

“L'air est **essentiel à chacun**
et mérite **l'attention de tous.**”

Etude 2010

Etude de la composition des particules dans l'air de Saint-Malo

Campagne du 7 mai au 9 juin 2010



ORGANISME
DE MESURE, D'ÉTUDE
ET D'INFORMATION SUR
LA QUALITÉ DE L'AIR
EN BRETAGNE



Air Breizh
3 rue du Bosphore - Tour ALMA 8^{ème} étage - 35200 Rennes
Tél : 02 23 20 90 90 – Fax : 02 23 20 90 95

www.airbreizh.asso.fr

GLOSSAIRE	2
I. PRESENTATION	3
II. CONTEXTE REGLEMENTAIRE	3
III. MATERIEL ET METHODE	4
IV. CONTEXTE METEOROLOGIQUE	4
V. ACTIVITE PORTUAIRE	5
VI. LES CONCENTRATIONS ET COMPOSITION DES PARTICULES PM10	5
VII. IDENTIFICATION ET RECHERCHE DE LA CONTRIBUTION DES DIFFERENTES SOURCES D'EMPOUSSIEREMENT.	10
V. CONCLUSION / DISCUSSION	12

Glossaire

CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
Corg	Matière organique et carbonée des particules (fraction calculée pour chacun des échantillons en soustrayant la somme des masses des éléments mesurés à la masse totale collectées sur le filtre)
INRS	Institut Nationale de Recherche et de Sécurité
OMS	Organisation Mondiale de la santé
PIXE	Particle Induced X-rays Emission, méthode d'analyse multi-élémentaires
PM _{2,5}	Particules de diamètre aérodynamique inférieur ou égal à 2,5 µm
PM ₁₀	Particules de diamètre aérodynamique inférieur ou égal à 10 µm
Rfc	Concentration de référence (US-EPA):, concentration estimée à laquelle aucun effet néfaste sur la santé, non cancérigène, n'est susceptible d'apparaître pour une exposition continue des populations, y compris les plus sensibles, par inhalation, pendant toute la durée de la vie
Sources terrigènes	Particules issues de l'érosion éolienne des sols et des terres cultivées
TSP	Total Suspended Particulate
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
µg/m ³	Microgramme (10 ⁻⁶ g) par mètre cube

I. Présentation

Les particules sont des polluants omniprésents dans l'air, compte tenu de la diversité de leurs sources à la fois naturelles (embruns salins, érosion des sols,...) et anthropiques (utilisation de combustibles fossiles, industrie,...). Ces particules sont classées suivant leur taille ou granulométrie (diamètre des particules). En effet, plus les particules sont petites, plus elles peuvent pénétrer profondément dans les voies respiratoires, augmentant les risques sanitaires. Dans la terminologie courante, on appelle TSP (Total Suspended Particulate), l'ensemble des particules en suspension dans l'atmosphère et PM10, l'ensemble des particules de diamètre aérodynamique inférieur ou égal à 10 µm. En général, les sources naturelles produisent des particules grossières alors que les sources anthropiques produisent des particules de tout type de diamètre (fines et grossières).

La ville de Saint-Malo a sollicité Air Breizh afin répondre aux interrogations de Malouins au sujet de la pollution particulaire potentiellement générée par les activités industrielles situées au niveau du port.

Une première étude s'est déroulée du 2 août au 16 novembre 2006, pour évaluer les niveaux de pollution rencontrés. Les appareils de surveillance des TSP et PM10 ont été installés au niveau du stade Marville. Les mesures ont démontré que les niveaux de pollution en PM10 étaient supérieurs à ceux rencontrés à Rennes et Brest mais sensiblement identiques à ceux de Lorient. Il s'avère que les concentrations moyennes en particules mesurées sous le vent de la zone portuaire sont plus élevées que celles correspondant aux autres secteurs de vents, avec respectivement 27,6 µg/m³ contre 20,2 µg/m³ pour les TSP, et 21,3 µg/m³ contre 16,2 µg/m³, pour les PM10.

Dans le but de quantifier plus précisément les contributions de chaque source à la pollution particulaire inhalable par les Malouins, une seconde étude utilisant une nouvelle méthode d'analyse des particules a été effectuée du 7 mai au 8 juin 2010 sur le site du cimetière de Rocabay (proximité de la zone portuaire). Basé sur l'analyse de la composition chimique des particules, cette méthode leur applique un traitement mathématique particulier destiné à révéler les différentes sources d'émissions à partir de leur signature multi-élémentaire. Cette méthode, développée par le laboratoire ARCANÉ du Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan dans le cadre du programme de recherche PRIMEQUAL/PREDIT, a été validée par une campagne de mesure au niveau du site de mesure de la qualité de l'air d'Anglet (AIRAQ).

II. Contexte réglementaire

La réglementation française applicable aux particules en suspension est basée sur la directive 1999/30/CE de l'Union Européenne. Ce texte, traduit en droit français par le décret 2002-213 du 15 février 2002, ne s'applique qu'aux PM10 (particules de diamètre aérodynamique inférieur ou égal à 10 µm).

Par ailleurs, la circulaire du 12 octobre 2007 relative à l'information du public sur les particules en suspension dans l'air ambiant fixe des seuils d'alerte.

PM10	Seuils (µg/m ³)
Objectif de qualité Moyenne annuelle	30
Valeurs limites pour la protection de la santé Moyenne annuelle	40
Nombre de jours > 50 µg/m ³	35 dépassements autorisés par an
Seuil d'information Moyenne sur 24 heures glissantes	80 µg/m ³
Seuil d'alerte Moyenne sur 24 heures glissantes	125 µg/m ³

Fig.1 : Valeurs réglementaires pour les PM10 en 2010

III. Matériel et Méthode

Les prélèvements ont été effectués sur la ville de Saint Malo à l'emplacement du cimetière Rocabey, sous le dans une zone résidentielle susceptible d'être sous le vent du port.



Fig.2 : Localisation du point de prélèvement

L'appareil utilisé pour cette campagne était de type Partisol permettant une sélection granulométrique de la fraction PM10. L'appareillage était programmé de manière à prélever 12 heures consécutives pour un débit moyen de l'ordre de 1m³/h, de 8h00 à 20h00, puis de 20h00 à 8h00. Les prélèvements ont commencé le 7 mai pour se terminer le 8 juin 2010, ce qui a représenté au total une cinquantaine d'échantillons.

Les particules ont été collectées sur des membranes en polycarbonate de porosité 0,8 µm, sur lesquelles il a été réalisé une pesée avant et après prélèvement, ce qui donne accès à la masse totale de matière collectée et la concentration massique de PM10 dans l'air.

Les analyses multi-élémentaires PIXE (Particle Induced X-rays Emission) sont sous-traitées à un laboratoire partenaire. Ces analyses permettent la quantification d'une vingtaine d'éléments de masse supérieure ou égale au sodium. Il n'est donc pas possible de détecter les composés organiques à base de carbone et d'oxygène.



Fig.3 : Appareil de prélèvement des PM10

Le principe de la technique analytique utilisée est d'observer l'énergie du rayonnement X émis lors de l'interaction entre un faisceau de particules de haute énergie et les atomes de la cible à étudier.

IV. Contexte météorologique

La météorologie joue un rôle important dans les mécanismes de dispersion, de transformation et d'élimination des polluants atmosphériques.

Le mois de mai 2010 est plutôt frais et connaît une alternance de période sèche et humide, avec un temps orageux en fin de mois. Les premiers jours du mois de juin sont marqués par l'arrivée d'un anticyclone, s'accompagnant d'un temps chaud et ensoleillé. Les vents sont principalement orientés selon un secteur Nord à Est Nord-Est (46% des observations). Le préleveur a été sous le vent de la zone portuaire environ 25 % du temps durant la campagne (soit 21 échantillons impactés sur 49 prélèvements).

V. Activité portuaire

Les engrais représentent une activité prépondérante au port de Saint-Malo avec un trafic de plus de 500 000 tonnes. Viennent ensuite les bois, denrées alimentaires et les produits agricoles. De nombreux autres produits y transitent comme les produits chimiques et minéraux.

Les liaisons Trans-Manche avec les îles anglo-normandes représentent un tiers du trafic. Elles concernent non seulement le fret roulant et le transport des conteneurs, mais aussi les passagers.

Le port de Saint-Malo est également le premier port d'escale breton devant Brest et Lorient.

Le graphique ci-dessous reprend le nombre de navires à quai, par jour, durant l'étude.

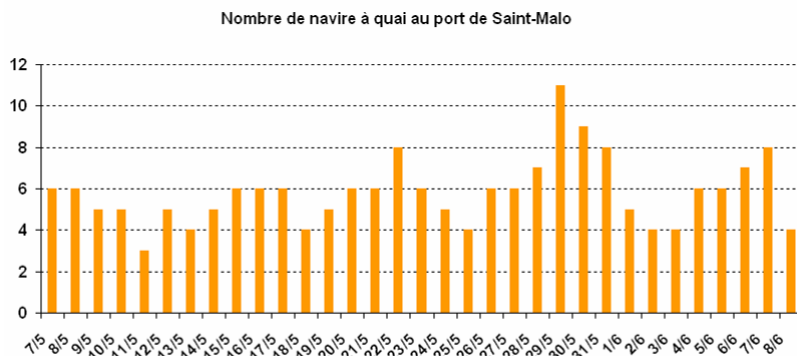


Fig.4 : Nombre de navires à quai au niveau du port de Saint-Malo (source Conseil Régional)

L'activité portuaire est la plus intense durant les week-ends (fin mai et début juin), avec un trafic de passagers accru entre Saint-Malo et les îles anglo-normandes.

VI. Les concentrations et composition des particules PM10

VI.1. Evolution temporelle

Les teneurs en PM10 mesurées par gravimétrie s'échelonnent entre $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, avec une moyenne de $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations maximales ($> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ont été relevées durant les journées du 10, du 25 et du 26 mai.

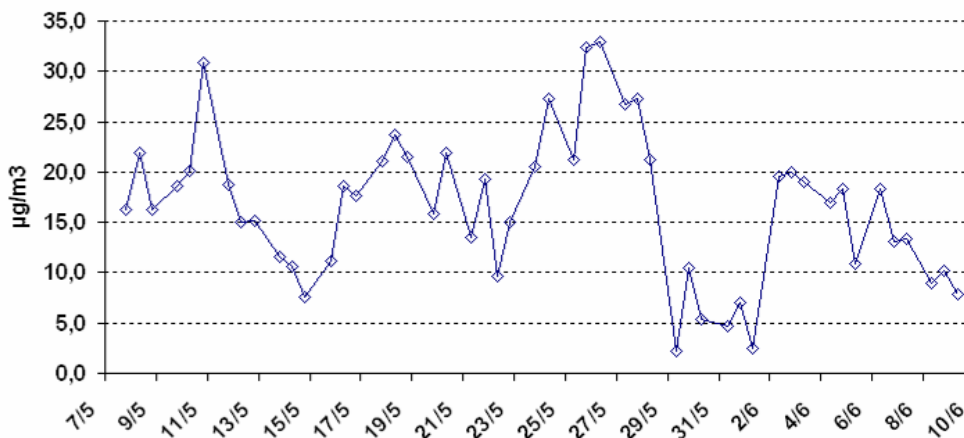


Fig.5 : Evolution des concentrations en PM10 prélevés du 07/05/10 au 09/06/10 au cimetière de la Rocabey à St-Malo

La comparaison avec le trafic portuaire ne permet pas de mettre en évidence un lien entre pollution particulaire et activité portuaire au niveau de site de prélèvement qui pourtant était sous le vent du port, du 25 mai de 3h00 à 12h00 et de 15h00 au lendemain 9h00. Ainsi les 2 échantillons couvrant la période du 25 mai de 8h00 au 26 mai à 8h00 ont été majoritairement sous l'influence de masse d'air en provenance du port. Ces derniers ne révèlent pas de concentrations plus importantes que d'autres prélèvements.

VI.2. Composition chimique des PM10

L'analyse PIXE donne une valeur pour les éléments détectés en μg de matière présente sur le filtre. A chaque élément le laboratoire a associé arbitrairement son poids d'oxyde équivalent qui traduit la forme majoritaire sous laquelle il est présent dans l'environnement. Les filtres ayant été pesés avant et après prélèvement, nous avons accès à la masse totale de matière collectée. En soustrayant la somme des éléments mesurés, il ne reste que la partie contenant la matière carbonée et organique des particules. Cette portion de la masse du prélèvement est appelée Corg.

Les données issues de l'analyse PIXE permettent d'accéder aux concentrations suivantes :

- 19 éléments: Na, MgO, Al_2O_3 , SiO_2 , SO_4 , Cl, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe_2O_3 , Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Pb, Cr,
- Corg calculé.

Environ 60% des particules (en masse) sont composées de matières organiques principalement émises par la combustion d'énergie fossile (trafic automobile, chauffage urbain, activités industrielles). On retrouve aussi des contributions assez importantes en chlore (Cl) et sodium (Na), respectivement 7% et 6% de la composition totale en masse, typique des embruns marins. La pollution tellurique (érosion de la croûte terrestre) est principalement caractérisée par les d'aluminosilicates (SiO_2 et Al_2O_3) à hauteur de 8,5%. Les sulfates représentent près de 11%. Enfin, les métaux lourds (potentiellement toxiques) ne constituent que 0,3% de la masse des particules.

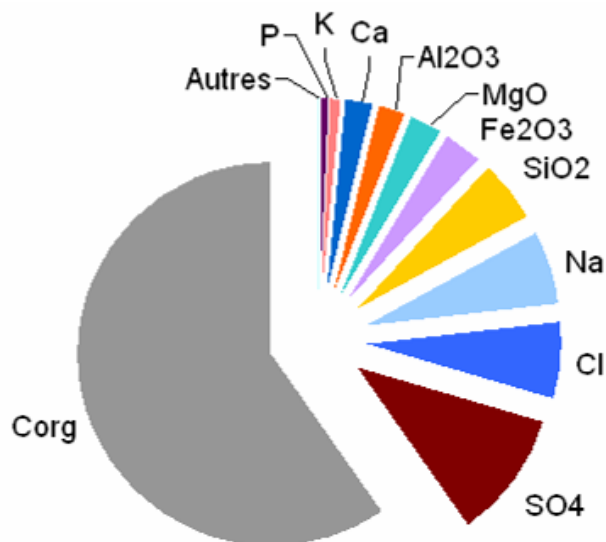


Fig.6 : Composition moyenne des PM10 durant la campagne de mesure

La synthèse des mesures figure en annexe 1.

L'évolution temporelle des concentrations (cf graphiques ci-dessous) permet de dégager des groupes d'éléments aux comportements similaires qui pourraient donc avoir des sources d'émissions communes, il s'agit du :

- sodium (Na), magnésium (MgO) et chlore (Cl),
- aluminium (Al_2O_3), silice (SiO_2) et fer (Fe_2O_3).

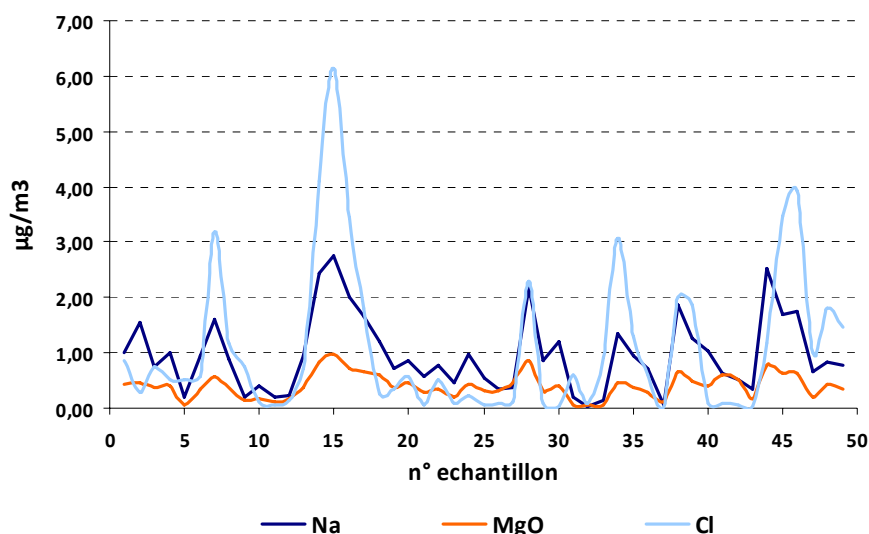


Fig.7 : Concentrations en sodium, magnésium et chlore relevées dans les PM10 du 7 mai au 8 juin 2010 à Saint-Malo

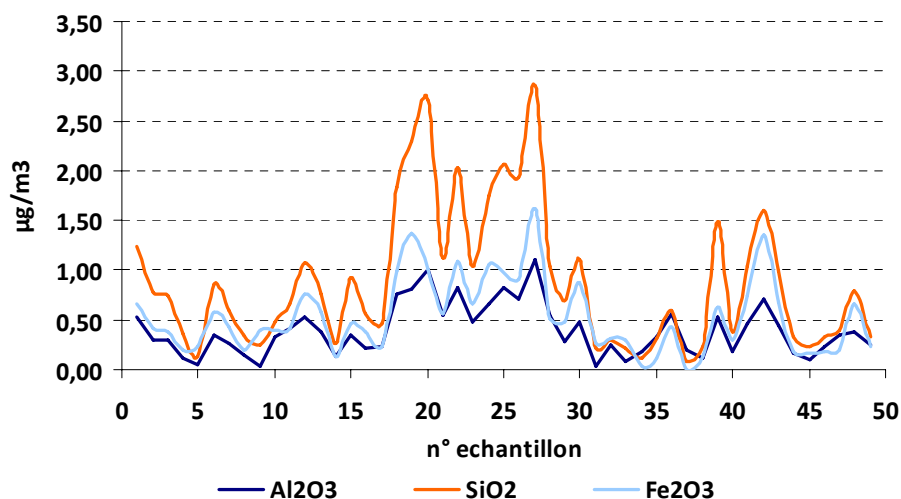


Fig.8 : Concentrations en aluminium, fer et silice relevées dans les PM10 du 7 mai au 8 juin 2010 à Saint-Malo

Bien que les métaux lourds présentent des concentrations faibles, un « pic » commun au plomb, zinc, manganèse, nickel et chrome apparaît pour l'échantillon 42. Ce prélèvement correspond à celui du 3 juin, 20h au 4 juin 8h, marqué par un vent d'Est faible (2 à 3 m/s). Ces éléments, émis principalement par les activités industriels, pourraient être issus d'émissions aux niveaux de la Zone Industrielle Nord de Saint-Malo.

VI.3. Etude des valeurs maximales

Etudions à présent les 2 périodes ayant connu les plus fortes concentrations en particules (PM10) à savoir le 10 et les 25 et 26 mai.

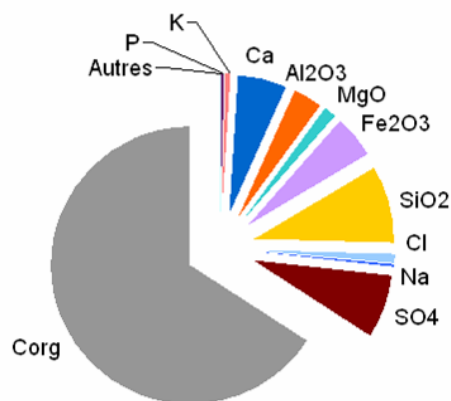
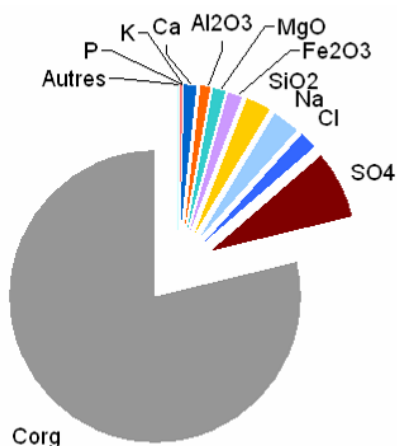


Fig.9 : Composition des PM10 prélevées le 10 mai de 8h à 20h Fig.10 : Composition des PM10 prélevées du 25/05 8h au 26/06 8h

L'examen des graphiques ci-dessus tend à montrer que ces 2 « pics » ont une origine différente. Si la fraction organique est prépondérante pour les 2 périodes et que les apports maritimes sont faibles, les niveaux de SiO₂, Fe₂O₃ et Ca sont nettement plus élevés pour la seconde période. Les conditions météorologiques sont complètement différentes, puisque le 10 mai est dominé par des vents soutenus d'Est et les 25, 26 mai par des vents faibles de Sud-Ouest. La nature des différentes sources est précisée dans le chapitre VII.

VI.4. Etude des concentrations relevées sous le vent du port

Afin de mettre en évidence l'impact des activités portuaires sur la composition des PM10 relevée au niveau du cimetière Rocabey, nous sélectionnons les échantillons qui ont été, à un moment du prélèvement, sous le vent du port. Il s'agit de 21 échantillons correspondants aux jours suivants : 14/05, 16/05, 18/05, 24/05 au 30/05, 01/06, 04/06, 05/06, 07/06 au 09/06.

Le tableau ci-dessous reprend la composition moyenne des particules en fonction de l'orientation du vent.

Concentration en µg/m ³	Sous le vent du port	Autres directions de vents
Na	0,88	1,03
MgO	0,39	0,41
Al ₂ O ₃	0,38	0,40
SiO ₂	0,80	0,93
P	0,05	0,04
SO ₄	1,39	2,01
Cl	1,33	0,91
K	0,13	0,13
Ca	0,36	0,37
Fe ₂ O ₃	0,48	0,56
Autres	0,04	0,06
Corg	9,45	10,51

Fig.11 : Composition moyenne des PM10 prélevés au cimetière Rocabey de Saint-Malo en fonction de la direction du vent.

Les différences les plus notables concernent les ions sulfates et le carbone organique, en concentration moins élevée lorsque les vents proviennent du port, et les chlorures dont les teneurs sont supérieures lorsque le préleveur est sous le vent du port.

L'étude des résultats exprimés en fonction de la durée d'exposition du prélèvement aux vents issus de la zone portuaire (de 0% à 100%) ne permet pas de conclure à une influence significative des émissions du port sur les teneurs atmosphériques en PM10 au cimetière de la Rocabey durant la période d'investigation.

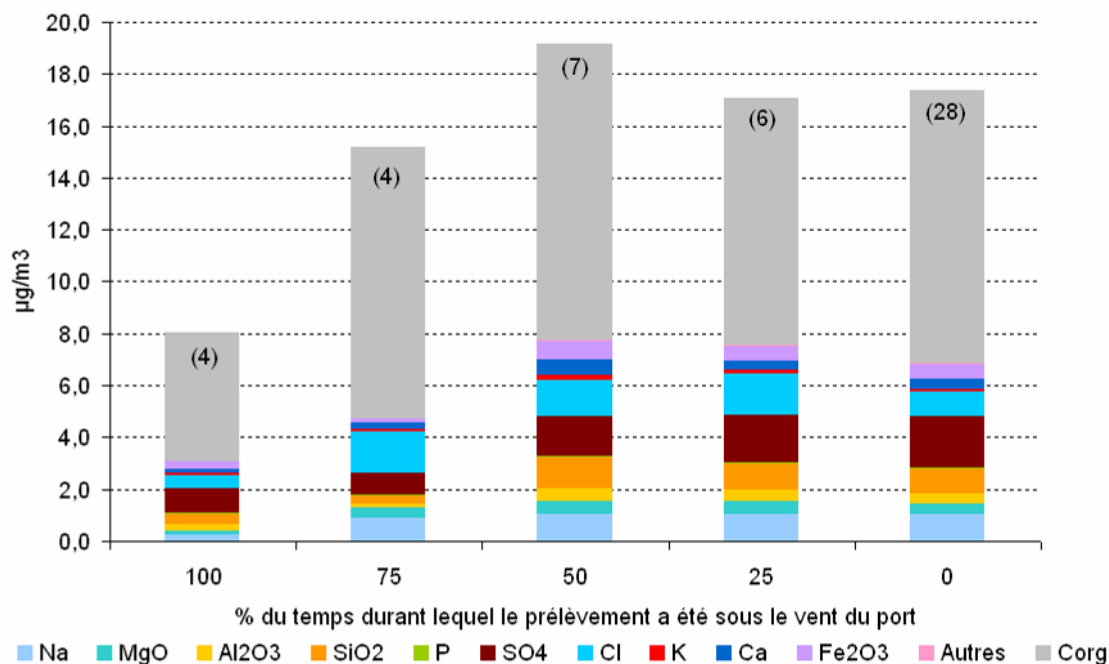


Fig. 12 : Composition des particules PM10 en fonction de la durée d'exposition sous le vent du port (nombre d'échantillon concerné).

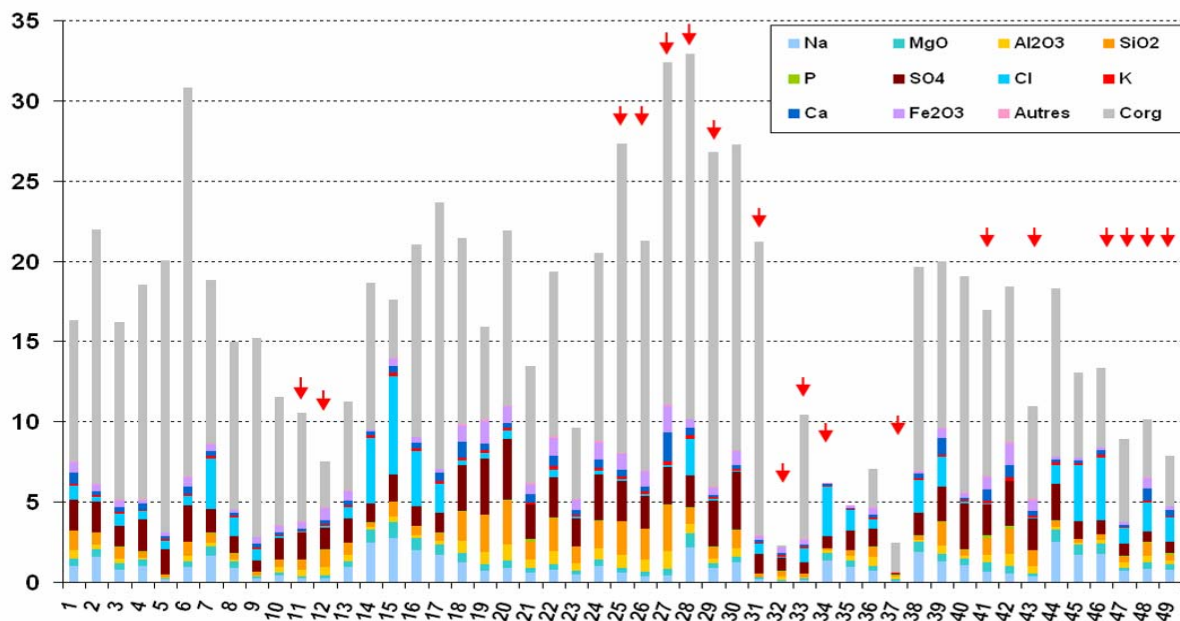


Fig. 13 : Composition des échantillons recueillis du 07/05/10 au 09/06/10 à Saint-Malo

L'étude de chacun des échantillons (les flèches rouges indiquent les échantillons pour lesquels le préleveur a été sous le vent du port) tend à montrer une grande hétérogénéité dans la composition des PM10. Ainsi, il apparaît difficile de mettre en évidence par cette approche temporelle l'impact du port sur les concentrations en particules.

Compte tenu des conditions de vent, le préleveur n'ayant été que potentiellement exposé aux vents du port durant 25% du temps, il n'est pas possible de conclure à une absence totale d'impact.

VII. Identification et recherche de la contribution des différentes sources d'empoussièremment.

Ce chapitre présente une synthèse du rapport d'étude n°01CB04-08b (Annexe 1) du laboratoire ARCANE (Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan - Unité Mixte de Recherche CNRS-IN2P3 / Université Bordeaux 1) qui a développé un traitement statistique de type « receptor modeling » permettant d'accéder à l'identification des principales sources de particules fines et à déterminer leur contribution à l'empoussièremment global.

Cette méthode est le fruit du programme de recherche Primequal initié par le Ministère en charge de l'environnement et l'ADEME et a été validée sur la station de prélèvement d'Anglet (64) du réseau de mesure AIRAQ.

Le traitement mathématique a permis de mettre en évidence 5 sources d'empoussièremment. La démarche d'interprétation des résultats se décompose en plusieurs étapes :

1. Vérification que la décomposition a du sens (test statistique de la qualité du modèle et confrontation avec les sources les plus évidentes (en particulier la source marine).
2. Identification des sources en étudiant :
 - a. les matrices des profils des différentes sources,
 - b. les contributions d'un élément d'une source données à l'empoussièremment,
 - c. les corrélations avec les directions du vent,
 - d. l'étude des évolutions jour/nuit,
 - e. l'impact potentiel du trafic portuaire
3. Calcul de la contribution des différentes sources identifiées à l'empoussièremment global.

Le graphique ci-dessous montre la qualité du modèle obtenu lorsqu'on décompose en 5 sources l'empoussièremment global, et qu'on attribue pour chaque prélèvement (un point sur le graphique) une intensité relative à chaque source. En abscisse, sont reportés les concentrations massiques réellement obtenues lors de l'analyse élémentaire et la pesée, et en ordonnée, les concentrations massiques obtenues par le modèle

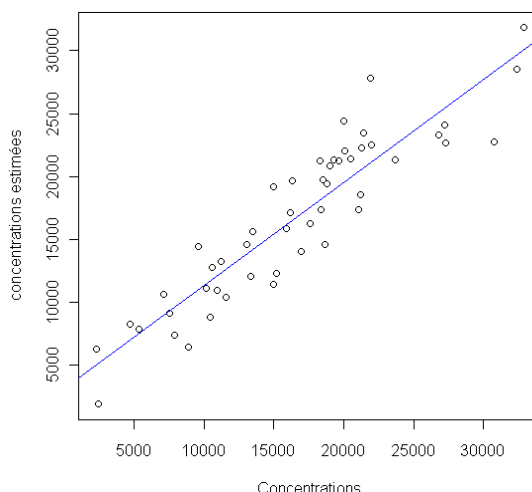


Fig.14 : Analyse de la qualité du modèle

Les résultats du traitement mathématique permettent de définir les sources suivantes :

Source 1 : La source marine dont le profil est le suivant Na (23%), MgO (8%) et Cl (45%). Ce profil est tout à fait classique, le sel marin contenant différents types de chlorures (de sodium et de magnésium, en particulier). La corrélation de l'intensité de cette source avec les vents de Nord-Ouest est sans ambiguïté.

Source 2 : La source terrigène dont la composition en aluminosilicates Al_2O_3 (11%) et SiO_2 (24%) est prépondérante

Source 3 : La source industrielle identifiée par le programme de traitement des données est d'une composition assez complexe, signe très certainement de la multiplicité des origines qui la composent. Les sulfates et la partie organique représentent la moitié de sa masse, et sa spécificité est due aux éléments métalliques qui la composent (Zn, Cr, Pb, V).

Source 4 : La source phénomènes de combustion avec une composante majoritairement carbonée (84%) révélatrice d'une nature organique de ces particules. A ces particules sont également associés les résidus soufrés qui constituent de l'ordre de 9% de la masse des particules.

Source 5 : Remise en suspension / source portuaire, il s'agit d'une source mixte certainement en présence d'un mix de source terrigène et d'autre source contenant du calcium, qui pourrait être la partie remise en suspension générée par le trafic portuaire, notamment en lien avec le déchargement de granit sur le port.

Une hypothèse alternative pourrait être que la source 5 soit liée à l'environnement direct du point de prélèvement avec les différents travaux au niveau du cimetière.

La contribution de chacune de ces sources figure sur la graphique ci-contre :

A la lumière de ce traitement statistique, il apparaît que la première source de pollution au PM10 à Saint-Malo correspond aux phénomènes de combustion (trafic automobile principalement). Les embruns marins contribuent à hauteur de 15%, les sources terrigènes pour 9 % et les sources industrielles à concurrence de 7% de l'empoussièrement global. Enfin, une source mixte proche du site de prélèvement qui pourrait inclure la contribution du port représente 14%.

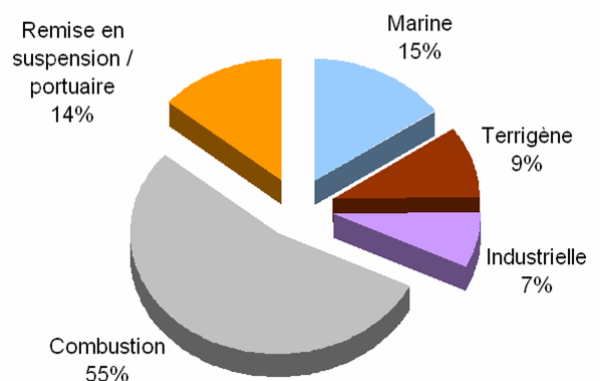


Fig.14 : Contribution des différentes sources d'émission à l'empoussièrement global

V. Conclusion / Discussion

Ce rapport fait état des mesures réalisées par Air Breizh du 7 mai au 9 juin 2010 au niveau du cimetière de la Rocabey à Saint-Malo.

Les particules fines (PM10) ont été collectées à l'aide d'un préleveur bas débit ($1\text{m}^3/\text{h}$) par période de 12 heures. Les échantillons ont ensuite été envoyés au laboratoire Arcane-CENBG (université de Bordeaux) pour être analysés par la méthode PIXE (Particle Induced X-rays Emission). Cette méthode, dite multi-élémentaire, permet d'obtenir les concentrations de 19 éléments (Na, MgO, Al_2O_3 , SiO_2 , SO_4 , Cl, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe_2O_3 , Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Pb, Cr) et de calculer la fraction organique.

L'analyse de l'évolution temporelle des concentrations des différents composés et la confrontation avec les paramètres météorologique ne permettent pas de conclure quant à une influence significative du port sur les concentrations en PM10 relevée au cimetière de la Rocabey durant la période de mesure. Néanmoins, le préleveur n'a été sous le vent du port que pendant 25% du temps, il n'est donc pas possible de conclure à une absence totale d'impact. Des investigations complémentaires pourraient être menées sur différents sites de Saint-Malo de manière simultanée et sur une période plus longue.

Un traitement statistique de type « receptor modeling » a été développé par le laboratoire Arcane pour identifier les principales sources de particules fines et déterminer leur contribution à l'empoussièrément global.

Pour la période étudiée, les résultats tendent à montrer que les phénomènes de combustion (trafic routier principalement) sont le principal contributeur (55%) à l'empoussièrément global en PM10 (particules fines inhalables et toxiques pour l'organisme), suivi des embruns marins (15%), de la source terrigène (particules issues du soufflage des sols) à hauteur de 9% et de la source industrielle (7%).

Une source mixte représente 14% de l'empoussièrément au niveau du point de mesure. Le laboratoire a émis l'hypothèse selon laquelle cette source serait un mélange entre l'activité portuaire et une source terrigène sans pour autant pouvoir dissocier l'importance de chacune des contributions.

Durant la campagne de prélèvements 3 journées ont connu un dépassement de l'objectif de qualité (fixé à $30\ \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$). L'étude de la composition des PM10 semble attester que la hausse des niveaux n'est pas imputable aux mêmes sources pour les 3 journées. Le 10 mai, les PM10 était principalement composés de Corg et de SO_4 , traduisant l'influence des phénomènes de combustion. La composition des échantillons correspondants aux prélèvements du 25 et 26 mai est dominée par le Corg mais présente des concentrations en SiO_2 et Ca relativement fortes, trahissant une influence de la source mixte (terrigenne/portuaire).



ANNEXE I

Synthèse des concentrations relevées au cimetière de la Rocabey à Saint-Malo
du 7 mai au 8 juin 2010

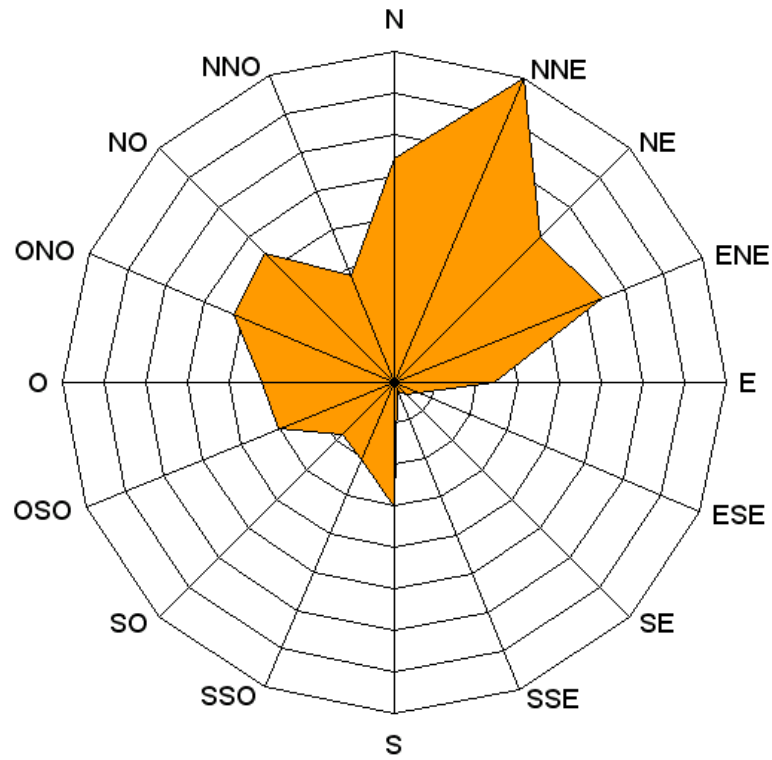
Eléments chimiques	Moyenne µg/m³	Minimale µg/m³	Maximale µg/m³
PM10	16,590	2,245	32,894
Na	0,966	<0,04	2,751
MgO	0,401	<0,07	0,977
Al ₂ O ₃	0,393	<0,04	1,107
SiO ₂	0,881	0,075	2,860
P	0,041	<0,02	0,205
SO ₄	1,770	0,087	3,775
Cl	1,071	<0,02	6,149
K	0,133	<0,01	0,232
Ca	0,368	0,004	1,829
Ti	0,014	<0,001	0,080
V	0,003	<0,001	0,011
Cr	0,002	<0,001	0,004
Mn	0,004	<0,0005	0,011
Fe ₂ O ₃	0,530	0,000	1,615
Ni	0,001	0,000	0,004
Cu	0,004	0,000	0,017
Zn	0,011	0,001	0,037
Br	0,006	0,001	0,013
Sr	0,002	<0,001	0,008
Pb	0,003	<0,0005	0,012
Corg	10,004	0,000	24,214

Les valeurs précédées du signe « < » signifient que les mesures sont inférieures à la limite de détection de la méthode d'analyse.



ANNEXE II

Rose des vents observés au niveau de la station Météo-France la plus proche du site d'étude
durant la période de l'étude (Dinard)





ANNEXE III



Rapport d'étude n°01CB04-08b

Analyse de particules fines prélevées à Saint-Malo : Identification et recherche de la contribution des différentes sources d'empoussièrement.

Cette étude a pour objectif d'identifier l'origine des poussières fines existant sur le port de Saint-Malo, et de quantifier les différentes sources mises en évidence.

Pour cela, l'approche proposée consiste à effectuer une grande série de prélèvements, à déterminer leur composition chimique en éléments majeurs, mineurs et traces par technique PIXE, puis à appliquer sur cet ensemble de données un traitement mathématique particulier. Celui-ci est basé sur l'adaptation du modèle du récepteur qui permet d'extraire les différentes sources contribuant à l'empoussièrement, à partir de leur signature multi-élémentaire, sans avoir à les connaître préalablement.

Ce deuxième rapport fait suite à celui en date du mois de juillet 2010 numéroté 01CB04-08, qui se rapportait à la partie prélèvements et analyse élémentaire des filtres par méthode PIXE.

On va ici s'intéresser au traitement des données issues de l'analyse par le traitement mathématique du type « source-récepteur ».

L'objectif de l'étude reste d'identifier une signature spécifique d'une source de particules liée à l'activité portuaire, soupçonnée d'être une cause importante de l'empoussièrement local.

-I- Données de base.

Les données issues de l'analyse PIXE ont été triées, mais certaines valeurs utilisées trop proches ou en dessous de la limite de détection devront être prise avec précaution car sans signification physique.

Au final, il reste donc :

- 66 filtres du 7 mai au 8 juin 2010 dont 15 vides (le filtre du 18 mai nuit a été mis en manquant car la valeur de $C \mu\text{g.m}^3$ est aberrante).
- 19 éléments : Na, MgO, Al_2O_3 , SiO_2 , SO_4 , Cl, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe_2O_3 , Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Pb, Cr (P a été enlevé).
- Corg calculé : 29 et 30 mai nuit mis à zéro car valeurs négatives

Ce qui représente donc environ 1000 valeurs.

L'analyse PIXE donne une valeur pour les éléments détectés en μg de matière présente sur le filtre. A chaque élément nous avons associé arbitrairement son poids d'oxyde équivalent qui traduit la

forme majoritaire sous laquelle il est présent dans l'environnement. Les filtres ayant été pesés avant et après prélèvement, nous avons accès à la masse totale de matière collectée, et si on y soustrait la somme des éléments que nous avons mesurés, il ne reste que la partie contenant la matière carbonée et organique des particules. Cette portion de la masse du prélèvement est appelée Corg.

-II- Modèle « source-récepteur » et traitement de type « PMF » (Positiv Matrix Factorization)

Préambule

Suite au traitement mathématique, nous donnerons des éléments d'interprétation des résultats obtenus par le calcul qui sont invariables, puisque le modèle appliqué a été validé par d'autres équipes à travers le monde, et par nous même sur d'autres sites de prélèvements.

Ce traitement identifie par le calcul 5 sources d'empoussièrement, ce qui est le maximum que l'on trouve dans la littérature (le plus souvent 4 sources seulement peuvent être identifiées par cette approche).

Notre démarche d'interprétation des résultats se décompose en plusieurs étapes :

1. On s'assure que cette décomposition a du sens
 - D'une part à l'aide du test de la qualité du modèle
 - Et d'autre part à l'aide de l'interprétation que l'on peut faire des sources les plus évidentes (en particulier la source marine).
2. On essaie ensuite de mettre un nom sur les sources identifiées
 - à l'aide de plusieurs résultats du calcul :
 - a. les matrices des profils des différentes sources
 - b. les contributions d'un élément d'une source données à l'empoussièrement
 - à l'aide des paramètres d'échantillonnage et données environnementales explicatives :
 - a. corrélations avec les directions du vent
 - b. étude des corrélations jour/nuit
 - c. trafic portuaire quantitatif et qualitatif
3. Le résultat de la contribution des différentes sources identifiées est alors directement donné par le calcul, ainsi que leurs contributions journalières et nocturnes à l'empoussièrement global. A partir des graphes, il sera alors possible d'aller plus loin dans l'explication et la compréhension des phénomènes, même si nous n'avons pas à l'heure actuelle tous les paramètres permettant l'explication de ces résultats.

Identification des sources

Toutes les interprétations qui suivent s'appuient sur le traitement mathématique des données, et dont les résultats principaux sont regroupés dans les différentes annexes de ce rapport.

1. Source 1 : La source marine

- C'est le profil qui contient le plus de Na (23,35%) ; MgO (7,98%) ; et Cl (45,29%). Ce profil est tout à fait classique, le sel marin contenant différents types chlorures (de sodium et de magnésium en particulier).
- Le chlore dans les particules provient à 100% de cette source, le MgO à 49% et le Na à 58%.
- La corrélation de l'intensité de cette source avec les vents d'Ouest / Nord-Ouest est sans ambiguïté.

2. Source 2 : La source terrigène

- Sa composition en aluminosilicates lève toute ambiguïté sur son authentification, bien que contrairement à ce que l'on observe habituellement, elle possède également une composante « Sulfate » et « C-Org »
- En revanche quand on regarde de quelle source proviennent majoritairement les éléments détectés sur un prélèvement, il apparaît clairement que cette source est responsable de plus de 40% de la présence de l'alumine et de la silice, et 76% de la présence du titane (sans doute à l'état rutilé, forme sous laquelle il est présent dans les aluminosilicates). Même si cet élément ne représente qu'une proportion faible dans la composition de source, cela démontre que celle-ci en est l'un des rares fournisseurs, ce qui est bien en accord avec toute la littérature sur le sujet.
- La corrélation avec la direction du vent n'apporte pas grand-chose si ce n'est que les conditions météo locales étaient ainsi lors de la période d'échantillonnage. Par ailleurs, ces apports terrigènes pouvant avoir lieu sur de longues distances, la corrélation directe avec une direction bien précise est parfois difficilement interprétable avec ces seuls éléments, et sans cartes de rétro-trajectoires par exemple.

3. Source 4 : La source phénomènes de combustion

- La caractéristique principale de cette source est sa composante majoritairement carbonée (84%) révélatrice d'une nature organique de ces particules. La source traditionnellement identifiée de celle-ci est celle des phénomènes de combustion, et donc les résidus de carburants fossiles issus de celle-ci (gaz, essence, gasoil, fuel,...). A ces particules sont également associés les résidus soufrés qui ont subi ou pas un certain nombre de transformations chimiques sous l'action de la T°c et du rayonnement UV pour se transformer en sulfates. Dans cette source, on retrouve bien la composée soufrée qui constitue de l'ordre de 9% de la masse de la particule.
- On retrouve cette source « phénomène de combustion » comme responsable de 78% de la partie carbonée présente dans un prélèvement, et comme celui-ci en représente la plus grande partie de la masse, il sera naturel de retrouver cette source comme contributrice majeure (54%) à l'empoussièrement du milieu. Cela signifie également que même si la partie sulfate n'est que 9% de la masse de la particule, cette source représente 45% des apports de cette espèce à l'empoussièrement global.

- L'étude de la corrélation de la direction des vents à l'intensité de cette source n'est pas immédiatement interprétable, bien qu'il semblerait qu'une tendance au Nord-Est indiquerait une source d'origine plutôt lointaine. Ces phénomènes de combustion englobent les systèmes de chauffage urbain (plutôt rares à cette saison), les émissions industrielles liées aux générateurs d'énergie, et tous les moteurs à explosion (gaz, 2 temps, essence, gasoil), et donc une bonne partie du trafic automobile.

4. Source 3 : La source industrielle

- Cette source identifiée par le programme de traitement des données est d'une composition assez complexe, signe très certainement de la multiplicité d'origines qui la compose. On notera malgré tout que les sulfates et la partie organique représentent la moitié de sa masse, et que sa spécificité est due aux éléments métalliques qui la composent.
- Il s'agit d'ailleurs de la principale source d'éléments métalliques qui ont généralement pour origine soit l'émission d'industries lourdes de la métallurgie, soit plus rarement les éléments traces des combustibles fossiles du type fuel lourds.
- L'étude de la corrélation avec la direction du vent est difficilement interprétable du fait du manque d'informations sur l'environnement local. Ici aussi comme dans le cas de la source terrigène, les phénomènes de transport à longue distance peuvent jouer un rôle non négligeable, mais le résultat brut est difficilement interprétable en l'état.

5. Source 5 : Remise en suspension / source portuaire

- Les deux éléments alumine et silice qui composent partiellement les particules de cette source sont quasiment dans le même rapport élémentaire que la source terrigène, de même qu'on note aussi la présence de titane. A la différence de celle-ci, on observe dans cette source la présence de calcium en forte quantité, de même qu'une composante en partie carbonée majoritaire (56%). On est ici très certainement en présence d'un mix de source terrigène et d'autre chose contenant du calcium, qui pourrait être la partie remise en suspension générée par le trafic portuaire.
- Cette interprétation de source mixte incluant une partie de la source terrigène est renforcée par le fait que cette source 5 est responsable de plus de 30% des aluminosilicates, mais également des 20% de Titane manquant à la source 4. Si elle ne contribue que peu, fort logiquement, à la composante partie carbonée, elle est à l'origine en revanche de 80% du Calcium total détecté, ce qui en fait une source avec ce traceur bien spécifique qu'il nous reste à identifier.....

Si l'on s'intéresse maintenant à la courbe de l'évolution de la contribution de cette source sur la période d'échantillonnage, on visualise clairement qu'elle présente une zone entre le 18 et le 25 mai où sa contribution est plus importante avec un pic en début et un pic en fin de zone.

En reprenant les données du trafic du port, on voit que sur la période d'échantillonnage, il y a eu un seul jour un transport de granit, justement entre le 17 et le 18 mai. Le granit à base d'aluminosilicate contient également du calcium, mais en faible quantité. En revanche il est probable que la manipulation effectuée lors du chargement ait entraîné la remise en suspension de poussières même parmi les plus fines pendant quelques jours. L'intensité de ce phénomène a pu naturellement varier en fonction des mouvements et du trafic dans le port.

- Le graphique de corrélation de l'intensité de cette source avec la direction du vent ne montre pas de direction préférentielle nette, contrairement à tous les autres graphes. Même si pour ceux-ci leur interprétation n'est pas immédiate, l'absence totale de corrélation ici renforce encore l'hypothèse d'une origine très locale de la source.

Les sources potentielles non identifiées lors de cette étude:

Un certain nombre de sources sont intéressantes à identifier et à observer dans le cadre d'études environnementales. Dans ce travail, on peut parler de deux sources qui n'ont pas été clairement identifiées par l'analyse des données :

- La source automobile

Dans ce type d'étude, la source automobile est généralement mise en évidence grâce aux émissions d'éléments issus des phénomènes de freinage (éléments métalliques), ainsi des phénomènes de remise en suspension, en plus de la partie carbonée liée aux phénomènes de combustion.

Le protocole de prélèvement choisi ici avait justement pour objectif de mettre en évidence cette source, de part la dualité jour/nuit de l'échantillonnage. Sur aucune des sources identifiées nous n'avons mis en évidence ce phénomène, ce qui signifie que cette source n'est visiblement pas très prépondérante en termes de particules émises sur le site choisi. L'éloignement du lieu de prélèvement d'une voie de grande circulation automobile explique très certainement le phénomène (ou l'absence de phénomène !) observé. Malgré tout, si cette source n'est pas identifiée comme source à part entière, elle existe forcément et doit se répartir entre la source combustion pour la partie échappement des moteurs, la source industrie pour les éléments métalliques issus des phénomènes de freinage, voire la partie remise en suspension pour les particules générées par le passage des véhicules

- La source portuaire

Celle-ci peut être décomposée à priori en 3 contributions possibles

- a. Les moteurs bateau : une rapide estimation par le calcul doit montrer que les émissions sont de toute façon faibles au regard de celles liées au trafic automobile de la ville.
- b. Le trafic automobile associé au trafic passager : On voit sur les relevés des départ/arrivé des bateaux que ce trafic est fortement lié à l'activité jour/nuit. Or pour chacune des sources identifiées, aucune différence d'intensité n'a été franchement mise en évidence par rapport à ce paramètre. Cela signifie que cette source-là est très certainement négligeable au point d'échantillonnage considéré.
- c. Le fret : Parmi l'ensemble des marchandises transitant dans le port, seule celle liée au mouvement du granit a été mise en évidence. Celle-ci est reliée à celle plus générale « remise en suspension ». Elle est identifiée comme une source à part entière (source 5) dont la contribution à l'empoussièrement global reste minoritaire (mais non nulle !).

Remarques relatives à l'interprétation des résultats

- Nous donnons ici des éléments d'interprétation qui n'ont pas la prétention d'apporter une explication fine à chacun des phénomènes observés. Malgré tout, ceux qui sont donnés sont assez robustes au vu de ce qui existe dans la littérature, et ne sont en tout cas jamais en incohérence avec le calcul ou les paramètres environnementaux. Malgré tout, ce travail est le fruit de résultat de recherches dont il n'est pas exclu que les développements ultérieurs permettent l'affinage des conclusions.
- Pour certains éléments à l'état de trace, et/ou qui ne sont pas détectés sur chaque filtre analysé, l'étude statistique perd de son sens, et il ne faut pas vouloir absolument donner une interprétation à des valeurs qui elles-mêmes n'ont pas de signification métrologique.

Contributions à l'empoussièrement

- La source marine (les embruns) contribue pour 15% à l'empoussièrement en PM10, ce qui est somme toute relativement faible compte tenu de sa proximité.
- La source terrigène est responsable d'environ 9% des particules recueillies, ce qui est cohérent avec ce que l'on trouve dans la littérature
- La source « phénomène de combustion » représente plus de la moitié des apports en masse de particule à l'empoussièrement global, ce qui est ici encore entièrement cohérent avec les résultats que nous avons pu obtenir sur d'autres sites, et ce que l'on retrouve dans la littérature. Si l'on compare le nombre de bateaux par jour et les véhicules à moteur qui en sortent, ou qui y rentrent, avec le nombre de véhicules à moteur en circulation dans la ville, on voit vite que la composante trafic portuaire de cette source n'est que très limitée, et au final donc que peu responsable de l'empoussièrement au titre des phénomènes de combustion.
- La source industrielle est donnée responsable pour 12% de l'empoussièrement, ce qui ne paraît pas anormal compte tenu de l'éloignement des émetteurs potentiels qui pourraient en être à l'origine.
- La source remise en suspension qui est sans doute l'addition d'une partie de source terrigène et d'une source liée chargement de granite, et pour lequel le phénomène est peut être accentué par le trafic de passagers. Cette source est non négligeable, et représente tout de même environ 14% de la quantité totale de poussières recueillies.

Conclusions

Les 5 sources que l'on a identifiées permettent d'expliquer 100% de l'empoussièrement du lieu d'échantillonnage.

Dans la source remise en suspension que l'on a attribuée au transport du granite, est sans doute associée une source terrigène plus globale.

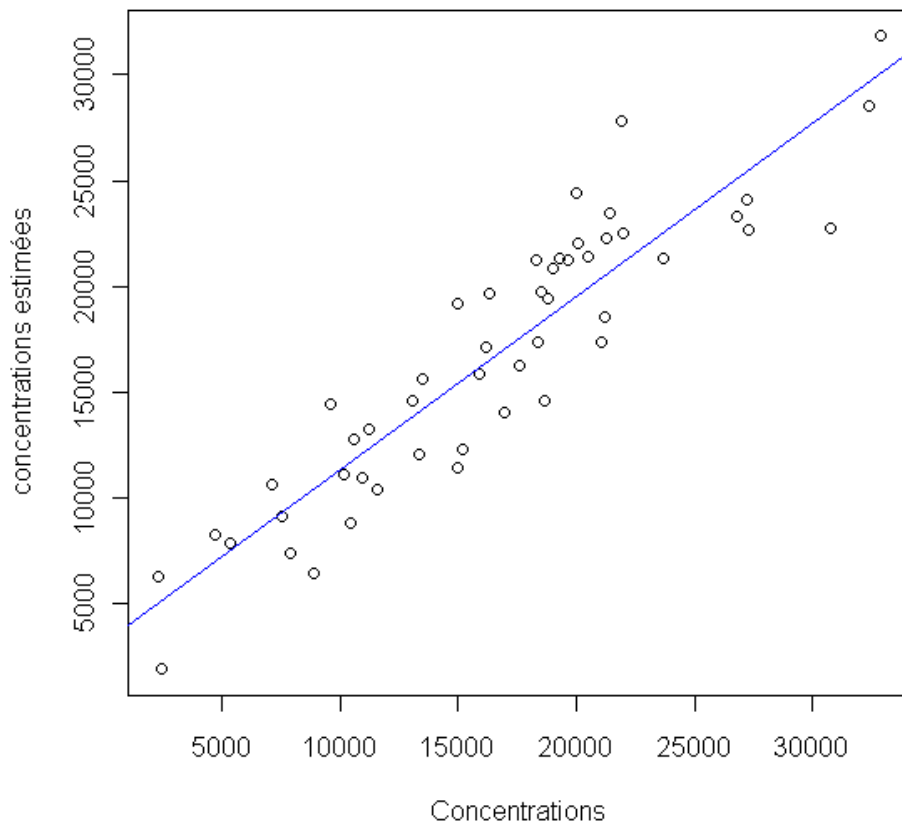
Ainsi, même si on n'évoque que des hypothèses pour certaines interprétations, les phénomènes pour lesquels on a de bonnes certitudes, permettent d'être assez affirmatif sur le rôle mineur que peut jouer le trafic portuaire sur l'empoussièrement, pour cette catégorie de particules fines étudiées lors de ce travail.

Il pourra par ailleurs être complété par une étude de terrain des conditions environnementales locales qui permettront sans doute d'affiner certaines conclusions.

Annexe 1 : Qualité du modèle

Ce graphique montre la qualité du modèle obtenu lorsqu'on décompose en 5 sources l'empoussièrèment global, et qu'on attribue pour chaque prélèvement (un point sur le graphique) une intensité relative à chaque source.

En abscisse est reporté les concentrations massiques réellement obtenues lors de l'analyse élémentaire et la pesée, et en ordonnée la concentration massique obtenue par le modèle



Annexe 2 : Résultats PMF en 5 sources

Profil des sources

Ce tableau donne la composition en éléments de chacune des sources déterminée par le calcul. La somme de tous les éléments d'une colonne doit redonner 100%.

	source1 (marine)	source2 (terrigène)	source3 (industrielle)	source4 (combustion)	source5 (port)
Na	23,35	0,00	7,01	3,78	0,00
MgO	7,98	0,62	4,75	1,05	2,12
Al ₂ O ₃	0,98	10,68	4,66	0,25	5,28
SiO ₂	0,00	23,86	10,28	0,90	14,77
SO ₄	6,91	29,91	30,59	8,93	0,00
Cl	45,29	0,00	0,00	0,00	0,00
K	1,41	0,93	1,94	0,42	0,95
Ca	0,81	0,00	4,04	0,00	13,07
Ti	0,00	0,71	0,00	0,01	0,13
V	0,01	0,02	0,13	0,01	0,00
Cr	0,02	0,01	0,05	0,00	0,01
Mn	0,00	0,06	0,12	0,01	0,03
Fe ₂ O ₃	0,00	11,02	11,30	0,52	7,67
Ni	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
Cu	0,01		0,02	0,00	0,00
Zn	0,02	0,24	0,41	0,02	0,00
Br		0,03	0,05	0,03	0,00
Sr	0,02	0,01	0,00	0,00	0,06
Pb	0,00	0,05	0,11	0,00	0,00
Corg	13,13	21,61	24,48	84,05	55,92

Contribution par élément des sources à l'empoussièrement

Ce tableau indique pour chaque élément de quelle source il provient. Pour un élément donné, la somme d'une ligne correspondant aux différentes sources potentielles de sa provenance doit redonner 100%.

	source1 (marine)	source2 (terrigène)	source3 (industrielle)	source4 (combustion)	source5 (port)
Na	58,43	0,00	8,49	33,08	0,00
MgO	49,06	2,32	14,15	22,70	11,77
Al ₂ O ₃	6,36	42,42	14,63	5,62	30,97
SiO ₂	0,00	40,49	13,79	8,70	37,02
SO ₄	9,69	25,69	20,77	43,84	0,00
Cl	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	26,77	10,88	17,89	28,12	16,34
Ca	5,58	0,00	13,41	0,00	81,01
Ti	0,00	76,20	0,00	3,34	20,45
V	5,61	7,95	47,16	39,28	0,00
Cr	31,50	12,40	47,54	0,00	8,56
Mn	0,00	21,40	33,98	29,73	14,89
Fe ₂ O ₃	0,00	32,13	26,06	8,74	33,06
Ni	0,00	0,00	72,57	21,97	5,46
Cu	5,18	89,23	5,59	0,00	0,00
Zn	5,36	32,40	43,26	18,99	0,00
Br	32,57	7,15	10,06	49,25	0,97
Sr	22,57	3,90	0,00	16,27	57,26
Pb	0,00	28,89	57,74	13,38	0,00
Corg	3,43	3,45	3,09	76,82	13,20

Le tableau suivant donne source par source la contribution de chacune d'entre elles à l'empoussièrement globale

source1	15,38
source2	9,42
source3	7,45
source4	53,85
source5	13,91

Source 1 : source marine

Source 2 : source terrigène

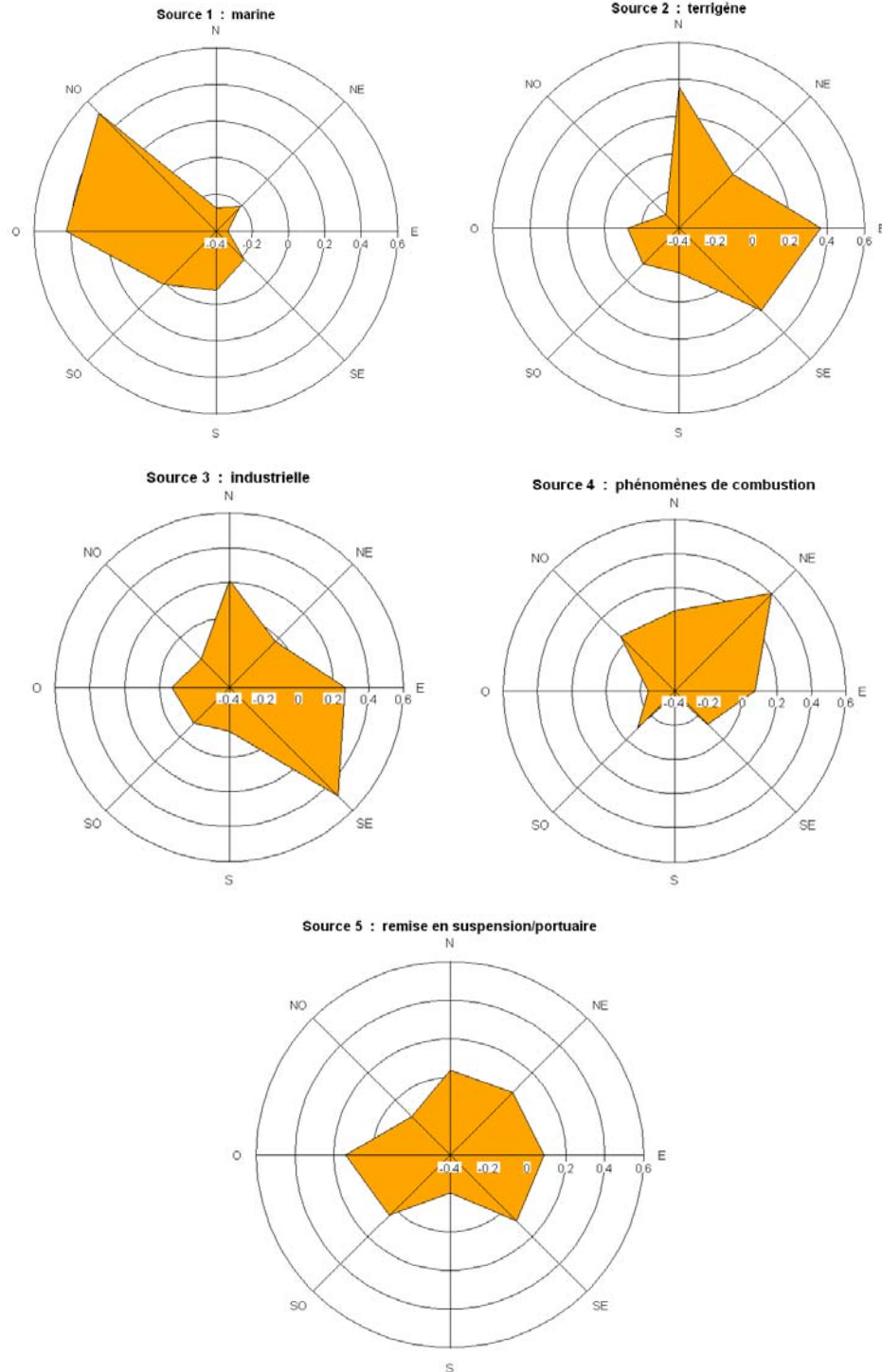
Source 3 : source industrielle

Source 4 : source phénomène de combustion

Source 5 : source remise en suspension/source portuaire

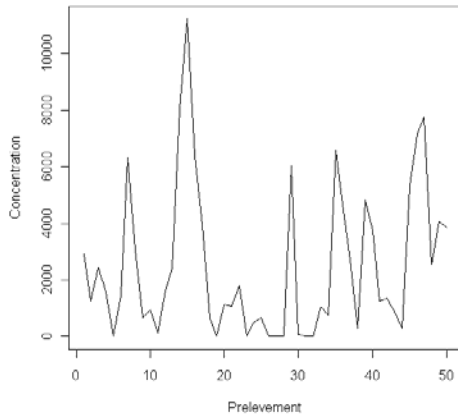
Annexe 3

Corrélations entre la direction des vents et les différentes sources identifiées

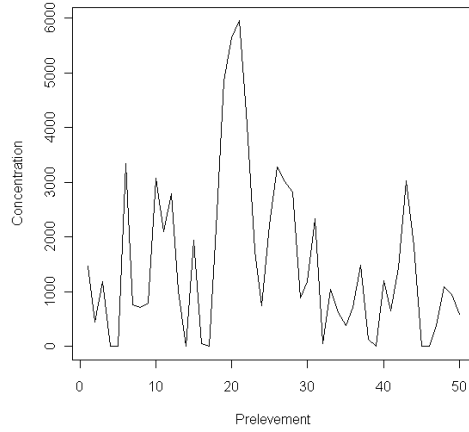


Courbes de l'intensité relative des différentes contributions à l'empoussièrèment global

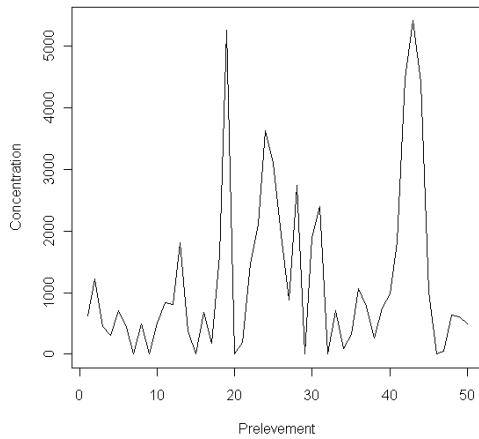
Courbe des contributions de la source 1 de PMF



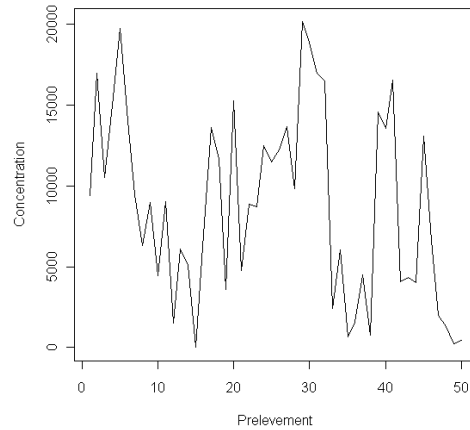
Courbe des contributions de la source 2 de PMF



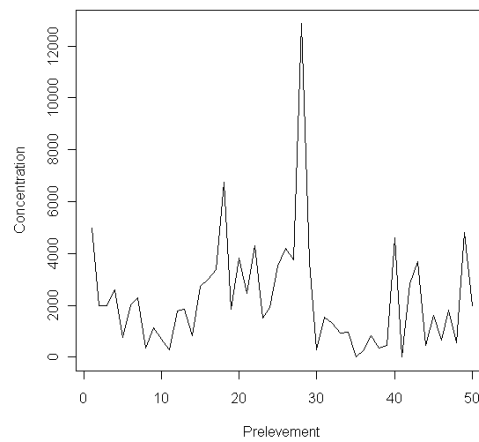
Courbe des contributions de la source 3 de PMF



Courbe des contributions de la source 4 de PMF



Courbe des contributions de la source 5 de PMF



Annexe 5

Courbes de l'intensité relative Jour/Nuit des différentes sources

