 : Localisation des micro-capteurs sur la carrière B et en périphérie	194
Figure 198 : microstation 1 aux côtés de station carrière B	195
Figure 199 : microstation 2 – proximité du concasseur primaire (carrière B)	195
Figure 200 : microstation 3 sur la zone de stockage des stériles - butte Ouest (carrière B)	196
Figure 201 : micro-capteur 4 limite Nord-Est	196



Figure 202 : Micro-capteur 5 Ferques – A proximité de la station ATMO Ferques.....	197
Figure 203 : Concentrations PM2,5 micro-capteur et station ATMO – station 1.....	198
Figure 204 : Test de corrélation entre les concentrations PM2,5 micro-capteur et station ATMO – station1	198
Figure 205 : Concentrations PM2,5 micro-capteur et station ATMO – station 5.....	199
Figure 206 : Test de corrélation entre les concentrations PM2,5 micro-capteur et station ATMO – station5	200
Figure 207 : Concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 1.....	201
Figure 208 : Test de corrélation entre les concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 1	201
Figure 209 : Concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 5.....	202
Figure 210 : Test de corrélation entre les concentrations PM10 micro-capteur et station ATMO – station 5	203
Figure 211 : Recherche de corrélation entre poussières sédimentables et PM10 – ensemble des campagnes EMCAIR	206
Figure 212 : Corrélation entre poussières sédimentables et PM10 – ensemble des campagnes EMCAIR.....	206
Figure 213 : Recherche de corrélation entre poussières sédimentables et PM10 – ensemble des campagnes EMCAIR	207
Figure 214 : Corrélation entre poussières sédimentables et PM10 –campagnes bassin de Marquise	207
Figure 215 : Corrélation entre poussières sédimentables et PM10 –campagnes Pays de la Loire et Bretagne	208
Figure 216 : récapitulatif des campagnes - relation poussières sédimentables/ PM 2,5 ensemble des campagnes	208
Figure 217 : Poussières sédimentables en carrières : granulométrie optique pour 2 prélèvements (carrières E, H)	209
Figure 218 : Poussières sédimentables : échantillonnage en carrières E et H à proximité des sources (2017)	211
Figure 219 : Poussières sédimentables en carrières : granulométrie optique - courbe en fréquences cumulées (carrières E et H - 2017)	212
Figure 220 : Poussières sédimentables en carrières : granulométrie optique - courbe en fréquences (carrières E et H - 2017)	212
Figure 221 : Poussières sédimentables : granulométrie optique par type de source –concassage primaire (carrières E et H - 2017).....	213
Figure 222 : Poussières sédimentables : granulométrie optique par type de source –concassage et criblage secondaire (carrières E et H - 2017).....	213
Figure 223 : Poussières sédimentables : granulométrie optique par type de source –concassage et criblage tertiaire (carrières E et H - 2017)	214
Figure 224 : Poussières sédimentables : granulométrie optique par type de source (carrières E - 2017).....	215
Figure 225 : Représentation schématique de la distribution granulométrique des aérosols et de leurs mécanismes de formation et de dépôts. Adapté de Whitby et Cantrell (1976).....	216
Figure 226 : diamètres équivalents pour une particule quelconque V_{TS} correspondant à la vitesse terminale de chute (Hinds, 1999)	217
Figure 227 : Schéma illustrant les types de comportements des particules dans l'air (SEIGNEUR, 2013).....	218



Figure 228 : Dépôts secs : vitesse en fonction de la taille des particules (Moller & Shumann, Schmel) – C Seigneur	219
Figure 229 : Dépôts secs : vitesse en fonction de la taille des particules pour cinq cas sur un champ d'avoine (Petroff 2005)	219
Figure 230 : Schéma de la problématique des TSP en carrières = cas des particules de taille supérieure à 10 µm.....	220
Figure 231 : Schéma de la problématique des TSP en carrières = cas des particules de taille inférieure à 10 µm.....	221
Figure 232 : Répartition du potentiel des émissions de TSP et PM10 par source d'émission (outil GEREP v.5.0) – carrière A du bassin de Marquise dans la région Hauts-de-France.....	224
Figure 233 : Répartition du potentiel d'émissions de TSP et PM10 par source d'émission (outil GEREP v.5.0) – carrière B du bassin de Marquise dans la région Hauts-de-France	225
Figure 234 : Répartition du potentiel des émissions de TSP et PM10 par source d'émission (outil GEREP v.5.0) – carrière E dans la région Pays de la Loire.....	226
Figure 235 : Répartition du potentiel des émissions de TSP et PM10 par source d'émission (outil GEREP v.5.0) – carrière H dans la région Bretagne.....	227
Figure 236 : Facteurs d'émission pour les points de transfert (convoyeur) : PM2,5, PM10 et PM100 = TSP Extrait du chapitre « 11.19.2 Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing »	230
Figure 237 : relations entre énergie et dimension des particules d'après Charles Holmes (1957) et Hukki (1961)	232
Figure 238 : Rapprochement des tendances moyennes entre concentrations mesurées en ligne et calculées par la chimie pour les carrières (à gauche) et en champs proches (à droite), pour les PM2,5 en haut et les PM10 en bas.	238



Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement
AASQAs	Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air
ACD	Agent Chimique Dangereux
ATILH	Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques
ARS	Agence Régionale de Santé
ATMO HdF	ATMO Haut-de-France
Al	Aluminium
Al₂O₃	Oxyde d'Aluminium
BREF	Best Available Techniques Reference Document = MTD (Meilleures Techniques Disponibles)
CERC	Cambridge Environmental Research Consultant
°C	Degré Celsius
CEN	Comité Européen de Normalisation
C	Carbone
CaCO₃	Carbonate de calcium
Ca²⁺	Calcium
CaO	Oxyde de calcium
Cl	Chlore
CEREGE	Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement
CNRS	Centre National de Recherche Scientifique
CORTEA	COonnaissance, Réduction à la source et Traitement des Emissions dans l'Air
CMR	Cancérogènes, Mutagènes ou Toxiques pour la Reproduction
CIQA	Comité Interministériel de la Qualité de l'air
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
DPED	Direction Productions et Energies Durables
DREAL	Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement
Da	Diamètre Aérodynamique
EMCAIR	Emission de Carrière dans l'Air
EC	Carbone Élémentaire
EEA	Agence Européenne de l'Environnement
ERLAP	European Reference Laboratory for Air Pollution
EEWRC	Energy, Environment and Water Research Center
EF	Facteur d'Enrichissement
EPA	Environmental Protection Agency
F	Fluore
Fe	Fer
FE	Facteur d'Enrichissement
Fe₂O₃	Oxyde de Fer
GEREP	Déclaration des émissions issues de leurs sites à fréquence annuelle
GAW	Global Atmospheric Watch
H	Hydrogène
IANESCO	Institut d'Analyses et d'Essais en Chimie de l'Ouest
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
IC	Chromatographe Ionique



ICP-OES	Plasma à Couplage Inductif - Spectrométrie d'Emission Optique
ICP-MS	Spectrométrie de Masse à Plasma à Couplage Inductif
IED	Directive relative aux émissions industrielles
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
I	Ions
K2O	Oxyde de potassium
K	Potassium
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
LRTAP	Long-Range Transboundary Air Pollution
LAURE	Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie
LTECV	Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte
LCSQA	Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air
M	Métaux
MFN	Mécanique des Fluides Numérique
Mn	Manganèse
MF	Météo France
MES	Matières en Suspension
MEDDE/MTES	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Devenue depuis Mai 2017 Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire
MgO	Oxyde de Magnésium
Mg	Magnésium
NMSE	L'erreur quadratique moyenne normalisée
N	Azote
Na₂O	Oxyde de sodium
NO₃	Nitrate
NH₄⁺	Ammonium
NO₃⁻	Nitrate
Na	Sodium
OC	Carbone Organique
O	Oxygène
OMM	L'Organisation Mondiale de la Météorologie
OMINEA	Format d'inventaire international pour la publication des informations de la qualité de l'air
O₃	Ozone
P	Phosphore
Ppb	Partie Par Billion
PPA	Plans de Protection de l'Atmosphère
PREPA	Plan national de Réduction des Emissions de Polluants Atmosphériques
PCAET	Plan Climat Air Énergie Territoriaux
PCE	Plans Climat Énergie
PRQA	Plan Régional pour la Qualité de l'Air
PRSE	Plans Régionaux Santé Environnement.
PSQA	Programme de Surveillance de la Qualité de l'Air
PPA	Plans de Protection de l'Air
PM	Particulate Matter = particule en suspension
PM 10	Particule en suspension de taille inférieure ou égale à 10 µm
PM 2.5	Particule en suspension de taille inférieure ou égale à 2,5 µm
QA/SAC-Americas	Quality Assurance Science Activity Centre – Americas



RGIE	Règlement Général des Industries Extractives
SFIC	Syndicat Français de l'Industrie Cimentière
SEDI	Service Entreprises et Dynamiques Industrielles
SRCAE	Schémas Régionaux Climat Air Energie
Si	Silicium
SO₂	Dioxyde de Soufre
SiO₂	Dioxyde de Silicium
SO₄⁻²	Sulfate
TGAP	Taxe Générale sur les Activités Polluantes
TSP	Poussières Totales en Suspension
Ti	Titane
UE	Union Européenne
UNICEM	Union Nationale des Industries de Carrières Et des Matériaux de construction
UNPG	Union Nationale des Producteurs de Granulats
3D	Trois Dimensions
σ	Diffusion turbulente

Glossaire

µg/m³ : microgramme de polluant par mètre cube d'air. 1 µg/m³ = 0,001 mg/m³ = 0,001 milligramme de polluant par mètre cube d'air.

µm : micromètre. 1 µm = 0,001 mm = 0,001 millimètre.

Anthropique : Relatif à l'activité humaine. Qualifie tout élément provoqué directement ou indirectement par l'action de l'homme.

Concentration : la concentration d'un polluant représente la quantité du composé présent dans l'air et s'exprime en masse par mètre cube d'air. Les concentrations des polluants caractérisent la qualité de l'air que l'on respire.

Conditions de dispersion : ensemble de conditions atmosphériques permettant la dilution des polluants dans l'atmosphère et donc une diminution de leurs concentrations (vent, température, pression, rayonnement...).

Emissions : rejets d'effluents gazeux ou particulaires dans l'atmosphère issus d'une source anthropique ou naturelle (exemple : cheminée d'usine, pot d'échappement, feu de bioamasse...).

Episode de pollution : période pendant laquelle la procédure d'information et d'alerte a été déclenchée traduisant le dépassement du niveau d'information et de recommandations voire du niveau d'alerte pour l'un ou plusieurs des polluants suivants : SO₂, NO₂, O₃ et PM₁₀.

mg/m³ : milligramme de polluant par mètre cube d'air. 1 mg/m³ = 0,001 g/m³ = 0,001 gramme de polluant par mètre cube d'air.

Moyenne 8 heures glissantes : Moyenne calculée à partir des 8 dernières moyennes horaires toutes les heures. Le pas de temps est égal à 1 heure et l'intervalle est de 8 heures.

ng/m³ : nanogramme de polluant par mètre cube d'air. 1 ng/m³ = 0,000001 mg/m³ = 0,000001 milligramme de polluant par mètre cube d'air.

Objectif à long terme : niveau à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.

Objectif de qualité : niveau à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.

Polluant primaire : polluant directement émis par une source donnée.

Polluant secondaire : polluant non émis directement, produit de la réaction chimique entre plusieurs polluants présents dans l'atmosphère.



Valeur cible : niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné, et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble.

Valeur limite : niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble.



L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

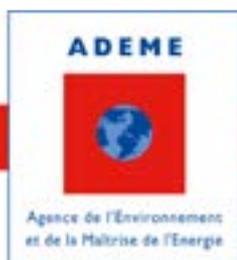


EMISSIONS DES POUSSIÈRES DES CARRIÈRES DANS L'AIR

L'industrie extractive a souhaité améliorer ses connaissances par le programme d'études "EMCAIR" – EMISSIONS des Carrières dans l'AIR. Suivant une même méthodologie répétée dans différentes conditions d'exploitation, pour différentes roches et sous différentes conditions, il se confirme que :

- les carrières produisent majoritairement des PM10, peu de PM2,5 avec un ratio PM2,5/PM10 évoluant typiquement en dessous de 0,20 ; elles enregistrent les dépôts les plus importants, soulignant qu'elles fonctionnent également comme « puits des particules les plus grossières qu'elles libèrent » ;
- les stations en champ proche enregistrent une influence limitée, que les analyses chimiques permettent (par la méthode dite de Lenschow) de quantifier ;
- la granulométrie des dépôts est large (0,1 à 250 µm) ; leur mobilisation peut remettre en suspension des fractions de PM10 et dans une moindre mesure, de PM2,5 ;
- une modélisation satisfaisante a pu être construite sur la dispersion des émissions de PM10 des carrières du bassin de Marquise par ATMO Hauts-de-France (ADMS-Urban) confirmant sur une surface significative (48 km²) la pertinence de la méthodologie proposée par le CITEPA pour évaluer le facteur facteurs d'émission ;
- pour les poussières totales en suspension (TSP), les résultats permettent de comprendre qu'au-delà de quelques mètres d'une source (hors influence météorologique), les TSP en carrière sont des PM10 puisque les particules supérieures ont sédimenté et donc ne sont plus en suspension.

Réalisée par des experts de la mesure et du contrôle de la qualité de l'air (AASQA), de la chimie des particules (LSCE/Chyprus Institute) et de l'inventaire des émissions (CITEPA) sous la coordination du syndicat professionnel de l'industrie des granulats (UNPG), l'étude EMCAIR montre que les émissions en carrières proviennent de points sources multiples disséminés dans un espace vaste et changeant dans le temps du fait du fonctionnement des exploitations. Ces émissions sont constituées par des particules grossières de nature minérale, majoritairement au-dessus des PM10, dont le rayon d'influence est le plus souvent très limité.



www.ademe.fr

