EXPERTISES

JUIL. 2017

PROJET TEMMAS

TELEDETECTION, MESURES IN-SITU ET MODELISATION DES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES INDUSTRIELS

Application au cas de la raffinerie de Provence

RAPPORT FINAL

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :

ONERA THE FRENCH AEROSPACE LAB — Laboratoire Chimie Environnement — Aix*Marseille université — LA — Université Paul Sabatier TOULOUSE III — TOTAL — AirPACA QUALITÉ DE L'AIR — Cerea Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique

REMERCIEMENTS

Les partenaires scientifiques du projet TEMMAS souhaite remercier les membres du comité de pilotage et l'ensemble des personnes ayant permis le lancement du projet et le bon déroulement des campagnes de mesure.

Emmanuel FIANI - ADEME
Delphine COTTET – ADEME
Chloé MASSOUBRE - ONERA
Myriam PLANTE - ONERA
Anthony DROUAIRE – ONERA
Sandra LAPEYRIE – Air PACA
Frédéric MARTY – Air PACA
Sébastien MATHIOT – Air PACA
Damien PIGA – Air PACA
Alexandre ARMENGAUD – Air PACA
Sylvie MENGOZZI – TOTAL La Mède
François WIOLAND TOTAL La Mède
Georges FAUQUE – TOTAL La Mède
François BOURASSE TOTAL La Mède
Christine BERTRAND – TOTAL Raffinage
Jean-Philippe HALLET – TOTAL Raffinage
Catherine JUERY – TOTAL LQA
Guillemette COURTIER - TOTAL LQA
Pierre MANGEON - TOTAL LQA
Sarah LE PARMENTIER - TOTAL LQA
Christian SEIGNEUR – CEREA
Laurent HESPEL – ONERA
Romain CEOLATO – ONERA
Thibault DARTIGALONGUE – ONERA
Christian CHATELARD – ONERA
Jean-Michel Martin – LA

CITATION DE CE RAPPORT

Pierre-Yves FOUCHER , Alexandre ARMENGAUD , Guillemette COURTIER , Philippe DELIOT , Olivier DUCLAUX, Amandine DURAND , Michel FRACES , Thierry HUET , Catherine JUERY , Sandra LAPEYRIE , Carole LEGORGEU , Jean-François LEON , Frederic MARTY , Damien PIGA , Valentin RAFFORT, Yelva ROUSTAN, Claire SARRAT, Brice TEMIME-ROUSSEL, Henri WORTHAM. 2017. PROJET TEMMAS : Télédétection, Mesures in-situ et Modélisation des polluants atmosphériques industriels. Application au cas d'une raffinerie industrielle.

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 : 1381C0054

Projet de recherche coordonné par : Pierre-Yves FOUCHER (ONERA)
Appel à projets de recherche : CORTEA, édition 2013

Coordination technique - ADEME : FIANI Emmanuel
Direction/Service : Direction Productions et Energies Durables, Service Entreprises et Eco-technologies

Rapport Final

TABLE DES MATIERES

Résumé 6
1. CONTEXTE DU PROJET 7
1.1. Contexte environnemental et enjeux économiques et sociétaux 7
1.2. Positionnement du projet 9
2. CAMPAGNES DE MESURE 11
2.1. Liste des instruments déployés 11
2.2. Cartes du site 12
2.3. Mesures au niveau des émissaires 13
2.4. Mesures Lidars 19
2.5. Mesures in situ 21
2.6. Mesures ballon captif 52
2.7. Mesures hyperspectrales aéroportées 55
2.7.1. Caractéristiques des capteurs aéroportés embarqués 55
2.7.2. Montage dans le Piper 56
2.7.3. Acquisitions réalisées 58
2.7.4. Illustration des panaches observés 65
2.7.5. Analyse différentielle temporelle : emprise des panaches observables et estimation des débits 77
2.7.6. Conclusions 81
3. TRAVAUX DE MODELISATION 82
3.1. Modèle CTM Polyphemus PinG 82
3.1.1. Description des simulations 82
3.1.2. Émissions 83
3.1.3. Météorologie 83
3.2. Évaluation par comparaison aux mesures d'AirPACA 84
3.2.1. Échelle des Bouches-du-Rhône 84
3.2.2. Voisinage de la raffinerie 84
3.3. Évaluation par comparaison aux mesures de la plate-forme Massalya 87
3.3.1. Concentrations des PM1 87
3.3.2. Composition chimique des PM1 88
3.3.3. Concentrations en nombre de particules 92
3.4. Modèle CTM CHIMERE 94
3.4.1. Description des simulations 94
3.4.2. Résultats 95
3.5. Modèle dispersion fine échelle SLAM 96
3.5.1. Description des simulations 96
3.5.2. Maquette et maillage du site industrielle 96

3.5.3. Base de données de champ de vents 97
3.5.4. Dispersion des polluants 98
4. BILAN – SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS 100
4.1. Bilan des analyses des prélèvements atmosphériques 100
4.2. Bilan des mesures « on line » 100
4.3. Bilan des mesures hyperspectrales 101
4.4. Bilan de la comparaison modélisation / mesures 101
5. CONCLUSIONS –PERSPECTIVES - RECOMMANDATIONS 102
Références bibliographiques 104

Résumé

Le projet TEMMAS : Télédétection, Mesures in-situ et Modélisation des polluants atmosphériques industriels a pour objectif de mettre en synergie les techniques de caractérisation optiques par télédétection avec les mesures in situ d'analyses des propriétés microphysiques des rejets atmosphériques d'un site industriel afin d'améliorer la compréhension de l'évolution des aérosols dans l'environnement proche et la modélisation de la qualité de l'air à fine échelle.

Dans ce cadre, deux campagnes de mesures ont été réalisées sur le site de la raffinerie TOTAL de La Mède. La première campagne a eu lieu en Septembre 2015 sur une période de dix jours et la seconde s'est déroulée en février 2016 sur dix jours également. Durant cette campagne, différents ateliers de mesures ont été déployés, en particulier : (i) prélèvements d'aérosols sur filtres en sortie de l'émissaire principal, à l'intérieur et à l'extérieur du site ; (ii) prélèvement et mesures « on line » des propriétés microphysiques des aérosols et des concentrations de gaz traceurs des panaches à l'extérieur du site; (ii) mesures hyperspectrales aéroportées dans le domaine réflectif.

Les résultats obtenus montrent de façon claire qu'il est possible de mettre en correspondance les propriétés microphysiques des aérosols avec les gaz traceurs de panache à partir de mesures sol et qu'il est possible d'associer à chaque condition de vent une ou des sources principales (raffinerie, réseau routier, air maritime,…) pour les différents points de collecte au sol. Si la cartographie des aérosols par Lidar n'a pu être réalisée suite à différents problèmes techniques lors des campagnes, les acquisitions d'images hyperspectrales ont montré la possibilité de localiser les sources d'aérosols et d'identifier le type et l'épaisseur optique en bonne adéquation avec les données sol. Enfin l'exercice de modélisation fine échelle réalisé a montré qu'il était possible de reproduire la dispersion du panache avec une très bonne résolution spatiale avec des résultats en bonne cohérence avec les mesures sols.

1. CONTEXTE DU PROJET

Aujourd'hui il existe très peu de données d'observations permettant de suivre l'évolution spatio-temporelle des émissions en champ proche sur site industriel et donc de valider la modélisation numérique des processus de chimie-transport mis en jeu à petite échelle en particulier pour les aérosols les plus fins. En effet, même s'il existe des données d'inventaire des émissions canalisées par les industriels et des estimations des flux diffus, les rejets atmosphériques interagissent avec leur environnement et ainsi se transforment. Par conséquent, les particules émises ne sont pas nécessairement celles inhalées à 1km de là. La compréhension des mécanismes de dispersion et de modification physico-chimique des particules dans l'atmosphère entre les différentes sources de polluants industriels ou non et la mesure de la qualité de l'air en zone proche est un problème majeur si l'on veut pouvoir disposer de modèle de qualité de l'air fiable à l'échelle locale et pouvoir définir les actions spécifiques à la source à entreprendre pour son amélioration.
Ce projet s'inscrit très clairement dans la problématique de la caractérisation de l'évolution de la granulométrie et des propriétés des aérosols depuis la source d'émission à la formation d'aérosols secondaires afin de pouvoir faire le lien entre les données à l'émission et leur exploitation in fine au titre de l'amélioration de la qualité de l'air. Ce projet de recherche en connaissances nouvelles est ainsi centré sur la mesure par télédétection à haute résolution spatiale par moyens aéroportés et depuis le sol des polluants atmosphériques proches des émissions industrielles et lors de la dilution du panache dans son environnement immédiat afin d'améliorer la modélisation locale et régionale de leurs impacts sanitaires. Ce projet apportera ainsi sa contribution aux actions permettant de mieux cibler localement les actions futures à réaliser pour respecter les seuils réglementaires d'exposition aux particules les plus fines en particulier.

1.1. Contexte environnemental et enjeux économiques et sociétaux

Problématique santé-environnement :
En 2005, le programme Clean Air for Europe (CAFE, 2005) estimait à 9.6 mois l'espérance de vie moyenne perdue par l'exposition de la population de l'Union Européenne aux particules fines (PM2.5, masse des particules de diamètre inférieur à 2.5 µm) ; soit une perte annuelle de 4 millions d'années de vie dans l'UE. Selon cette même étude, l'exposition au PM2.5 serait également responsable de 386 000 décès prématurés par an. Dans le même temps, le cadre législatif en matière de surveillance de la qualité de l'air a été renforcé principalement pour les particules fines (PM2.5). En vertu de la directive européenne 2008/50/EC, les États membres sont ainsi tenus, d'ici à 2020, de réduire l'exposition de la population urbaine aux PM2.5 de 20% par rapport aux chiffres de 2010. Elle leur impose également de ramener les niveaux d'exposition au-dessous de 20 µg.m-3 d'ici 2015 dans ces zones. Sur l'ensemble de leur territoire, les états membres devront enfin respecter le plafond de 25 µg.m-3 fixé pour les PM2.5. Abaisser les concentrations en PM2.5 dans l'atmosphère suppose de connaître les principaux leviers gouvernant les niveaux observés. Or cette connaissance est encore très incomplète. Un important travail a été réalisé et se poursuit pour mieux connaitre l'impact du transport routier et la combustion de la biomasse sur les concentrations ambiantes de particules. Par contre, l'impact des émissions industrielles sur l'aérosol atmosphérique reste mal appréhendé. Ces sources peuvent pourtant modifier très significativement les caractéristiques physico-chimiques de l'aérosol ambiant dans et à proximité des grands centres industriels.
Spécificité de la zone industrielle Fos-Berre
Le pourtour de l'Étang de Berre est une zone densément peuplée, regroupant 29 communes et comptant 400 000 habitants. Les zones d'habitation et les zones d'activités industrielles sont aujourd'hui d'avantage imbriquées du fait de l'installation progressive de nombreuses industries ainsi que de l'étalement urbain au cours des 50 dernières années. La zone Fos-Étang de Berre est l'une des plus importantes zones industrielles d'Europe, regroupant sur plusieurs sites, un important complexe pétrochimique et sidérurgique. Cette zone industrielle concentre également plus de 430 installations classées pour la protection de l'environnement et 82 installations Seveso II "seuil haut". Les principaux secteurs d'activités concernés sont le raffinage pétrolier représentant près de 30 % de la capacité totale de raffinage française, la chimie organique (Naphtachimie, Arkema, Ineos…), la sidérurgie (Ferifos, Arcelormittal…) et la construction aéronautique (Eurocopter, Dassault Aviation).

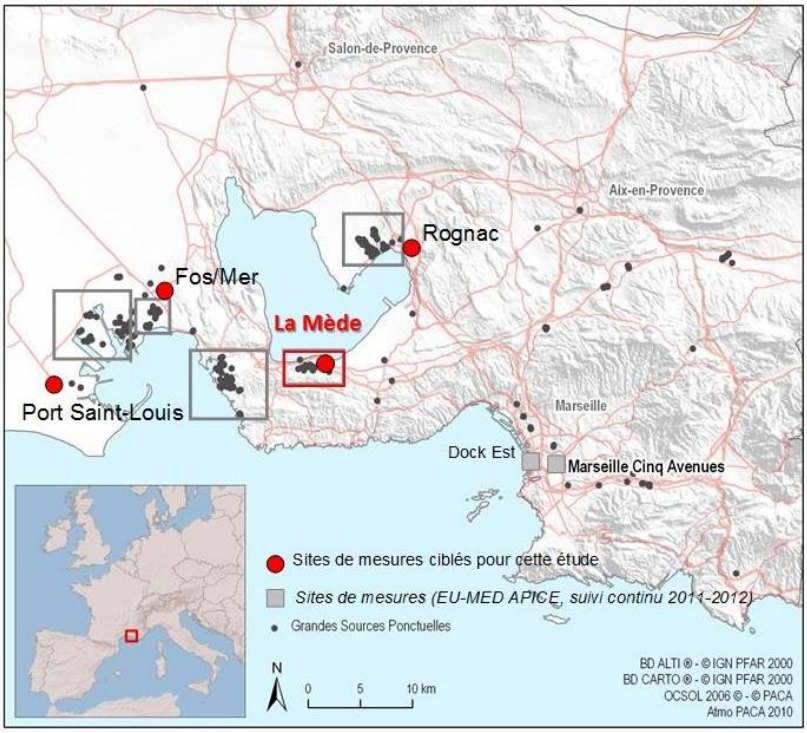


Figure 1 : Implantation des principales sources industrielles sur le pourtour de l'étang de Berre et emplacement des sites d'études sélectionnés

Les industries sont regroupées sur quatre sites principaux (figure 1) : 1/ Berre-l'Étang, 2/ Fos-sur-Mer et Port-Saint-Louis-du-Rhône, 3/ quartier de Lavéra à Martigues et 4/ la Mède à Châteauneuf-les-Martigues. Ce complexe industriel est alimenté par le plus important port français et du pourtour méditerranéen, le 4eme port européen et le 3eme port mondial pour le pétrole et les dérivées du pétrole. 61% du trafic total d'hydrocarbures en France se concentrent en effet sur le Grand Port Maritime de Marseille (GPMM). Ce territoire est également traversé par un réseau routier et autoroutier particulièrement dense qui supporte un fort trafic de poids lourds lié aux flux interrégionaux et aux dessertes des zones industrielles, du GPMM et de l'aéroport Marseille-Provence (3eme aéroport français) (Atiyeh, 2006). Bien qu'aucun véritable lien direct entre pollution de la zone et impact sanitaire n'ait encore pu être très clairement mis en évidence sur ce territoire, des études conduites ces dernières années montrent une particularité du pourtour de l'étang de Berre en matière de santé publique. Les études du SIRSéPACA montrent ainsi une surmortalité liée aux maladies respiratoire telles que le cancer du poumon avec des maxima à 75,6 cas pour 100 000 habitants dans le canton de Port St Louis situé à l'ouest du golfe de Fos. De façon plus générale, on observe sur cette zone, une sur-hospitalisation des habitants pour des affections respiratoires avec des taux de 13,7/100 000 habitants à l'Ouest de l'Etang de Berre (Fos/Mer et Istres). La zone industrielle de Fos-Berre, de par ses particularités en terme d'émissions industrielles et d'exposition des populations, est propice à la mise en œuvre de notre protocole expérimental, alliant observations de télédétection, mesures in situ et modélisation numérique du transport et des transformations en champ proche des sources.

La problématique industrielle pour la maîtrise des effluents

L'industrie est contrainte de respecter des normes d'émissions. La définition de ces normes à l'émission a pour objectif de diminuer l'exposition des populations européenne en deçà de seuil de qualité de l'air [ref Thematic Strategy for Air Pollution]. Ces travaux s'appuient largement sur des modélisations de chimie transport, officiellement reconnu pour appréhender la relation entre émission et exposition des populations. La complexité des paramètres à prendre en compte (météorologies, chimie physique de l'atmosphère, variété des sources d'émission, contraintes numériques …) ne permettent de ne modéliser qu'une approximation de la réalité. Dans le cas des polluants secondaires comme les particules mesurées dans l'air, les interactions entre différentes sources de pollution / polluants doivent être évaluées pour identifier la contribution réelle de chaque source. L'approche complémentaire développée dans le cadre de TEMMAS (mesures & modélisations) devra permettre d'avoir une appréciation plus réaliste de la relation entre émissions polluantes et qualité de l'air

Contexte scientifique

Plusieurs sources d'incertitude existent dans les modèles de qualité de l'air : les données d'entrée (météorologie, conditions aux bords du domaine, émissions) et la formulation du modèle (paramétrisations, algorithmes numériques). Une source d'incertitude majeure concerne les émissions de composés organiques : d'une part la spéciation chimique des composés organiques volatils (COV) et d'autre part la fraction gazeuse des composés organiques semi-volatils (COSV).

Les inventaires d'émissions donnent généralement les émissions de COV en termes de COV totaux non-méthaniques. Ensuite, une spéciation chimique doit être appliquée pour obtenir la composition moléculaire des COV. Cette spéciation est définie pour différentes catégories de sources, mais fondée sur un nombre limité de mesures. Une étude récente a montré que si certaines émissions de COV sont assez bien définies, d'autres sont entachées d'erreur allant jusqu'à un facteur 2 en moyenne et pouvant aller jusqu'à un ordre de grandeur dans certains cas (Koohkan et al., 2012). Étant donné que la spéciation chimique des COV affecte la réactivité chimique (et, par conséquent, la formation de polluants tels que l'ozone et les aérosols secondaires), il est important de bien caractériser cette spéciation.

Par ailleurs, les modèles de qualité de l'air ont traditionnellement sous-estimé la masse organique particulaire mesurée aux stations fixes en Europe (Simpson et al., 2007 ; Bessagnet et al., 2008). L'ajout d'une fraction semi-volatile aux inventaires d'émissions des particules organiques a mené à un meilleur accord avec les mesures ambiantes (Couvidat et al., 2012a, 2012b). Il y a cependant beaucoup d'incertitude concernant la fraction des COSV qui est présente dans la phase gazeuse lors de l'émissions et les simulations sur l'Europe ont utilisé des rapports pour la masse totale (i.e., gaz + particules) de COSV et de la masse particulaire de ces COSV allant de 1 (i.e., pas de fraction gazeuse) à 7 (Couvidat et al., 2012a, 2012b ; Zhang et al., 2012). La cause de cette incertitude est le manque de données expérimentales permettant de caractériser avec précision la fraction gazeuse des COSV à l'émission. En effet, les données existantes correspondent à des mesures effectuées dans des laboratoires américains (Schauer et al., 1999, 2002 ; Robinson et al., 2007), qui ne sont peut-être pas représentatives des émissions en Europe. Par conséquent, la connaissance des inventaires existants apparaît insuffisante pour permettre aux modèles de simuler l'évolution des propriétés des aérosols à l'échelle locale, en particulier en terme de fraction organique. A cela s'ajoute les connaissances lacunaires en termes de flux diffus de particules provenant du site et de son environnement.

Afin de pouvoir conduire une analyse des sources potentielles d'incertitudes et d'erreurs de prévisions des modèles aux niveaux des stations ponctuelles de relevés de la qualité de l'air, la mise en place d'outils de mesures permettant de suivre à haute résolution spatiale les propriétés des aérosols entre leurs sources et leur environnement proche apparaît nécessaire. Cette analyse permettra de mieux cibler localement les actions futures à réaliser pour respecter les seuils réglementaires d'exposition aux particules fines en particulier.

1.2. Positionnement du projet

Ce projet se positionne sur la thématique de « l'Amélioration des connaissances des caractéristiques des composés émis et de leur évolution dans le champ proche de la source » en se concentrant sur la thématique des émissions industrielles de particules fines. Les polluants visés sont prioritairement les particules PM10, PM2.5, PM1, leurs teneurs en matière organique, carbone-suie, sels inorganiques et métaux. Un effort particulier sera réalisé pour l'analyse des liens entre particules et précurseurs : COV, NOx, SO2.

La méthodologie proposée, basée sur des outils de télédétection à haute résolution spatiale depuis le sol et par avion, est totalement originale, elle devrait permettre d'améliorer nos connaissances sur les émissions de particules et leur devenir en champ proche. A partir de ces outils de télédétection, nous cherchons à caractériser les principales propriétés physico-chimiques de l'aérosol sur une zone géographique (quelques km2) incluant différentes sources ponctuelles ou diffuses à l'intérieur de la zone régionale incluant la zone de l'étang de Berre (Gros et al., 2004).

Depuis juin 2012, un projet régional (ESTAMP) incluant 2 partenaires du présent projet a été mis en place pour l'étude des sources d'aérosol sur la zone de l'Etang de Berre. Plus en détail, Il consiste à quantifier la contribution relative des sources industrielles à l'aérosol atmosphérique de la zone. Par son approche de type CMB (Chemical Mass Balance), ce projet se place dans la continuité des études de caractérisation des sources qui ont eu lieu en France ces dernières années [FORMES, (2008-2011, coord. J.L. Jaffrezo et N. Marchand) projet PRIMEQUAL ; EU-MED APICE (2010-2012, coord. S. Patti) étude de source de 5 grands ports méditerranéens Marseille-Berre ; ANR – SAM (2012-2015, coord. B. D'Anna) étude de l'aérosol organique marin primaire et secondaire].

Le présent projet est complémentaire du projet régional ESTAMP puisque ce dernier s'intéresse à la contribution des diverses sources d'aérosols en zones réceptrices alors que l'objectif est ici de regarder l'évolution de l'aérosol industriel dans les premières minutes après son émission dans l'atmosphère. Il permettra éventuellement d'expliquer la très forte contribution de l'aérosol secondaire observé essentiellement en été par les modèles CMB.

Dans ce projet, nous n'abordons pas les aspects liés à la dynamique du transport des polluants à moyenne distance, qui sont par ailleurs couverts par le projet TRAQA (Transport à longue distance et qualité de l'air dans le bassin méditerranéen, supporté par PRIMEQUAL). Cependant, les retombés de notre projet porteront sur une meilleure connaissance des particules proche des zones sources et contribueront ainsi à une meilleure estimation de l'impact régionale des émissions industrielles.
Enfin, ce projet axé sur une fine échelle spatio-temporelle permettra de fournir un jeu de données complémentaires aux études régionales de type ESCOMPTE, CHARMEX ou MEGAPOLI et aux études sur le long terme de type PACTE-BMP dans la région de Gardanne pour la validation des développements algorithmiques des outils de modélisation.

2. CAMPAGNES DE MESURE

Dans le cadre du projet TEMMAS le site test choisi par les partenaires est le site de la raffinerie TOTAL à La Mède sur le sud de l'étang de Berre. Sur ce site deux campagnes de mesures ont été prévues, la première qui s'est déroulée en septembre 2015, la seconde en février 2016 dont nous présentons les mesures réalisées dans ce document. Ce site a été choisi car il permettait de réaliser de façon simultanée les différents ateliers prévus dans le projet : mesures à la source, mesures sur le site et mesures en proche périphérie. De plus les partenaires possèdent une expérience importante sur cette zone en termes de compréhension des mécanismes météorologiques et de prévision de la qualité de l'air. Dans ce document nous décrivons donc l'ensemble des ateliers de mesures qui ont été déployés durant la campagne de février 2016 et les premiers résultats.

2.1. Liste des instruments déployés

Le tableau ci-dessous répertorie les principaux instruments déployés sur les différents ateliers durant la campagne de Février autour du site de la raffinerie de La Mède.

Tableau 1: Liste des instruments déployés pour les campagnes TEMMAS

Nom de l'instrument - Description	Opérateur	Nombre	Nomenclature
Filtre sur sonde de prélèvement iso cinétique chauffée (NF EN 13284-1 et NF X 44-052)	LQA/TOTAL RC	1 instrument 1 à 3 cheminées	FTRC1-3
PARTISOL	LQA/TOTAL RC	6	PTRC1-6
Digitel	LQA/TOTAL RC	2	DTRC1-2
Ballon Sonde (Granulomètre, optique LOAC-sonde PTU – vent Vaisala)	LA/UPS	1	BLA
Héliophotomètre CIMEL	L'ONERA	1	CIO
Lidar Vent	L'ONERA	1	LWO
Lidar Aérosol UV 355nm (2 voies de polarisation)	L'ONERA	1	LUVO
Spectroradiomètre 0.4-2.5µm	L'ONERA	1	ASD
Analyseurs automatiques (SO_2), (NO_2)	Air PACA	3	ANA1-5
Jauge radiométrique BAM 1020	Air PACA	3	BAM1-5
Collecteurs Digitel DA80	Air PACA	3	DA80-1-5
Camion laboratoire Massalya : AMS + SMPS+ PTRMS	LCE	1	MASS
Caméra hyperspectrale 0.4-2.5µm : (porteur SAFIRE : Piper Aztec) Altitude de vol comprise entre 1500m/2000m	L'ONERA	1	HYP

2.2. Cartes du site

La Figure 1 et la Figure 2 illustrent la position des différents ateliers de mesures par rapport à la raffinerie.

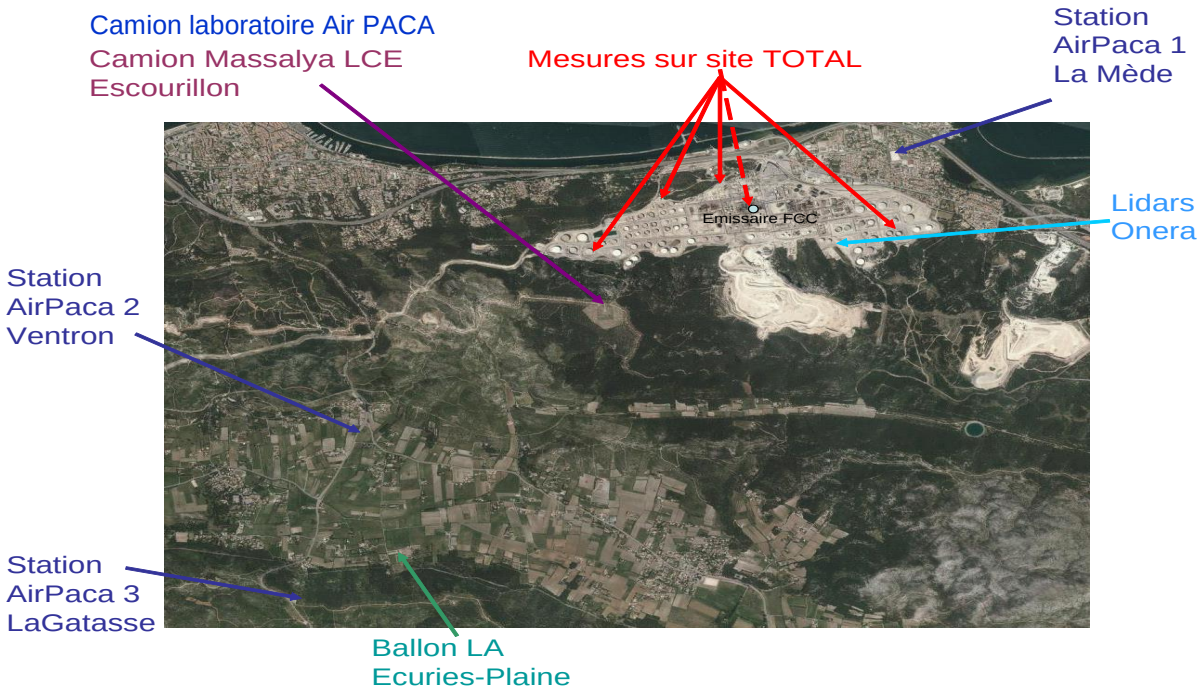


Figure 1 : Image aéroportée du site de la Mède avec position des ateliers de mesures sol

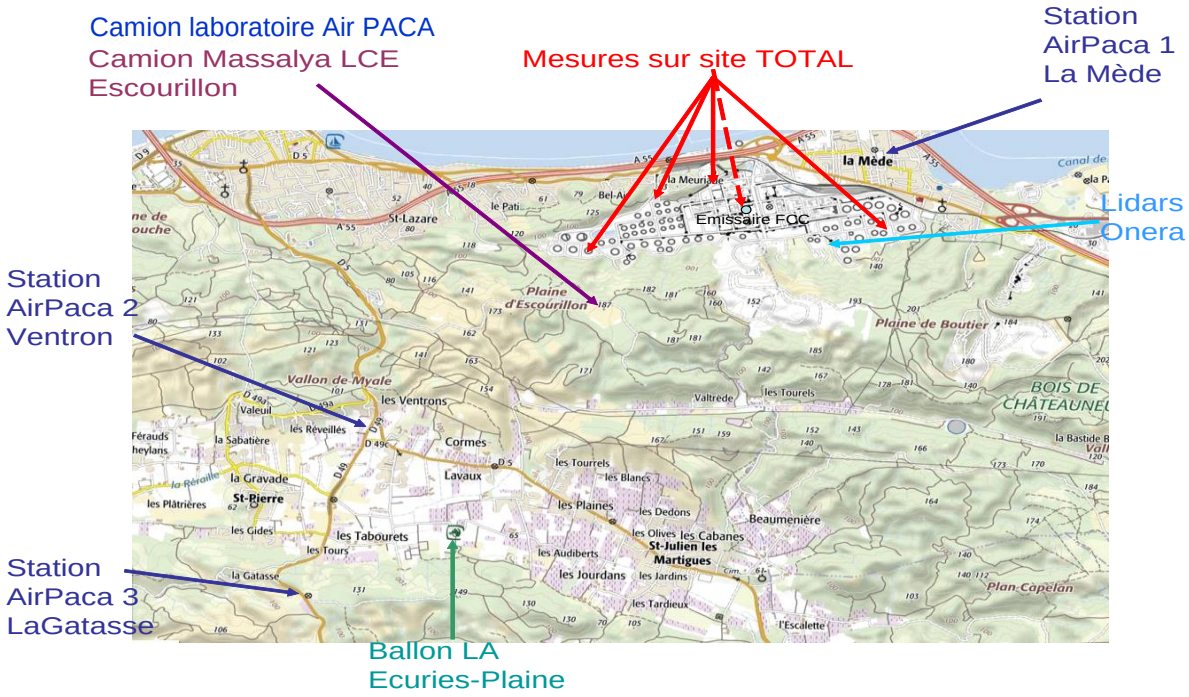


Figure 2 : Carte IGN du site de la Mède avec position des ateliers de mesures sol

2.3. Mesures au niveau des émissaires

Durant la première campagne, la raffinerie était en fonctionnement partiel et certaines unités n'avaient pas encore redémarré. L'émissaire initialement prévu était l'unité FCC, principal émetteur de particules. Du fait de son non-fonctionnement au moment de la campagne, les prélèvements ont été réalisés dans les fumées de la chaudière 11. Cette chaudière était en fonctionnement mixte, fuel oil (env. 130 t/j) et fuel gaz (env. 200 t/j). Les prélèvements ont été effectués depuis une passerelle (voir
Figure 4) dans le conduit principal.

Au global des deux campagnes, deux émissaires différents ont pu être étudiés :
- la chaudière 11 : Septembre 2015 et Février 2016
- la chaudière 12, traitement de post-combustion du FCC (procédé à combustion partielle), émissaire principal de particules du site et non fonctionnelle en Septembre 2015. Il est à noter que durant les prélèvements, le système d'abattement des particules était en mode dégradé (électro filtre à l'arrêt suite à un dysfonctionnement).

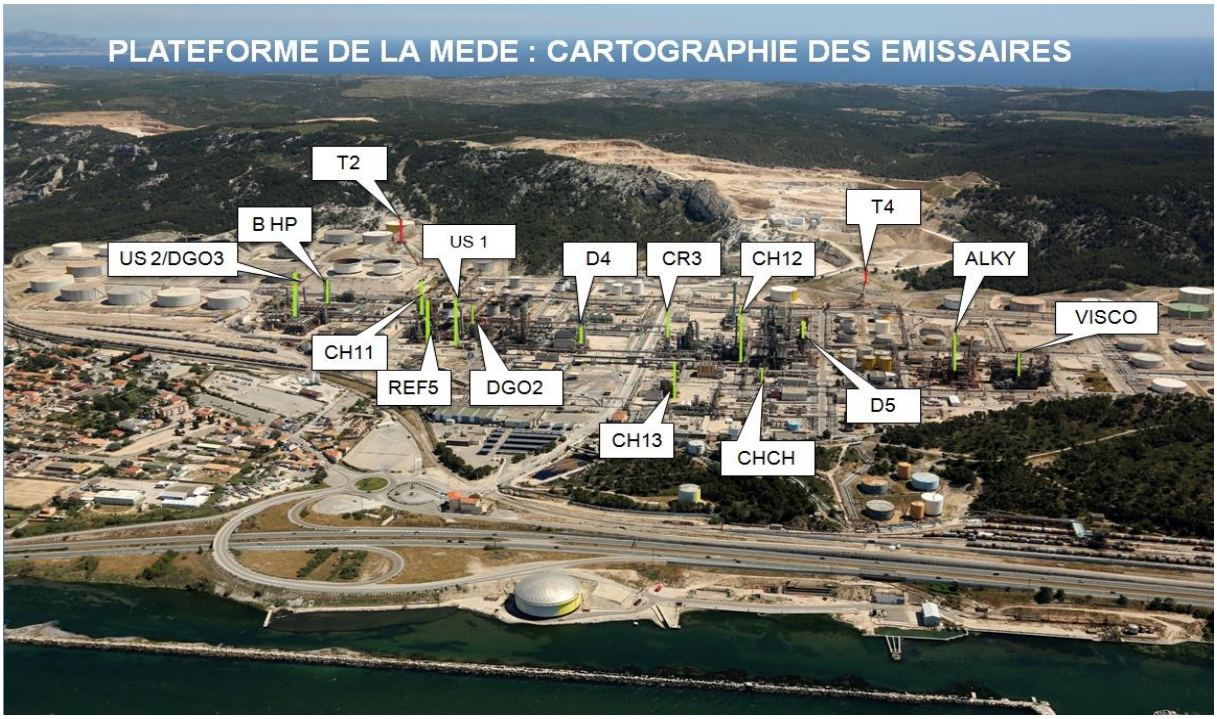


Figure 3 : Vue d'ensemble des installations sur la plateforme de La Mède.

La mesure des concentrations en poussières dans une veine gazeuse a été réalisée selon les principes des normes NF EN 13284-1 et NF X 44-052, à l'aide d'une sonde de prélèvement iso cinétique chauffée. Elle s'effectue à l'aide d'un prélèvement iso cinétique (vitesse des gaz à l'entrée de la buse de prélèvement égale à la vitesse des fumées dans la cheminée ajustée avec le débit d'aspiration des gaz en fonction du diamètre de buse choisie) d'un échantillon gazeux, sur une portion droite. Les poussières sont captées sur un filtre en fibre de quartz. La teneur en poussières est déterminée par pesée du filtre avant et après le prélèvement, ainsi que de la solution de rinçage, à l'aide d'une balance de précision. L'aspiration des gaz est assurée par une pompe (environ 1 Nm^3/h) et le volume de gaz prélevé est déterminé après séchage des gaz sur adsorbant, par un compteur gaz de type sec. Le système de prélèvement est chauffé jusqu'à la sortie du porte filtre.



Figure 4 : Montage installé sur la CH11

Mesures réalisées

Le tableau suivant donne les résultats pour le premier jour, des pertes d'échantillons ayant pu avoir lieu les jours 2 et 3. Les résultats sont rendus dans les conditions normales de température et de pression, à une teneur en oxygène de référence de 3% et sur gaz secs. Les particules récupérées dans le rinçage de la canne de prélèvement sont incluses (conformément à la norme), mais le blanc n'a pas été soustrait.

Après pesée, les filtres ont été envoyés au LCE pour analyse chimique.

Campagne d'été

Mesure du 08/09/2015	
Temps de prélèvement	2h
Temps de purge	1h
Volume prélevé (m3)	2,3
Vitesse moyenne de prélèvement (m/s)	5,04
Température moyenne des fumées (°C)	210°
Humidité moyenne (%)	13,4
Teneur O2 (analyseur en ligne) (%)	3,4
Analyse du blanc (mg)	0,1
Masse particule (en mg/Nm3 sur sec à 3% d'O2)	14.4
Débit gazeux à la CH11 à partir des facteurs d'émission des combustibles	2.7

(Mm3 / jour)	
Emission PM primaire d'après la mesure (kg/j)	39
Déclaration site CH11 à partir des facteurs d'émission des combustibles (kg/j) de PM	76

Tableau 2 : prélèvement sur la cheminée de la chaudière 11.

D'après le prélèvement réalisé le 8/09, la Chaudière 11 émet de l'ordre de 39 kg/jour de Particules filtrables.
La déclaration du site pour cet émissaire à partir de facteur d'émission spécifique aux combustibles est de l'ordre du double, soit 76 kg/j.

Campagne d'hiver

Principaux résultats :

	10/02/2016	11/02/2016	15/02/2016	16/02/2016	17/02/2016
Emissaire	**Chaudière 12**		**Chaudière 11**		
combustible FG (t/j)	40	43	146	145	158
combustible FO (t/j)	73	71	67	60	64
Allure (rendement direct/ rendement design)	87%	87%	87%	87%	87%
Horaires de prélèvement	11h40 à 13h19	10h19 à 11h58	16h22 à 18h20	10h08 à 12h08	9h55 à 11h55
Temps total de prélèvement	1h39	1h39	1h41	1h55	1h58
1er filtre (min)	30	30	38	32	58
2ème filtre (min)	30	30	30	83	60
3ème filtre (min)	30	30	33		

Pour les trames de calculs, on a considéré :

Chaudière 12	10/02/2016	11/02/2016
O2 (valeur instantanée analyseur en ligne du site)	2,25%	2,09%
CO2 (valeur par défaut)	10 %	10 %

Chaudière 11	15/02/2016	16/02/2016	17/02/2016
O2 (valeur instantanée analyseur en ligne du site)	2,2%	2,6%	2,9%
CO2 (valeur du rapport de contrôle 2015)	10 %	10 %	10%

Profil de vitesse et mesure d'humidité

Chaudière 12

Le profil de vitesse préliminaire recommandé par la norme NF X 44-052 n'a pas été réalisé en entier du fait de la présence d'un seul point de prélèvement. **Les conditions d'isocinétisme ont été vérifiées avant et durant chaque prélèvement.**
L'humidité a été mesurée au cours de la campagne, selon la norme NF EN 14790.

On a obtenu une valeur de 12,9% le 11 février. Cette valeur est légèrement inférieure à celle obtenue par SOCOTEC en septembre 2014 (13, 9% en moyenne). Elle reste cependant dans les teneurs habituellement constatées sur l'émissaire.

Chaudière 11

Le profil de vitesse préliminaire recommandé par la norme NF X 44-052 n'a pas été réalisé en entier du fait de la présence d'un seul point de prélèvement. **Les conditions d'isocinétisme ont été vérifiées avant et durant chaque prélèvement.**

L'humidité a été mesurée au cours de la campagne, selon la norme NF EN 14790.
On a obtenu une valeur de 12,7% le 15 février. Cette valeur est légèrement supérieure à celles obtenues par l'APAVE en mai 2015 (9,5% en moyenne). Elle reste cependant dans les teneurs habituellement constatées sur l'émissaire.

Analyse des supports

Les tableaux suivants donnent les résultats des pesées des filtres. Les résultats sont rendus dans les conditions normales de température et de pression, à une teneur en oxygène de référence de 3% et sur gaz secs. Les particules récupérées dans le rinçage de la canne de prélèvement sont incluses (conformément à la norme) sauf exception.

Chaudière 12

Mesure du 10/02/2016 (3 filtres n°1;2;3) Prélèvement de 11h40 à 13h19	
Volume prélevé (m3)	1,893
Vitesse moyenne de prélèvement (m/s)	24,28
Température moyenne des fumées (°C)	277,5

Mesure du 11/02/2016 (3 filtres n°6;5;7) Prélèvement de 10h19 à 11h58	
Volume prélevé (m3)	1,906
Vitesse moyenne de prélèvement (m/s)	23,99
Température moyenne des fumées (°C)	278,0

La valeur la plus récente retrouvée pour un prélèvement manuel date d'un contrôle inopiné de 2014 effectué par SOCOTEC : elle est de 123,3 mg/Nm3 (avec une teneur en oxygène mesurée à 1,5%)
Pour rappel, le système était en mode dégradé durant la campagne TEMMAS d'hiver (dysfonctionnement électrofiltre), de fait il s'agira d'un panache particulièrement visible par les techniques optiques. Les valeurs serviront de test en aveugle pour valider avec les estimations obtenues par les mesures caméra.

Chaudière 11

Mesure du 15/02/2016 (3 filtres n° 9; 24; 15) - Prélèvements de 16h22 à 18h20	
Volume prélevé (m3)	1,088
Vitesse moyenne de prélèvement (m/s)	5,41
Température moyenne des fumées (°C)	220,0
Filtre (9) (en mg/Nm3 sec) 38 min de prélèvement	4,5
Filtre (24) (en mg/Nm3 sec) 30 min de prélèvement	15,8
Filtre (15) (en mg/Nm3 sec) 33 min de prélèvement	6,9
Moyenne Filtres (en mg/Nm3 sec)	9,1

Les particules recueillies en amont des filtres n'ont pas été comptabilisées, du fait de la perte du flacon de rinçage

On note une forte disparité entre les pesées de filtres du 15 février, sans qu'une explication puisse y être apportée.

Mesure du 16/02/2016 (2 filtres Filtrables n°8;10) Prélèvement de 10h08 à 12h08	
Volume prélevé (m3)	1,226
Vitesse moyenne de prélèvement (m/s)	4,77
Température moyenne des fumées (°C)	235,0
Filtre (8) (en mg/Nm3 sec) 32 min de prélèvement	5,1
Filtre (10) (en mg/Nm3 sec) 1h23 min de prélèvement	5,4
Moyenne Filtres (en mg/Nm3 sec)	5,3

Mesure du 17/02/2016 (2 filtres n°14;11) Prélèvement de 9h55 à 11h55	
Volume prélevé (m3)	1,240
Vitesse moyenne de prélèvement (m/s)	4,93
Température moyenne des fumées (°C)	230,0
Filtre (14) (en mg/Nm3 sec) 58 min de prélèvement	12,3
Filtre (11) (en mg/Nm3 sec) 1h de prélèvement	10,0
Moyenne Filtres (en mg/Nm3 sec)	11,2

La valeur de l'analyseur en continu est exprimée en % d'opacité, difficile à convertir en équivalent masse, c'est pourquoi elle n'est pas reprise ici.

La valeur la plus récente disponible pour un prélèvement manuel de particules date d'une intervention du 27 mai 2015 par l'APAVE : 1, 22 mg/Nm3 pour une alimentation à 7,3 t/ h de fuel gaz, bien moins émissif en poussières qu'un mélange Fuel Gaz / Fuel Oil comme c'est le cas pour notre étude.

2.4. Mesures Lidars

Localisation sur le site

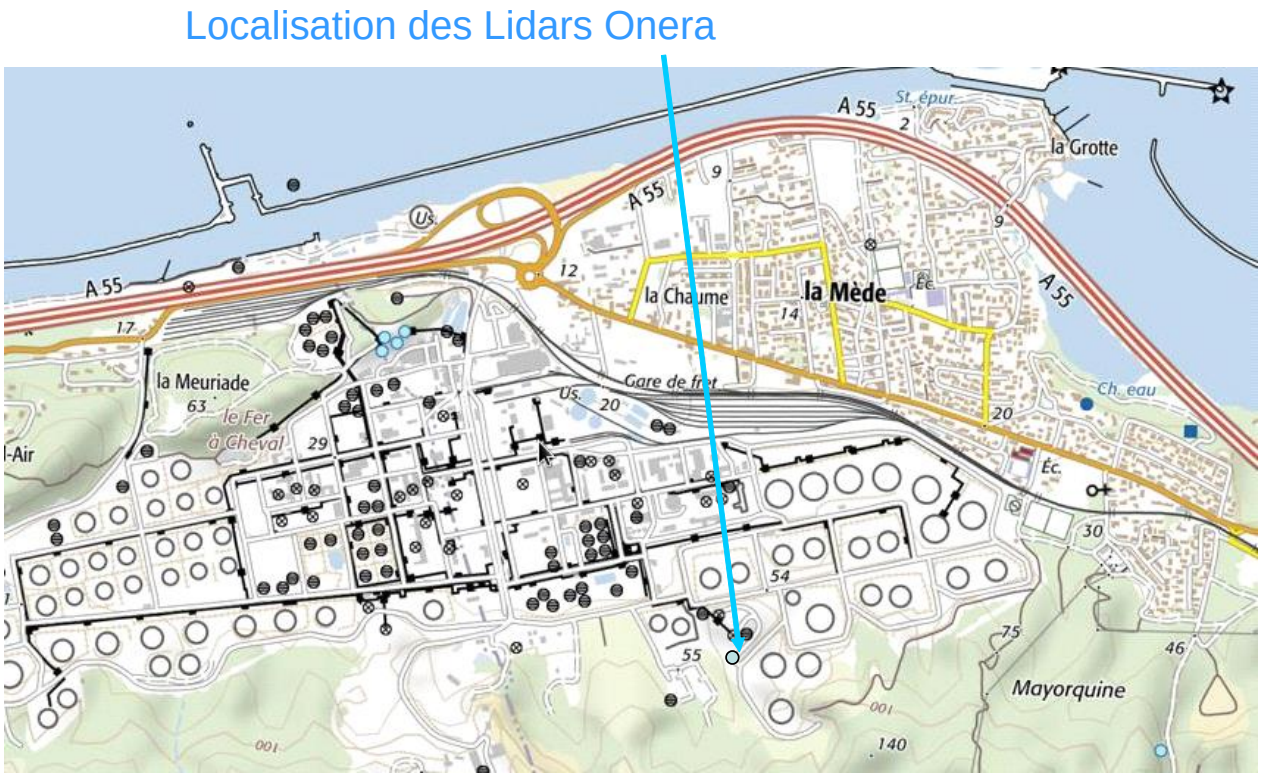


Figure 5 : Positionnement des Lidars à l'intérieur de la raffinerie.

Caractéristique des instruments déployés

Deux lidars ont été déployés : un lidar commercial WindCube de la société Léosphère et un prototype de lidar UV scannant.

Malheureusement suite à un problème technique sur le prototype juste quelques mesures de vérification de bon fonctionnement ont pu être acquises dans l'UV pour l'ensemble des deux campagnes. Le problème rencontré, lié à l'alimentation en énergie du Lidar est inhérent à l'utilisation de prototypes qui n'ont pas la robustesse d'instrument dit « commerciaux ». Le problème rencontré lors de la campagne de Septembre avait été réglé après plusieurs mois d'investigation par l'Onera. Cependant les intempéries durant la campagne n'ont pas permis de faire d'acquisition durant la seconde semaine de campagne.

Mesures réalisées

Des mesures de profils verticaux de vent et de CNR (Carrier to Noise Ratio) aérosols ont pu être réalisées pour les deux campagnes. Les figures ci-dessous montrent différents exemples de résultats qui ont été intégrées dans la modélisation du champs de vent local pour les deux campagnes.

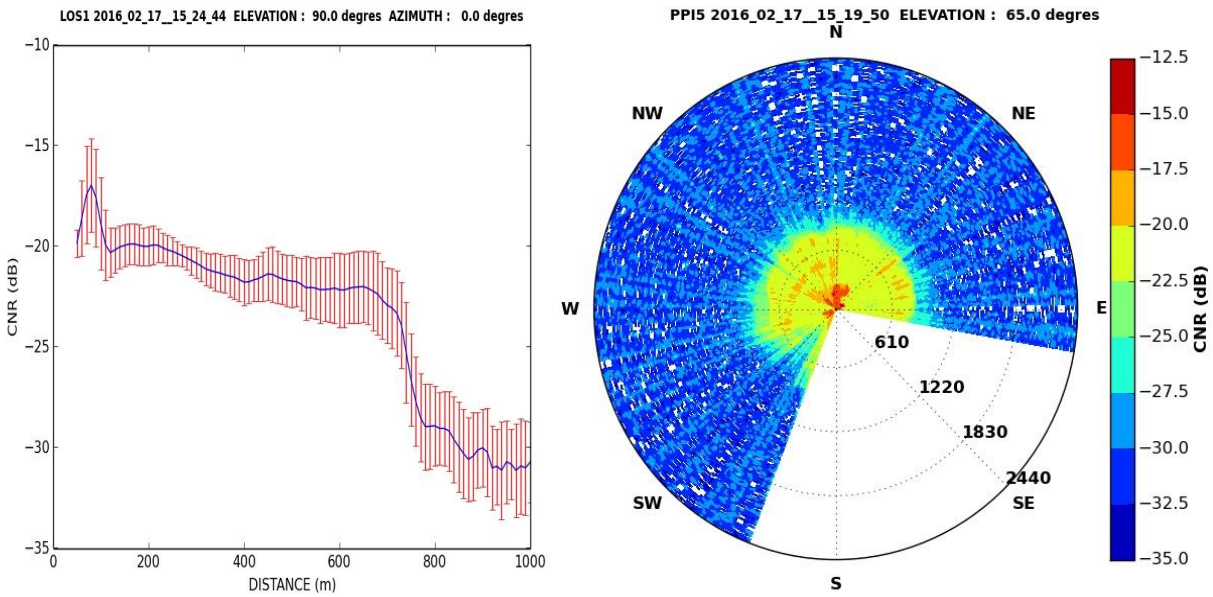


Figure 6 : Gauche, visualisation du CNR de rétrodiffusion aérosol pour une ligne de visée verticale du 17 février. Droite : Scan de CNR pour une élévation de 65°.

De façon générale, la couverture aérosol lors des journées du 17 au 19 février correspondait à une « cloche » assez homogène au niveau de la raffinerie et très peu d'aérosols de fond du fait des forts vents qui ont balayé la zone à cette période.

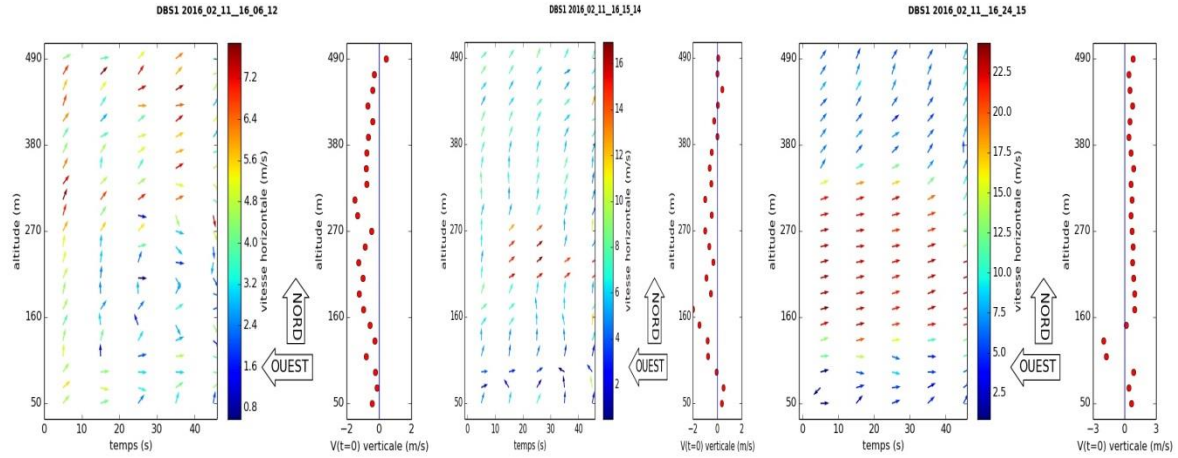


Figure 7 : Evolution du profil vertical de champs de vent du 11/02/2016 entre 16h et 16h30.

Sur la Figure 6 on peut observer que dans une zone de l'ordre de 800m autour du Lidar lors de la campagne d'Hiver une chute importante du CNR qui est synonyme d'une chute importante de la quantité d'aérosols. La quantité d'aérosols restant assez homogène sur l'ensemble du site, les sources étant difficilement identifiable du fait de la faible résolution spatial de ce Lidar dédié initialement pour la mesure de vent. Sur la Figure 7 on peut illustrer des profils verticaux obtenus au cours du temps, les flèches sont orientées dans la direction du vent avec un code couleur associés à la vitesse horizontale pour des altitudes comprises entre 50 et 500m. Il est possible d'estimer aussi la composante verticale du vent en fonction de l'altitude (graphiques contenant les points rouge).

2.5. Mesures in situ

Les stations d'Air PACA



Figure 8: Localisation des sites d'Air PACA

Les instruments d'Air PACA ont fonctionné en continu pendant les 15 jours de la campagne estivale (du 04/09/15 au 11/09/15) de la campagne hivernale (du 05/02/16 au 19/02/16). Un récapitulatif du dispositif mis en place par Air PACA est donné ci-dessous :

Périodes	Lieux	Matériels de mesures	Polluants / pas de temps
Eté : Du 04/09/15 au 11/09/15	La Gatasse	METEK API 100E	DV / VV quart horaire SO2 quart horaire
	La Mède	API 200E BAM 1020 AF 21 M DA80 (haut débit)	$NO_x/NO/NO_2$ quart horaire PM10 quart horaire SO2 quart horaire PM2,5 moyenne jour
Hiver : Du 05/02/16 au 19/02/16	Les Ventrons	API 200E AF 22 M DA80 (haut débit) Partisol+ (bas débit)	$NO_x/NO/NO_2$ quart horaire SO2 quart horaire PM2,5 moyenne jour PM10 moyenne jour
	Site STNA (labo mobile Air PACA)	AC 31 M API 100E DA80 (haut débit) Partisol+ (bas débit)	$NO_x/NO/NO_2$ quart horaire SO2 quart horaire PM2,5 moyenne jour PM10 moyenne jour

Tableau 3: Appareillage Air PACA pendant les campagnes d'été et d'hiver

Localisation de la plateforme mobile Massalya (LCE) et du labo mobile Air PACA

La plateforme mobile Massalya du LCE et le labo mobile d'Air PACA étaient positionnés sur le site STNA sur la plaine de l'Escourillon (Coordonnées GPS : 43.38696, 5.08638), au sud-ouest et légèrement en altitude (180 m) par rapport au site pétrochimique de TOTAL et à l'ouest de la carrière des Bouttiers.

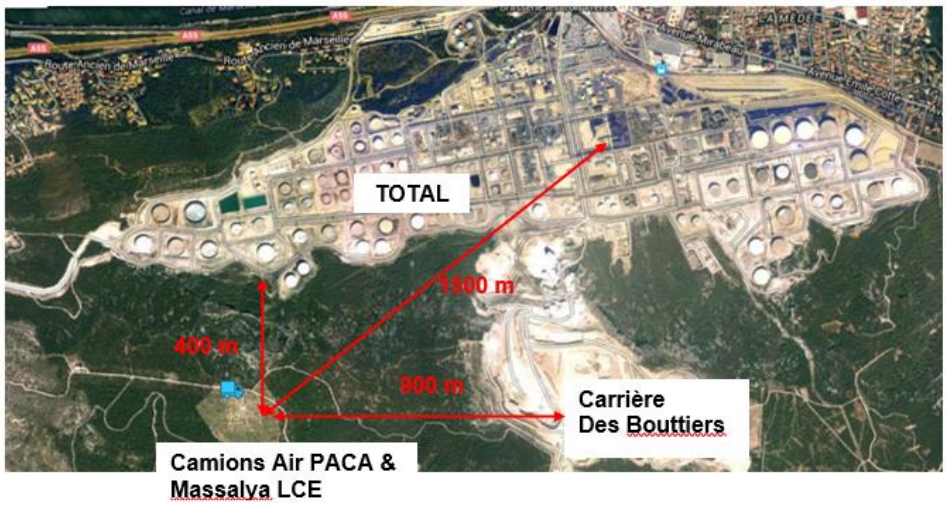






Figure 9: Localisation sur le site de mesure (en haut). Le site pétrochimique de TOTAL La Mède vu depuis la plaine de l'Escourillon (au milieu). La plateforme Massalya et le camion d'Air PACA sur le site STNA (en bas)

Caractéristiques des instruments déployés par le LCE pour les mesures en ligne

La plateforme mobile Massalya regroupe des équipements pour la mesure en ligne et en continu des aérosols et des COV dans l'atmosphère avec une résolution temporelle de l'ordre de la minute. Dans le cadre de ce projet, la totalité des instruments analytiques a été déployée, cela comprend :

- Un SMPS et un OPC pour mesurer la distribution granulométrique de l'aérosol entre 15 nm et 34 µm.

- Un AMS (Aérosol Mass Spectrometer) associé à un MAAP pour quantifier les principales composantes chimiques de la fraction PM1 de l'aérosol : matière organique, sulfates, nitrates, ammonium, chlorures et black carbon.

- Un PTR-ToF-MS pour la caractérisation qualitative et quantitative des COV.

- Une station météo pour prendre en compte localement les directions et vitesses des vents lors du traitement des données.

Un récapitulatif du dispositif mis en place par le LCE durant les deux campagnes est donné ci-dessous.

Tableau 4: Instruments de la plateforme Massalya mobilisés pour les deux campagnes

Appareils	Mesure	Fréquence de mesure
PTR-MS (TOF)	COV	1 min
AMS	SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+, Matière Organique, Cl^- jusqu'à 450 nm	2 min
SMPS	Nombre de particules/cm^3 en fonction de la granulométrie 106 classes de taille de 15 à 660 nm	5 min
OPC	Nombre de particules/cm^3 en fonction de la granulométrie 30 classes de taille de 0,265 µm à 34 µm	1 min
MAAP	Concentration en Black Carbon (Carbone suie)	1 min
Station météo	Direction et vitesse du vent Température et humidité relative	5 min

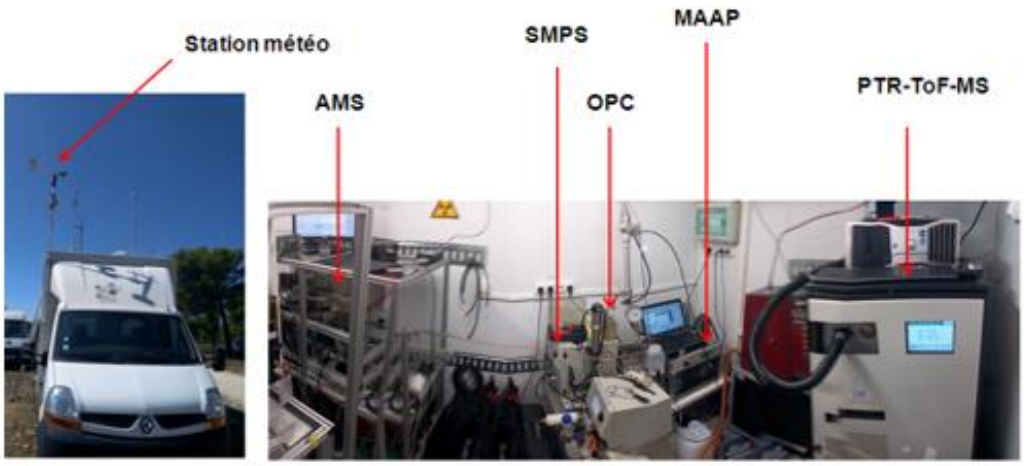


Figure 10 : La plateforme Massalya équipée des instruments de mesure du LCE

Mesures offline (prélèvements sur filtres)

1) Sites de prélèvements :

En complément des mesures en ligne, des prélèvements atmosphériques ont été réalisés à la fois sur le site de la raffinerie mais aussi sur trois stations situées autour du site de TOTAL La Mède :

- la station STNA correspondant au positionnement de la plateforme MASSALYA et du camion d'Air PACA.
- la station de la Mède située dans le centre-ville de la Mède.
- la station Les Ventrons située à environ 3,5 km au sud-ouest de la raffinerie.



Figure 11: Carte de localisation des stations de prélèvements atmosphériques autour du site de TOTAL La Mède.



Figure 12 : Préleveur DA80 sur le site STNA dédié à la récupération sur filtre des particules pour pesée gravimétrique et analyse chimique des particules PM2.5 (particules dont le diamètre est inférieur à 2.5 µm).

Les 4 localisations retenues sont identiques pour les deux campagnes à l'intérieur du site.

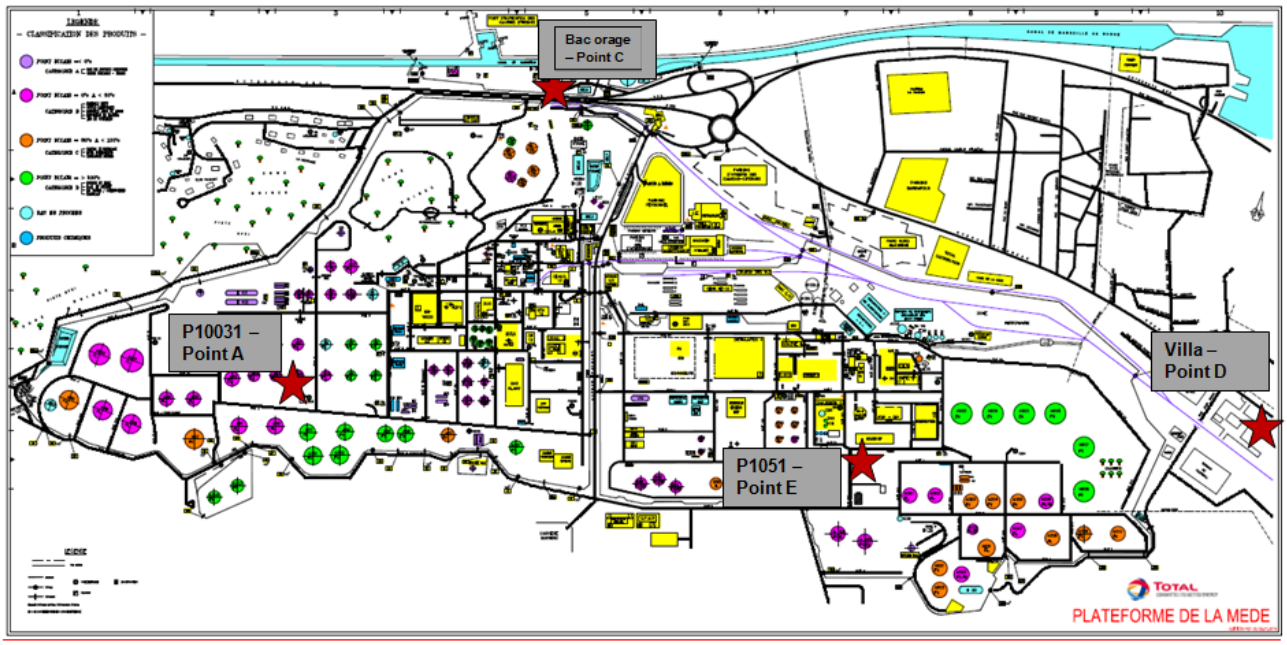


Figure 13 : Stations de prélèvements atmosphériques à l'intérieur du site.

Caractéristiques des instruments déployés

Deux types de préleveurs ont été utilisés :
- 6 systèmes PARTISOL préleveurs de petit débit (16,7 l/min, 1 m^3/h)
- 2 systèmes DIGITEL préleveurs de grand débit (500 l/min, 30 m^3/h)

Les préleveurs ont tous été placés en dehors des zones ATEX, et, dans la plupart des cas, en des points proches d'une précédente campagne de mesure des concentrations en particules sur la raffinerie, en 2007 (à l'occasion d'une étude de l'impact environnemental du site par le Laboratoire Qualité de l'Air) permettant de disposer d'une alimentation électrique et restant accessibles. Ils appartiennent tous au LQA.

Les préconisations de la norme NF EN 12341 « Air ambiant Méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la concentration massique MP10 ou MP2.5 de matière particulaire en suspension ont été suivies.
Des filtres Téflon, fournis, conditionnés et pesés par AIRPACA ont été utilisés.

Les modes opératoires internes au LQA CRES/R/MO/37/PARTISOL et CRES/R/MO/42/DIGITEL ont été suivis.

Il s'agit de préleveurs d'air ambiant équipés de têtes de coupure à 10 ou 2.5µm permettant d'éliminer les particules de taille supérieures à respectivement 10 et 2.5µm. Les particules se déposent sur un filtre pesé avant et après le prélèvement. La masse de particules collectée est rapportée au volume d'air prélevé sur la période.
Conformément aux préconisations de la norme, le volume d'air est exprimé en mètres cubes et non en normo-mètres cubes, le volume d'air étant celui dans les conditions ambiantes à proximité de la tête de prélèvement pendant le prélèvement.



Figure 14: système de prélèvement Partisol



Figure 15: système de prélèvement Digitel - DA 77

2) Méthode de prélèvement :

Les prélèvements de particules PM2.5 ont été effectués sur des filtres en fibre de quartz de 152 cm^2 de surface. Ces filtres ont été préalablement conditionnés à 500°C pendant 5h. Les prélèvements ont été réalisés au moyen d'un préleveur haut débit (DA80, 30 m^3/h avec tête PM2.5) sur un pas de temps journalier (12h-12h). Un blanc de terrain a été réalisé par site de prélèvement. Après prélèvement, les filtres ont été pliés, emballés dans du papier aluminium puis scellés dans une gaine en polyéthylène. Les pesées ont été effectuées par Air PACA puis ils ont été remis au LCE pour les analyses chimiques. Ils ont été stockés à -18°C jusqu'à leur analyse.

3) Echantillonnage :

4 poinçons de 11,3 cm^2 de surface ont été réalisés sur chaque filtre. 2 poinçons ont été utilisés pour l'analyse du carbone élémentaire (EC, équivalent au carbone suie mesuré lors de l'analyse en ligne par MAAP), carbone organique (OC), ions majeurs et métaux. 2 poinçons ont été conservés par le LCE. Le reste du filtre a été utilisé pour l'analyse des marqueurs organiques.

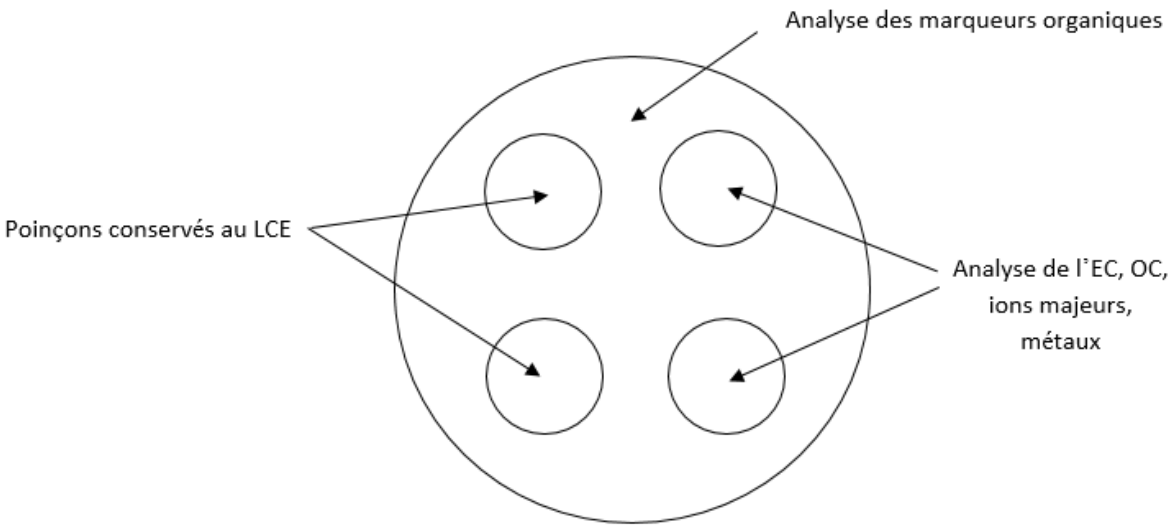


Figure 16: Poinçonnage des filtres en vue des différentes analyses

4) Analyses réalisées :

Les prélèvements atmosphériques sur filtres ont été analysés par différentes techniques afin d'obtenir une large spéciation chimique de l'aérosol. Elle a permis de quantifier les espèces majoritaires au bilan de masse et de quantifier des composés marqueurs de sources d'émissions.

- **Spéciation chimique de la matière organique :**

Les marqueurs organiques qui ont été quantifiés sont récapitulés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Après extraction des particules sous haute pression et haute température par un mélange de solvants organiques, les extraits ont été analysés par chromatographie gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC-MS).

Tableau 5: Liste des marqueurs organiques analysés par GC-MS

<table>
<tr><th colspan="4">COMPOSES APOLAIRES</th><th colspan="2">COMPOSES POLAIRES</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)</td><td rowspan="3">Acénaphtylène
Fluorène
Phénanthrène
Anthracène
Fluoranthène
Acéphenanthrène
Pyrène
Benzo[a]anthracène
Chrysene/triphenylene
Benzo[b]fluoranthène
Benzo[k]fluoranthène
Benzo[j]fluoranthène
Benzo[e]pyrène
Benzo[a]pyrène
Indeno[1,2,3-cd]fluoranthène
Indeno[1,2,3-cd]pyrène
Dibenzo[a,h]anthracène
Benzo[ghi]perylene</td><td rowspan="3">Tétradécane (C14)
Hexadécane (C16)
Octadécane (C18)
Nonadécane (C19)
Eicosane (C20)
Heneicosane (C21)
Docosane (C22)
Tricosane(C23)
Tetracosane (C24)
Pentacosane (C25)
Hexacosane (C26)
Heptacosane (C27)
Octacosane (C28)
Nonacosane (C29)
Triacontane (C30)
Untricontane (C31)
Dotriacontane (C32)
Tritriacontane (C33)
Tetratriacontane (C34)
Pentatriacontane (C35)
Hexatriacontane (C36)</td><td rowspan="3">Alcanes</td><td>Vanilline
Acétovanillone
Acide Vanillique
3-guaiacylpropanol
Coniferyl aldéhyde</td><td>Dérivés guaiacyl</td></tr>
<tr><td>Syringaldehyde
Acétosyringone
Syringyl acétone
Propionyl syringol
Acide syringique
Acide homosyringique
3-syringyllpropanol
Synapyl aldéhyde</td><td>Dérivés syringyl</td></tr>
<tr><td>Galactosan
Mannosan
Lévoglucosan</td><td rowspan="2">Monosaccharides anhydrides</td></tr>
<tr><td>Hopanes</td><td>17α(H) trisnorhopane
17α(H) - 21β(H)- norhopane
17α(H) - 21β(H)- hopane
17α(H) - 21β(H)-22S - homohopane
17α(H)-21β(H)-22R-homohopane
17α(H)-21β(H)-22S-bishomohopane
17α(H)-21β(H)-22R-bishomohopane
17α(H)-21β(H)-22S-trishomohopane
17α(H)-21β(H)-22R-trishomohopane</td><td>Acide palmitique
Acide palmitoléique
Acide stéarique
Acide oléique
Acide linoléique</td><td>Acides gras</td></tr>
<tr><td>Phtalates</td><td>Diethyl phtalate
Diisobutyl phthalate
Dibutyl phthalate
Benzylbutyl phthalate
Bis(2-ethyl hexyl) phthalate</td><td>Cholestérol
Campesterol
Stigmastérol
β-Sitostérol</td><td>Stérols</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td><td>Acide pinique
Acide pinonique
Acide abiétique</td><td>Autres acides</td></tr>
</table>

- **Analyse de la fraction carbonée (OC et EC)**

L'analyse de la matière carbonée (carbone organique OC et carbone élémentaire EC) a été réalisée directement sur un poinçon du filtre par une méthode thermo-optique.

- **Analyse de la fraction ionique**

Les cations et anions listés dans le Tableau 6 ont été analysés par chromatographie ionique après extraction en phase aqueuse.

IONS	
MSA (Acide méthylsulfonique)	Na^+
Cl^-	NH_4^+
NO_3^-	K^+
SO_4^{2-}	Mg^{2+}

Tableau 6: Liste des ions analysés

- **Analyse des métaux et éléments traces**

Les métaux et éléments traces présentés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ont été analysés par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS).

Tableau 7: Liste des métaux et éléments traces analysés

METAUX et ELEMENTS TRACES		
Al	La	Sc
As	Li	Se
Ba	Mn	Sn
Cd	Na	Sr
Ce	Ni	Ti
Co	Pb	Tl
Cr	Pd	V
Cs	Pt	Zn
Cu	Rb	Zr
Fe	Sb	

Mesures réalisées

Campagne estivale (Du 07/09/15 au 11/09/15)

1) Résultats des mesures en ligne de la plateforme Massalya

a) Conditions météorologiques

Les vitesses et directions des vents mesurées par la station météo installée sur le laboratoire mobile sont représentées sur la Figure 17**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Il apparait que la période de mesure a été marquée essentiellement par des vents faibles (< 3 m/s) en provenance du Nord/Nord-est le matin avec une bascule en milieu de journée sur des vents plus forts venant de secteur sud. Les conditions d'orientation de vent les plus favorables à la mesure de masses d'air impactées par les rejets de la raffinerie (secteur Nord-est avec un angle de 30°N à 75°N) ont été atteintes ponctuellement.

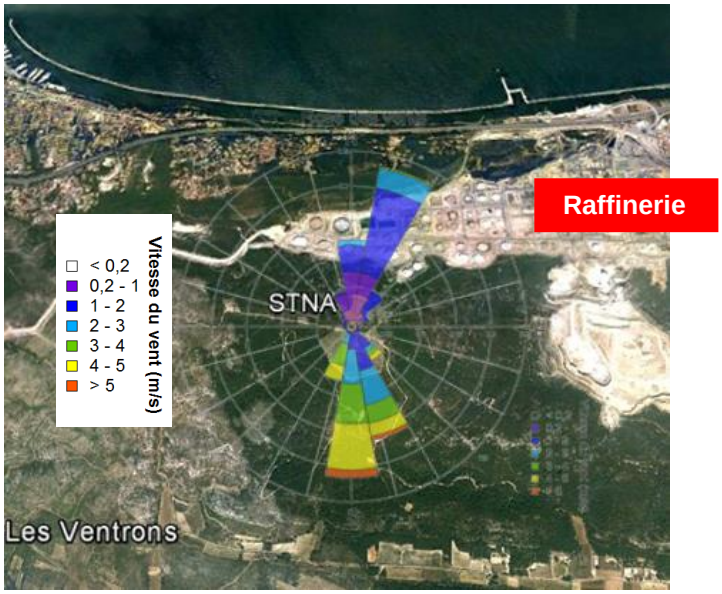


Figure 17: Rose des vents sur le site STNA
Représentation des directions dominantes du vent (fréquences des directions et fréquence de force pour chaque direction)

b) Caractérisation des particules

La campagne estivale a été marquée par quatre épisodes de pollution représentant le passage de panaches chargés en particules en provenance du site pétrochimique de TOTAL. Ces brefs épisodes (de l'ordre de quelques dizaines de minutes) étaient caractérisés par des montées et chutes soudaines du nombre de particules correspondant à des changements de régime de vent. La valeur maximale a été relevée le 08/09/15 avec un nombre de particules PM1 de 82 000 particules/cm^3, ce qui représente une concentration massique de 42 µg/m^3. En dehors de ces épisodes, la valeur moyenne de fond était d'environ 5 000 particules/cm^3 soit une concentration massique de l'ordre de 3,5 µg/m^3 .

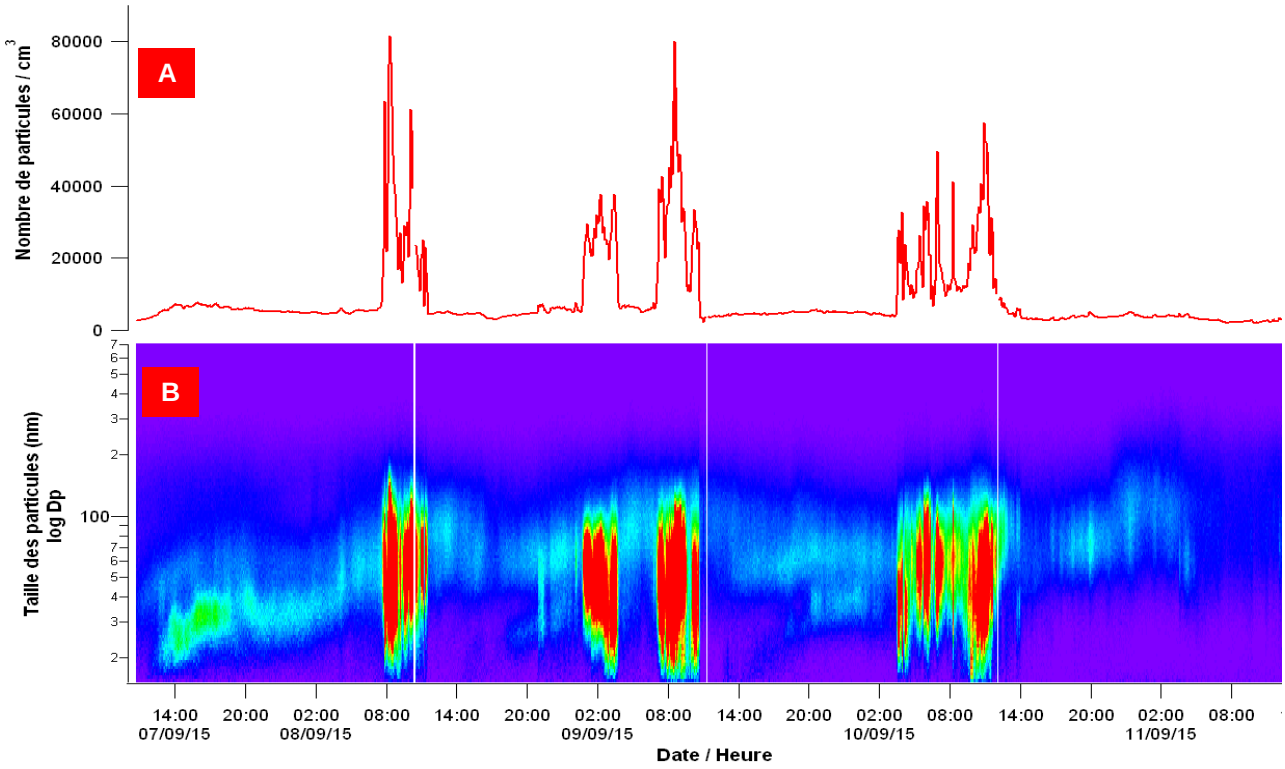


Figure 18: Evolution temporelle du nombre de particules fines PM1 (graphique A) et de leur granulométrie (graphique B). Les particules détectées pendant les épisodes de pollution étaient de granulométrie comprise entre 15 et 150 nm avec un mode centré autour de 50 nm.

Les particules en provenance du site pétrochimique de TOTAL La Mède se caractérisaient par :

- Leur taille très fine : une granulométrie inférieure à 150 nm et un mode centré autour de 50 nm (cf. Figure 18).

- Leur composition chimique : une quantité importante d'aérosols soufrés très faiblement neutralisés au regard des quantités d'ammonium mesurées (cf. Figure 19 représentant les concentrations massiques des principales fractions chimiques de l'aérosol PM1).

En fin de campagne, une augmentation du nombre de particules de granulométrie comprise entre 200 et 400 nm conjuguée à une augmentation de la teneur en nitrates a été observée. Les données relatives à la composition chimique et à la distribution granulométrique suggèrent qu'il s'agit d'un aérosol ancien ayant déjà subi des processus de vieillissement.

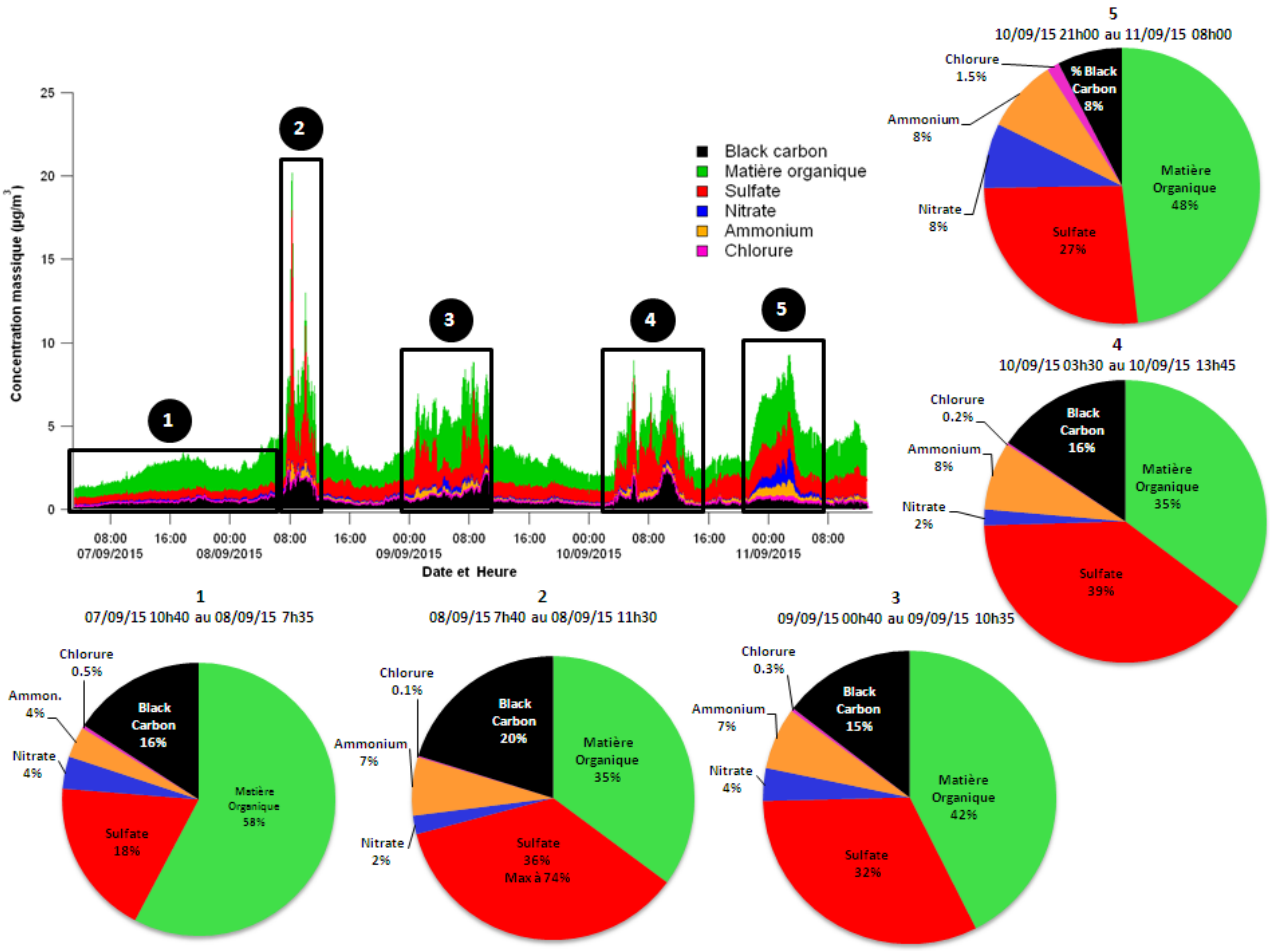


Figure 19: Evolution temporelle des concentrations massiques des principales fractions chimiques de l'aérosol PM1 (matière organique, carbone élémentaire, sulfates, nitrates, ammonium) mesurées sur le site STNA avec l'AMS et le MAAP. Les périodes représentatives des concentrations de fond (n°1), des épisodes de pollution d'origine industrielle riches en sulfates (n°2, 3, 4), et de l'aérosol âgé (n°5) ont été moyennées et représentées sous forme de diagramme circulaire.

La représentation sous forme de « rose de pollution » permet de distinguer les directions de vent préférentiellement associées aux espèces et ainsi de déterminer leur origine. Les roses de pollution associées au nombre de PM1 et aux concentrations en sulfates mettent clairement en évidence la raffinerie comme source de ces particules.

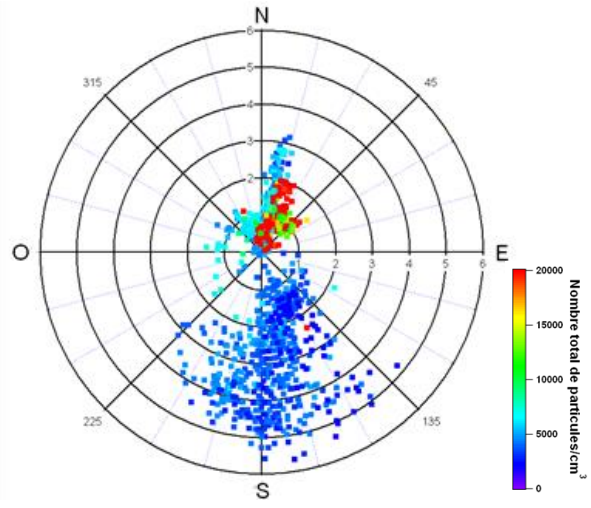


Figure 20: Rose de pollution construite à partir du croisement des données vents et du nombre de particules PM1. Les pics de particules (représentés par les points rouges) ont été enregistrés lorsque les masses d'air provenaient de la raffinerie. L'axe radial représente la vitesse du vent.

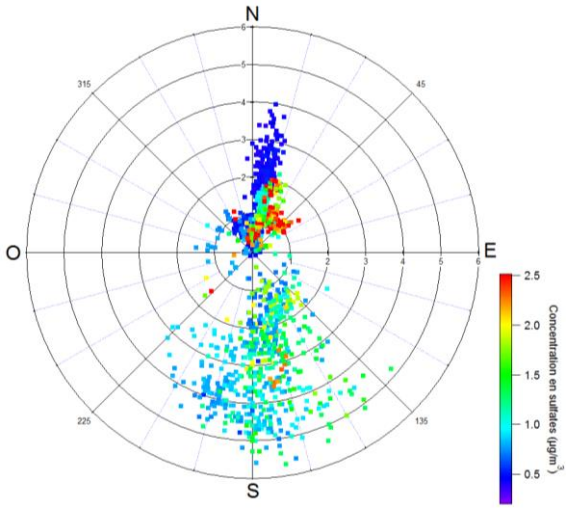


Figure 21: Rose de pollution construite à partir du croisement des données vents et des concentrations en sulfates. Les concentrations les plus élevées (représentées par les points rouges) ont été enregistrés lorsque les masses d'air provenaient de la raffinerie. L'axe radial représente la vitesse du vent.

c) Concentrations des composés organiques volatils (COV)

Une cinquantaine de COV a été identifiée et quantifiée en temps réel avec le PTR-ToF-MS, avec des teneurs comprises entre 10 ppt et 35 ppb. Les familles chimiques représentées étaient les hydrocarbures aliphatiques, les hydrocarbures aromatiques, les composés azotés, les composés oxygénés de type cétones, aldéhydes, acides carboxyliques, alcools… Quelques traces de composés soufrés ont également pu être détectées (cf. Figure 22).

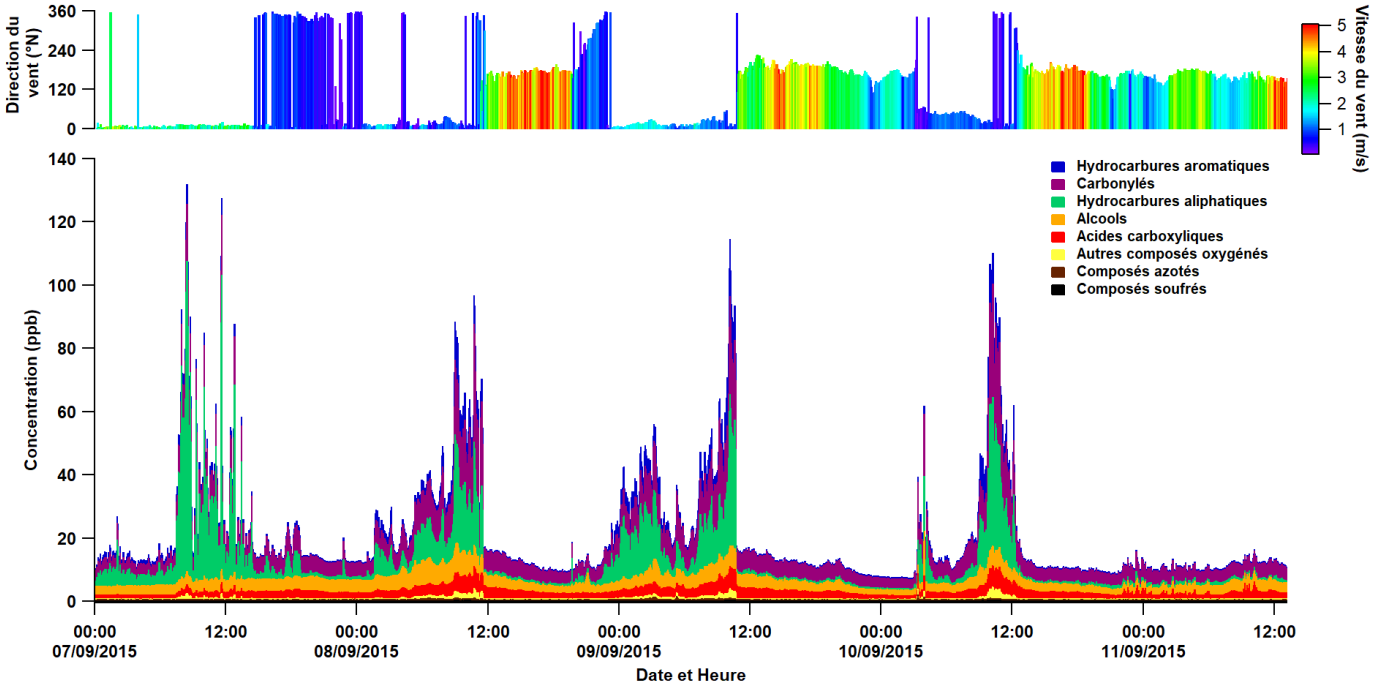


Figure 22: Suivi temporel des concentrations en COV classés par familles chimiques avec le PTR-MS

De même que pour les particules, l'analyse à très haute résolution temporelle a permis de mettre en évidence des variations soudaines dans les concentrations de COV, enregistrées lors des changements de régime de vent, avec une multiplication des concentrations par un facteur 5 à 200 selon le composé considéré.

Ces augmentations significatives de concentrations en COV n'étaient pas toujours corrélées avec les pics de particules et de sulfates observés avec l'AMS, ce qui implique la contribution d'au moins une source supplémentaire.
L'examen précis des régimes de vents associées à ces augmentations en COV a montré une direction préférentielle (5°N à 30°N) correspondant à la direction des cuves de stockage de la raffinerie.

2) Résultats des mesures Air PACA

Tableau 8: Synthèse des concentrations observées pendant la campagne estivale par Air PACA

été	NO2			NO			NOX		
04/09 11/09/2015	Mède	Ventrons	STNA	Mède	Ventrons	STNA	Mède	Ventrons	STNA
Moyenne campagne	15	10	12	6	2	3	23	14	17
Max horaire	81	84	63	57	52	21	150	164	87
	10-sept	10-sept	10-sept	15-sept	10-sept	08-sept	11-sept	10-sept	09-sept
Max journalier	26	21	15	10	5	4	40	30	21
	10-sept	10-sept	10-sept	09-sept	10-sept	08-sept	09-sept	10-sept	10-sept

été	SO2					PM10	O3
04/09 11/09/2015	Couronne	Mède	Gatasse	Ventrons	STNA	Mède	Martigues
Moyenne campagne	4	2	2	2	1	15	84
Max horaire	29	39	40	43	30	56	124
	06-sept	09-sept	09-sept	09-sept	08-sept	09-sept	09-sept
Max journalier	7	8	10	6	2	19	91
	09-sept	09-sept	10-sept	10-sept	08-sept	09-sept	09-sept

Quelques panaches de SO_2 sont enregistrés sur le site de la Mède, dans les après-midis du 09 et du 10 septembre. Les concentrations ne dépassent pas 80 µg/m^3/h. Les concentrations restent faibles en comparaison du seuil d'information et de recommandation (300 µg/m^3/heure). Les concentrations en SO_2 du site STNA sont logiquement bien corrélées avec les concentrations en sulfates issues de l'AMS sur ce même site (Figure 23).

Les concentrations en NO, NO_2 et NOx sont corrélées avec les épisodes de PM1 sous le vent de la raffinerie et avec les émissions du trafic routier émissions du trafic routier provenant de l'autoroute à proximité de la raffinerie (

Figure 8). Les concentrations enregistrées à La Mède et sur le site STNA ne dépassent pas 100 µg/m^3/h, elles sont en dessous du seuil d'information et de recommandation pour le NO_2 (200 µg/m^3/h). (Figure 24).

Une comparaison SO_2 versus NOx pour les sites de la Mède et de STNA met en évidence un bon phasage temporel entre les augmentations de concentrations de SO_2 et de NOx pour le site STNA.
Ce phasage temporel entre ces 2 concentrations n'est plus vrai à la Mède. Les concentrations en SO_2 à la Mède sont plus fortes les après-midis du 9 et 10 septembre. Les concentrations en NOx à la Mède sont plus élevées le matin des 8, 9, 10 et 11 septembre. (Figure 25).

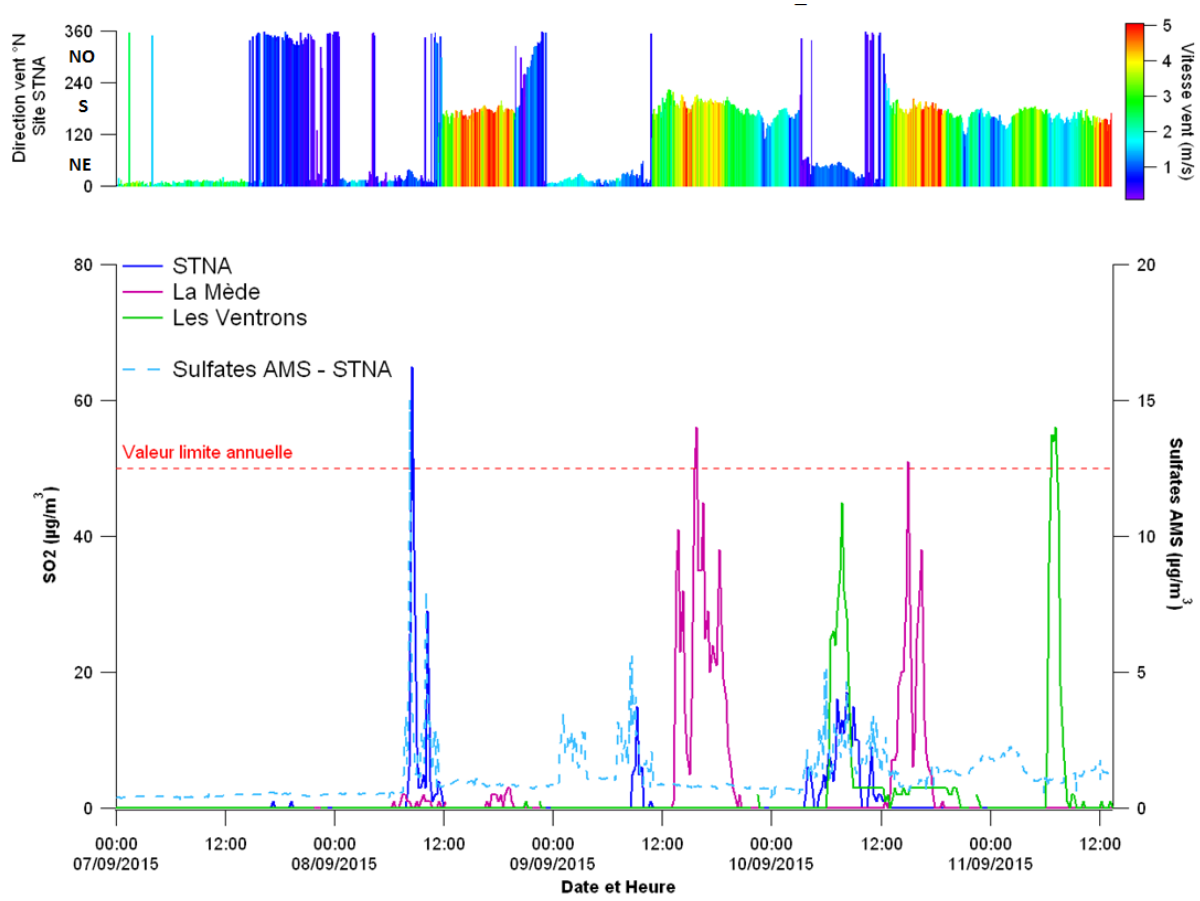


Figure 23: Evolution temporelle des concentrations en SO_2

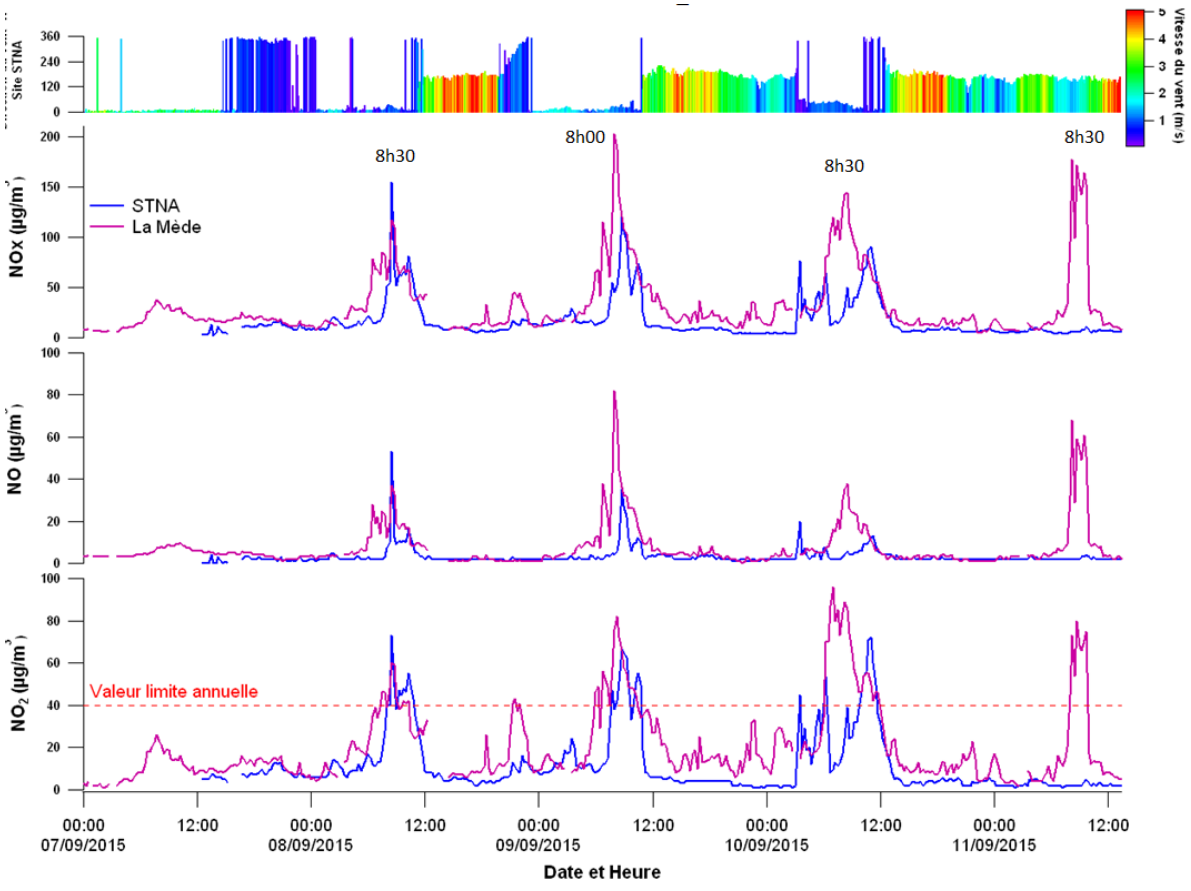


Figure 24: Evolution temporelle des concentrations en $NO/NO_2/NOx$

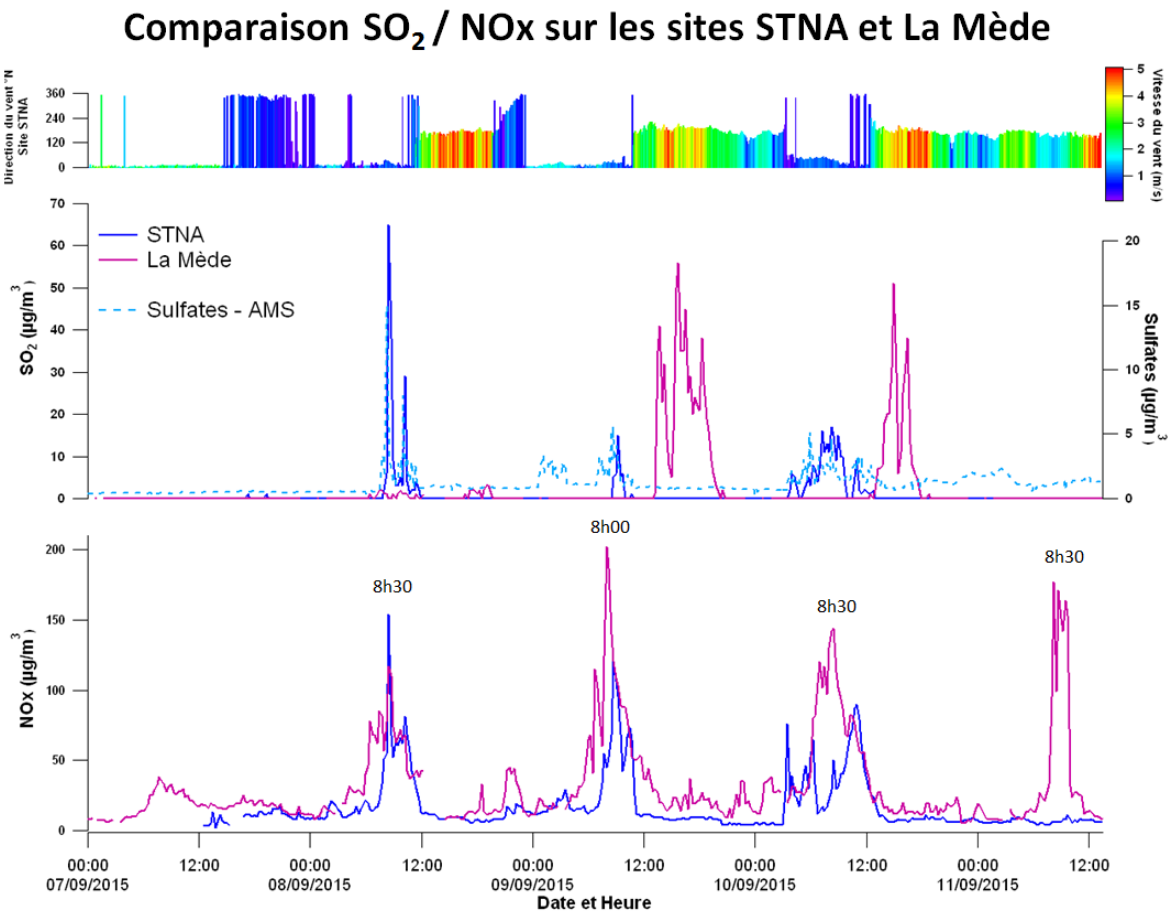


Figure 25: Comparaison SO_2/NOx sur les sites STNA et La Mède

3) Résultats des analyses offlines (prélèvements atmosphériques sur filtres)

Les filtres prélevés en air ambiant (Air PACA et TOTAL LQA) ont tous été pesés par Air PACA (sur la même balance micrométrique). Les concentrations totales en particules (PM2.5) varient de 8 à 30 µg/m^3 en moyenne sur 24h. Un seul filtre dépasse le seuil annuel réglementaire de 25 µg/m^3 (site E TOTAL le 09/09).
Une sélection de 19 filtres de 150 mm sur les 24 prélèvements effectués pendant la campagne a été réalisée pour conduire les analyses chimiques complètes au LCE. Les périodes regroupant les épisodes de pollution ont été privilégiées.

a) Composition chimique globale de l'aérosol PM2.5

Les concentrations des espèces majoritaires sont représentées sur la Figure 26 pour les prélèvements réalisés sur le site de TOTAL La Mède (stations DGRC1 et DGRC2) et sur la Figure 27 pour les prélèvements réalisés sur les 3 sites gérés par Air PACA (La mède, STNA, Les Ventrons).

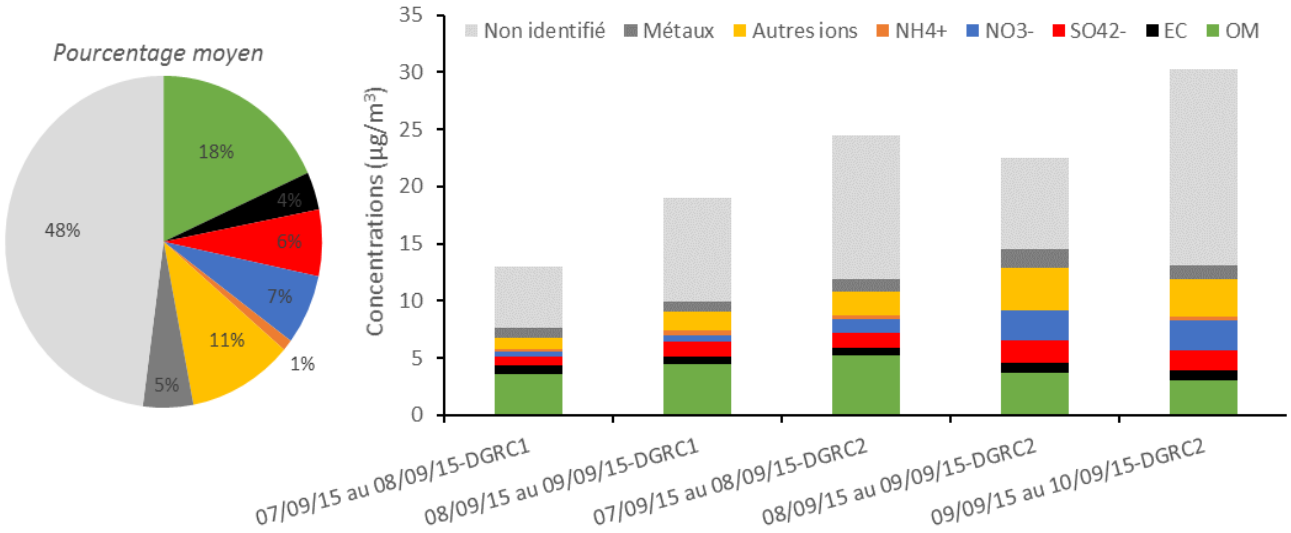


Figure 26: Concentrations des principales fractions de l'aérosol pour les filtres TOTAL

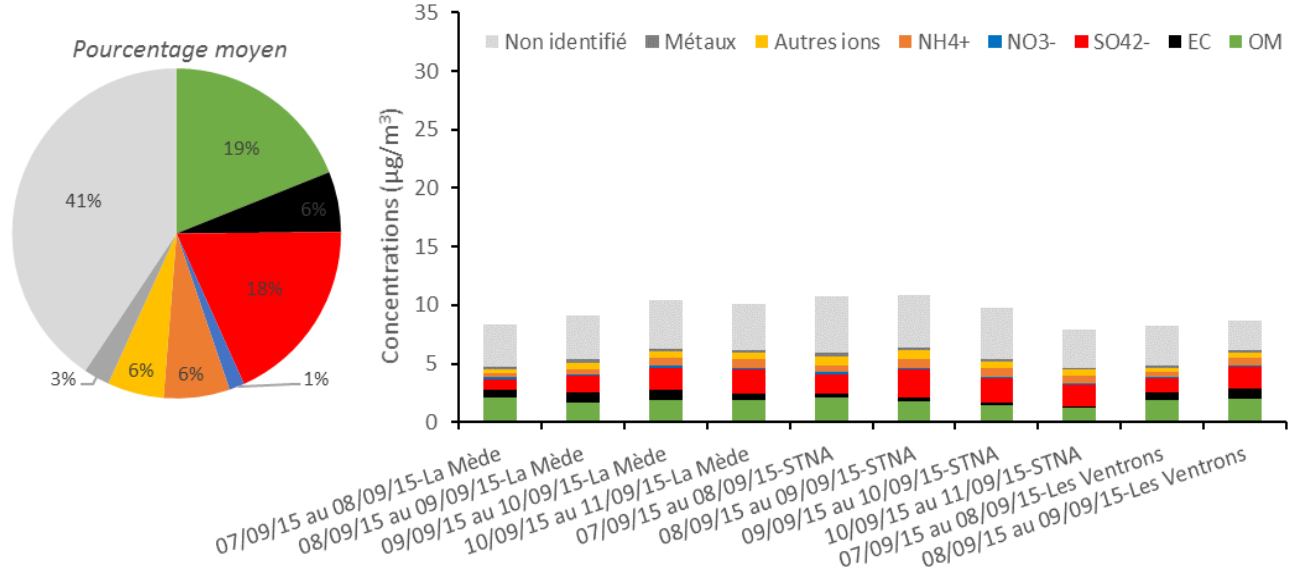


Figure 27: Concentrations des principales fractions de l'aérosol pour les filtres Air PACA

La concentration de la matière organique n'étant pas directement accessible, il est usuel d'utiliser un facteur de conversion OC-OM pour l'estimer. Pour cette première campagne, un facteur de conversion de 1,4 a été appliqué, ce

qui est une valeur typique en période estivale. Des concentrations totales en particules deux à trois fois supérieures ont été retrouvées sur les filtres TOTAL par rapport aux filtres Air PACA. Il faut cependant noter que les trois filtres présentant les plus fortes concentrations ont été réalisés avec des têtes de prélèvement PM10, les autres prélèvements ayant été effectués avec des têtes de prélèvement PM2.5. Pour ces trois filtres, des quantités plus importantes en nitrates et en ions chlorures et sodium ont également pu être relevées. La matière carbonée reste cependant majoritaire et représente en moyenne 42 % de la masse identifiée. Les prélèvements effectués sur les stations de la Mède, du STNA et des Ventrons montrent des profils chimiques similaires avec pour ce qui concerne la part identifiée de l'aérosol, une domination de la matière carbonée (42 % en moyenne) et des sulfates (31 % en moyenne). Les autres espèces ioniques (23 % en moyenne) et les métaux (4 % en moyenne) présentent une faible part de la masse analysée.

Le calcul de la balance ionique permet de vérifier si l'ensemble des ions participant au bilan ionique ont bien été pris en compte. La droite diagonale représente un aérosol neutre pour lequel l'équilibre entre les charges positives et négatives est établi. L'aérosol collecté pendant cette campagne, en particulier sur les sites de TOTAL, montre clairement un déficit de charges négatives probablement dû à la présence d'ions CO_3^- non analysés qui seraient associés aux ions Ca^{2+}. Une bonne corrélation peut effectivement être observée entre la concentration en ions calcium et le déficit en anion ce qui appuie cette hypothèse (cf. Figure 29).

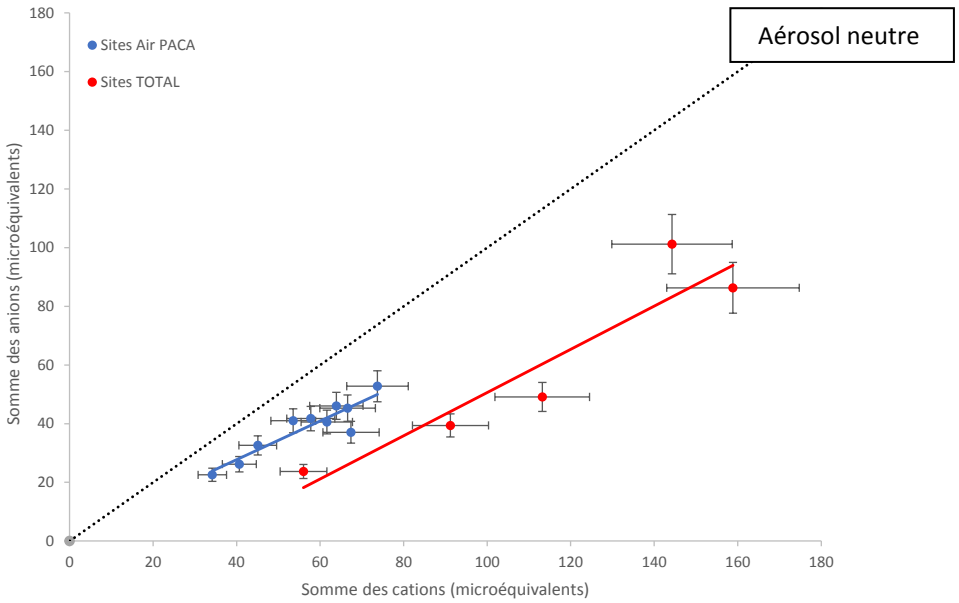


Figure 28: Balance ionique de l'aérosol. La droite diagonale représente ce qui est obtenu pour un aérosol neutre. Les points situés en dessous de la diagonale présentent un excès de cations qui s'explique par la contribution d'autres anions non pris en compte dans le calcul.

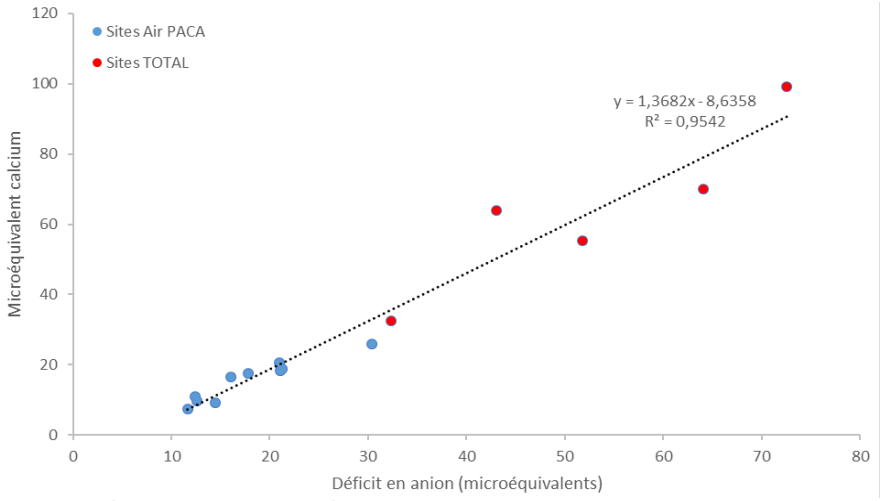


Figure 29: Corrélation entre le déficit en anion observé dans le bilan ionique et la concentration en ions calcium

b) Spéciation chimique de la matière organique

La spéciation chimique réalisée sur la matière organique a permis d'identifier et de quantifier 80 marqueurs caractéristiques de sources d'émissions, représentant en moyenne 4 % de la matière organique. Les concentrations de ces marqueurs sont représentées sur la Figure 30 pour les prélèvements réalisés sur le site de TOTAL La Mède et sur la Figure 31 pour les prélèvements réalisés sur les 3 sites gérés par Air PACA (La mède, STNA, Les Ventrons).

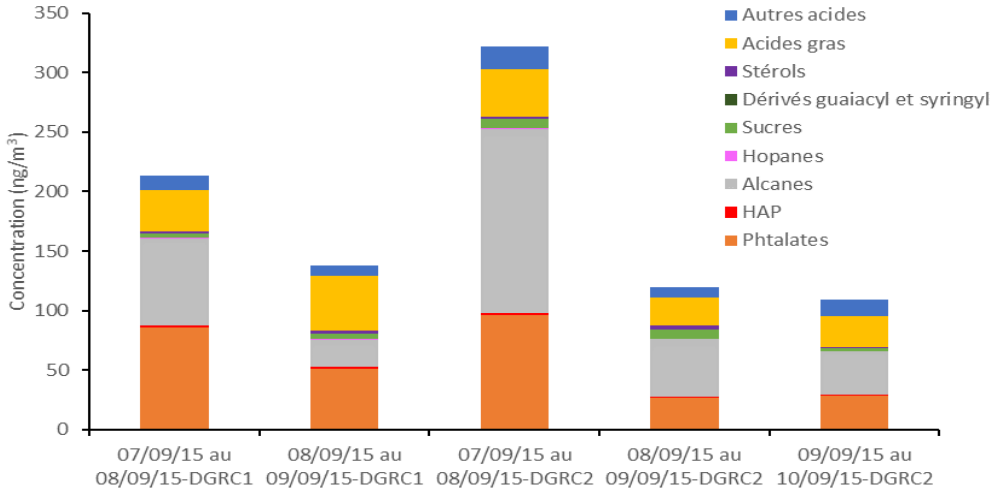


Figure 30: Concentrations des marqueurs organiques pour les filtres TOTAL

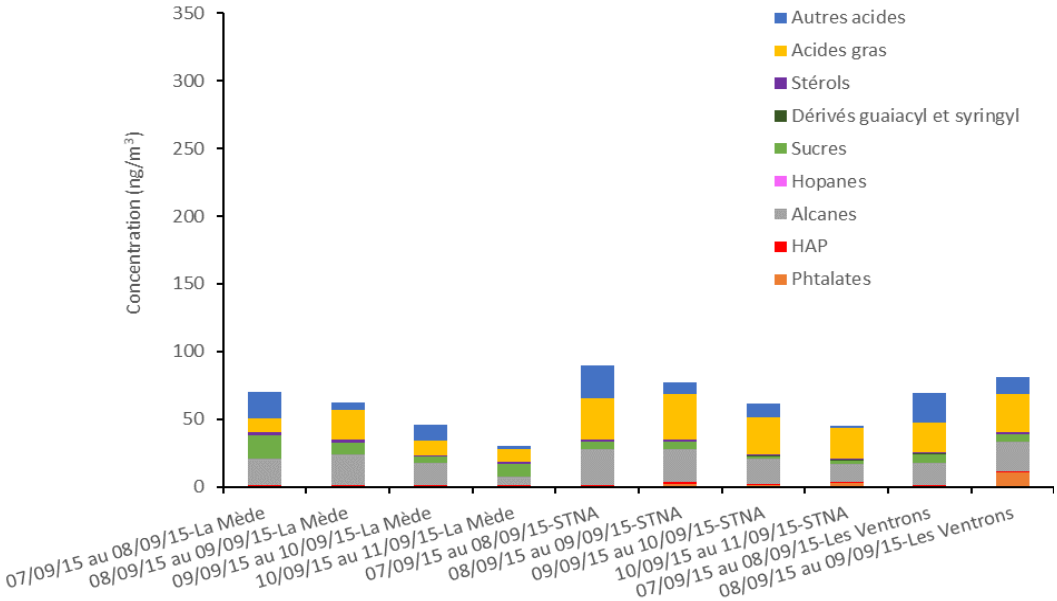


Figure 31: Concentrations des marqueurs organiques pour les filtres Air PACA

Les prélèvements réalisés sur les stations de la raffinerie présentent en moyenne des teneurs trois fois plus élevées par rapport aux prélèvements réalisés sur les stations autour de la raffinerie. Une prédominance des phtalates, alcanes et acides gras a pu être relevée pour l'ensemble des sites de prélèvement. Les phtalates sont des composés d'origine anthropique largement employés par les industries pour leurs propriétés plastifiantes. Ils ont été retrouvés dans des teneurs moyennes de 58 ng/m^3 dans les prélèvements effectués sur les sites de la raffinerie. Une prédominance des alcanes à hauts poids moléculaires (C27-C31) et à nombre impair de carbone a également pu être relevée, ce qui peut être révélateur d'un apport biogénique. A titre indicatif, des concentrations en phtalates du même ordre de grandeur (50 ng/m^3) et une prédominance des alcanes lourds et à nombre impair de carbone avait également été observées à Marseille en été 2008 (El Haddad et al, 2011).

c) Les métaux et éléments traces

Les concentrations des métaux et éléments traces sont représentées sur la Figure 32 pour les prélèvements réalisés sur le site de TOTAL La Mède et sur la Figure 33 pour les prélèvements réalisés sur les 3 sites gérés par Air PACA (La mède, STNA, Les Ventrons).

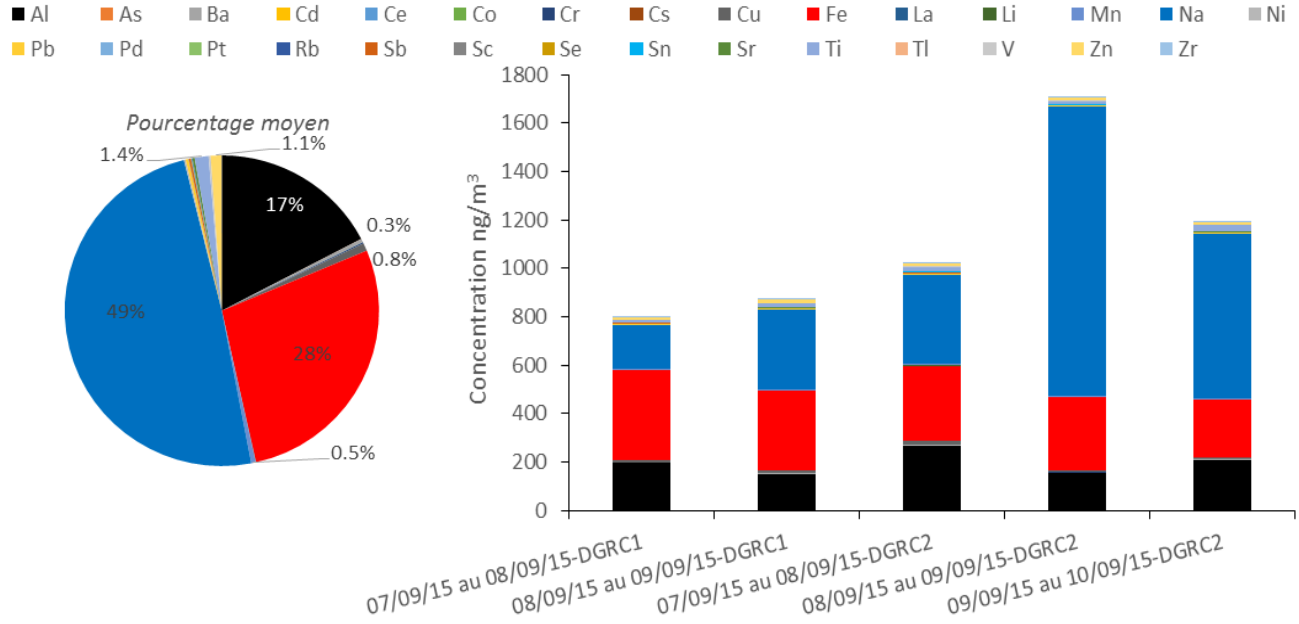


Figure 32: Concentrations des métaux et éléments traces pour les filtres TOTAL

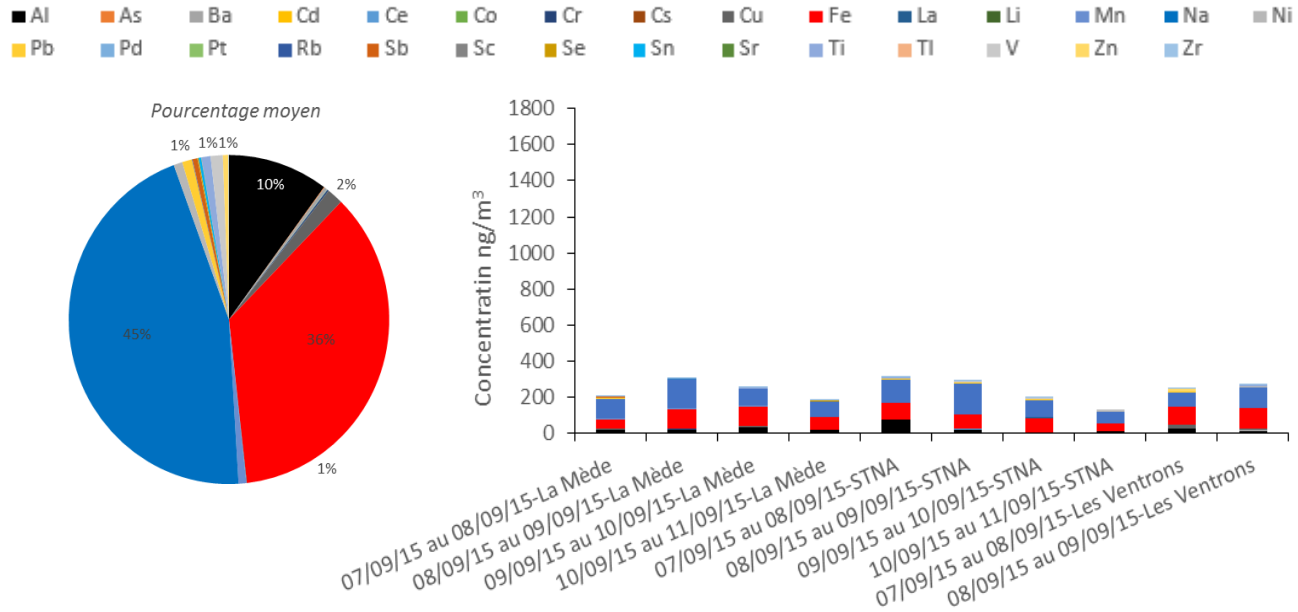


Figure 33: Concentrations des métaux et éléments traces pour les filtres Air PACA

Les métaux majoritaires sont le fer (161 ng/m^3 en moyenne), l'aluminium (81 ng/m^3 en moyenne) et le sodium (255 ng/m^3 en moyenne). Leurs concentrations sont 4 à 8 fois plus importantes sur les filtres TOTAL par rapport aux filtres Air PACA. Ces trois métaux peuvent à la fois avoir une origine naturelle (poussières d'origine crustale pour le fer et l'aluminium, origine marine pour le sodium) et une origine anthropique. Dans des concentrations beaucoup plus faibles sont retrouvés le titane (0 à 27 ng/m^3), le cuivre (0 à 18 ng/m^3) et le zinc (0 à 16 ng/m^3). Le cuivre et le zinc peuvent être émis par diverses sources industrielles mais aussi par la remise en suspension de débris de freins et de pneus.

Campagne hivernale (Du 07/02/16 au 19/02/16)

1) Résultats des mesures en ligne de la plateforme Massalya

a) Conditions météorologiques

La campagne hivernale a été marquée par des conditions météorologiques peu favorables à la mesure du panache industriel de la raffinerie avec des vents principalement de secteurs nord-ouest, ouest et sud-est. Les vents les plus forts ont été relevés en début de campagne, entre le 05/02/16 et le 08/02/16, puis en fin de campagne entre le 15/02/16 et le 17/02/16, avec des vitesses moyennes atteignant les 40 km/h (cf.Figure 34).

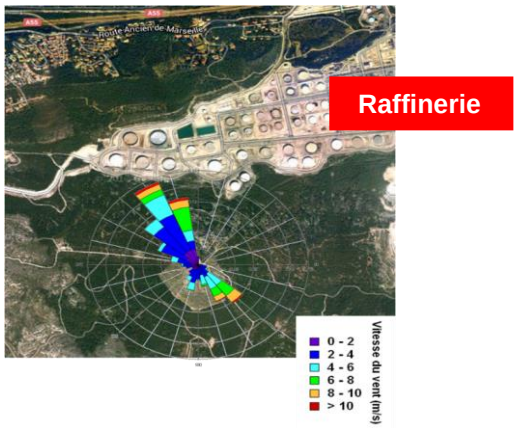


Figure 34: Rose des vents sur le site STNA
Représentation des directions dominantes du vent (fréquences des directions et fréquence de force pour chaque direction)

b) Caractérisation des particules

De brefs épisodes (de l'ordre de quelques minutes), caractérisés par des montées et chutes soudaines du nombre de particules correspondant à des changements de régime de vent ont cependant pu être relevés principalement entre le 12/02/16 et le 15/02/16, avec un nombre de particules PM1 dépassant ponctuellement les 60 000 particules/cm^3. En dehors de ces épisodes, la valeur moyenne de fond était d'environ 2 500 particules/cm^3. En ce qui concerne les concentrations massiques, les valeurs journalières ont oscillé entre 3,5 µg/m^3 (le 10/02/16) et 10,5 µg/m^3 (les 16 et 17/02/16) avec des pointes jusqu'à 20 µg/m^3 lors du passage des panaches en provenance de la raffinerie.

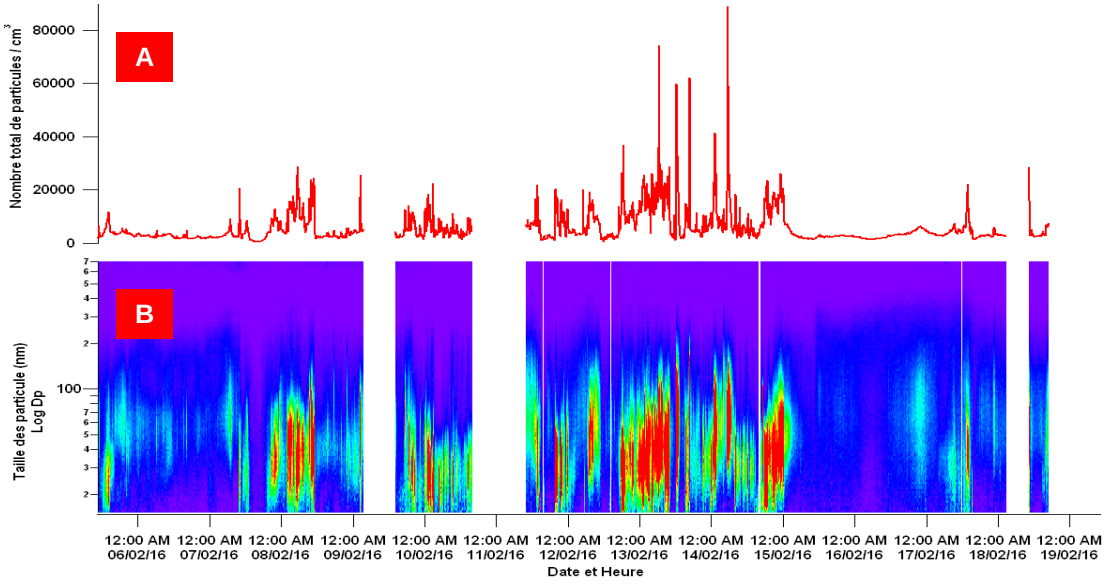


Figure 35: Evolution temporelle du nombre de particules fines PM1 (graphique A) et de leur granulométrie (graphique B). Les particules détectées pendant les épisodes de pollution étaient de granulométrie inférieure à 150 nm avec un mode centré autour de 50 nm.

De même que cela l'a été observé durant la première campagne, les particules en provenance de la raffinerie (période 2 sur la Figure 36**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) se caractérisaient par :

-leur taille très fine : une granulométrie inférieure à 150 nm et un mode centré autour de 50 nm.
-leur composition chimique : une quantité importante d'aérosols soufrés très faiblement neutralisés au regard des quantités d'ammonium mesurées.

A partir du 15/02/16, une augmentation progressive du nombre de particules de granulométrie comprise entre 200 et 400 nm conjuguée à une augmentation de la concentration massique des nitrates, de la matière organique et de l'ammonium a été observée (périodes 3 et 4 sur la Figure 36). Le mode « accumulation » et la composition chimique présentés par les particules indiquent qu'il s'agit d'un aérosol d'origine anthropique à dominante secondaire qui a séjourné suffisamment longtemps dans l'atmosphère pour y subir des processus de vieillissement par conversion gaz/particule et qu'il provient probablement de sources plus lointaines.

L'étude des rétro-trajectoires des masses d'air a mis en évidence un déplacement des masses d'air, passant d'une origine océanique le 15/02/16 à une origine continentale (Nord de l'Italie, Suisse) le 16/02/16. La plateforme nationale de prévision de la qualité de l'air Prev'Air (http://www2.prevair.org/) indiquait pour cette période une arrivée de masses d'air en provenance du nord de l'Italie, qui pourrait être à l'origine de l'aérosol observé. Il est à noter qu'une baisse importante de la visibilité sur l'ensemble de l'Etang de Berre a été constatée depuis le site de mesure durant ces journées.

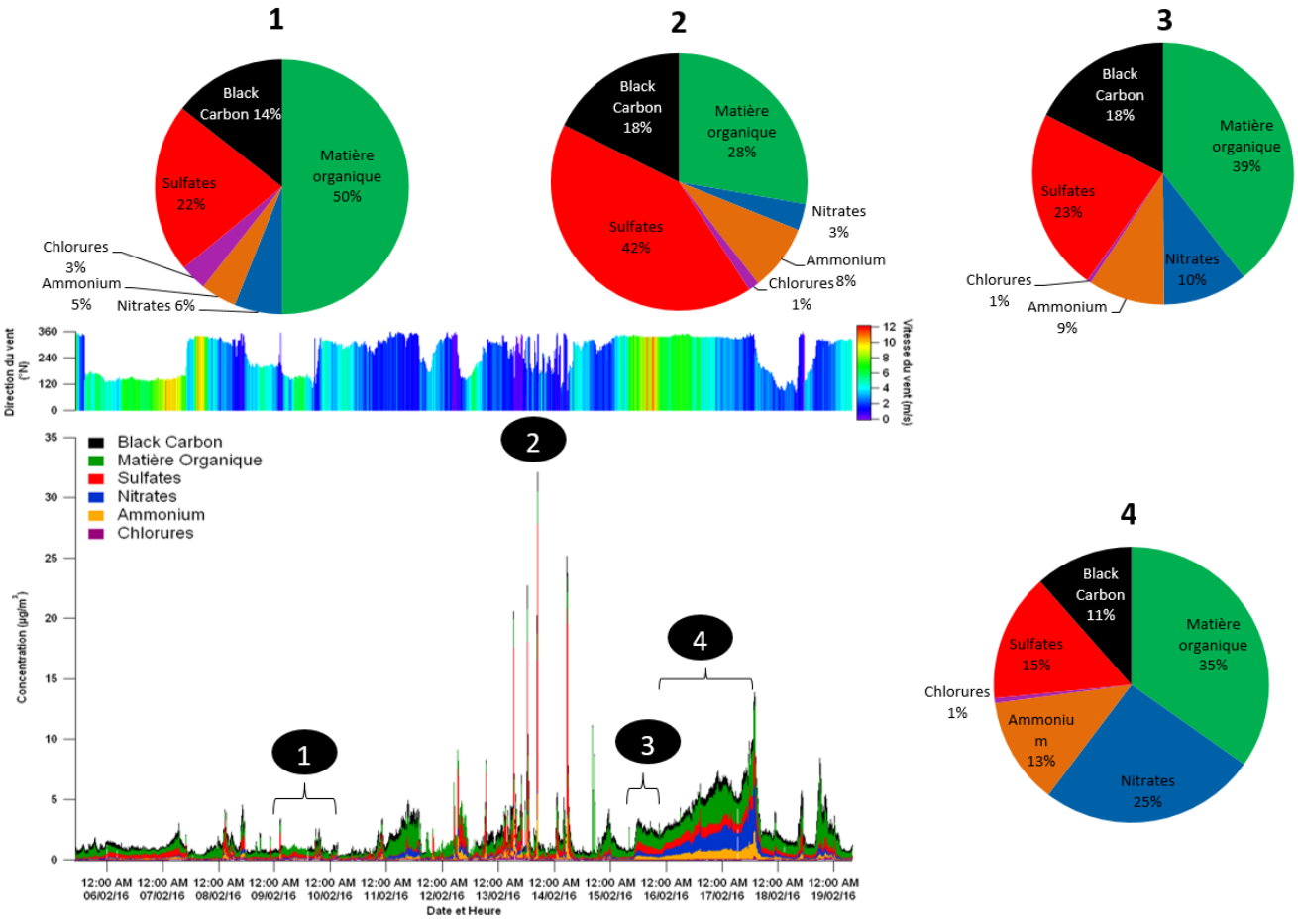


Figure 36: Evolution temporelle des concentrations massiques des principales fractions chimiques de l'aérosol PM1 (matière organique, carbone élémentaire, sulfates, nitrates, ammonium) mesurées sur le site STNA avec l'AMS et le MAAP. Les périodes représentatives des concentrations de fond (n°1), des épisodes de pollution d'origine industrielle riches en sulfates (n°2), et de l'aérosol âgé (n°3 et 4) ont été moyennées et représentées sous forme de diagramme circulaire.

c) Concentrations des COV

L'ensemble des COV mesurés pendant la première campagne ont été retrouvés lors de cette campagne hivernale dans des teneurs comprises entre 10 ppt et 15 ppb. De même que pour les particules, plusieurs pics de COV ont été mesurés principalement entre le 12/02/16 et le 15/02/16 avec des concentrations jusqu'à quinze fois plus élevées en COV_{totaux} par rapport aux concentrations de fond. Ces évènements caractérisés par des variations soudaines de concentrations suivaient généralement les régimes de vents en provenance du secteur Nord-Est favorables à la mesure du panache industriel de la raffinerie. Les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques ont contribué majoritairement à ces augmentations.

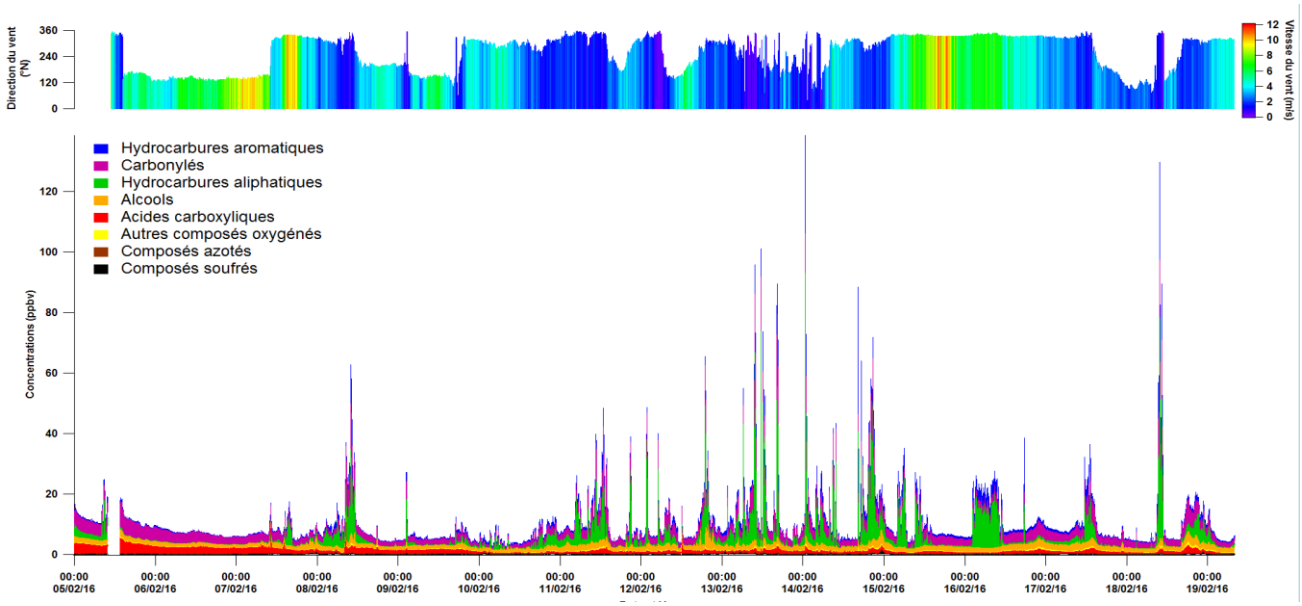


Figure 37 : Suivi temporel des COV regroupés par famille chimique

Un épisode s'est démarqué des autres par sa durée. Il a eu lieu le 16/02/16 entre 2h15 et 10h05 et a été caractérisé par une augmentation modérée des concentrations en hydrocarbures aliphatiques et en aromatiques légers (benzène, toluène). Cet épisode coïncide avec un léger changement de direction de vent, de l'ordre de quelques degrés, passant de 337°N à 340-350°N. Comme le montre les roses de pollution de la Figure 38, cette direction de vent pointe vers les cuves de stockage situées sur la pointe Ouest de la raffinerie.

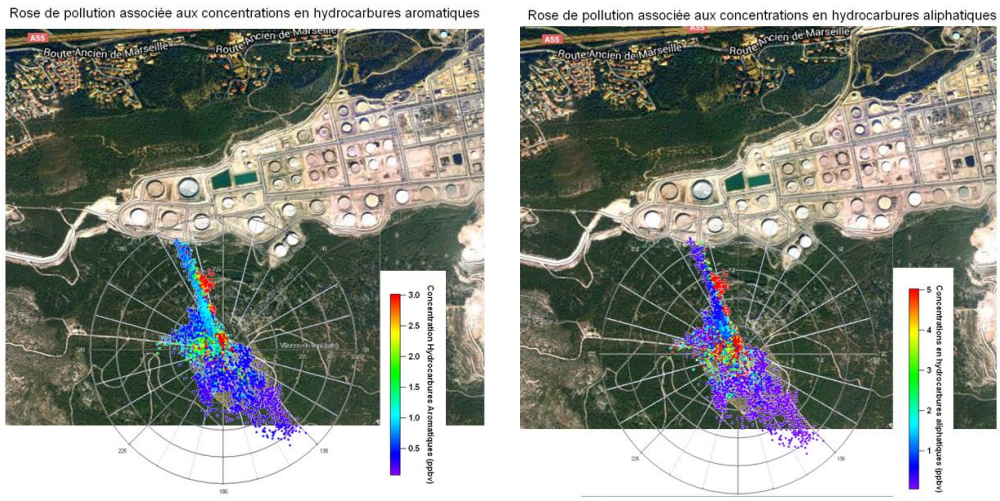


Figure 38: Rose de pollution associée aux concentrations en hydrocarbures aromatiques (à gauche) et en hydrocarbures aliphatiques (à droite). Les concentrations les plus élevées représentées par les points rouges ont été mesurées avec des vents de 340-350°N, direction correspondant aux cuves de stockage de la raffinerie.

2) Résultats des mesures en ligne des stations d'Air PACA

Le tableau ci-dessous résume les concentrations observées pendant la campagne hivernale.

Tableau 9: Synthèse des concentrations observées pendant la campagne hivernale par Air PACA

	NO2			NO			NOX		
	Mède	**Ventrons**	**STNA**	**Mède**	**Ventrons**	**STNA**	**Mède**	**Ventrons**	**STNA**
Moyenne campagne	23	8	13	9	2	0	37	10	14
Max horaire	75 18-févr	58 08-févr	51 18-févr	77 08-févr	33 18-févr	8 08-févr	184 08-févr	108 08-févr	64 18-févr
Max journalier	39 18-févr	20 13-févr	19 18-févr	19 08-févr	5 13-févr	1 11-févr	61 18-févr	28 13-févr	20 13-févr

	SO2					PM10
	Couronne	**Mède**	**Gatasse**	**Ventrons**	**STNA**	**Mède**
Moyenne campagne	2	6	2	1	6	17
Max horaire	23 11-févr	170 08-févr	20 19-févr	17 10-févr	117 14-févr	46 17-févr
Max journalier	6 19-févr	48 08-févr	6 13-févr	4 10-févr	25 13-févr	23 09-févr

Quel que soit le polluant mesuré, aucun seuil réglementaire n'a été atteint pendant la campagne. Une fenêtre météorologique peu propice aux observations du panache de la raffinerie de la Mède au niveau du site sommital de mesure du STNA et dans la vallée de St Julien et St Pierre les Martigues.
Il a manqué la situation anticyclonique hivernale associée à des températures froides et à une stabilité atmosphérique, situation qui n'est quasiment jamais apparue cet hiver.

SO_2 : Les concentrations restent faibles en comparaison du seuil d'information et de recommandation (300 µg/m^3/heure). Le maximum enregistré concerne le site de la Mède le 8 février ; 184 µg/m^3 ont été enregistrés par vent de Sud-Ouest sous le vent de la raffinerie de Total. A noter que le site STNA et la station des Ventrons n'enregistrent aucune augmentation parallèle au même instant.
Le site du STNA enregistre plusieurs augmentations brèves de SO_2 les 12, 13 et 14 février lors d'épisodes brefs de vents faibles de secteur Nord Est. Ces pics de SO_2 s'observent en en même temps que les augmentations de COVs soufrés et celles de sulfates (
Figure 49).
Par ailleurs quelques poussées modérées en SO_2 sont observées par vent de secteur Ouest, Nord-Ouest notamment les 7, 9 et 10 février probablement liées aux rejets industriels de la plateforme de Lavéra.

NO_2, NO, NOx :
Les concentrations en NO_2 enregistrées à la Mède et au STNA ne dépassent pas 75 µg/m^3/h. Elles restent faibles en comparaison du seuil d'information et de recommandation (200 µg/m^3/heure).

PM10 :
Les concentrations en PM10 pendant cette période hivernale sont plutôt faibles. Le maximum horaire de la station de la Mède atteint 46 µg/m^3/h le 17 février. Le maximum journalier 23 µg/m^3/jour est enregistré le 9 février dans cette même station. Les mesures OPC du site STNA sont également très modérées. L'augmentation des concentrations observée du 15 au 17 février est également visible dans d'autres stations du réseau d'Air PACA dans le département des Bouches du Rhône et de la région. Cela corrobore l'hypothèse d'un transport de particules exogène sur la zone.

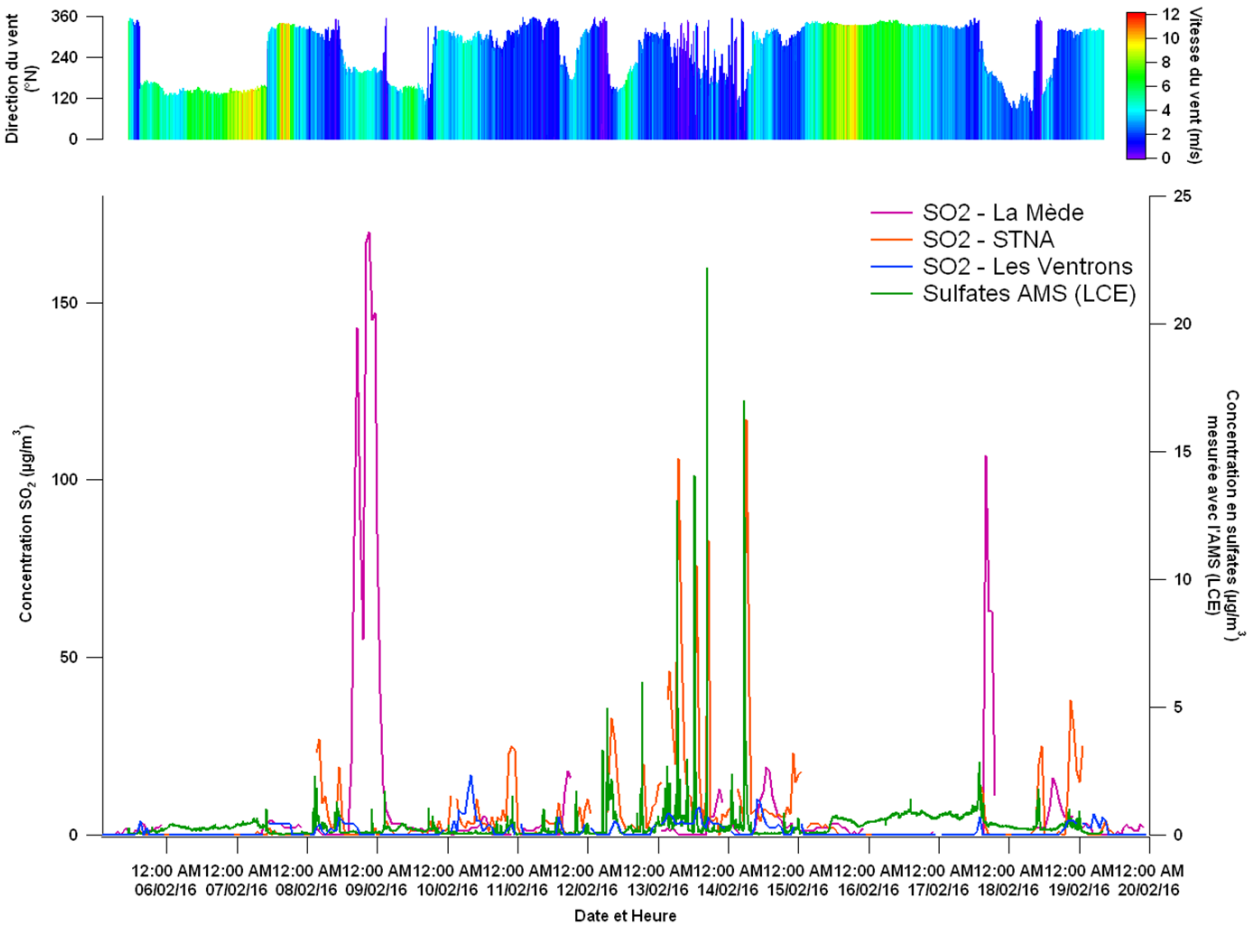


Figure 39: Concentrations hivernales en SO_2 relevées sur les sites d'Air PACA

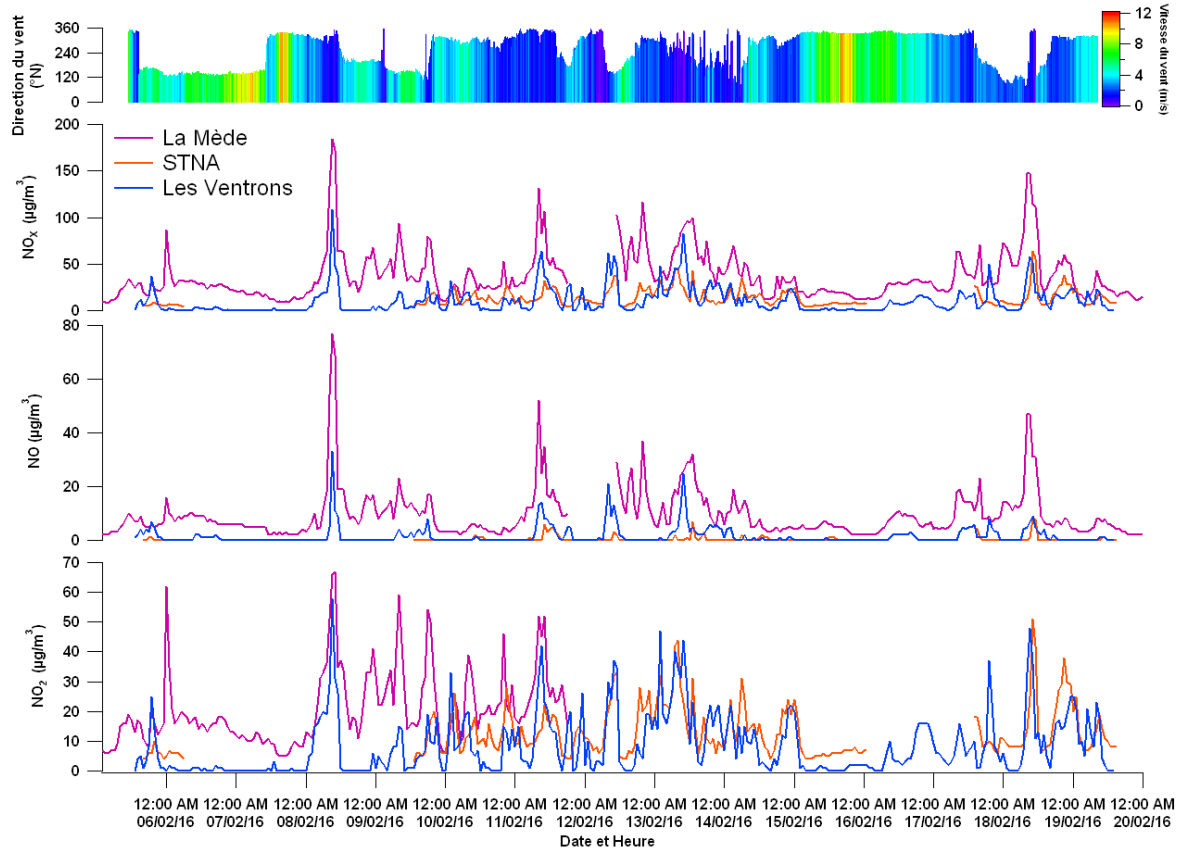


Figure 40: Concentrations hivernales en NO, NOx, NO_2 relevées sur les sites d'Air PACA

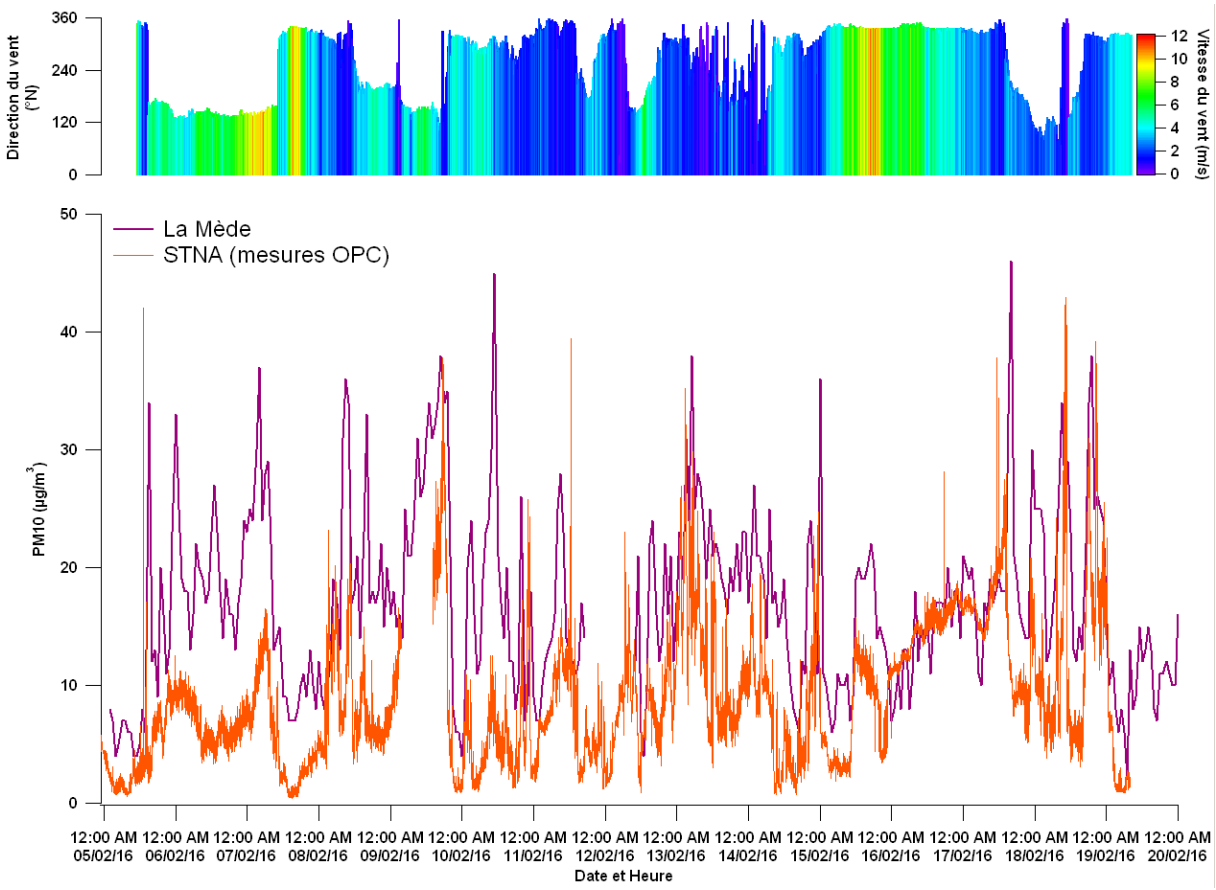


Figure 41: Concentrations hivernales en PM10 relevées sur les sites d'Air PACA

3) Résultats des analyses offlines (prélèvements atmosphériques sur filtres)

24 filtres dont 4 blancs sur les 62 prélèvements effectués pendant la campagne hivernale ont été analysés. La sélection des filtres a été en partie effectuée à partir des résultats de mesure en ligne. Les périodes regroupant les épisodes de pollution ont été privilégiées.

a) Composition chimique globale de l'aérosol PM2.5

Les concentrations des espèces majoritaires sont représentées sur la Figure 42 pour les prélèvements réalisés sur le site de TOTAL La Mède et sur la Figure 43 pour les prélèvements réalisés sur les 3 sites gérés par Air PACA (La mède, STNA, Les Ventrons).

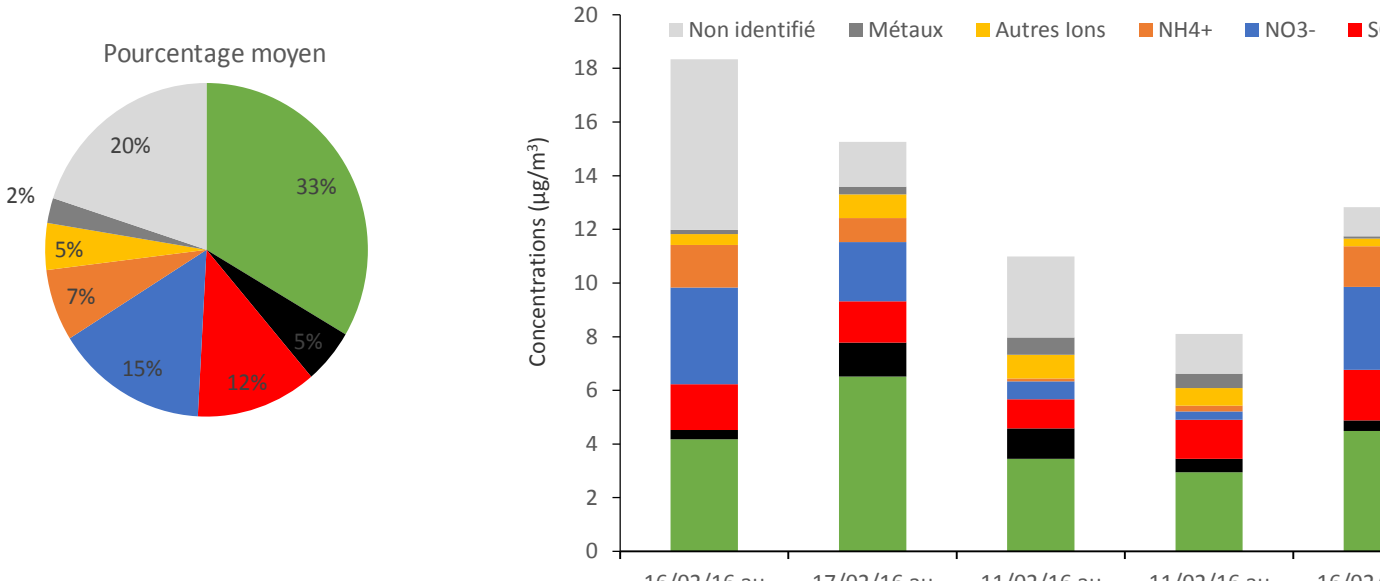


Figure 42: Concentrations des principales fractions de l'aérosol pour les filtres TOTAL

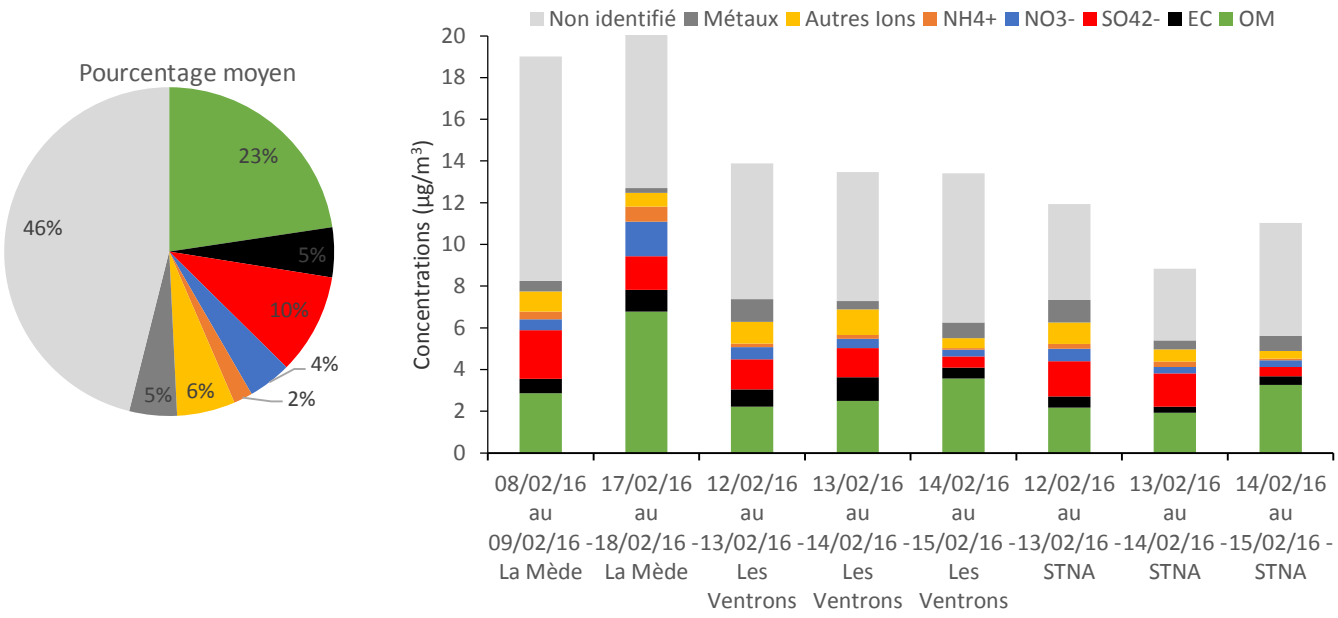


Figure 43: Concentrations des principales fractions de l'aérosol pour les filtres Air PACA

La concentration de la matière organique n'étant pas directement accessible, il est usuel d'utiliser un facteur de conversion OC-OM pour l'estimer. Pour cette deuxième campagne, un facteur de conversion de 1,78 a été appliqué, ce qui est une valeur typique en période hivernale où la combustion de bois est généralement une source importante.

La composante carbonée mesurée en hiver est environ deux fois supérieure à la période estivale. Cette augmentation est principalement due à la matière organique, les concentrations moyennes en carbone élémentaire étant similaires pour les deux saisons.

L'aérosol est donc dominé par la matière organique (42 % en moyenne sur le total identifié) et par la fraction ionique (44 % en moyenne sur le total identifié). Des pourcentages moyens de 8 % et de 6 % sont attribués au carbone élémentaire et aux métaux. L'arrivée de masses d'air vieillies sur le site, observée avec l'AMS durant les journées du 16/02/17 au 18/02/17 est retrouvée dans les résultats des analyses des filtres avec une augmentation significative des nitrates.

Les concentrations en sulfates sont équivalentes pour les deux campagnes avec des valeurs moyennes comprises entre 1,4 et 1,7 µg/m^3.

Le calcul de la balance ionique (Figure 44**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) montre une bonne corrélation entre la somme des cations et la somme des anions. La droite diagonale représente un aérosol neutre pour lequel l'équilibre entre les charges positives et négatives est établi, ce qui est le cas pour l'ensemble des prélèvements.

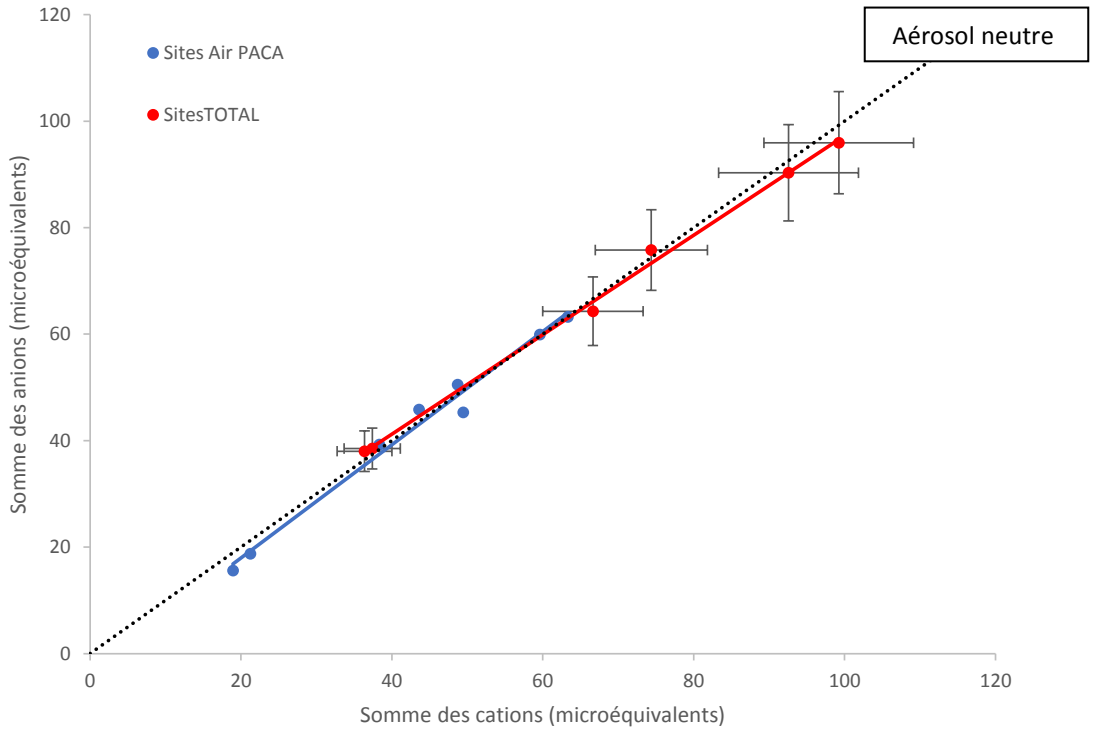


Figure 44: Balance ionique de l'aérosol. La droite diagonale représente ce qui est obtenu pour un aérosol neutre. Les prélèvements effectués autour de la raffinerie sont représentés en bleu, ceux effectués sur le site de la raffinerie sont représentés en rouge.

b) Spéciation chimique de la matière organique

La spéciation chimique réalisée sur la matière organique a permis d'identifier et de quantifier 80 marqueurs caractéristiques de sources d'émissions, représentant en moyenne 10 % de la matière organique. Les concentrations de ces marqueurs sont représentées sur la Figure 45 pour les prélèvements réalisés sur le site de TOTAL La Mède et sur la Figure 46 pour les prélèvements réalisés sur les 3 sites gérés par Air PACA (La mède, STNA, Les Ventrons).

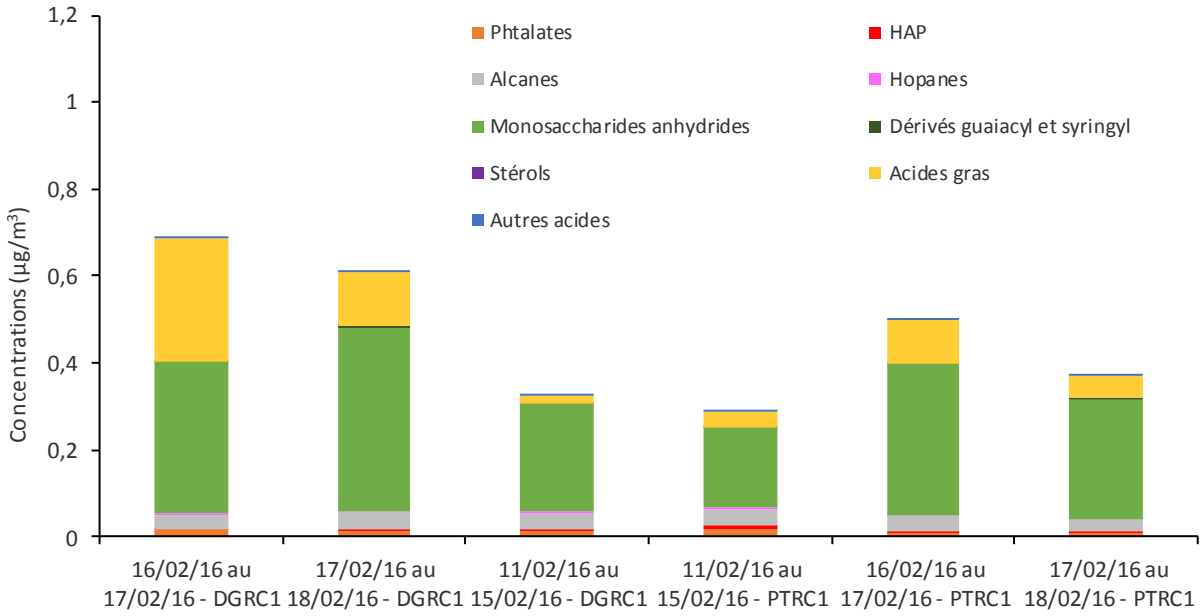


Figure 45: Concentrations des marqueurs organiques pour les filtres TOTAL

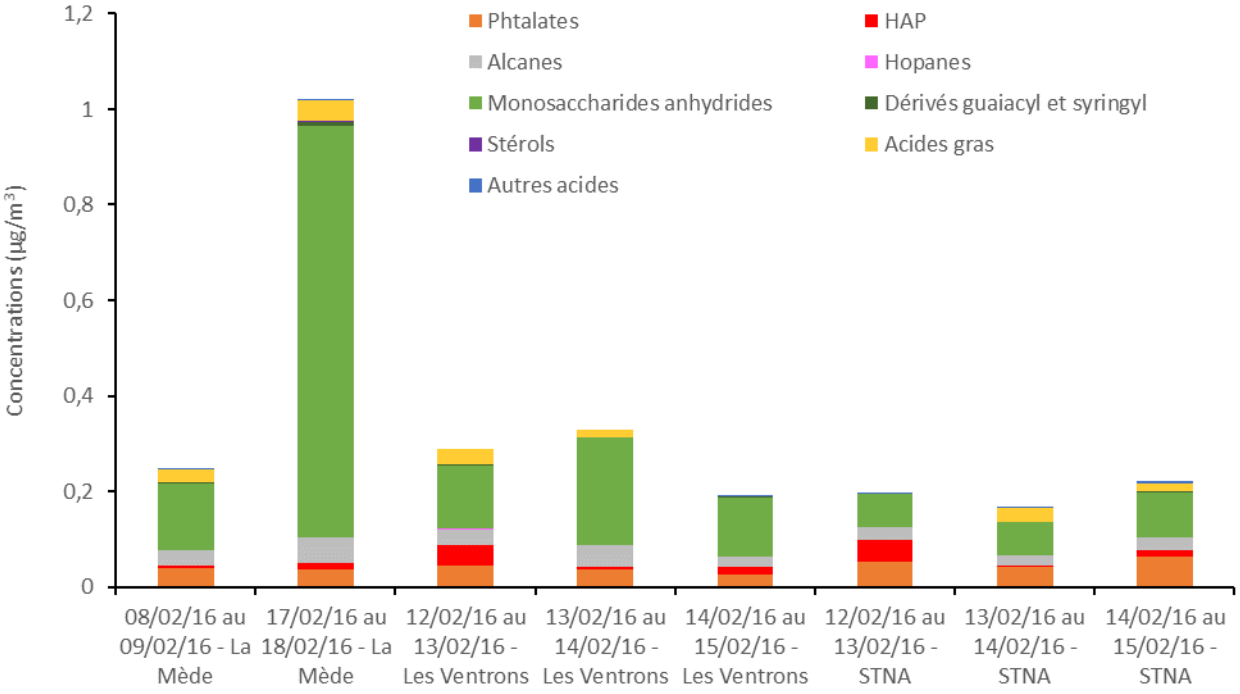


Figure 46: Concentrations des marqueurs organiques pour les filtres Air PACA

La spéciation de la matière organique fait ressortir la contribution de la combustion de biomasse à la part organique de l'aérosol. Les concentrations en lévoglucosan ont globalement été 25 fois plus élevées durant la campagne de février par rapport à la campagne de septembre avec une concentration moyenne de 214 ng/m^3 et un pic à 725 ng/m^3 pour la journée du 17/02/16 au 18/02/16 observé sur la station de La Mède. Ces teneurs en lévoglucosan restent cependant modérées pour une période hivernale où les concentrations peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 3 µg/m^3 (concentrations mesurées durant l'hiver 2012-2013 sur le pourtour de l'Etang de Berre dans le cadre d'une thèse conduite au LCE par Alexandre Sylvestre).

Des quantités faibles mais tout de même notables en dérivés syringyls, guaiacyls (2 ng/m^3 en moyenne) et en HAP (13 ng/m^3 en moyenne) ont aussi été relevées. Tous les processus de combustion de la matière organique sont émetteurs de HAP. Il est donc difficile à partir de ces seuls résultats de dire si la combustion de bois est l'unique source de HAP ou alors s'il y a un apport d'autre(s) source(s) et dans quelles proportions. On peut cependant préciser que la signature chimique des HAP est similaire sur l'ensemble des prélèvements analysés, ce qui indique une certaine homogénéité dans la nature des sources d'émission.

Comme cela l'avait déjà été observé lors de la campagne estivale, la distribution des n-alcanes met en valeur une prédominance des alcanes lourds et à nombre impair de carbone (C27, C29, C31). Le Carbon Preference Index (CPI), ratio ente la somme des concentrations des alcanes à nombre impairs de carbone et la somme des concentrations des alcanes à nombre pairs de carbone, est ici compris entre 1,5 et 2,5. On attribue généralement les valeurs de CPI comprises entre 1,2 et 4,6 aux sources de combustion de la biomasse (Fine et al., 2004). Les concentrations en n-alcanes sont équivalentes pour les deux campagnes (30 ng/m^3 en moyenne)

Les autres composés (phtalates, hopanes, acides gras) ont été retrouvés dans des concentrations légèrement plus faibles par rapport à la campagne estivale.

c) Les métaux et éléments traces

Les concentrations des métaux et éléments traces sont représentées sur la

Figure 47 pour les prélèvements réalisés sur le site de TOTAL La Mède et sur la Figure 48 pour les prélèvements réalisés sur les 3 sites gérés par Air PACA (La mède, STNA, Les Ventrons).

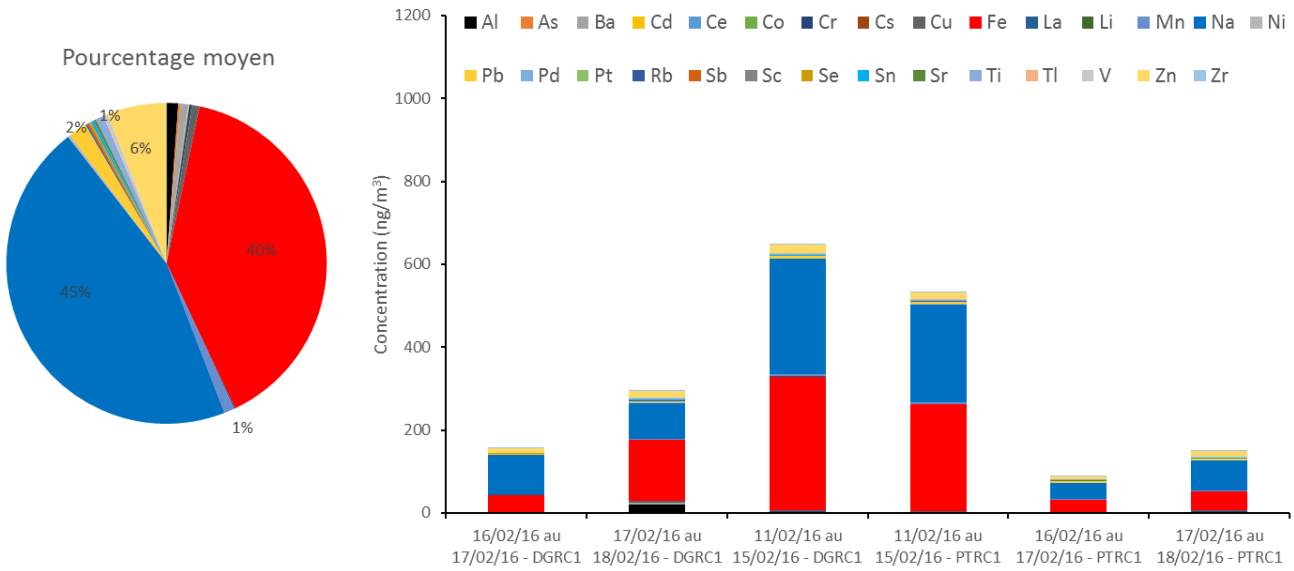


Figure 47: Concentrations des métaux et éléments traces pour les filtres TOTAL

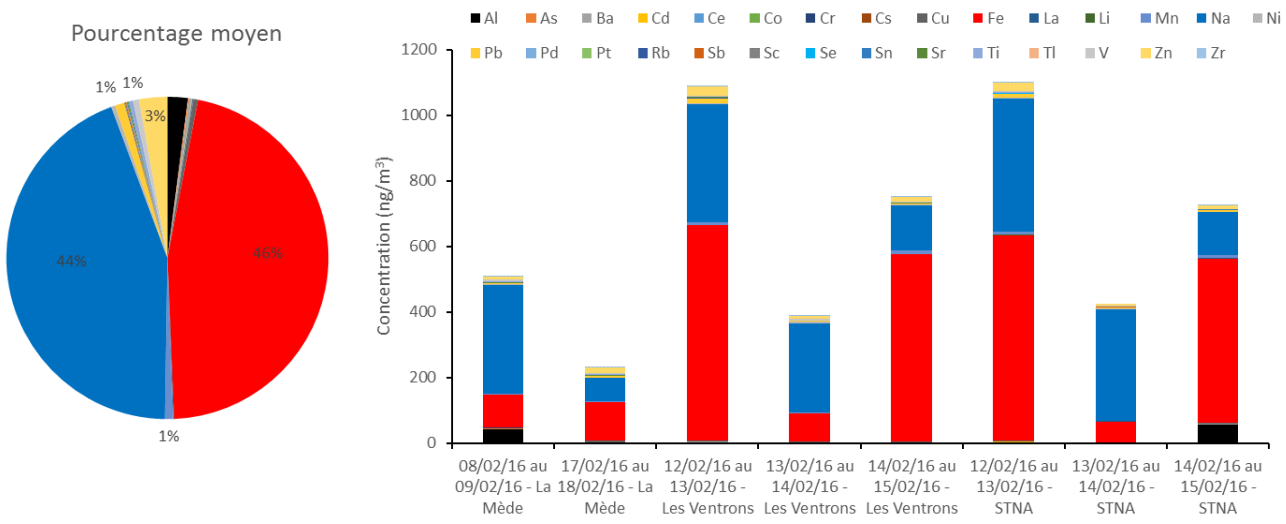


Figure 48: Concentrations des métaux et éléments traces pour les filtres Air PACA

Le fer, l'aluminium et le sodium trouvés comme étant les trois métaux principaux dans les prélèvements atmosphériques de la campagne estivale sont également retrouvés de façon majoritaire dans les prélèvements de la campagne hivernale. Cependant, les niveaux de concentrations sont beaucoup moins homogènes que durant la première campagne. L'aluminium a par exemple été détecté seulement sur 3 des 14 filtres analysés.

De plus, alors que pour les filtres TOTAL les concentrations moyennes en métaux (Fe, Al et Na) ont globalement diminués d'un facteur 4 par rapport à la campagne estivale, au contraire il a été observé pour les filtres Air PACA une augmentation moyenne d'un facteur 3.

Dans des concentrations beaucoup plus faibles sont retrouvés le zinc (8 à 27 ng/m^3) et le plomb (2 à 15 ng/m^3).

2.6. Mesures ballon captif

Localisation sur le site



Figure 49 : Localisation du site du ballon captif par rapport à la raffinerie.

Le site du ballon captif est situé dans la plaine de Saint-Julien-les-Martigues (GPS :43.367°N, 5.071°S, ~70 m asl). Le site est à 4km au Sud-Sud-Ouest de la raffinerie et est idéalement situé pour échantillonner le panache de la raffinerie en condition matinale, avant que la brise de mer ne se mette en place. Ces mesures sont complémentaires des mats de vent obtenus par sondage lidar Doppler au niveau de la raffinerie. Le secteur aérien concerné est sous contrôle du commandement de la base militaire aérienne d'Istres. Le ballon a pu être opéré de 8 :00 à 12 :00 LT jusqu'à 300 m d'altitude. La manipulation du ballon nécessite 2 opérateurs en permanence.

Caractéristiques des instruments déployés

Le ballon captif est un ballon de 7m^3 de type Vaisala TTB327 d'un emport maximal de 3.6 kg au niveau de la mer. Il est relié à un treuil électrique par une ligne de vie de 1000 m maximale. La
Figure 50 montre le ballon en opération sur le site de Martigues. Le ballon peut être utilisé jusqu'à une vitesse de vent de 12 m/s. Hors opération, le ballon est abrité sous tente.

Le ballon est équipé avec des sondes Vaisala TTS111 qui permettent la mesure de la pression, température, intensité et direction du vent (Lothon et al., 2014). Le ballon peut accueillir 5 sondes au maximum. Sur TEMMAS, 3 sondes ont été utilisées au niveau du sol, à 150 m, et à 300 m d'altitude. La fréquence d'acquisition est de 1 / 5 s.

Le ballon a également été instrumenté avec un compteur optique de particules LOAC (Light Optical Aerosol Counter) de MeteoModem (Renard et al., 2016). Ce compteur à la possibilité de mesurer la granulométrie des particules dans 19 classes de taille entre 0.2 et 50 µm.



Figure 50 : Ballon captif Vaisala TTB327 au niveau du sol.

Mesures réalisées

Le ballon a été opéré durant les 2 campagnes TEMMAS en septembre 2015 et en février 2016. Nous avons du faire face à 2 difficultés techniques principales. La première concerne l'utilisation du granulomètre optique LOAC lors de la première campagne (septembre). La sonde n'a pu finalement été réparée qu'à l'issue de la première semaine de campagne. La seconde difficulté a été la mise à l'abri du ballon sonde. Les conditions météorologiques durant la campagne hivernale (février 2016) ont été particulièrement défavorables avec la présence d'un mistral. Une rafale de vent a détruit l'abri ainsi que le ballon sonde dans la nuit du 9 février. La durée de campagne étant particulièrement courte, il n'a pas été possible de trouver de solution de rechange.

Par conséquent, les seules mesures exploitables sont les observations météorologiques de la campagne dite estivale du 7 au 11 septembre. La figure 30 montre un exemple des températures mesurées aux 3 altitudes. On observe une augmentation de la température au sol en raison de l'échauffement radiatif lié au lever du soleil. La vitesse du vent est entre 1 à 2m/s au sol et de 4 à 6 m/s à 300 m. De manière générale, les observations mettent en évidence (i) la mise en place de la turbulence après le lever du soleil et (ii) la mise en place d'un vent de sud-sud Est en fin de matinée avec la brise de mer. L'échantillonnage sous le vent de la raffinerie n'est donc possible que dans les premières heures de la matinée.

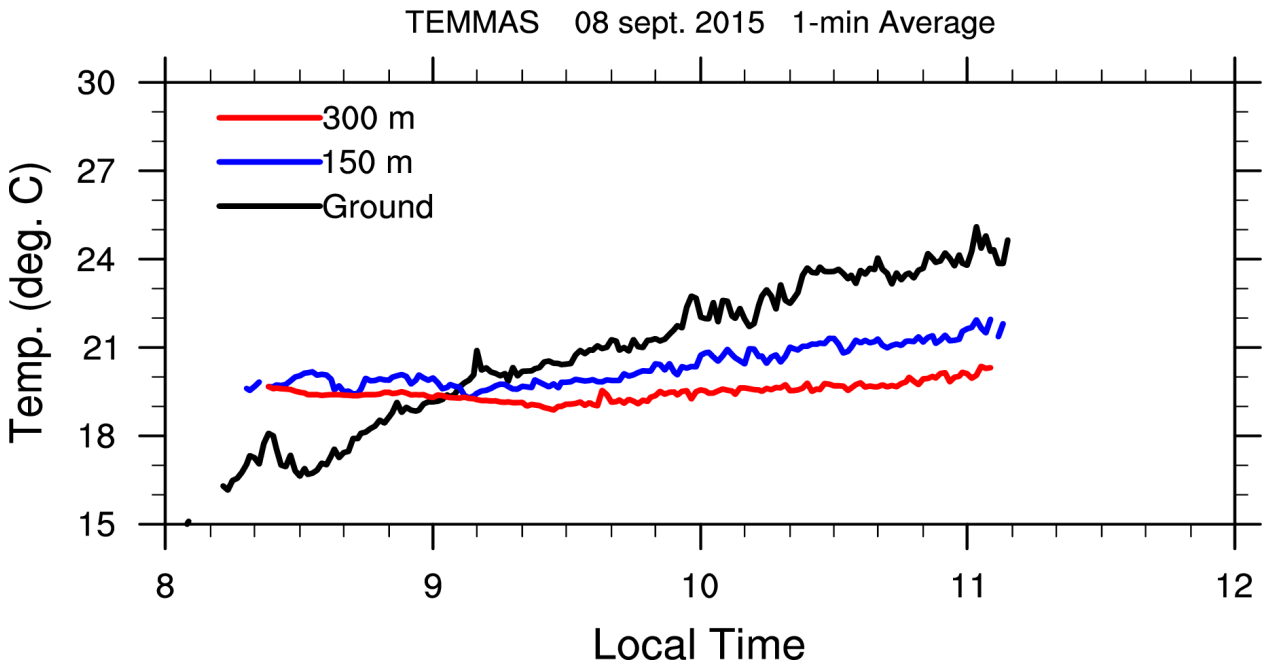


Figure 51 : Evolution de la température au sol, à 150 m et 300 m. Le 8 septembre 2015

.

2.7. Mesures hyperspectrales aéroportées

2.7.1. Caractéristiques des capteurs aéroportés embarqués

Les capteurs proposés sont les deux caméras hyperspectrales HySpex VNIR et SWIR et la caméra panchromatique CamV2 haute résolution. L'ensemble constitué des capteurs, d'une centrale inertielle, du laboratoire dédié à leur étalonnage et des logiciels de correction, constitue une plateforme appelé PELICAN-HYPER (Plateforme d'Etalonnage et Logiciels dédiés à l'Imagerie de Caméras Aéroportées Numériques HYPERspectrales).

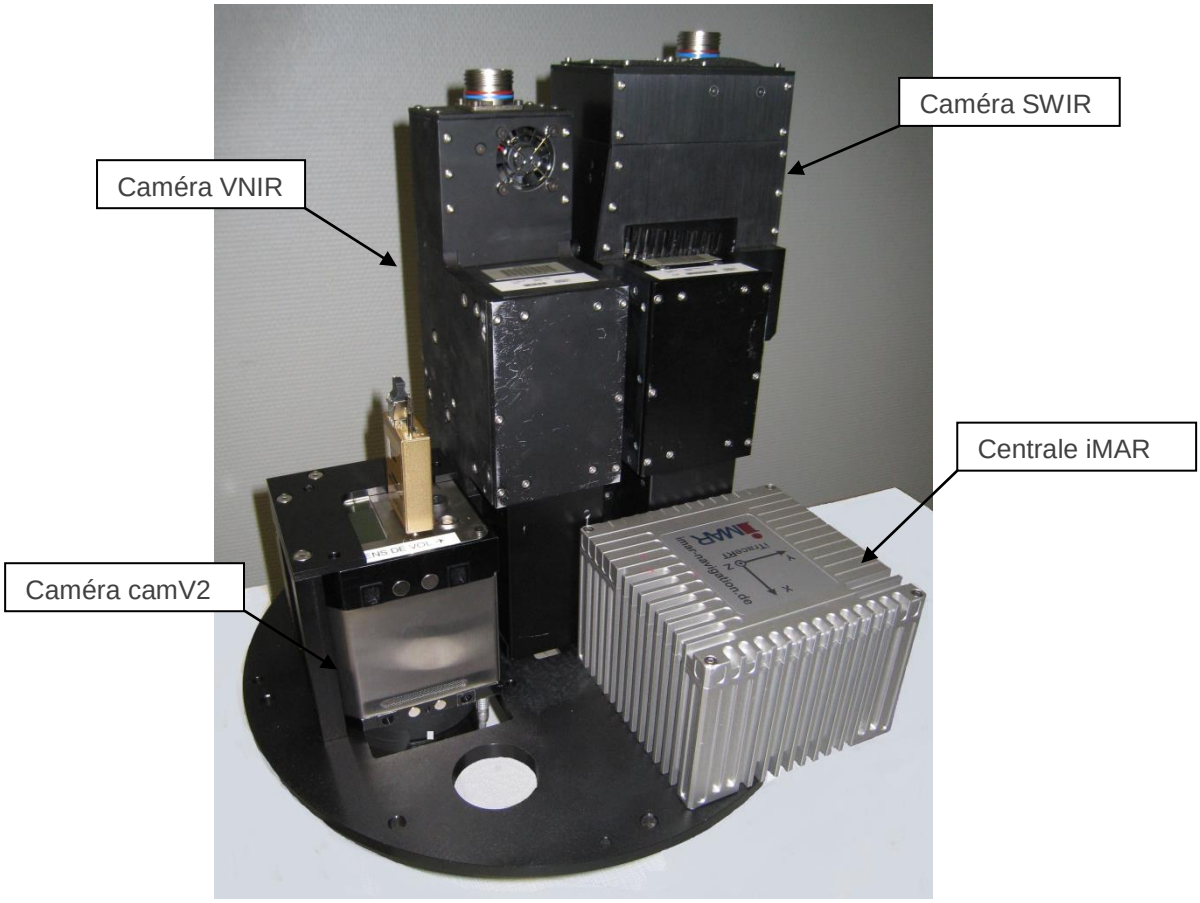


Figure 52 : Capteurs PELICAN-HYPER sur une plaque d'interface

Les principales caractéristiques des capteurs sont décrites dans le tableau suivant.

Tableau 10: Caractéristiques des capteurs de PELICAN-HYPER

Caractéristiques	HySpex VNIR	Hyspex VNIR + Fov exp	HySpex SWIR	CamV2
Type d'acquisition	Push-broom	Push-broom	Push-broom	Snapshot
Nombre de pixels	1600	1600	320	7256 × 5462
Champ de vue	17°	34°	14°	27°
Intervalle spectral	0,4-1 µm	0,4-1 µm	1-2,5 µm	0,4-0,8 µm
Nombre de bandes spectrales	160	160	256	Panchro
Largeur de bandes	3,7 nm	3,7 nm	6 nm	400 nm
Pas au sol (@ 2667m) perpendiculaire au sens du vol	0,50 m	1,00 m	2,00 m	0,17 m
Pas au sol (@ 2667m) parallèle au sens du vol	1,00 m	2,00 m	2,00 m	0,17 m
Fauchée à 2667m (hauteur/sol)	800 m	1600 m	640m	1280 m

L'objectif permettant de multiplier le champ de vue par deux (FOV-expander) est utilisé dans le cas particulier où le porteur vole à une vitesse trop importante par rapport à l'altitude requise pour un GSD fixé ou contrainte par le plan de vol. Cet objectif est également intéressant pour des prises de vue avec la caméra VNIR seule sur de grande zone puisqu' 'il permet de réduire le nombre de ligne de vol et réduire la durée d'acquisition.

2.7.2. **Montage dans le Piper**

Le Piper Aztec n'est pas pressurisé. La visée s'effectue directement sans passer à travers un hublot. La trappe photographique mise à la disposition de l'instrumentation est celle qui se trouve à l'arrière de l'avion. Cette trappe est très exiguë et aucun élément ne doit dépasser de "la peau" de l'avion.

Un montage compact des caméras sur une plaque d'assemble permet de se placer dans les différents porteurs en changeant uniquement l'interface entre la plaque et le porteur.

Cette interface mécanique présente des dimensions rigoureusement identiques à celle de la trappe photo du PA23. La

Figure 53 présente le support avec ses imageurs en cours de montage dans la trappe du Piper Aztec (les vis ne sont pas toutes présentes). La découpe laisse entrevoir les optiques des 3 caméras. Les deux ouvertures rectangulaires sont adaptées au champ de vue des deux caméras hyperspectrales placées légèrement en retrait. L'objectif de la caméra CamV2 vient affleurer le plan de la trappe.

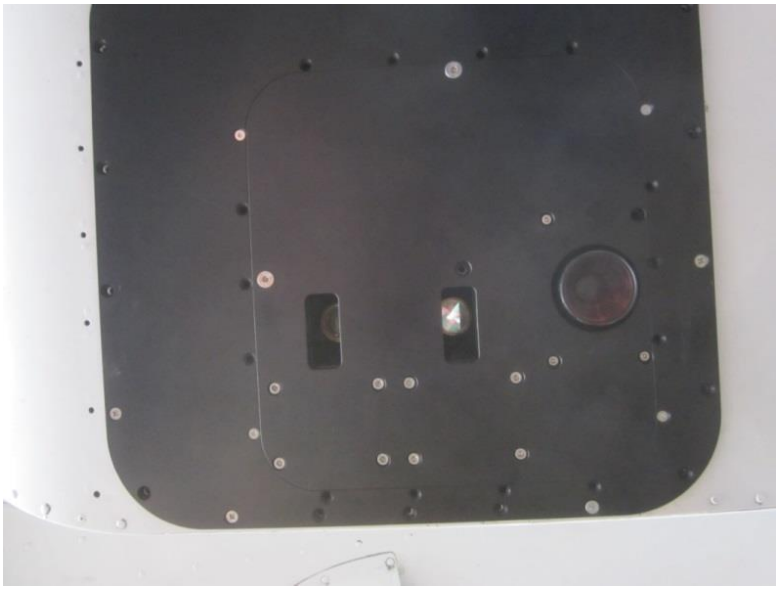


Figure 53 : les imageurs à THR spatiale et spectrale de Pelican-hyper vus sous le Piper Aztec.

Dans le Piper Aztec, seul un opérateur peut être embarqué à côté de la baie.

Les éléments de contrôle des caméras et des servitudes sont intégrés dans la seule baie du Piper placée derrière le pilote. Elle est au standard 19" et d'une hauteur largement dimensionnée pour recevoir l'instrumentation de Pelican-hyper.

Un switch clavier-écran-souris a été ajouté pour assurer ici la gestion des 3 caméras par un seul opérateur. Il permet de basculer entre les caméras à très haute résolution spectrale et celle à très haute résolution spatiale pour les paramétrer et déclencher les acquisitions.



Figure 54 : Baie de contrôle des imageurs Pelican-hyper

2.7.3. **Acquisitions réalisées**

Il a été décidé de réaliser 3 ou 4 survols de la raffinerie de La Mède par jour avec comme horaires, 7h30, 9h30, 11h30 et 13h30 TU. Chaque survol suivra les lignes de vol correspondant au vent pour pouvoir suivre les panaches. La ligne centrale NE sur laquelle se situe les instruments et mesures au sol sera acquise systématiquement.

Vol n° 1 du 7/9/2015

Décollage de Francazal et arrivée sur zone vers 7h40 TU. L'altitude et la vitesse avion sont prévues pour des pixels VNIR, SWIR et PAN respectivement de 2m, 2m et 25 cm. Au démarrage le vent est un mistral léger : nous décidons donc de suivre les lignes Mistral ainsi que la ligne de vol centrale (L2) NE prioritaire que nous ferons systématiquement à chaque vol. La météo est très favorable avec un grand ciel bleu sans cirrus. Pour gagner du temps de vol, comme les hippodromes sont plus longs que prévus, la vitesse avion est augmentée de 120 knots à 138 knots.

Tableau 11 : Liste des images acquises

Nom image brute HYPER	PANCHRO	AXE	commentaire image	Date et heure	Nb bandes	Nb lignes
lamede-1a_01_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	LAMEDE-1a_1 à 16	LMNE2	Axe NE navigation NOK	2015-09-07T074414	160	2688
lamede-1a_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2	Axe NE navigation NOK	2015-09-07T074414	256	1343
lamede-1a_02_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	2-17 - 38	LMNE2	OK	2015-09-07T075523	160	3818
lamede-1a_02_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2	OK	2015-09-07T075523	256	1908
lamede-1a_03_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	3-39-53	LMMI1	OK mais mauvaise vitesse initiale	2015-09-07T080620	160	2340
lamede-1a_03_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMMI1	OK mais mauvaise vitesse initiale	2015-09-07T080620	256	1170
lamede-1a_04_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	4-54-70	LMMI2		2015-09-07T081611	160	4089
lamede-1a_04_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMMI2		2015-09-07T081611	256	2044
lamede-1a_05_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	5-71-89	LMMI3		2015-09-07T082707	160	3851
lamede-1a_05_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMMI3		2015-09-07T082707	256	1925
lamede-1a_06_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	6-90-108	LMNE2	OK démarrage un peu tôt	2015-09-07T084017	160	4482
lamede-1a_06_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2	démarrage un peu tôt. Sat sur batime	2015-09-07T084017	256	2241

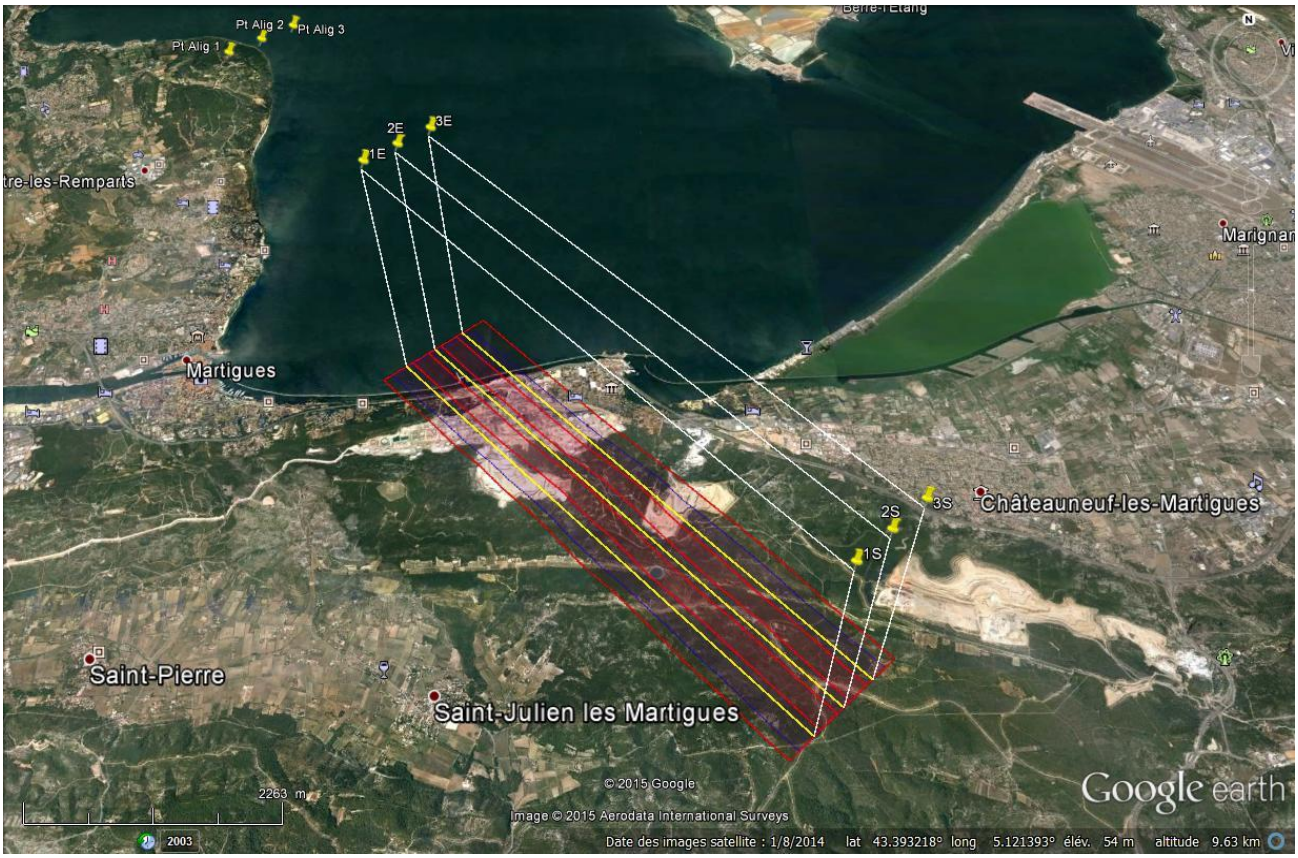


Figure 55 : Lignes de Vol La Mède – Mistral (LMMI)

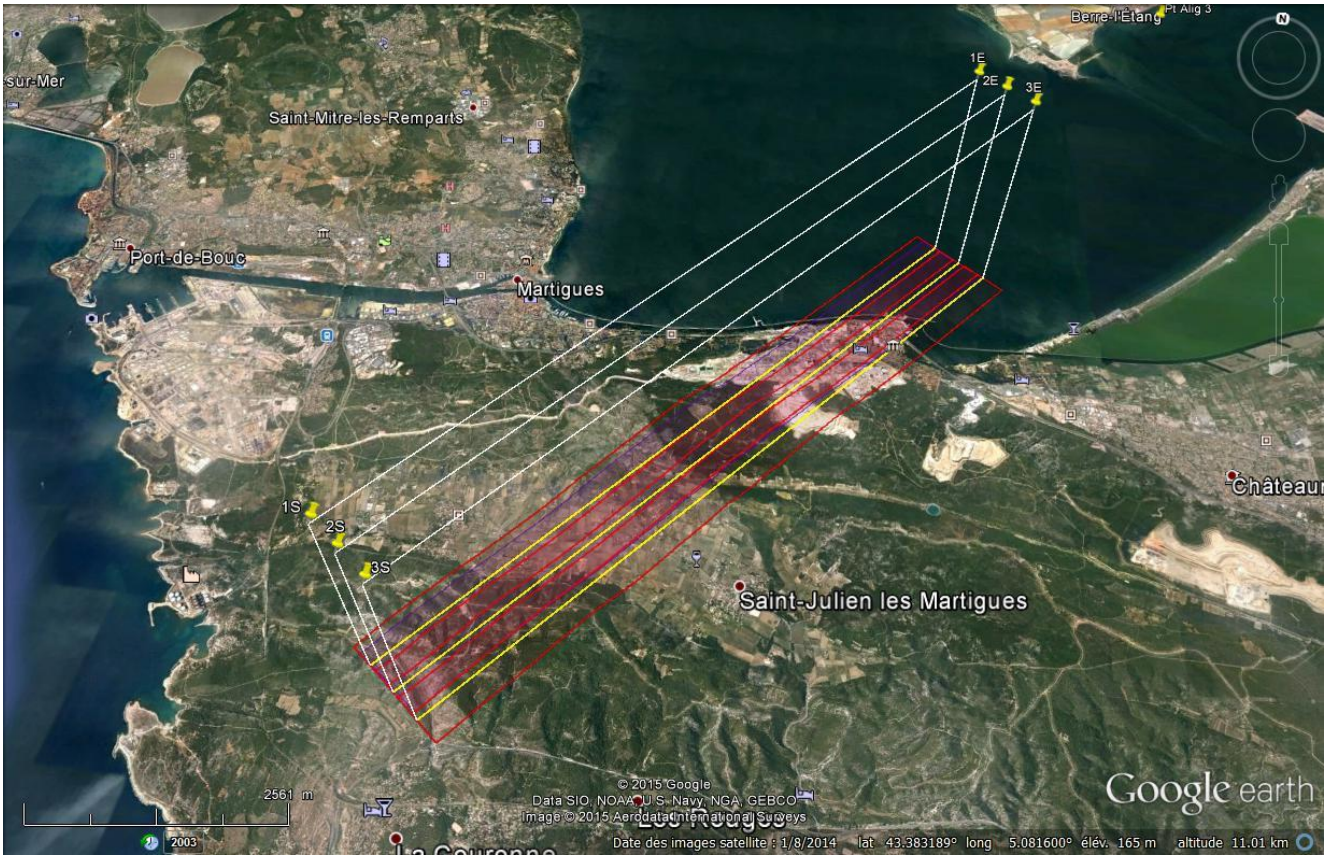


Figure 56 : Lignes de vol La Mède Nord-Est (LMNE). La ligne de vol centrale est prioritaire.

Vol n° 2 du 7/9/2015

Décollage d'Aix-en-Provence pour le deuxième créneau horaire de la journée. Rien à signaler sauf un problème de plantage du PC nécessitant un démarrage d'une nouvelle session en cours de vol. Les lignes de vol sont toujours NE et Mistral.

Tableau 12 : Liste des images acquises

Nom image brute HYPER	PANCHRO	AXE	commentaire image	Date et heure	Nb bandes	Nb ligne
lamede-1b_01_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	Lamede-1b_1 à 18	LMNE2	OK sat sur batiments	2015-09-07T094919	160	4313
lamede-1b_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2	OK sat sur batiments	2015-09-07T094919	256	2156
lamede-1b_02_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	2-19-33	LMMI1	OK sat sur carrière	2015-09-07T095917	160	3117
lamede-1b_02_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMMI1	OK sat sur carrière	2015-09-07T095917	256	1558
lamede-1b_03_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	3-34-45	LMMI2	OK début tardif	2015-09-07T100755	160	2747
lamede-1b_03_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMMI2	OK début tardif	2015-09-07T100755	256	1373
lamede-1c_01_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	5-51-65	LMMI3	OK	2015-09-07T102525	160	3397
lamede-1c_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMMI3	OK	2015-09-07T102525	256	1698
lamede-1c_02_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	6-66-84	LMNE2	OK	2015-09-07T103532	160	4540
lamede-1c_02_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2	OK	2015-09-07T103532	256	2270

Vol n° 3 du 7/9/2015

Acquisition image correcte mais perte des informations de la centrale inertielle malgré plusieurs essais de redémarrage. Les lignes de vol sont toujours NE et Mistral.

Tableau 13 : Liste des images acquises

Nom image brute HYPER	PANCHRO	AXE	commentaire image	Date et heure	Nb bandes	Nb lignes
lamede-1d_01_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	Lamede-1D-1 à 37	LMNE2	IMU OK ?	2015-09-07T122216	160	4710
lamede-1d_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2	IMU OK ?	2015-09-07T122216	256	2355
lamede-1e_01_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	2-38-69	LMMI1		2015-09-07T123015	160	3168
lamede-1e_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMMI1		2015-09-07T123015	256	1584
lamede-1e_02_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	non	LMMI2	CamV2 non démarrée	2015-09-07T123849	160	3406
lamede-1e_02_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMMI2		2015-09-07T123849	256	1703
lamede-1e_03_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	3-70-90	LMMI3		2015-09-07T124656	160	3407
lamede-1e_03_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMMI3		2015-09-07T124656	256	1703
lamede-1e_04_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	4-91-108	LMNE2		2015-09-07T125624	160	4540
lamede-1e_04_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2		2015-09-07T125624	256	2269

Vol n° 4 du 7/9/2015

Dernier vol de la journée du 7 septembre arrêté car la centrale ne redémarre toujours pas.
Sur le trajet du retour un arrêt complet du matériel et un redémarrage permet de retrouver un fonctionnement normal de la centrale. Il semble que cela soit dû à un conflit entre le trackball et la centrale.

Tableau 14 : Liste des images acquises

Nom image brute HYPER	PANCHRO	AXE	commentaire image	Date et heure	Nb bandes	Nb lignes
lamede-1f_01_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	5-109-124	LMMI2	Pb IMU on arrête les acq	2015-09-07T140444	160	3230
lamede-1f_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMMI2	Pb IMU on arrête les acq	2015-09-07T140444	256	1614

Vol n° 5 du 8/9/2015

Décollage de Francazal vers 6h30 TU. Le vol est prévu avec vent d'est changeant au secteur SE. La présence de cirrus dès le début de la journée se renforcera en cours de journée. Les lignes de vol seront donc la ligne centrale NE et les 3 lignes La Mède-EST.
Un conflit de port communication entre le trackball et IMU entraine toujours des problèmes sur le fonctionnement de la centrale. Après plusieurs initialisations la centrale remarche correctement.

Tableau 15 : Liste des images acquises

Nom image brute HYPER	PANCHRO	AXE	commentaire image	Date et heure	Nb bandes	Nb lignes
lamede-2a_01_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	Lamede-2-1 à 21	LMNE2	présence de cirrus (7h45)	2015-09-08T074718	160	4898
lamede-2a_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2		2015-09-08T074718	256	2449
lamede-2a_02_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	2-22-34	LMEST1	OK début tardif	2015-09-08T075510	160	3072
lamede-2a_02_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMEST1	OK début tardif	2015-09-08T075510	256	1536
lamede-2a_03_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	3-35-xx	LMEST2	OK	2015-09-08T080408	160	3980
lamede-2a_03_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMEST2	OK	2015-09-08T080408	256	1990
lamede-2a_04_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	4-xx-68	LMEST3	OK	2015-09-08T081330	160	3945
lamede-2a_04_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMEST3	OK	2015-09-08T081330	256	1972
lamede-2a_05_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	5-69-87	LMNE2	OK	2015-09-08T082131	160	4560
lamede-2a_05_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2	OK	2015-09-08T082131	256	2280

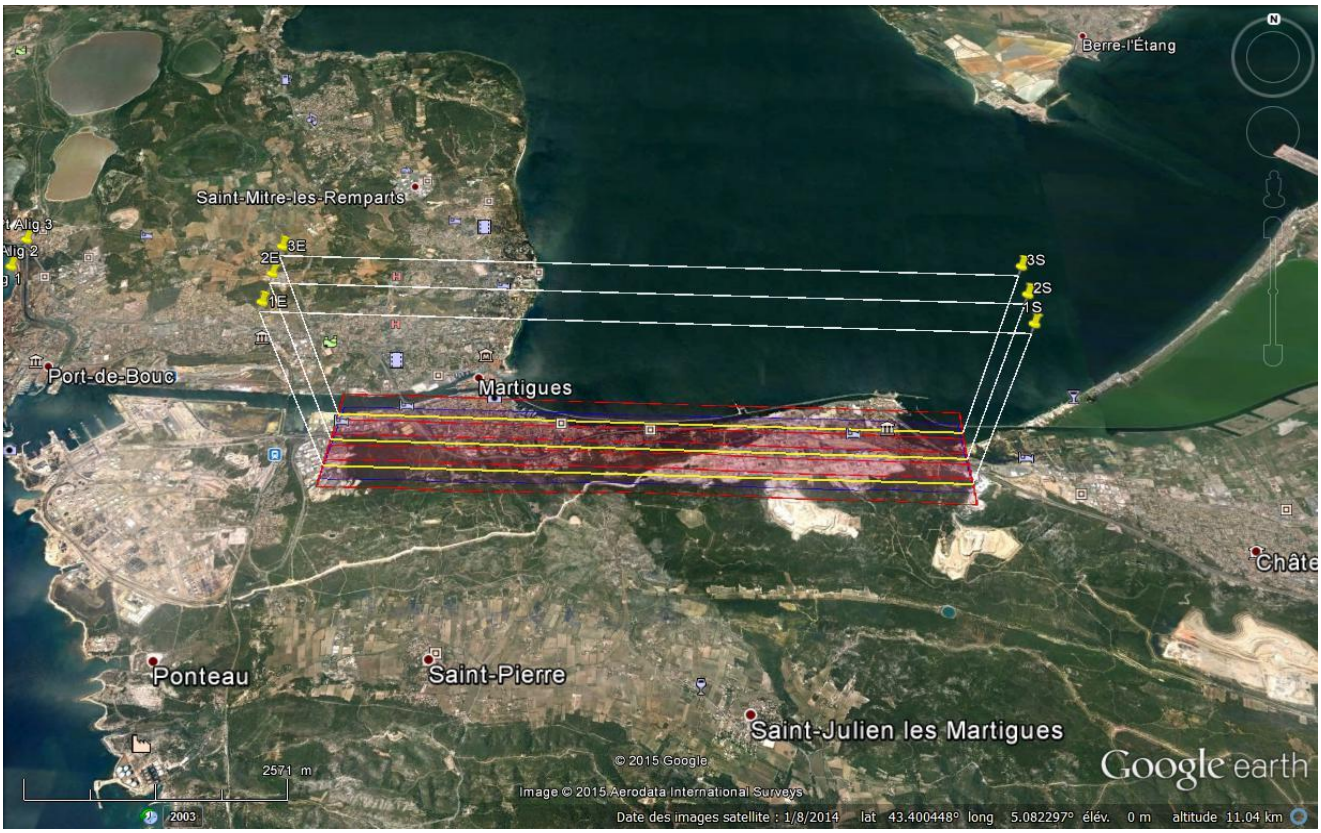


Figure 57 : Lignes de vol La Mède Est (LMEST)

Vol n° 6 du 8/9/2015

Bon fonctionnement de la chaine d'acquisition mais présence d'un voile nuageux. Le vent a tourné en SE, nous suivons donc les lignes La Mède SE.

Tableau 16 : Liste des images acquises

Nom image brute HYPER	PANCHRO	AXE	commentaire image	Date et heure	Nb bandes	Nb lignes
lamede-2c_01_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	11-168-186	LMNE2	OK	2015-09-08T115129	160	4700
lamede-2c_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2	OK	2015-09-08T115129	256	2350
lamede-2c_02_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	12-187-xxx	LMSE1	Ok pb lancement début d'axe	2015-09-08T120107	160	2749
lamede-2c_02_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMSE1	Ok pb lancement début d'axe	2015-09-08T120107	256	1374
lamede-2c_03_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	13-xxx-210	LMSE2	pb perte controle trackball	2015-09-08T120832	160	2456
lamede-2c_03_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMSE2	pb perte controle trackball	2015-09-08T120832	256	1228
lamede-2c_04_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	14-xxx-xxx	LMSE3	OK	2015-09-08T121601	160	3321
lamede-2c_04_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMSE3	OK	2015-09-08T121601	256	1660
lamede-2c_05_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	15-xxx-243	LMNE2	OK	2015-09-08T122315	160	3998
lamede-2c_05_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2	OK	2015-09-08T122315	256	1999

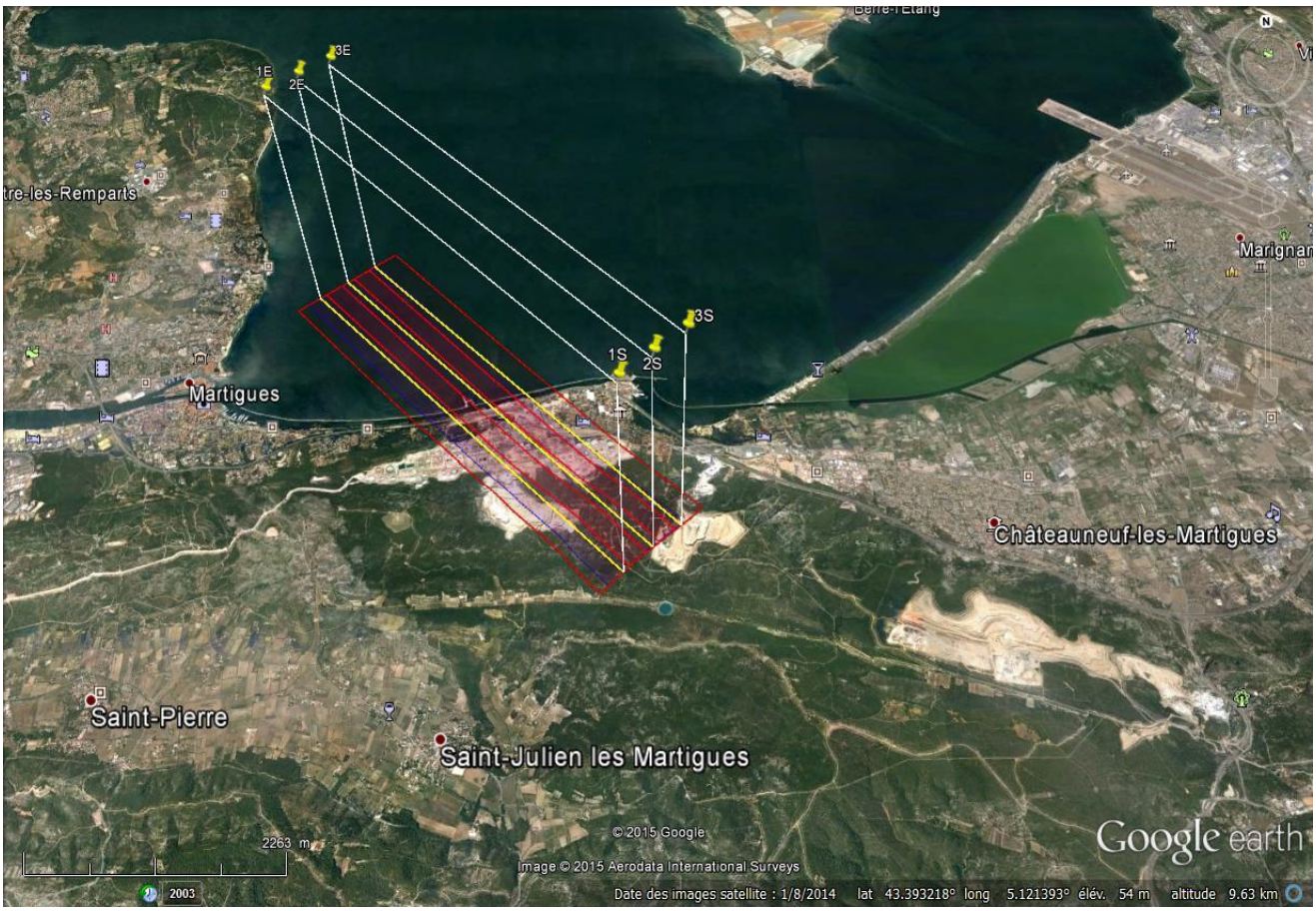


Figure 58 : Lignes de vol La Mède Sud-Est (LMSE)

Vol n° 7 du 8/9/2015

Il y a beaucoup de nuages autour du site et un voile nuageux sur le site. La radiométrie est donc incertaine mais relativement stable.

Tableau 17 : Liste des images acquises

Nom image brute HYPER	PANCHRO	AXE	commentaire image	Date et heure	Nb bandes	Nb lignes
lamede-2b_01_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	6-88-109	LMNE2		2015-09-08T094040	160	4882
lamede-2b_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2	Un peu de saturation	2015-09-08T094040	256	2441
lamede-2b_02_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	7-110-122	LMSE1	nuages plus épais	2015-09-08T094930	160	3214
lamede-2b_02_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMSE1	nuages plus épais	2015-09-08T094930	256	1606
lamede-2b_03_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	8-123-135	LMSE2	voile nuageux	2015-09-08T095811	160	3008
lamede-2b_03_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMSE2	voile nuageux	2015-09-08T095811	256	1503
lamede-2b_04_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	9-136-148	LMSE3	voile nuageux	2015-09-08T100546	160	2957
lamede-2b_04_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMSE3	voile nuageux	2015-09-08T100546	256	1478
lamede-2b_05_VNIR_1600_SN0012_FOVx2_raw.hyspex	10-149-167	LMNE2	voile nuageux	2015-09-08T101655	160	4696
lamede-2b_05_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex		LMNE2	voile nuageux	2015-09-08T101655	256	2348

Exemples d'images obtenues (mosaïque quick look de basse qualité radiométrique et géométrique)



Figure 59 : Mosaïque VNIR et SWIR Lignes de vol EST et NE (quick look)

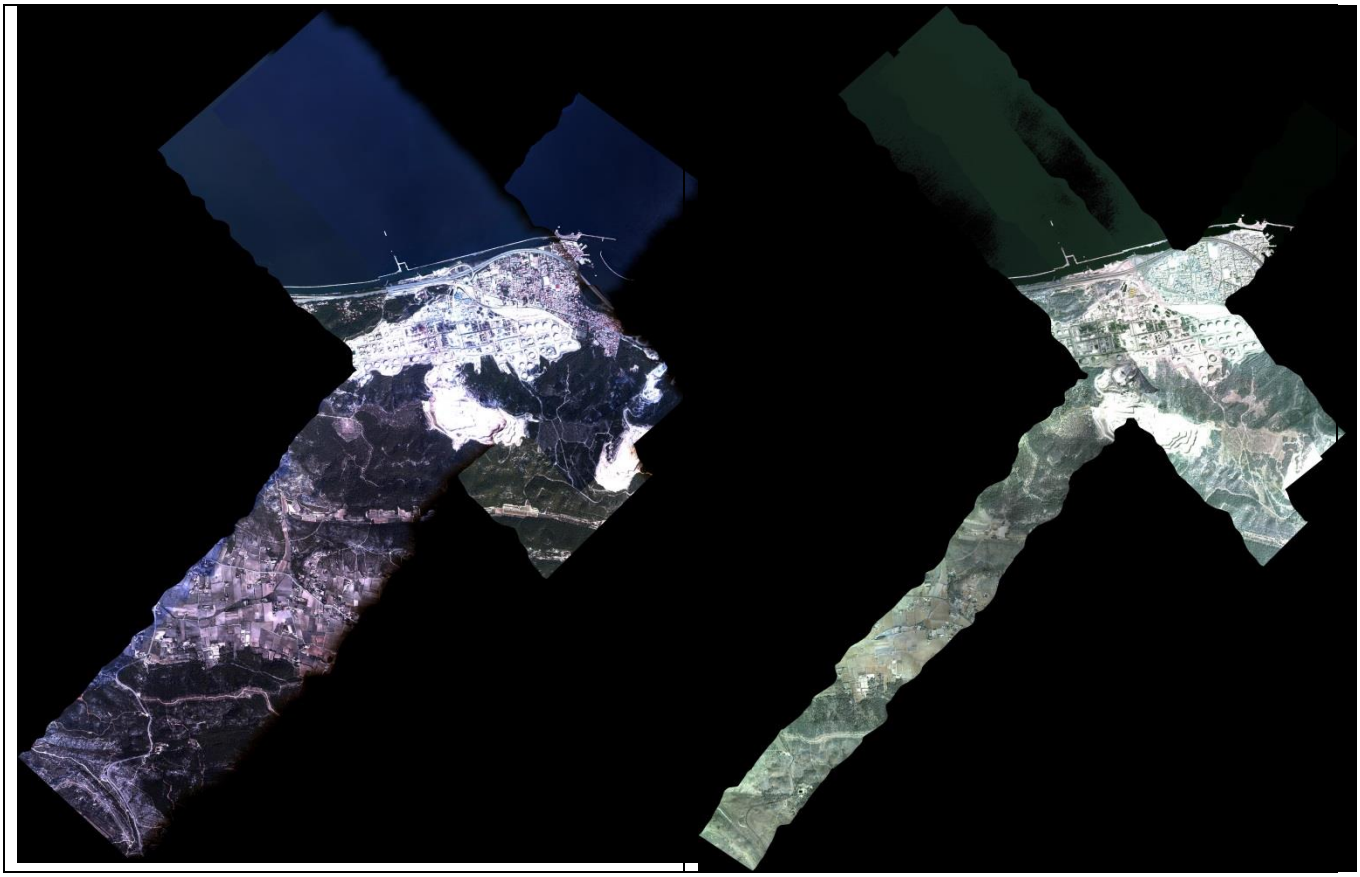


Figure 60 : Mosaïque VNIR et SWIR lignes de vol Mistral et NE (quick look)

Campagne Hiver du 17/2/2016

Le tableau ci-dessous synthétise les acquisitions réalisées lors des deux jours de vol, le premier vol du 11 février n'a pas permis d'avoir d'acquisition exploitable du fait de la présence de nuages bas et épais sous l'avion qui ne se sont pas dissipés. Des données sont disponibles uniquement pour la journée du 17 février.

Tableau 18 : Synthèse des lignes de vols réalisées lors de la campagne de février 2016.

VOL	commentaire général	Nom image brute HYPER	PANCHRO	AXE	commentaire image	Date et heure	Nb bandes	Nb lignes
SAFIRE-TEMMAS2_2016-02								
TEMMAS2-1 11/02/2016	Pixel 1m VNIR et 2m SWIR, V/sol = 90 m/s, Alt = 8800 ft Abandon suite à couverture nuageuse basse altitude	lam160211a_01_VNIR_1600_SN0012_raw.hyspex	lam160211_1	NE2	NOK, pb navigation en fin de bande	2016-02-11T100048	160	8181
		lam160211a_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex	lam160211_1	NE2	NOK, pb navigation en fin de bande	2016-02-11T100048	256	4090
		lam160211a_02_VNIR_1600_SN0012_raw.hyspex	lam160211_2	NE2	NOK nuages bas + cirrus	2016-02-11T102218	160	7393
		lam160211a_02_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex	lam160211_2	NE2	NOK nuages bas + cirrus	2016-02-11T102218	256	3696
TEMMAS2-2 17/02/2016 matin	Pixel 1m VNIR et 2m SWIR, V/sol = 90 m/s, Alt = 8800 ft. Météo OK	lam160217a_01_VNIR_1600_SN0012_raw.hyspex	lam160217_1	NE2	Pas de dérive OK	2016-02-17T101240	160	11422
		lam160217a_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex	lam160217_1	NE2	Pas de dérive OK	2016-02-17T101240	256	5710
		lam160217a_02_VNIR_1600_SN0012_raw.hyspex	2	NO1	OK	2016-02-17T101957	160	6536
		lam160217a_02_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex	2	NO1	OK	2016-02-17T101957	256	3267
		lam160217a_03_VNIR_1600_SN0012_raw.hyspex	3	NO2	OK	2016-02-17T102827	160	6619
		lam160217a_03_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex	3	NO2	OK	2016-02-17T102827	256	3309
		lam160217a_04_VNIR_1600_SN0012_raw.hyspex	4	NO3	OK	2016-02-17T103622	160	6951
		lam160217a_04_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex	4	NO3	OK	2016-02-17T103622	256	3475
TEMMAS2-3 17/02/2016 après-midi	Pixel 1m VNIR et 2m SWIR, V/sol = 90 m/s, Alt = 8800 ft. Météo OK	lam160217b_01_VNIR_1600_SN0012_raw.hyspex	lam160217_5	NE2	OK avec quelques saturations	2016-02-17T122137	160	9468
		lam160217b_01_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex	lam160217_5	NE2	OK avec quelques saturations	2016-02-17T122137	256	4734
		lam160217b_02_VNIR_1600_SN0012_raw.hyspex	6	NO1	OK	2016-02-17T122920	160	6601
		lam160217b_02_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex	6	NO1	OK	2016-02-17T122920	256	3300
		lam160217b_03_VNIR_1600_SN0012_raw.hyspex	7	O1	OK changement de vent	2016-02-17T124123	160	6509
		lam160217b_03_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex	7	O1	OK changement de vent	2016-02-17T124123	256	3254
		lam160217b_04_VNIR_1600_SN0012_raw.hyspex	8	O2	OK	2016-02-17T124853	160	6598
		lam160217b_04_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex	8	O2	OK	2016-02-17T124853	256	3299
		lam160217b_05_VNIR_1600_SN0012_raw.hyspex	9	O3	OK	2016-02-17T125719	160	6363
		lam160217b_05_SWIR_320m_SN3502_raw.hyspex	9	O3	OK	2016-02-17T125719	256	3181

2.7.4. **Illustration des panaches observés**

Trois panaches différents ont été observés et étudiés lors des deux campagnes correspondant aux cheminées de la chaudière 11, à la Torchère et à la cheminée FCC.

Les images présentées ci-dessous sont des compositions colorées faisant ressortir le panache éventuel d'aérosol en « jaune ». Il s'agit juste d'un mode de visualisation qualitatif, les panaches étant peu denses, leur visualisation qualitative n'est pas toujours évidente en particulier lorsque le fond est clair et très structuré. Les illustrations ont été réalisées sur les images non corrigées géométriquement.

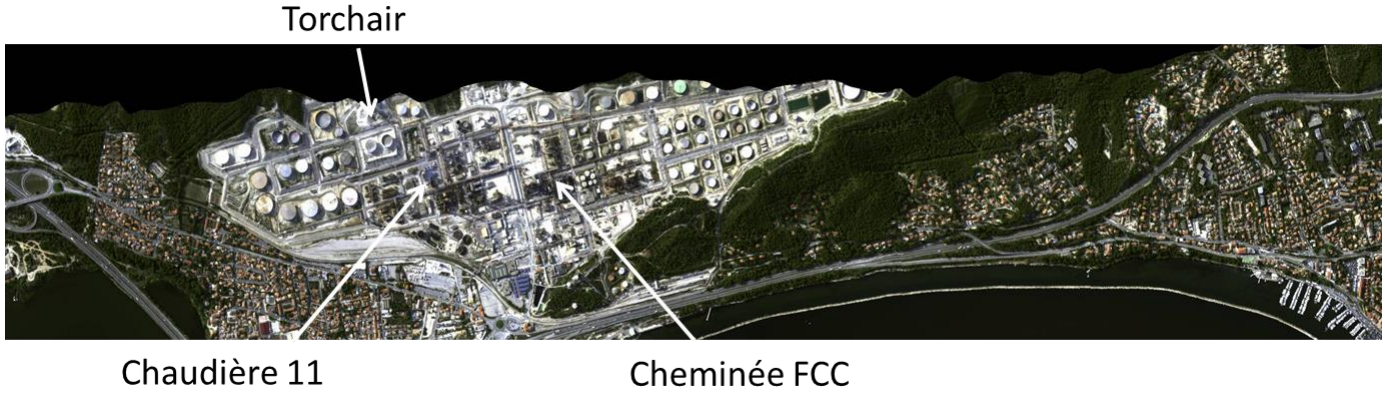


Figure 61 : Image de la raffinerie de Provence et localisation des cheminées d'intérêt

Chaudière 11

Le panache de la Chaudière 11 a pu être observé lors des deux campagnes. Nous représentons sur les figures ci-dessous l'évolution temporelle des observations réalisées. Il s'agit d'un panache dont le débit semble assez homogène qui est plus facilement observable pour des vents faibles de NNO lorsque le panache passe sur le toit homogène situé au sud de la cheminée.

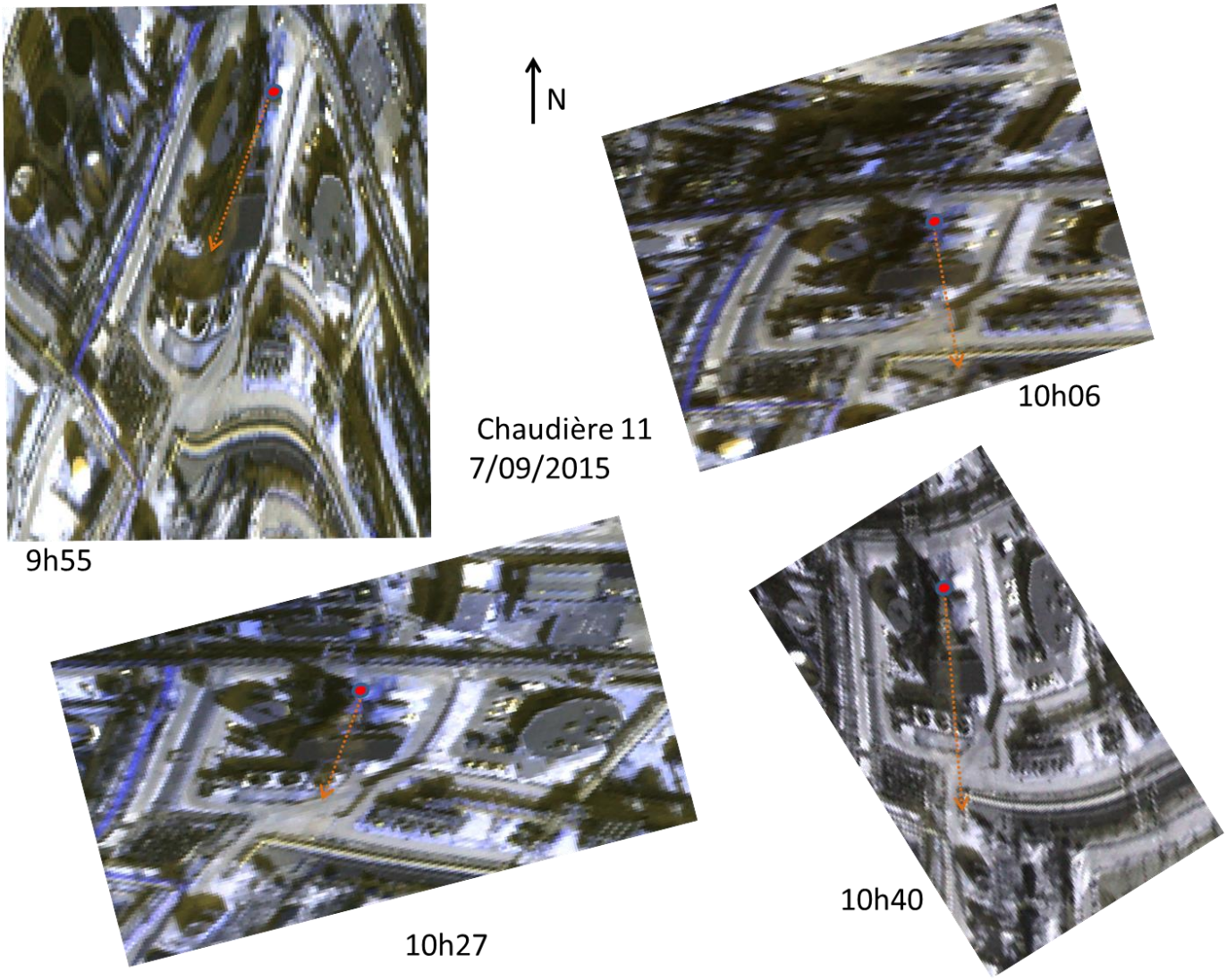


Figure 62 : Visualisation des panaches en composition colorées de la cheminée 11 (point rouge entouré de bleu). Les axes de propagation des panaches sont représentés en pointillés jaune.

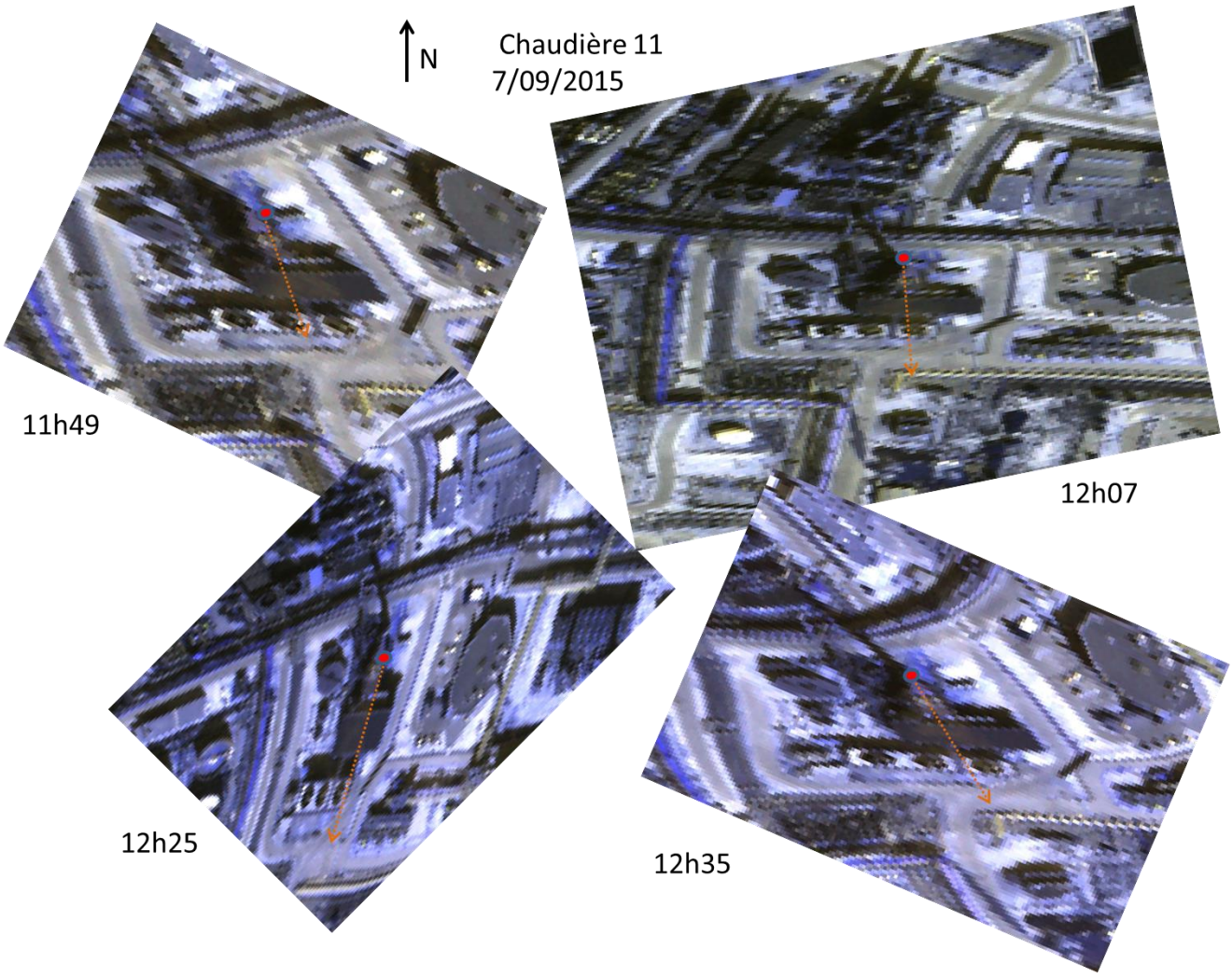


Figure 63 : Visualisation des panaches en composition colorées de la cheminée 11 (point rouge entouré de bleu). Les axes de propagation des panaches sont représentés en pointillés jaune.

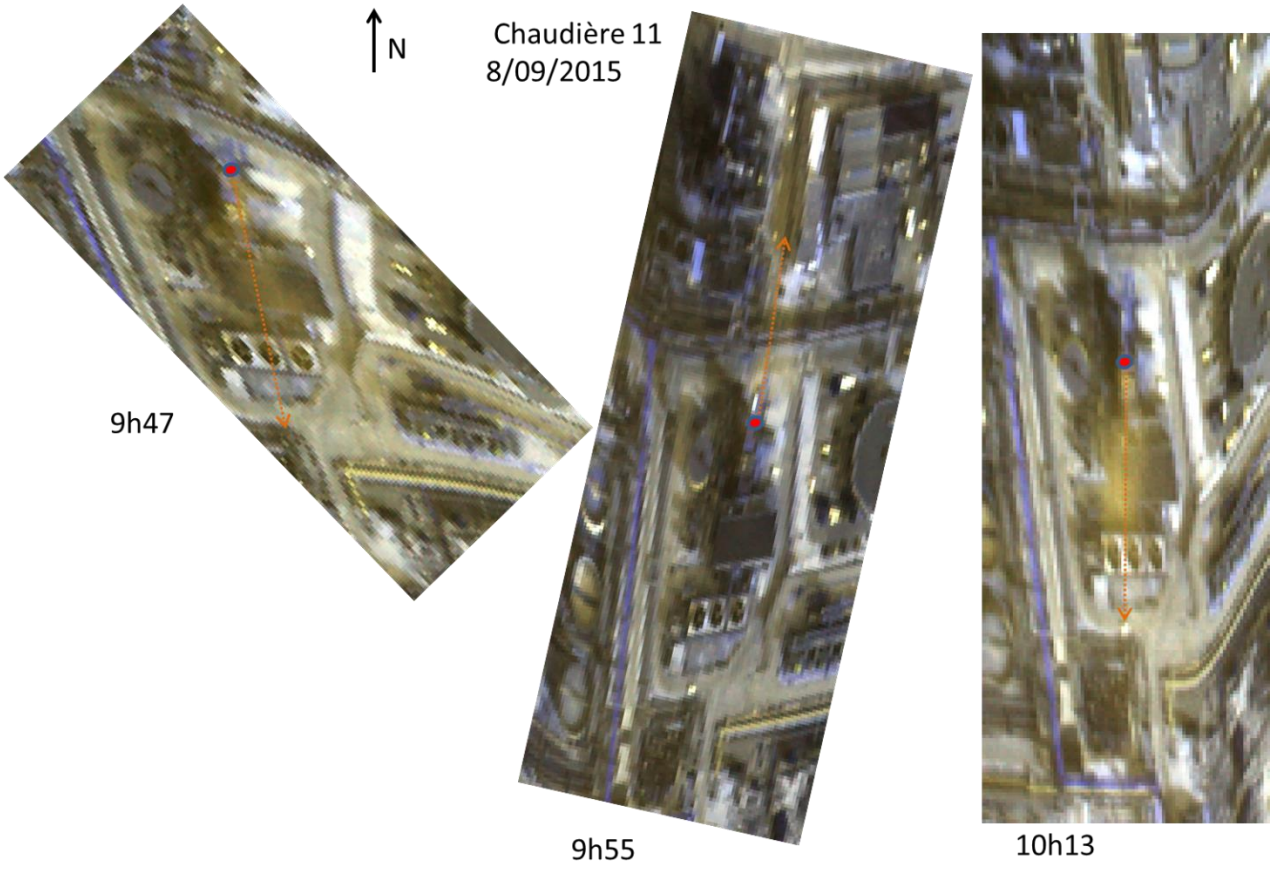


Figure 64 : Visualisation des panaches en composition colorées de la cheminée 11 (point rouge entouré de bleu). Les axes de propagation des panaches sont représentés en pointillés jaune.

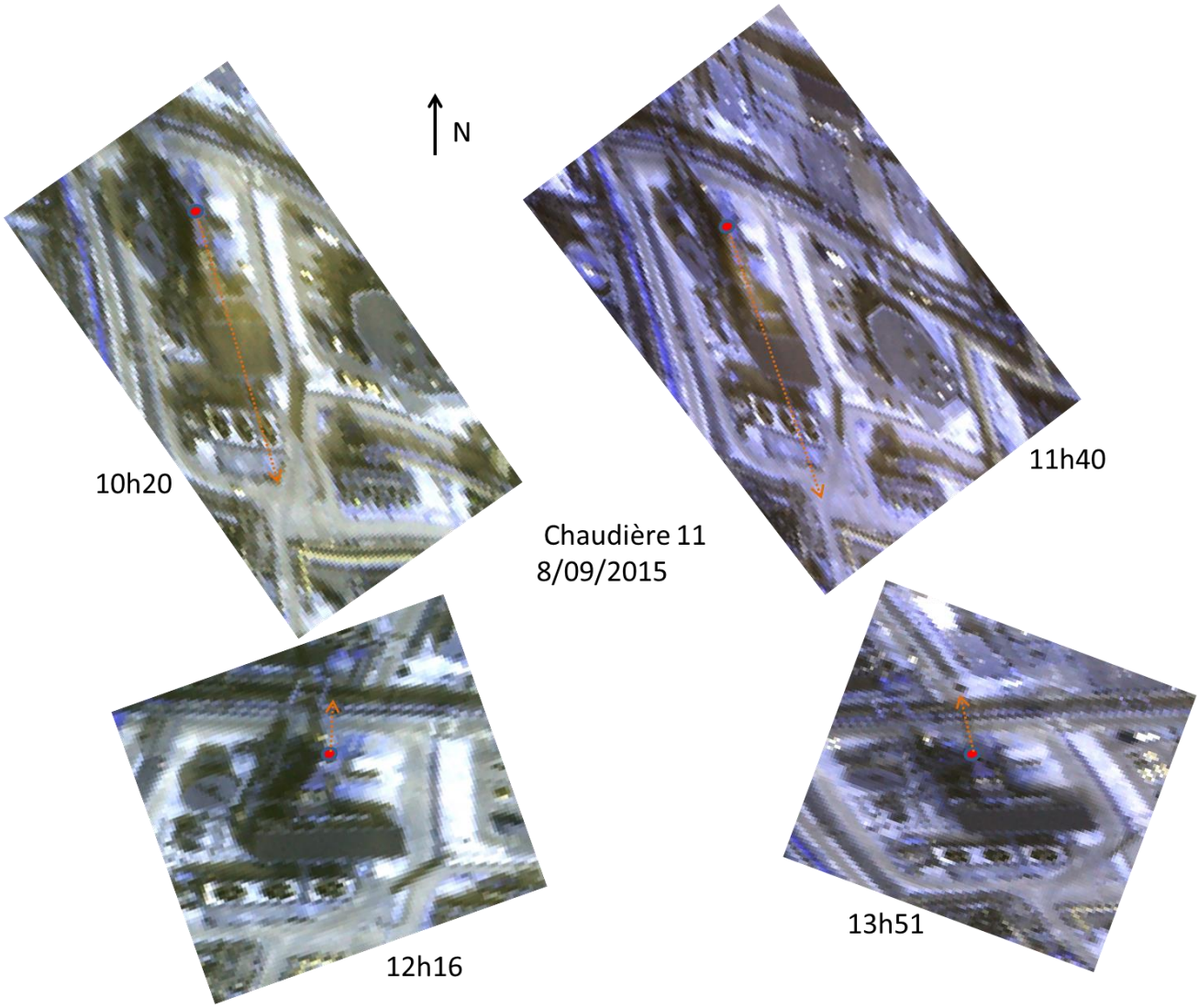


Figure 65 : Visualisation des panaches en composition colorées de la cheminée 11 (point rouge entouré de bleu). Les axes de propagation des panaches sont représentés en pointillés jaune.

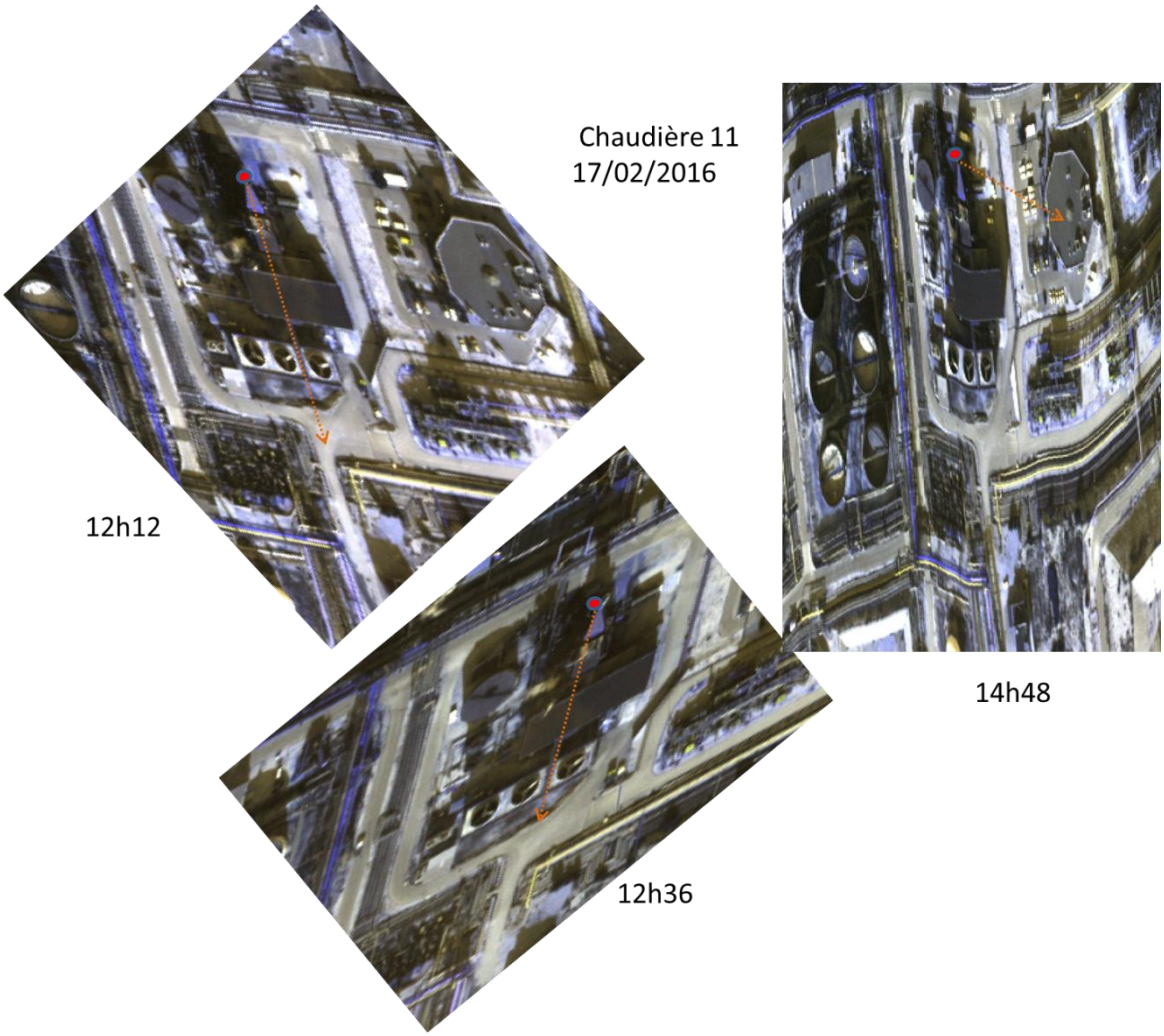


Figure 66 : Visualisation des panaches en composition colorées de la cheminée 11 (point rouge entouré de bleu). Les axes de propagation des panaches sont représentés en pointillés jaune.

Différentiel spectral

La signature spectrale observée pour le panache de la cheminée 11 peut être identifiée en utilisant la zone de toit sombre au sud du panache qui est assez homogène. La signature caractéristique mesurée est illustrée ci-dessous. Cette signature est alors comparée à une base de données de signatures d'aérosols permettant d'identifier le type d'aérosol correspondant à cette signature. Nous obtenons que le mélange d'aérosol associé correspond à un mélange entre des aérosols diffusants de type sulfate de distribution granulométrique centrée autour de 50-100 nm avec des particules de suies fines (mode également autour de 50nm). La proportion de sulfate/suie retrouvée est de 90/10.

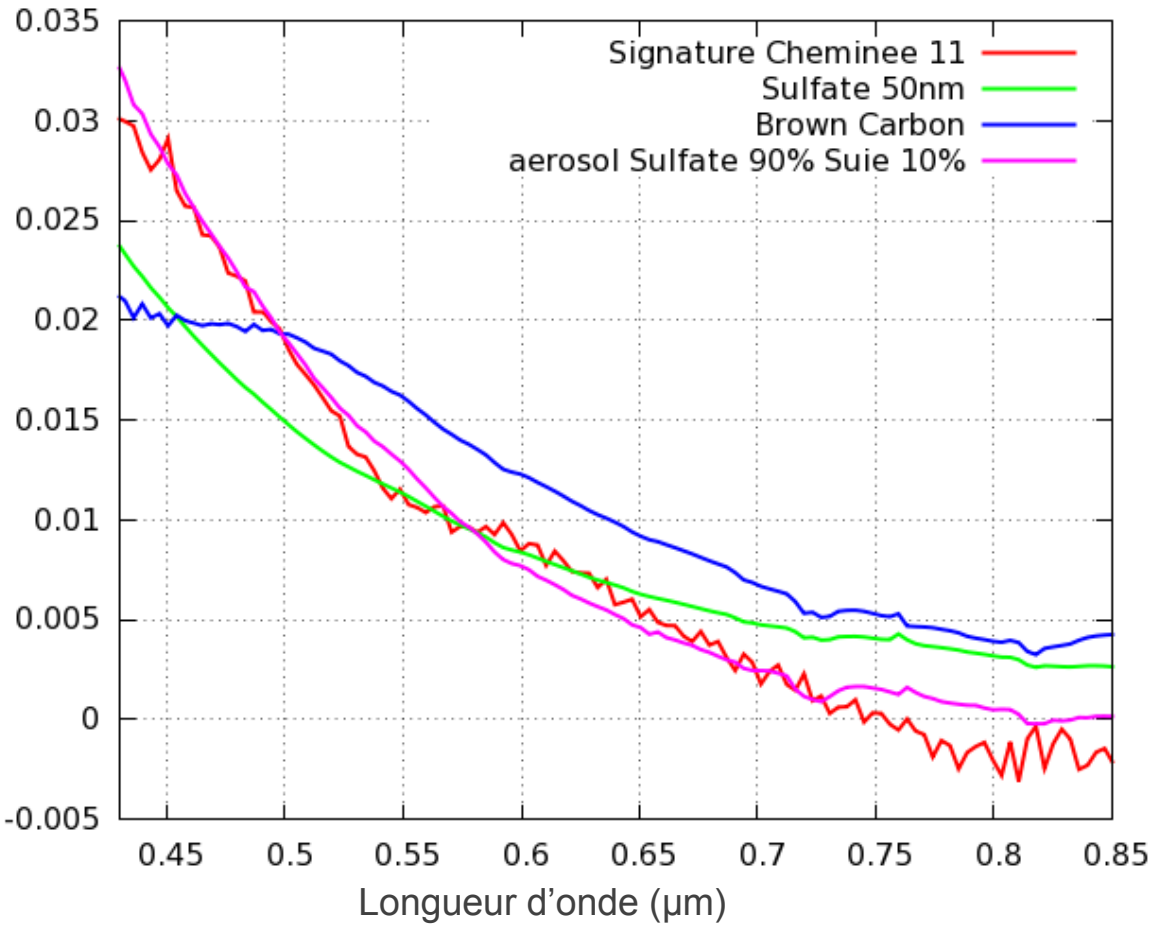


Figure 67 : Signature spectrale observée pour le panache de la cheminée 11. La courbe en rouge correspond à la signature mesurée à partir des observations hyperspectrales aéroportées et les courbes verte, bleue, et violette correspondent aux calculs théoriques de signatures attendues pour respectivement un panache composé exclusivement de particules fines de sulfate, pour un panache fin de particules de type « Brown Carbon » et pour un panache composé à 90% de sulfates fin (mode 50 nm) et de 10% de Carbone Suie (Black Carbon mode 50 nm).

Conclusion

Le panache de la chaudière 11 est très fin optiquement et il est assez difficile de le localiser sur les images hyperspectrales néanmoins nous pouvons l'observer sur une distance comprise entre 20m et 100m depuis la cheminée en fonction des conditions de vent. Lors de la campagne d'été pour la journée du 7/09/2015 le panache suit le vent et a une direction SSE tout au long des mesures. Lors de la journée du 8/09/2015 nous observons une bascule entre SSO et N au cours de la matinée, cette bascule s'installe progressivement entre 10h et 12h et s'établie durablement à partir 12h. Durant la campagne d'hiver la force du vent étant plus importante le panache est encore moins visible et il suit une direction comprise entre SSE et E.

En utilisant ces observations nous avons pu isoler la signature du panache sur le toit situé au Sud de la cheminée de la chaudière 11. Cette signature a une forme spectrale très stable en fonction des jours de mesure et correspond à un mode d'aérosol principalement diffusant (de type sulfate) dont le mode principal de la distribution en taille est compris est de l'ordre de 50nm. Il apparait aussi clairement sur sa signature qu'il contient une proportion de l'ordre de 10% de fines particules de Carbone suies (Black Carbon) dont le taille moyenne est également de 50nm.

Cas de la Torchère

Le panache observé provenant de la Torchère a un comportement beaucoup moins régulier, comme nous l'illustrons sur les figures ci-dessous. Lors de certains vols nous observons des « bouffées » du panache à plusieurs centaines de mètre en aval de la Torchère alors qu'à certains moments aucun panache n'est observable.

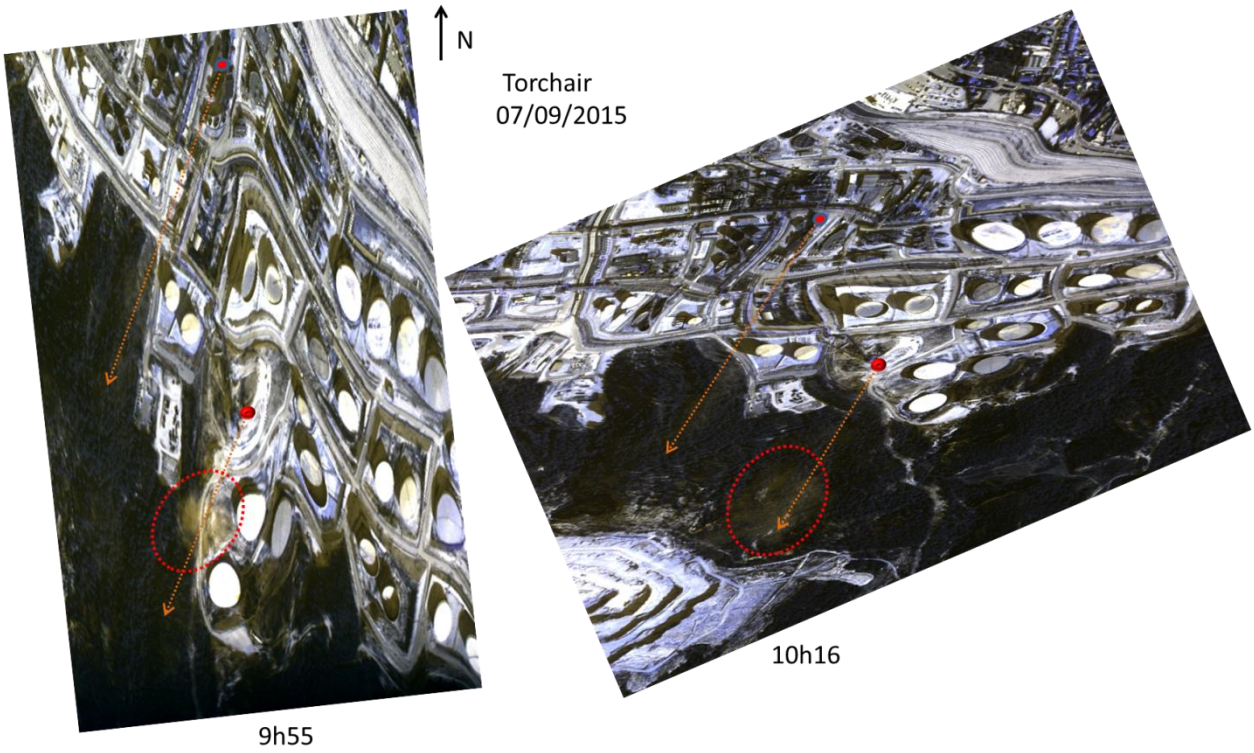


Figure 68 : Visualisation des panaches en composition colorées de la Torchère (Point rouge) et de la cheminée 11 (point rouge entouré de bleu). Les axes de propagation des panaches sont représentés en pointillés jaune. La zone entourée de pointillés rouge correspond à la présence d'un panache marqué pour la Torchère.

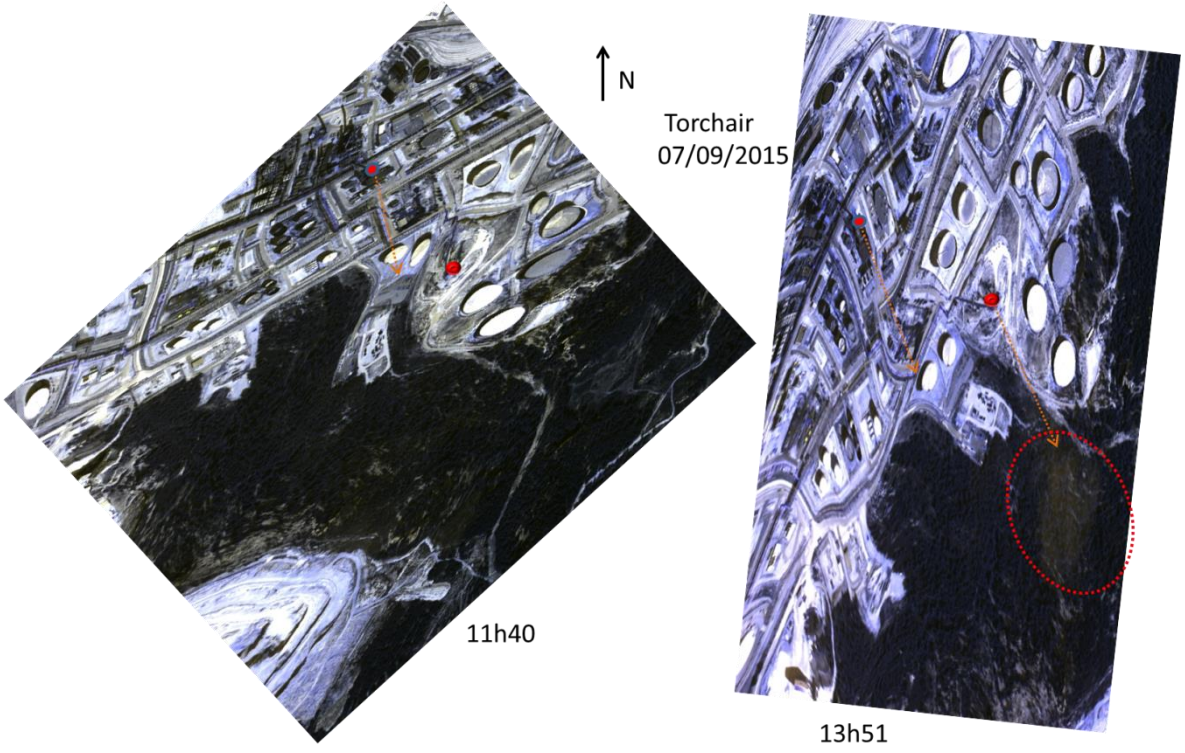


Figure 69 : Visualisation des panaches en composition colorées de la Torchère (Point rouge) et de la cheminée 11 (point rouge entouré de bleu). Les axes de propagation des panaches sont représentés en pointillés jaune. La zone entourée de pointillés rouge correspond à la présence d'un panache marqué pour la Torchère.

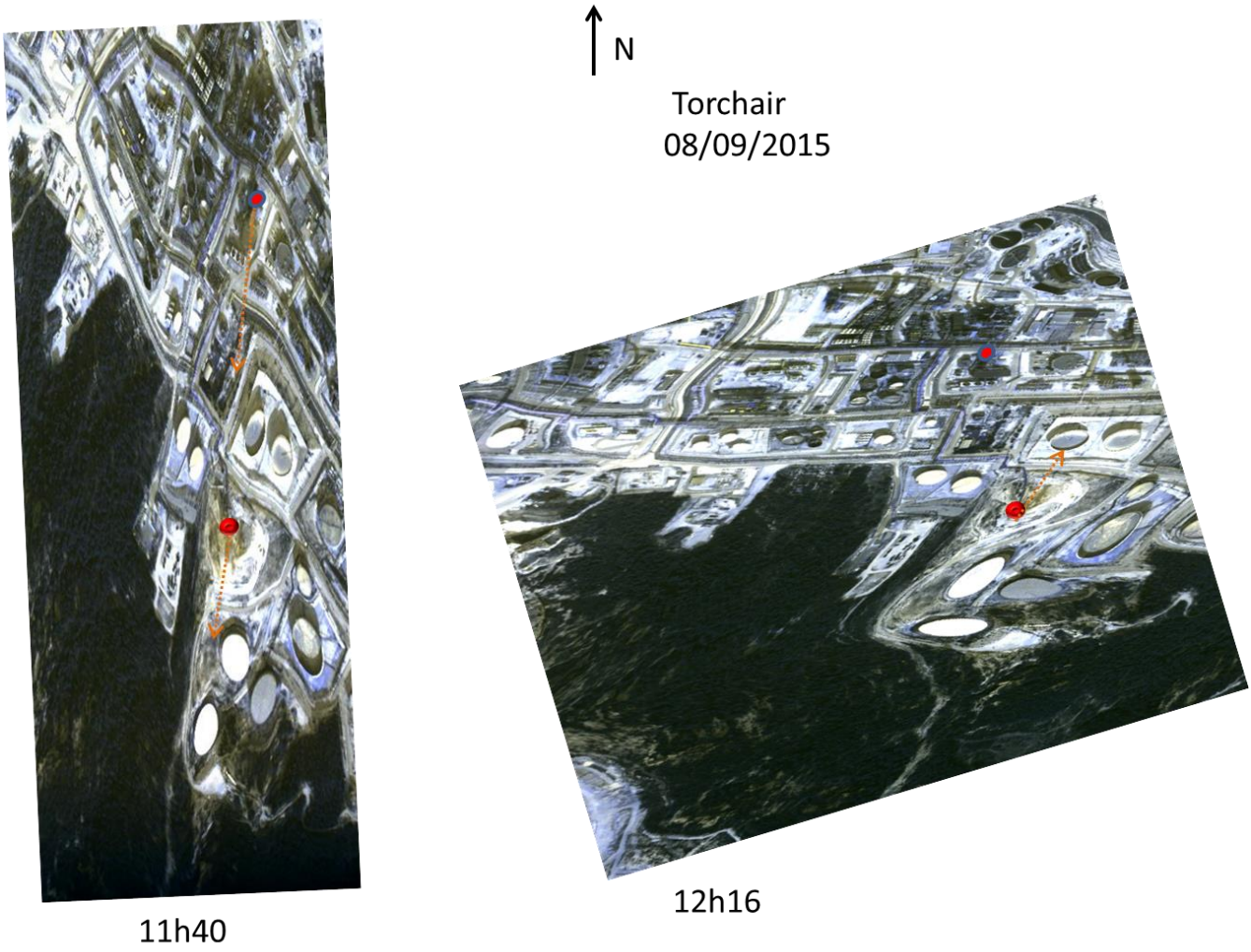


Figure 70 : Visualisation des panaches en composition colorées de la Torchère (Point rouge) et de la cheminée 11 (point rouge entouré de bleu). Les axes de propagation des panaches sont représentés en pointillés jaune. La zone entourée de pointillés rouge correspond à la présence d'un panache marqué pour la Torchère.

Différentiel spectral observé

La signature spectrale observée pour le panache de la Torchère est assez variable et est plus difficilement identifiable. La signature caractéristique obtenue est illustrée ci-dessous. Cette signature est alors comparée à une base de données de signatures d'aérosols permettant d'identifier le type d'aérosol correspondant à cette signature. Nous obtenons que le mélange d'aérosol associé correspond à un mélange entre des aérosols diffusants de type sulfate de distribution granulométrique centrée autour de 50-100 nm avec des particules de suies fines (mode également autour de 50nm). La proportion de sulfate/suie retrouvée est de 90/10. Cette conclusion est à prendre avec précaution, une étude un peu plus approfondie de la variabilité des signatures de la Torchère semble nécessaire.

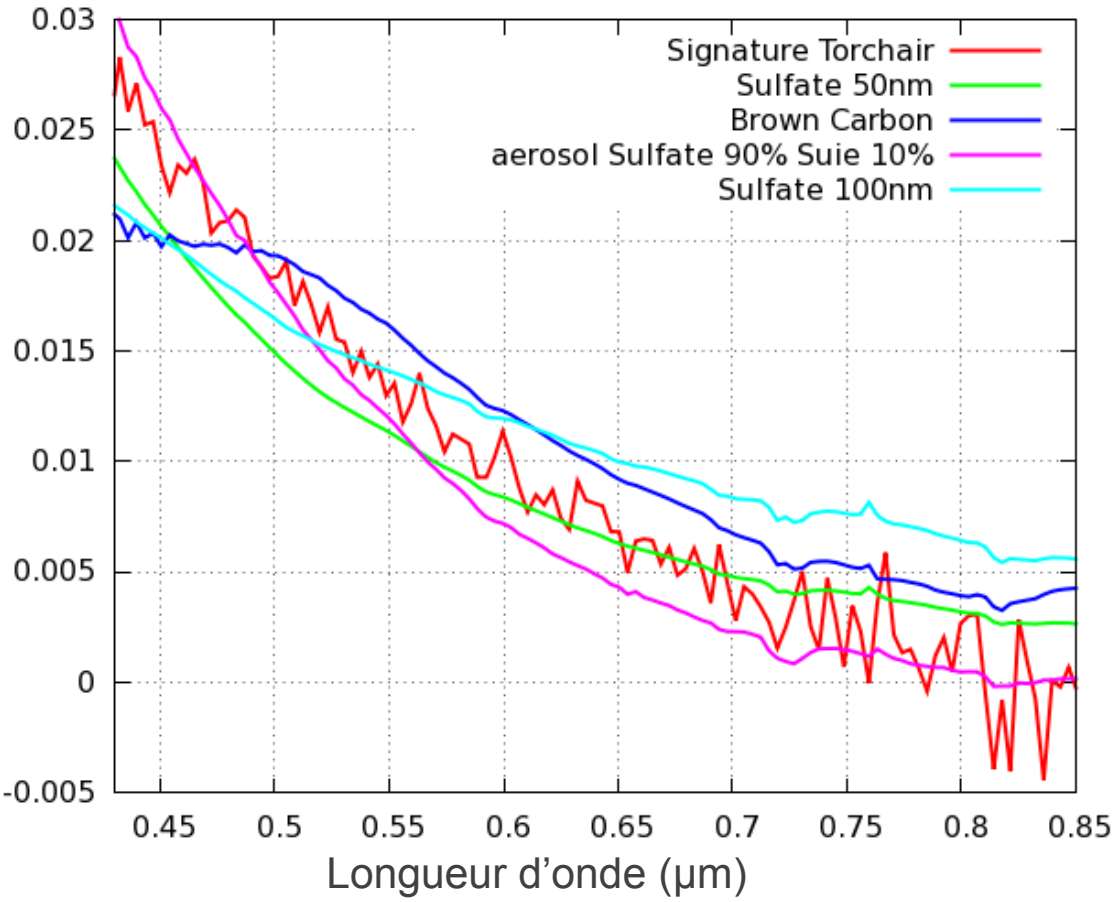


Figure 71 : Signature spectrale observée pour le panache de la Torchère. La courbe en rouge correspond à la signature mesurée à partir des observations hyperspectrales aéroportées et les courbes verte, bleue, violette et turquoise correspondent aux calculs théoriques de signatures attendues pour respectivement un panache composé exclusivement de particules fines de sulfate (50nm), pour un panache fin de particules de type « Brown Carbon », pour un panache composé à 90% de sulfates fin (mode 50 nm) et de 10% de suies (mode 50 nm) et pour un panache composé exclusivement de particules fines de sulfate (mode 100nm)

Cas de la cheminée FCC

Le panache de la cheminée FCC n'a pas pu être observé lors de la campagne d'été car l'installation était à l'arrêt. Durant la campagne hivernale nous avons pu malgré les vents très marqués observé le panache dans un périmètre limité comme nous l'illustrons sur les figures suivantes.

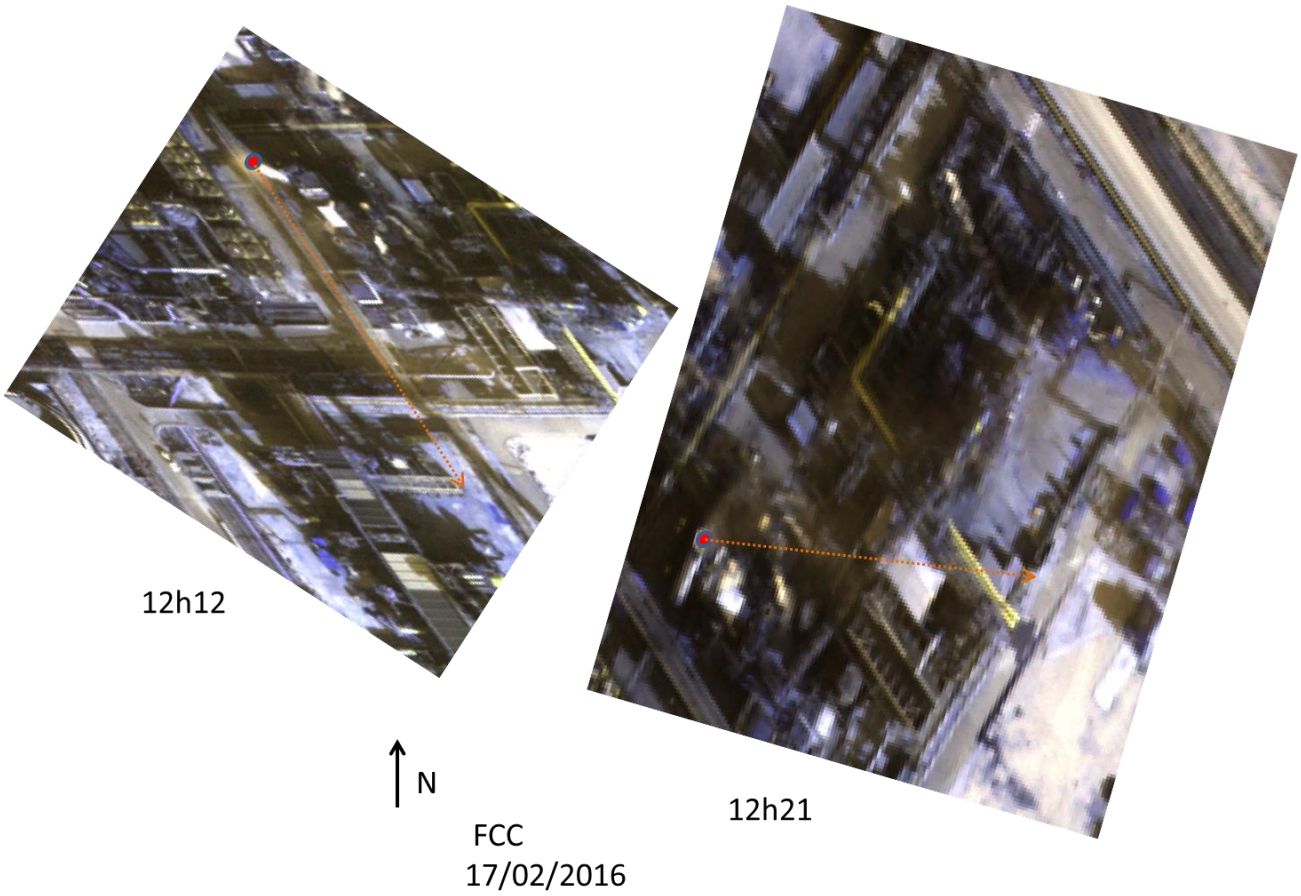


Figure 72 : Visualisation des panaches en composition colorées de la cheminée FCC (point rouge entouré de bleu). Les axes de propagation des panaches sont représentés en pointillés jaune.

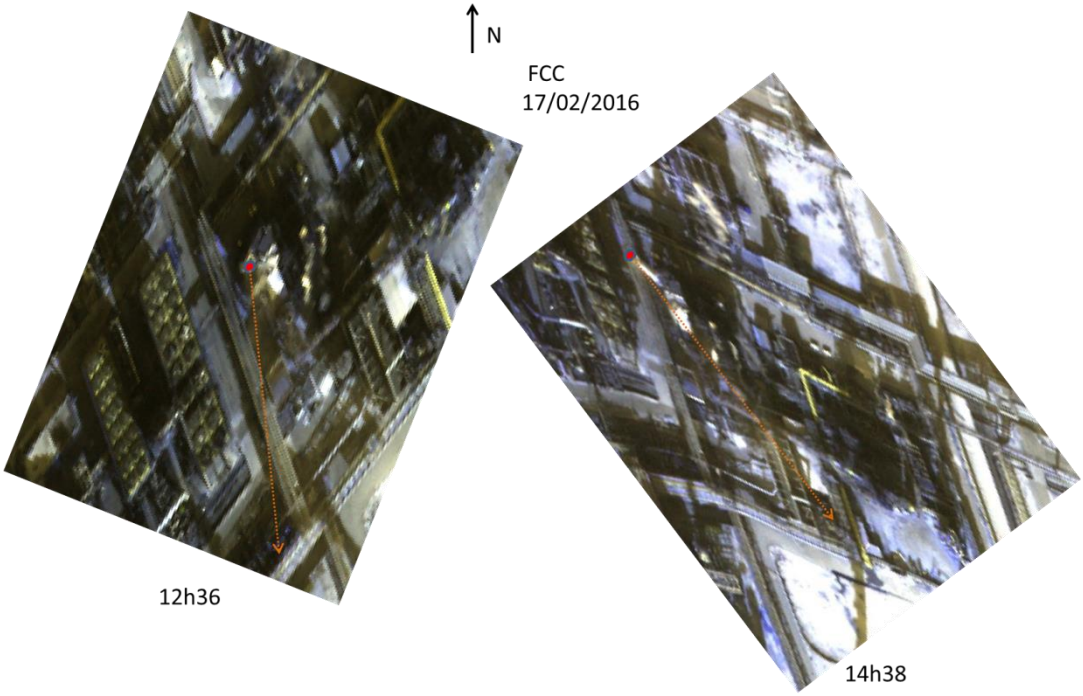


Figure 73 : Visualisation des panaches en composition colorées de la cheminée FCC (point rouge entouré de bleu). Les axes de propagation des panaches sont représentés en pointillés jaune.

Différentiel spectral

Il est assez difficile de localiser précisément le panache de la FCC et donc d'en tirer des signatures caractéristiques. Néanmoins nous présentons ci-dessous différentes signatures mesurées associé aux signatures correspondant au type d'aérosol le plus proche. Nous obtenons toujours un mode granulométrique très fin entre 50 et 100nm et une proportion de suie entre 10 et 20% selon les signatures.

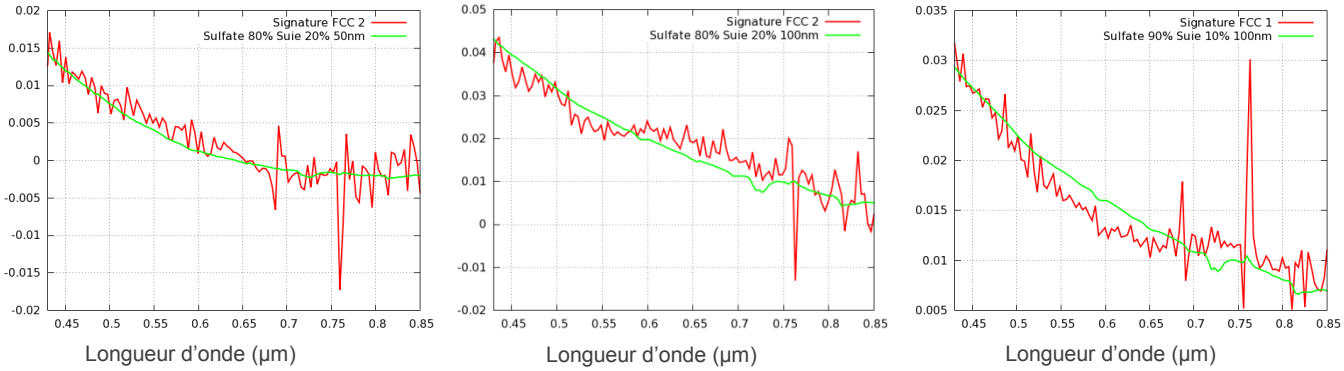


Figure 74 : Signature spectrale observée pour le panache de la cheminée 11. La courbe en rouge correspond à la signature mesurée à partir des observations hyperspectrales aéroportées et les courbes verte correspondent aux calculs théoriques de signatures attendues pour respectivement ,de gauche à droite, un panache composé à 80% de sulfates fin (mode 50 nm) et de 20% de suies (mode 50 nm), un panache composé à 80% de sulfates fin (mode 100 nm) et de 20% de suies (mode 100 nm) et un panache composé à 90% de sulfates fin (mode 100 nm) et de 10% de suies (mode 100 nm)

Conclusion

Le panache de la FCC est difficilement observable lors de la campagne hivernale du fait des vents marqués qui diluent le panache rapidement et du fond très structuré sous le panache. Néanmoins nous observons à la sortie de la cheminée ce panache sur plusieurs dizaines de mètres dans une direction entre Sud et Ouest en fonction de la direction du vent. Sa signature spectrale n'est pas facilement observable mais reste assez proche de celle mesurée pour la cheminée 11 avec néanmoins une proportion de suie qui semble être plus importante. Il s'agit néanmoins principalement de particules diffusantes (Sulfate et/ou organique). La distribution granulométrique obtenue reste de très petite taille avec un mode principal autour de 100nm.

2.7.5. **Analyse différentielle temporelle : emprise des panaches observables et estimation des débits**

Estimation de la distribution spatiale des panaches

Du fait de la grande dilution des panaches nous avons opté pour analyse différentielle pour analyser quantitativement la distribution spatiale des panaches de la cheminée 11 en s'appuyant sur la bascule de vent du 8 Septembre 2015.

La méthodologie a consisté à co-registrer entre-elles les données géoréférencées provenant des caméras hyperspectrales sur un pas au sol de 2m. Nous avons pu ensuite étudier la variation temporelle de réflectance spectral e au sol que nous avons quantitativement associée à une quantité d'aérosol. Cette méthode permet de s'affranchir dans une certaine mesure de la grande hétérogénéité du sol pour l'analyse quantitative mais introduit des bruits supplémentaires : effets d'ombre non constant entre les images, effets variables des nuages et des cirrus en particulier.

Les figures ci-dessous illustrent les étapes de la méthodologie mise en place.

Etape 1 : Construction d'une image différentielle

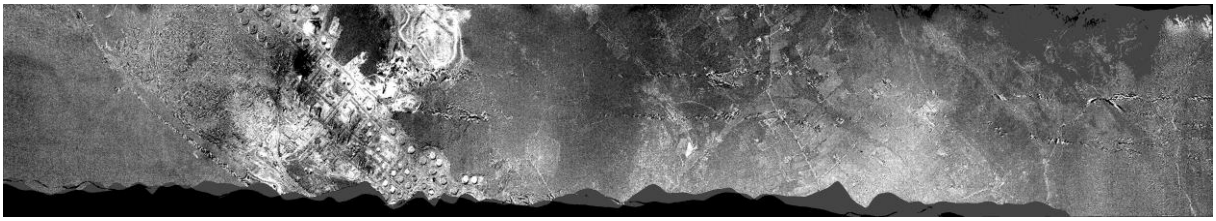


Figure 75 : Carte différentielle à 450nm

Etape 2 : Soustraction des effets de « fond »

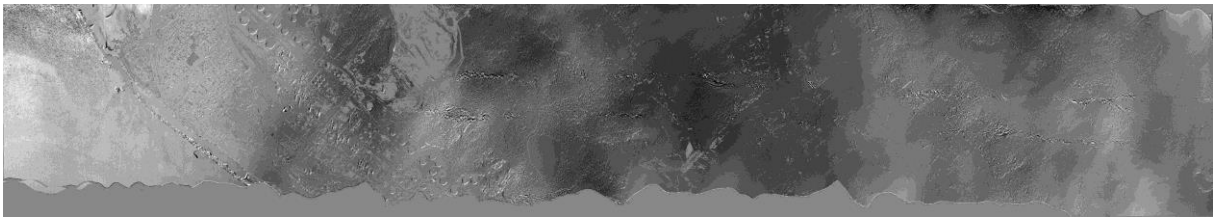


Figure 76 : Carte de variation du « fond » : impact des nuages et cirrus.

Etape 3 : Analyse quantitative des panaches

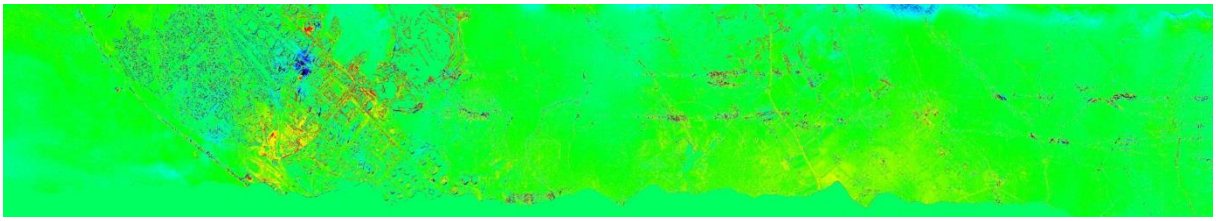
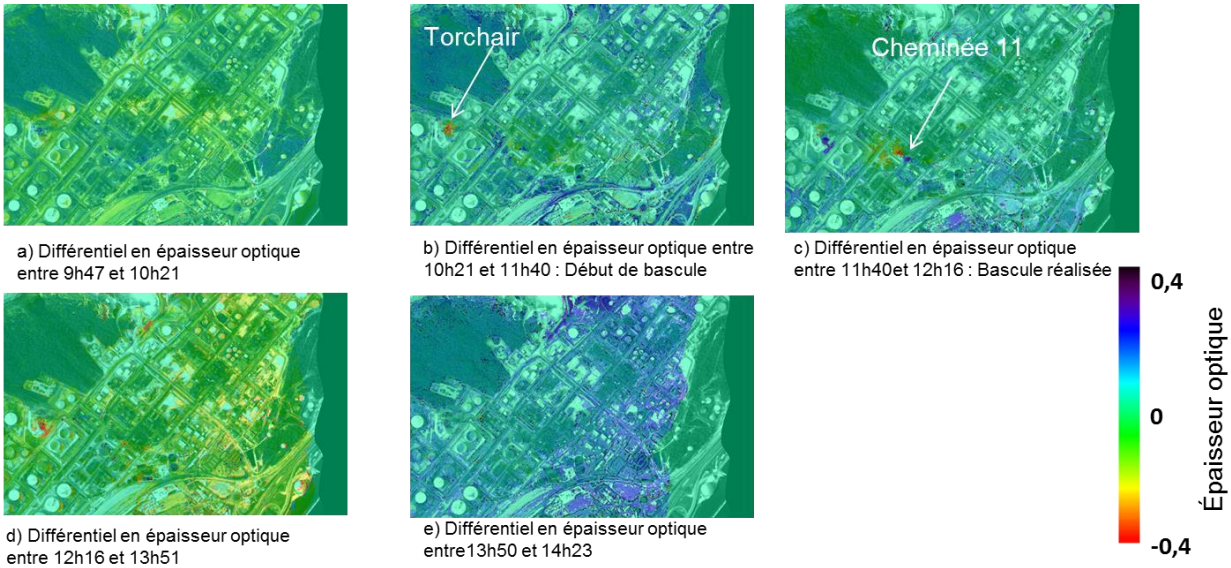


Figure 77 : Carte en épaisseur optique différentielle : les zones bleues correspondent au panache ayant « disparu » et les zones rouge aux panaches ayant fait leur apparition du au changement de direction du vent.

Les résultats en épaisseur optique correspondent au produit de l'épaisseur du panache par l'extinction moyenne des aérosols sur cette épaisseur. Classiquement si on considère une épaisseur de panache de 20m, pour une épaisseur optique estimée de 0.2 cela correspond à une extinction moyenne de 0.01 pour les aérosols au sein du panache.

Pour le modèle d'aérosol estimé dans la partie précédente, une extinction de 0.01 correspond à une concentration massique l'ordre de 1mg/m^3. Une étude plus approfondie des incertitudes de ce bilan en masse est néanmoins à réaliser pour conforter le passage entre épaisseur optique et concentration massique.
Ainsi les échelles en épaisseur optique entre 0 et 0.4 présentées dans les figures suivantes peuvent être lues en concentration moyenne pour une échelle de l'ordre 0 à 4mg/m^3 dans l'hypothèse d'un panache homogène sur une épaisseur verticale de 20m.

Nous présentons ci-dessous
Figure 78 un exemple d'évolution temporelle des panaches observés lors de la journée du 8/09/2016. Lors des variations de direction du vent apparaissent au niveau des cheminées 11 et de la Torchère les signatures des panaches. Nous détectons de façon claire la variation en aérosol autour de la cheminée 11 : apparition d'un panache dans la direction aval du vent et disparition du panache dans la partie amont En effet, la
Figure 79 montre au moment de la bascule entre brise d'étang et brise de mer la forme et l'intensité du panache précédent la bascule (gauche) et celui apparu après la bascule (droite). Sur la
Figure 80 nous illustrons le même phénomène en indiquant les axes utilisés pour l'étude quantitative du panache et le signe des variations des épaisseurs optique a été restitué.



a) Différentiel en épaisseur optique entre 9h47 et 10h21
b) Différentiel en épaisseur optique entre 10h21 et 11h40 : Début de bascule
c) Différentiel en épaisseur optique entre 11h40et 12h16 : Bascule réalisée
d) Différentiel en épaisseur optique entre 12h16 et 13h51
e) Différentiel en épaisseur optique entre13h50 et 14h23

Figure 78 : Evolution temporelle de l'épaisseur optique lors de la matinée du 8/09/2016

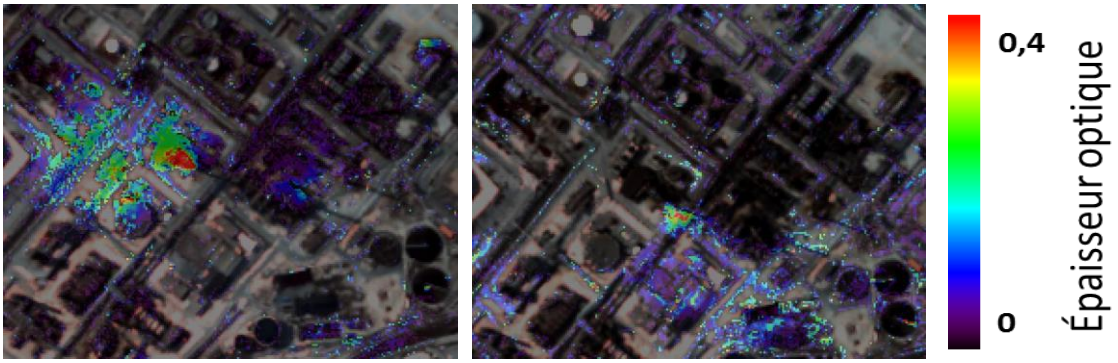


Figure 79 : Zoom sur la bascule de vent de 12h au dessus de la cheminée 11. Les épaisseurs optiques ont été exprimées en valeurs absolue et nous avons séparé le panache ayant disparu (gauche) et celui étant apparu (droite) du faite d'un changement radical du sens du vent et de son intensité.

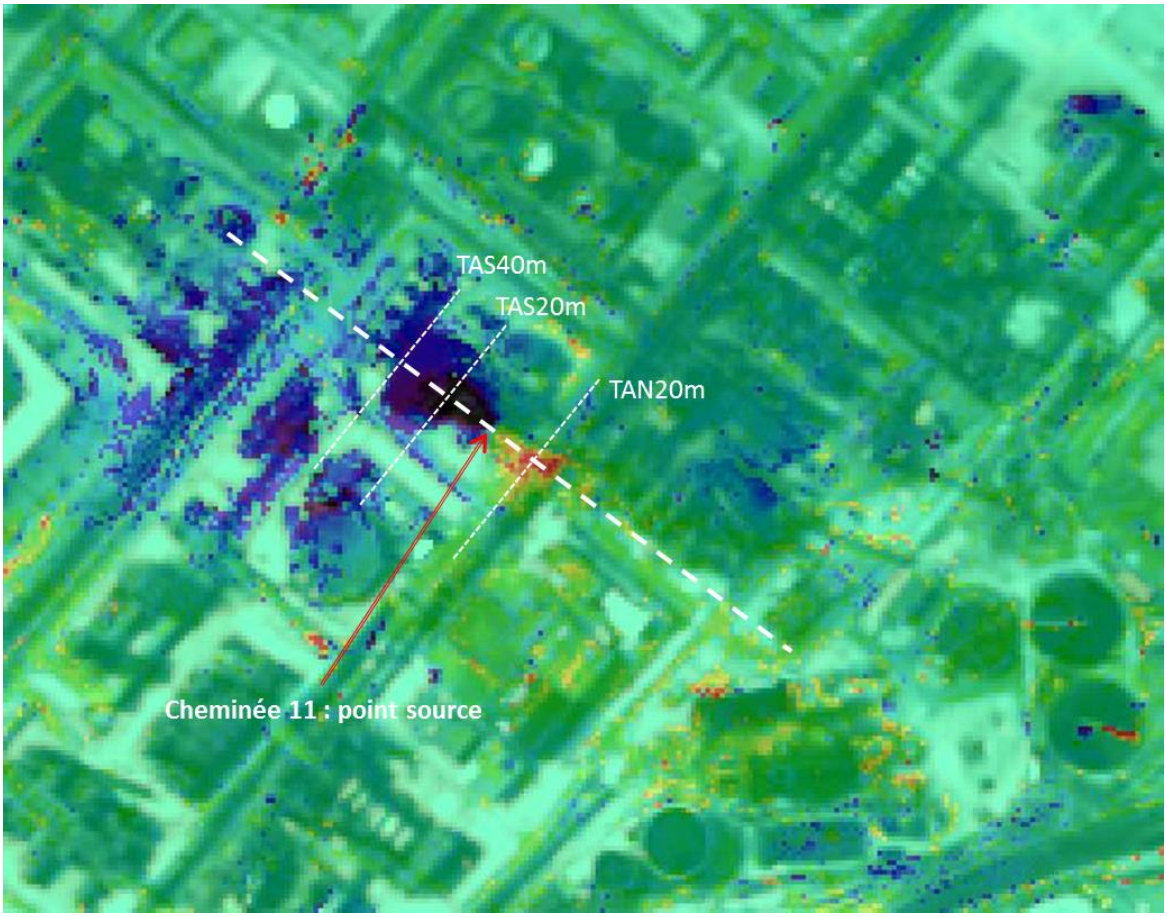


Figure 80 : Complément de la figure précédente en conservant le signe de la variation en épaisseur optique autour de la cheminée 11 indiquant les axes utilisés pour l'étude quantitative : Pointillés gras blanc : axe longitudinal de la bascule de vent, Pointillés blanc fins : axe transverse Sud à 20m de la source (TAS20m), axe transverse Sud à 40m de la source (TAS40m) et axe transverse Nord à 20m de la source (TAN20m).

Nous représentons ensuite sur les figures suivantes l'évolution spatiale de l'épaisseur optique dans le sens de l'écoulement et dans les axes transverses à l'écoulement. Si on peut observer dans ce cas des influences du panache sur une distance de l'ordre de 50-60m vers le Sud, au bout de 30-40m vers le Nord l'influence du panache est mélangé avec le bruit de mesure.

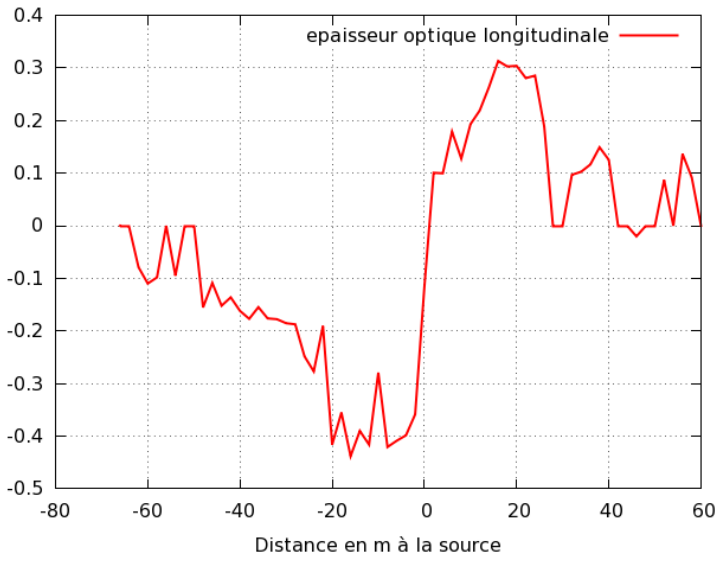


Figure 81 : Evolution de l'épaisseur optique sur l'axe longitudinal.

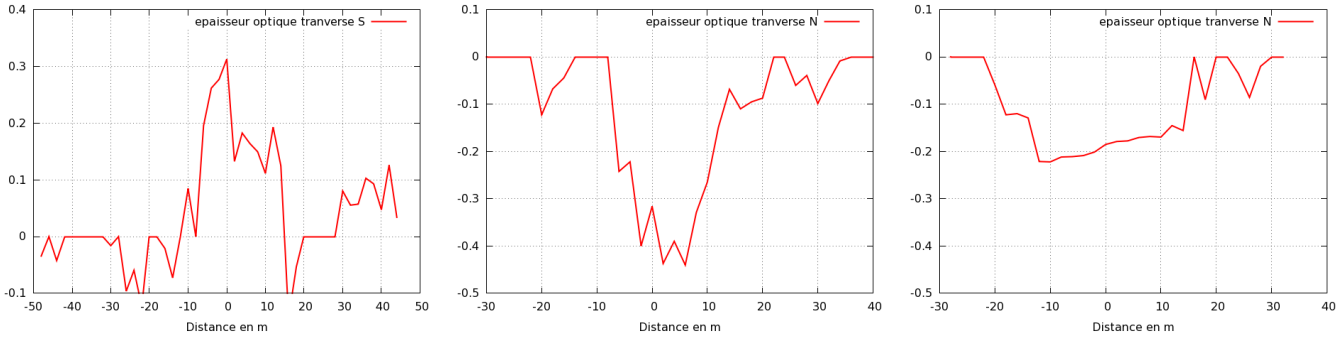


Figure 82 : Evolution de l'épaisseur optique sur les axes transverses (de gauche à droite) : TAN20m, TAS20m et TAS40m

Estimation du débit.

Nous avons dans un second temps essayé de mettre en place une procédure d'estimation des débits de particules sur la base des mesures précédentes. Pour cela pour chaque axe transverse TAS20m, TAS40m et TAN20m nous estimons la masse d'aérosol qui multipliée par la vitesse du vent permet de fournir une indication du débit.

Les mesures de vent réalisées réalisées sur le site STNA sur la station météo du LCE indiquent qu'avant la bascule le vent de Nord a une vitesse estimée de 1.5m/s et qu'après la bascule le vent de Sud forcit pour s'établir à une vitesse de 4m/s.

Section TAS20m : A 20 m de la source au Sud, le volume d'une tranche de panache est estimé à 400m3 (hauteur de 20m et largeur moyenne de 20m) pour une épaisseur optique moyenne de 0.2 (soit 1 mg/m^3).
Le débit estimé est alors de 0.6 g/s de particules.

Section TAS40m : A 40 m de la source au Sud, le volume d'une tranche de panache est estimé à 700m3 (hauteur de 20m et largeur moyenne de 35m) pour une épaisseur optique moyenne de 0.1 (soit 0.5 mg/m^3).
Le débit estimé est alors de 0.56 g/s de particules.

Débit après la bascule : Vent de Sud estimé à 4m/s

Section TAN20m : A 20 m de la source au Nord, le volume d'une tranche de panache est estimé à 300m3 (hauteur de 20m et largeur moyenne de 15m) pour une épaisseur optique moyenne de 0.12 (soit 0.6 mg/m^3).
Le débit estimé est alors de 0.72 g/s de particules.

Il faut noter la grande incertitude sur ces valeurs de débits, un bilan d'erreur doit être mené pour estimer la pertinence de ces résultats. Néanmoins ces valeurs permettent d'estimer un débit moyen de l'ordre de 50kg/j, ce qui est cohérent s avec le débit journalier de 40kg/j obtenu suite aux mesures ce jour-là sur la cheminée de la chaudière 11.

Concernant le cheminée FCC12 lors de la campagne hiver nous n'avons pas pu appliquer de méthode multi-temporelle du fait du faible nombre d'acquisition, néanmoins le panache a été caractérisé image par image sur différents points et les épaisseurs optiques obtenues sont du même ordre de grandeur que pour la cheminée 11 à une distance de 20m de la source, le vent étant de l'ordre de 3-4m/s (en comparaison à 1.5m/s pour l'analyse faite sur la cheminée 11), on peut estimer que le débit de la FCC est de l'ordre de 100kg/j.

Ces estimations de débits ne concernent que les particules fines PM1 qui sont analysables spectralement par l'instrument Hyspex. Si pour la cheminée 11, il ne semble pas y avoir de grosses particules émises en masse, dans le cas de la FCC12 il semble qu'il y a une présence de particule de diamètres plus importants, la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** semble en effet montrer un impact des aérosols non nuls pour des longueurs d'ondes supérieures à 850nm. Le manque de données pour la campagne hivernale n'a pas permis de prolonger l'analyse après 850nm.

2.7.6. **Conclusions**

Les panaches étudiés ici sont des panaches correspondant à des faibles épaisseurs optiques et sont difficilement détectables de façon automatique en imagerie hyperspectrale aéroportée. Néanmoins par analyse multi-temporelles des acquisitions aéroportées, l'empreinte des panaches avant dispersion dans le fond a pu être mise en évidence pour la cheminée 11. L'analyse spectrale de ces aérosols a permis d'estimer la composition du panache en sortie de cheminée et une estimation de l'ordre de grandeur du débit en s'appuyant sur les données de champs de vent. Les résultats obtenus pour la cheminée 11 indiquent une granulométrie sur un mode très fin (50nm) avec pour principal composé des aérosols sulfaté (90%) et en minorité de la suie (10%). L'analyse des panaches de la FCC 12 a permis d'obtenir des résultats de caractérisation assez proche avec une granulométrie comprise entre 50 et 100nm et une teneur en suie comprise entre 10 et 20%. Ces éléments sont en cohérence avec les mesures au sol on-line réalisés sur le site STNA.
L'analyse quantitative sur le panache identifié de la cheminée 11 a permis d'estimer un débit autour de 50kg/j ce qui est cohérent avec les mesures in-situ réalisées. Pour le FCC le panache n'a pu être quantifié de façon homogène, mais à partir de l'analyse de différents points et par analogie avec la mesure de la cheminée 11 nous estimons que le débit est plus important d'un facteur de l'ordre de 2.

3. TRAVAUX DE MODELISATION

Cette section présente la mise en œuvre d'outils de modélisation dans le cadre du projet TEMMAS.

Dans une première partie, les résultats de différents modèles Chimie transports Polyphemus Plume-in-Grid (« PinG ») et CHIMERE sont présentés :

- Tous sont alimentés par l'inventaire d'émissions kilométrique élaboré par AirPACA, les émissions de la raffinerie fournies par TOTAL LQA et des simulations météorologiques du modèle WRF.
- Les résultats de simulations du modèle Polyphemus Plume-in-Grid (« PinG ») de la raffinerie de la Mède sont présentés et comparés aux mesures réalisées lors des deux campagnes du projet TEMMAS. Ces simulations mettent en œuvre une approche dite de « panache sous-maille » (ou « PinG » pour « Plume-in-Grid »). Les résultats sont évalués à l'échelle régionale par comparaison aux mesures des stations du réseau de surveillance de la qualité de l'air de l'AASQA AirPACA. Les performances du modèle pour la représentation des particules (« PM »), à la fois en masse, composition chimique et nombre, sont ensuite évaluées plus localement sur la base des deux campagnes de mesures TEMMAS.

Dans une seconde partie, un modèle de dispersion est utilisé pour reproduire les trajectoires des panaches de chaque émissaire du site avec une résolution très fine. Cette approche permet d'avoir :

- une représentation précise du relief escarpé autour de la raffinerie.
- le comportement initial des panaches tels que visualisés par la caméra embarqué.

3.1. Modèle CTM Polyphemus PinG

3.1.1. Description des simulations

Les simulations sont conduites sur 4 domaines imbriqués horizontalement, allant de l'Europe (0,27°), à la France (0,09°), au sud de la France (0,03°) et à un domaine final couvrant la région des Bouches-du-Rhône à une résolution de 0,01° (~ 1 km). Les domaines utilisés sont décrits en
Figure 83. Le domaine des Bouches-du-Rhône est centré sur la raffinerie Total de la Mède.
Les modèles de panaches sous-maille représentent les concentrations dans les panaches des sources ponctuelles avec un modèle de panache gaussien ou à bouffées gaussiennes, couplé dynamiquement avec un modèle eulérien pour la représentation des concentrations du fond ambiant. Ce type d'approche a été largement utilisé notamment pour la modélisation de l'ozone (Seigneur et al., 1983 ; Byun et Schere, 2006 ; Karamchandani et al., 2002) et également pour la modélisation des particules (Karamchandani et al., 2006 ; Kim et al., 2014). Cette approche permet une meilleure représentation des panaches à proximité des sources. L'utilisation d'un modèle gaussien permet d'éviter une dilution « brutale » des émissions de la source considérée. En comparaison de l'utilisation d'un modèle gaussien « simple », l'approche « sous-maille » permet une meilleure représentation des processus chimiques non-linéaires, car l'évolution des concentrations en polluant autour du panache est prise en compte dans le modèle eulérien. Enfin, lorsque le panache atteint une largeur comparable à la résolution horizontale du modèle eulérien le suivit de ses concentrations est transféré du modèle gaussien au modèle eulérien et peut-être continuer sur de grandes distances. Le modèle « PinG » de Polyphemus utilisé et amélioré dans le cadre de ce projet, couple un modèle à bouffées gaussiennes avec un modèle eulérien.

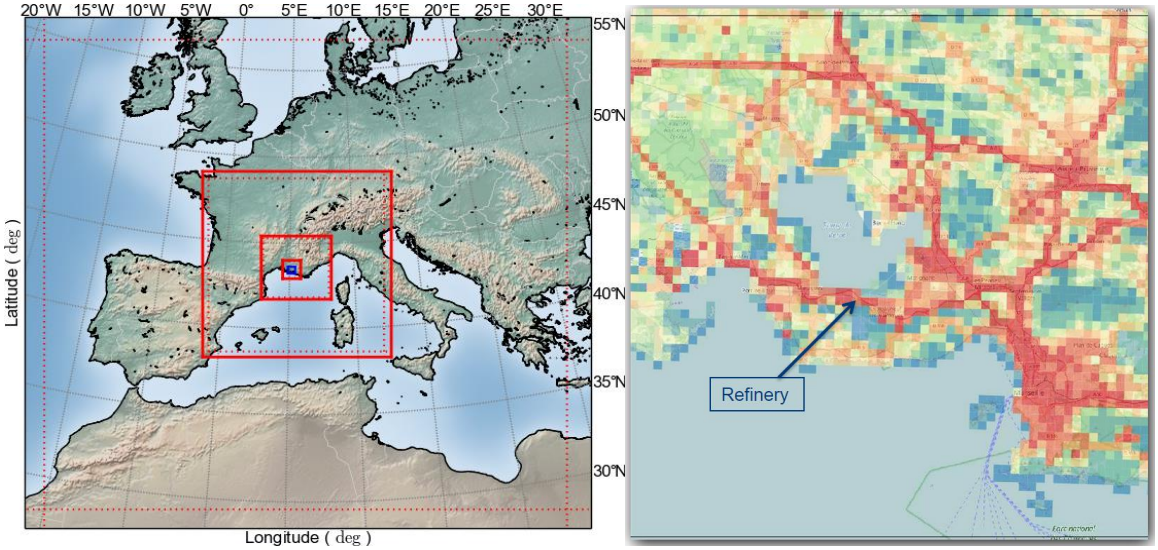


Figure 83. Domaines de simulation, les cadres pointillées correspondent aux domaines de simulation Polyphemus, et les cadres continus aux domaines utilisés pour les modélisations WRF (figure de gauche). La figure de droite présente le plus petit domaine, et la distribution spatiale des émissions anthropiques.

3.1.2. Émissions

Les émissions du domaine des Bouches-du-Rhône sont issues de l'inventaire d'AirPACA de 2013 (Figure 1), résolu à 1 km^2. Les émissions sont données sous forme de totaux annuels de NO_x, SO_x, COVNM, NH_3, CO, PM_{10} et $PM_{2.5}$, répartis par secteur d'activités. Les émissions horaires sont calculées à partir de profils temporels établis par AirPACA. Au-delà du domaine des Bouches-du-Rhône, les émissions sont issues de l'inventaire EMEP 2014, résolu à 0,5° x 0,5°. Les émissions biogéniques sont issues du modèles MEGAN v2.04 (Guenther et al., 2006) et les émissions de sels marins sont calculées d'après Jaeglé et al. (2011). Les PM émis sont distribués sur 20 classes de tailles, de 10 nm à 10 µm.

Les mesures réalisées aux émissaires par le LQA ont pour objectifs de déterminer les paramètres d'éjections (débit des fumées, température), ainsi que la composition chimique des aérosols émis. Les émissions de la raffinerie sont données sous forme de flux journaliers de SO_2, de NO_x et de poussières. Les flux calculés sont utilisés en tant qu'émissions dans le modèle PinG, pour chacune des sources décrites en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Afin de prendre en compte les émissions de SO_3, 5 % du SO_2 émis est traité en tant que H_2SO_4, représentant la rapide hydrolyse de SO_3 dans l'atmosphère. Les fractions PM_{10} et $PM_{2.5}$ des poussières sont déduites à partir de mesures réalisées dans le cadre d'une autre campagne de mesure menée à la raffinerie de Grandpuits en avril 2013 :

- les PM_{10} représentent 63% des flux totaux de poussières
- les $PM_{2.5}$ représentent 65% des PM_{10}.

Les compositions chimiques des PM émis sont issues des profils d'AirPACA pour le secteur d'activité correspondant à la raffinerie.

3.1.3. Météorologie

Les données météorologiques sont issues de simulations effectuées avec le modèle WRF v3.3. Les données météorologiques de la campagne hiver ont été fournies par AirPACA. Les simulations WRF pour la campagne de septembre 2015 ont été réalisées au Cerea, avec assimilation des données d'observations météorologiques disponibles. Pour le domaine 3, couvrant le sud de la France, les modélisations WRF bénéficient de l'assimilation des mesures des stations météorologiques incluses dans le domaine. La même méthodologie est appliquée pour le domaine 4, en utilisant en plus les mesures de Lidar vent, réalisées sur site.

Les directions du vent modélisées sont en bonnes corrélations avec les mesures, elles présentent un biais de -9,9°à la raffinerie et de +8,4°à la station de La Gatasse. La vitesse du vent est légèrement surestimée à La Gatasse et est bien représentée au niveau de la raffinerie en comparaison aux mesures Lidar. La station de La Gatasse est représentative des conditions météorologiques du domaine, et sera donc utilisée dans la suite de ce chapitre pour évaluer les données météorologiques.

3.2. Évaluation par comparaison aux mesures d'AirPACA

3.2.1. Échelle des Bouches-du-Rhône

Cette section présente les modélisations de la raffinerie de la Mède réalisées dans le cadre des deux campagnes du projet TEMMAS, couvrant la période d'été du 1 au 15 septembre 2015, et d'hiver du 1 au 20 février 2016. Les résultats des simulations sont évalués en comparaison aux mesures des stations d'AirPACA.

Les performances sont évaluées pour deux simulations par campagne :

- Simulation PinG : raffinerie traitée en représentation « PinG »
- Simulation Euler : raffinerie traitée en représentation eulérienne classique (émissions diluées dans les mailles du modèle eulérien)

Pour les deux campagnes de mesures, les simulations PinG et eulérienne présentent des performances statistiques similaires pour O3 et NO2. Durant la campagne été, le modèle sous-estime la concentration en O3 et NO2, mais obtient des valeurs de corrélations élevées (~0,7 et 0,6 respectivement), associées à une RMSE faible pour O3. (~19 µg m-3). La RMSE est plus élevée, relativement aux concentrations moyennes pour NO2 (~ 11 µg m-3) traduisant une moins bonne représentation des amplitudes des variations de ces concentrations. Les comparaisons des cycles journaliers d'O3 et de NO2 modélisés avec les cycles observés aux stations d'AirPACA montrent que le pic de NO2 observé à 9h, et imputable au trafic routier, n'est pas bien représenté par le modèle. La concentration moyenne en NO2 est convenable avant 5h et après 15h. Pour O3, le cycle journalier est bien représenté par le modèle, ce qui est attendu étant donné la forte dépendance de la production d'O3 au rayonnement solaire. La concentration moyenne est cependant sous-estimée, en particulier à 15h, lors du minimum de concentration de NO2. La sous-estimation de la concentration en NO2 est ainsi en partie attribuable à une sous-estimation des émissions du trafic routier.
Dans le cas du SO2, le modèle « PinG » présente de meilleures performances que le modèle eulérien, pour les deux campagnes de mesures. La différence est notable pour SO2 car la raffinerie est un des principaux émissaires de SO2 du domaine (les émissions de SO_2 de la raffinerie représentent 14% des émissions totales de SO_2 sur le domaine). Le traitement de la raffinerie en « sous-maille » permet ainsi une meilleure représentation de la concentration en SO_2 à l'échelle du département.

3.2.2. Voisinage de la raffinerie

Les résultats des simulations sont évalués par comparaison aux mesures de la station d'AirPACA de la Mède et du site STNA des campagnes TEMMAS, localisés au voisinage de la raffinerie de la Mède. Dans la suite la contribution de la raffinerie est calculée par la méthode suivante :

- Réalisation d'une simulation sans émissions à la raffinerie (Sim-0)
- Contribution calculée par la différence (Sim-PinG - Sim-0)

Pour les deux campagnes, les mesures de SO_2 et NO_2 horaires sont disponibles aux stations de la Mède et STNA. Pour les PM_{10}, les mesures journalières sont disponibles à la station de la Mède.

Campagne été

La station de la Mède, localisée au nord-est de la raffinerie, est impactée par les panaches lors des périodes de vent de sud et de sud-ouest. Les deux modèles donnent des résultats similaires pour la concentration en NO2. La raffinerie contribue peu à cette station principalement impactée par le trafic de l'autoroute située au nord, à l'est et à l'ouest. Les pics de NO2 observés du 8 au 12 septembre sont sous-estimés par les deux modèles. La rose des vents modélisée sur la période de pic, le 10 septembre de 6 heures à 14 heures, montre que la contribution du trafic autoroutier est sous-estimée, du fait de la non représentation des vents de nord et de nord-est observés. De plus, la station de mesure étant localisée proche de l'autoroute, la modélisation eulérienne n'est sans doute pas adaptée pour reproduire les pics observés à cette station (Briant et Seigneur, 2013).
Dans le cas du SO2, les pics de concentrations observés sont bien représentés dans la simulation « PinG » et sous-estimés dans la simulation eulérienne. Ces pics de concentrations, observés à la station de la Mède lors de périodes de vent de sud, sont imputables aux émissions de la raffinerie. La contribution modélisée correspond aux pics de SO2 mesurés, en accord avec le fait que la raffinerie est la principale source de SO2 à proximité de la station de mesure. Ces résultats mettent en avant l'intérêt de l'approche « sous-maille » pour la modélisation des sites industriels.

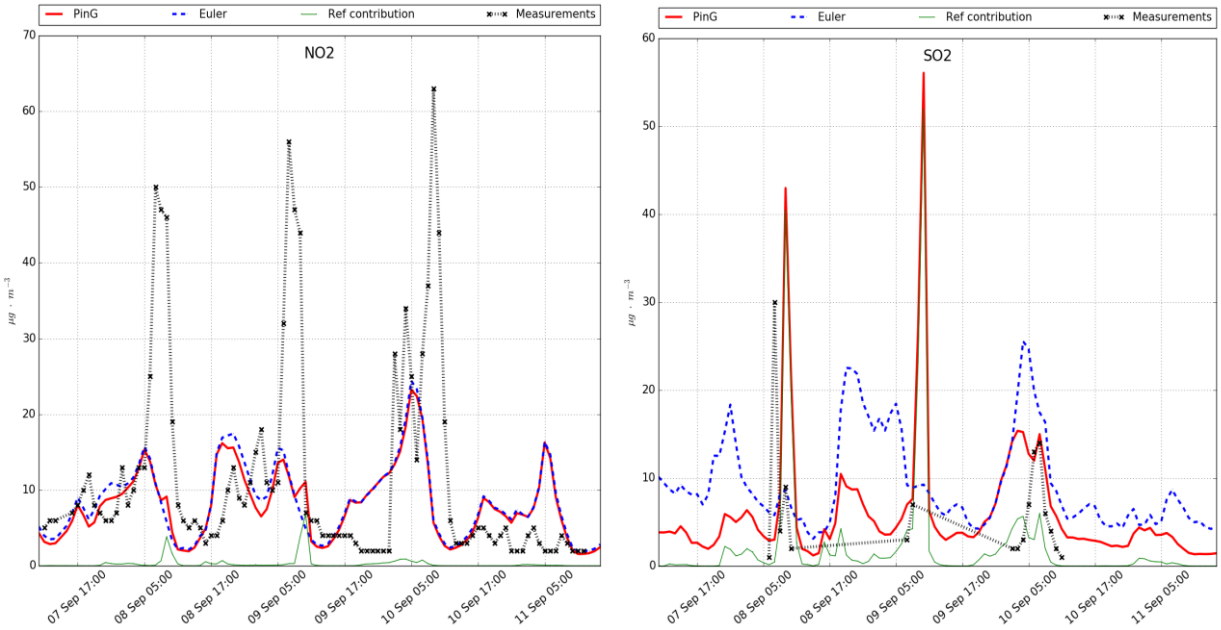


Figure 84. Comparaisons des concentrations de NO2 et de SO2 modélisées par les simulations « PinG » et eulérienne, aux mesures de la station STNA (µg.m-3).

Les concentrations en SO2 et NO2 modélisées sont maintenant comparées aux mesures de la station STNA, localisée au sud-ouest de la raffinerie, en
Figure 84. Comme dans le cas de la station de la Mède, les simulations « PinG » et eulérienne présentent des résultats similaires pour la modélisation de NO2. Les niveaux moyens de NO2 sont bien représentés par les modèles et les pics observés les 8, 9 et 10 septembre sont sous-estimés. Ces pics sont en partie attribuables aux émissions de la raffinerie (périodes de vents de nord-est), et également aux émissions du trafic routier (autoroute située au nord-est du site STNA). Les sous-estimations de la concentration en NO2 sont ainsi liées aux incertitudes sur les émissions de NOx du trafic et de la raffinerie. Les pics de SO2 sont en revanche bien représentés par le modèle « PinG ». Le modèle eulérien ne reproduit pas le pic du 8 septembre et surestime la concentration moyenne en SO2 pour ce site. Cette surestimation est due à la dilution trop importante des panaches. Cet effet est illustré sur la
Figure 85 qui montre les contributions de la raffinerie à la concentration en SO2, moyennées sur toute la période de simulation de la campagne d'été. Pour le modèle « PinG » la contribution maximale atteint 13,5 µg m-3 sur les zones les plus impactées contre seulement 5 µg m-3 pour le modèle eulérien. Néanmoins le site STNA qui est rarement impacté par les panaches de la raffinerie dans la simulation « PinG », en accord avec la direction du vent mesurée durant la campagne d'été, présente une concentration moyenne plus importante sur la période de simulation dans la modélisation eulérienne.

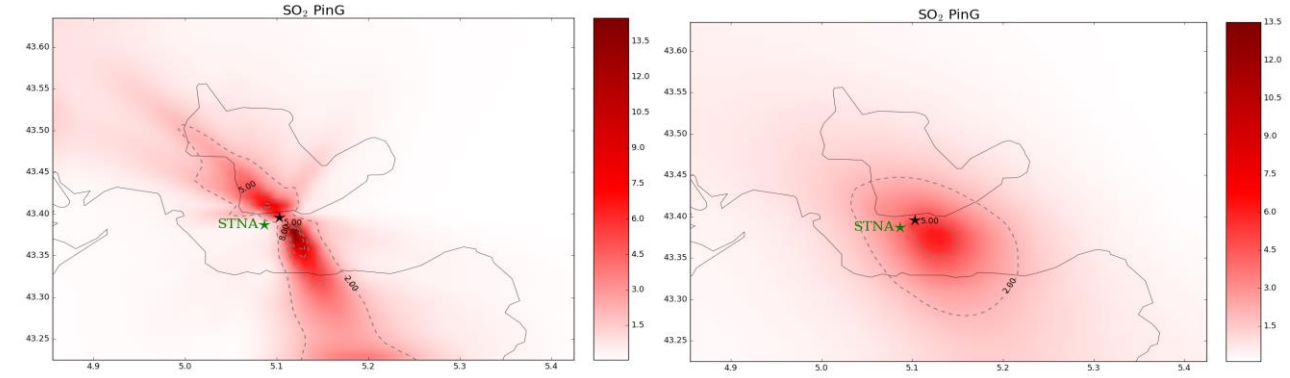


Figure 85. Contribution de la raffinerie à la concentration de SO_2 (µg m^{-3}), évaluée par le modèle « PinG » (gauche) et par le modèle eulérien (droite). Le marqueur noir indique l'emplacement de la raffinerie de la Mède, et le marqueur vert l'emplacement du site de mesures STNA.

Les concentrations en PM10 ont également été modélisées par Airpaca, à l'aide du modèle eulérien de Chimere. Les comparaisons des concentrations en PM10 modélisées par Chimere et Polyphemus sont présentées en Figure 86.

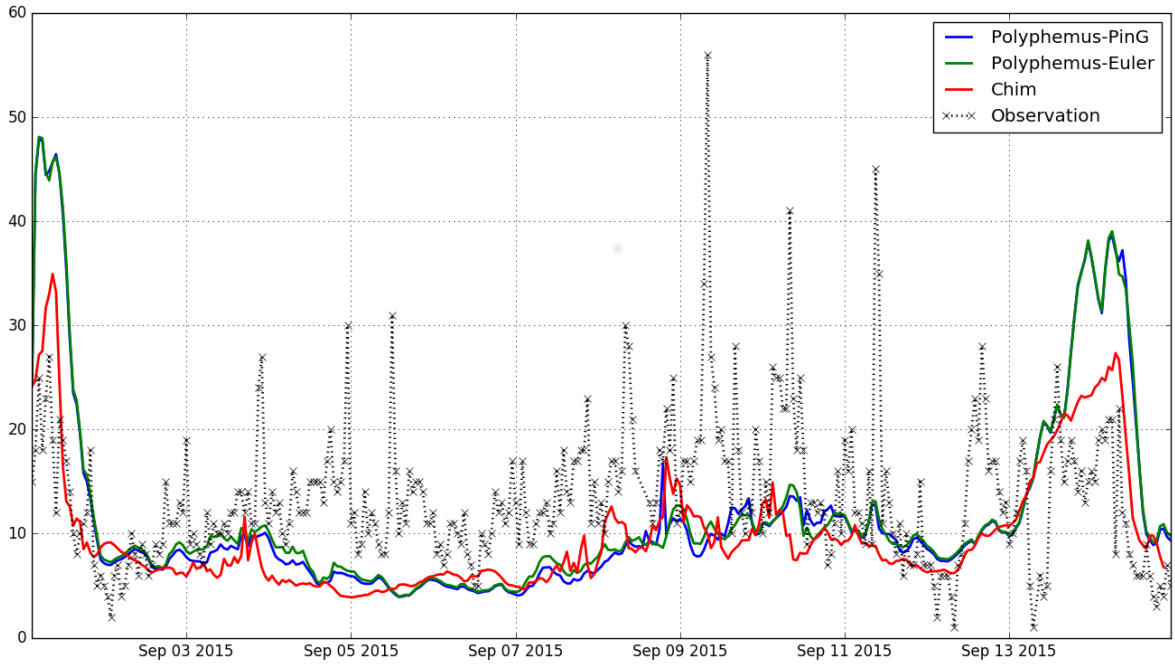


Figure 86. Comparaison des concentrations en PM10 modélisées par Chimere et par les modèles PinG et eulérien de Polyphemus, aux mesures de la station de La Mede (µg/m³).

Les concentrations en PM10 modélisées sont comparées aux mesures de la station de la Mède. Comme dans le cas du NO2, les modèles donnent des résultats similaires, du fait de la faible contribution de la raffinerie dans cette direction, et du nombre important de sources de PM10 à proximité. La concentration en PM10 est sous-estimée, et les pics de concentration observés ne sont pas reproduits par les modèles. La concentration en PM10 en début et fin de période est surestimée par Polyphemus, et bien représentée par Chimere. Les résultats des trois modèles sont comparables sur le reste de la période. Durant la période de pics de PM10, les directions du vent observées sont principalement de nord-ouest, et sont bien reproduites par WRF. En considérant ces directions, les pics de PM10 sont principalement dus à la contribution du trafic autoroutier. La sous-estimation des PM10 peut ainsi en partie être imputée aux incertitudes sur les émissions du trafic, à la non prise en compte de la re-suspension des poussières par le trafic et à la résolution spatiale non adaptée à la modélisation des pics de concentration à proximité du trafic.

Campagne d'hiver

Les concentrations moyennes de SO_2 et de NO_2 modélisées à la station de la Mède sont bien représentées par les modèles mais les pics ne sont en revanche pas modélisés, en particulier le pic mesuré de SO_2 de 160 µg m^{-3}. Durant la période du 8 au 14 février, la contribution modélisée de la raffinerie à la concentration de SO_2 atteint au maximum 35 µg m^{-3} et 20 µg m^{-3} pour le NO_2. La contribution maximale est observée le 19 février, avec des pics de SO_2 et NO_2 à 40 µg m^{-3} comparables aux pics mesurés.
En comparaison aux mesures à la station STNA les deux modèles présentent également de bonnes performances pour la modélisation des niveaux de fond de SO_2 et de NO_2. Les pics de SO_2 observés du 12 au 14 février ne sont pas représentés, du fait de l'absence de conditions de vent favorables (nord-est) dans la simulation WRF. Les pics observés de NO_2 sont sous-estimés de l'ordre de 10 à 20 µg m^{-3}, ce qui correspond aux amplitudes des pics de NO_2 modélisés à la station de la Mède, localisée à une distance équivalente. La concentration en NO_2 pourrait potentiellement être mieux représentée au site STNA en améliorant la modélisation des champs météorologiques.
Les concentrations de PM_{10} modélisées ont été comparées aux mesures de la station de la Mède également pour cette période. Le pic de concentration du 2 février est bien représenté par les deux modèles et la contribution de la raffinerie à ce pic est de 8,7 µg m^{-3} (21 % de la concentration de pic). La concentration moyenne de PM_{10} est cependant largement sous-estimée. Étant donnée les conditions de vent de sud-ouest et de nord-ouest, les fortes concentrations de PM10 peuvent être attribuées aux émissions du trafic autoroutier, de la raffinerie et de la carrière des Bouttiers localisée au

sud-ouest de la station de la Mède. Durant ces périodes, la contribution de la raffinerie est de 20 à 25 %, comparable à celle modélisée durant le premier pic de PM_{10}.

3.3. Évaluation par comparaison aux mesures de la plate-forme Massalya

Les résultats des simulations « PinG » et eulérienne sont comparés aux mesures de la plate-forme Massalya. La localisation de la plate-forme Massalya est présentée en Figure 2. Le site de mesures est impacté par les panaches de la raffinerie lors des périodes de vent de nord-est. Durant ces périodes, le site est également impacté par les émissions de l'autoroute A55. Cette section présente en premier lieu l'évaluation des PM1 modélisés par les modèles « PinG » et eulérien. La seconde partie présente les études de composition chimique des PM1.
Le modèle « PinG » a été amélioré pour intégrer la représentation en nombre des PM, en parallèle de la représentation massique. Les variations du nombre de particules lors des processus de coagulation et nucléation sont résolues en cohérence avec la résolution de la concentration massique. Les performances des modèles « PinG » et eulérien pour la représentation du nombre de PM1 sont évaluées en dernière partie, en comparaison aux mesures du SMPS et de l'OPC.

3.3.1. Concentrations des PM1

Campagne d'été

Les résultats des modélisations « PinG » et eulérienne sont évalués par comparaison aux mesures de la plate-forme Massalya. Les mesures réalisées avec l'OPC indiquent que les PM1 correspondent à pratiquement 100 % du nombre total de particules, et à 80 % de la masse totale de particules, sur toute la période de campagne. Quatre périodes de pics de particules, de diamètre inférieur à 150 nm sont mises en évidence. Les 3 premières périodes sont caractérisées par des conditions de vent de nord-est, indiquant une contribution des panaches de la raffinerie sur ces périodes. La quatrième période est caractérisée par des conditions de vents de sud, la raffinerie ne contribue pas aux pics de PM1 observés sur cette période.
Les résultats pour la modélisation de la concentration massique des PM1 sont présentés en Figure 87. Les deux simulations présentent de bonnes performances pour la modélisation des niveaux de fond de PM1. Les pics de concentrations observés sont largement sous-estimés dans la simulation eulérienne. Le modèle « PinG » représente les PM1 avec une bonne corrélation temporelle (0,85 en corrélation journalière, 0,4 en corrélation horaire), et présente de bonnes performances pour reproduire les pics observés. Les trois périodes de pics de PM, attribuables aux panaches de la raffinerie, sont ainsi bien représentées par le modèle. Pour les deux premiers pics, la raffinerie contribue à 50 % et 63 %, respectivement, à la concentration massique de PM1.

À partir de ces résultats 5 périodes sont définies, pour l'étude de la composition des PM :

- Période 0 : Du 7/09 10h au 8/09 7h : Composition des particules de fond
- Période 1 : Du 8/09 7h au 8/09 11h
- Période 2 : Du 9/09 0h au 9/09 10h
- Période 3 : Du 10/09 3h au 10/09 13h
- Période 4 : Du 10/09 21h au 11/09 8h

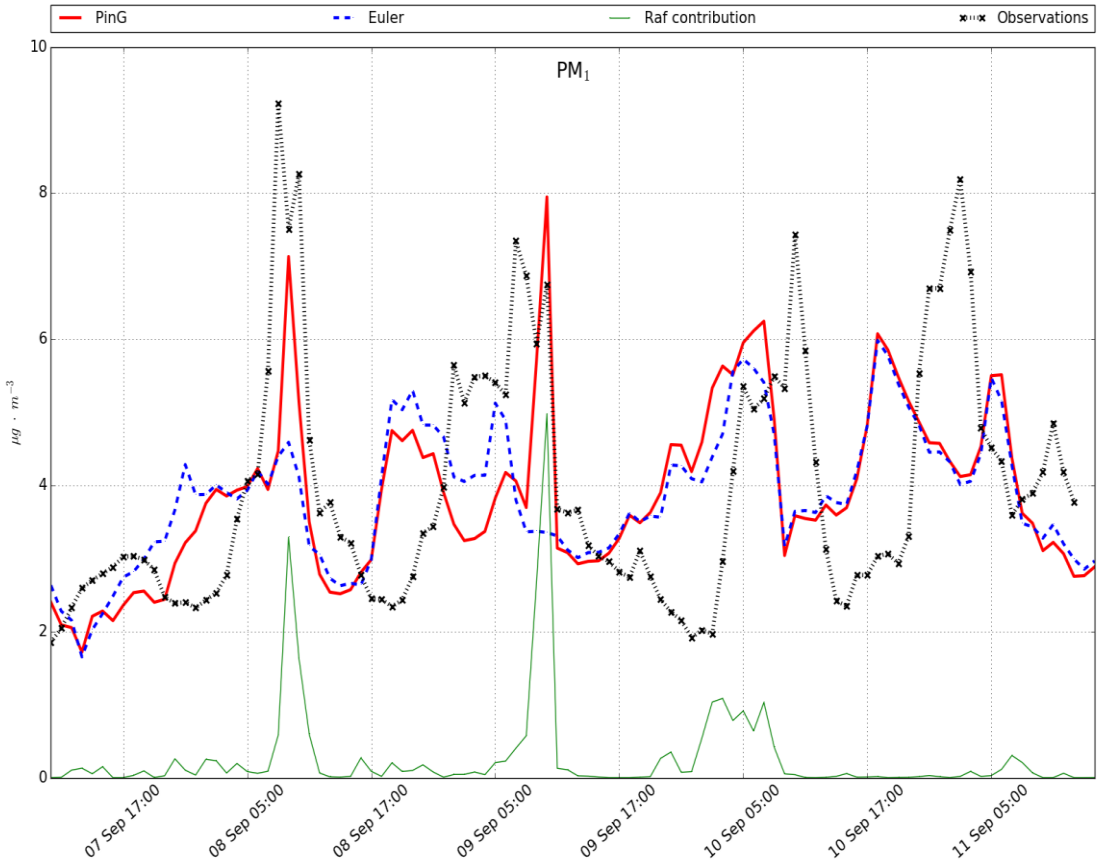


Figure 87. Résultats des simulations « PinG » et eulérienne pour la modélisation des PM_1, en comparaison aux mesures de l'AMS (µg m^{-3}).

Campagne d'hiver

Les mêmes mesures ont été réalisées durant la campagne d'hiver. Les périodes de pics de particules sont beaucoup plus brèves que durant la campagne d'été, de l'ordre de la dizaine de minutes. Les pics de concentrations sont caractérisés par une très fine granulométrie, avec des particules de diamètres inférieurs à 150 nm, et de 50 nm en moyenne. Pour le reste de la campagne, les conditions de vents n'ont pas été propices à l'observation des panaches. La concentration moyenne en PM_1 est bien représentée par les modèles, mais les pics brefs observables du 12 au 14 février ne sont pas simulés. La non-représentation de ces pics est due au fait que les courts épisodes de vents de nord-est ne sont pas représentés dans les simulations WRF. La contribution de la raffinerie modélisée au site de mesures est ainsi pratiquement nulle sur toute la période de mesures.

3.3.2. Composition chimique des PM1

Les principales fractions des PM_1 (sulfate, BC, OM, ammonium, nitrate) ont été mesurées avec la plate-forme Massalya, et sont comparées aux résultats de simulations. Étant donné les conditions de vents non propices à l'observation des panaches durant la campagne d'hiver, uniquement les résultats de la campagne d'été sont présentés dans cette partie. La Figure 88 présente les résultats pour la modélisation du sulfate.

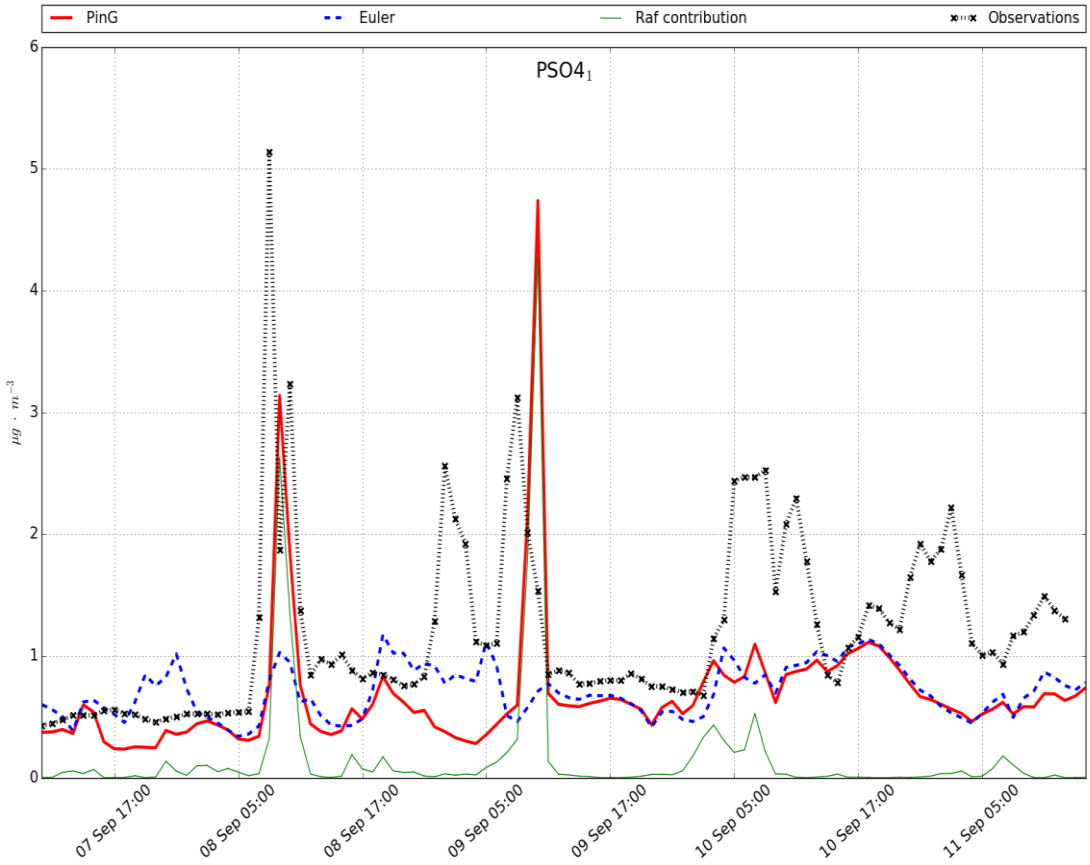


Figure 88. Résultats des simulations « PinG » et eulérienne pour la modélisation du sulfate, en comparaison aux mesures de l'AMS (µg m^{-3}).

La concentration de fond moyenne de sulfate est de 0,5 µg m^{-3}. Les deux modèles sous-estiment la concentration de fond, avec un biais négatif de 0,2 µg m^{-3} en moyenne. Les pics de sulfate observés ne sont pas représentés par le modèle eulérien. Le modèle « PinG » présente lui de bonnes performances pour représenter la concentration observée pour les pics. Les pics modélisés présentent une importante contribution de la raffinerie. Les pics des périodes 1 et 3 sont légèrement sous-estimés par le modèle, le pic de la période 2 est en revanche surestimé. Aucune contribution de la raffinerie n'est modélisée pour les pics de la période 4 qui ne sont pas attribuables à la raffinerie.

Les concentrations d'ammonium et de nitrate, modélisées par les modèles « PinG » et eulérien, sont comparées aux mesures de l'AMS en

Figure 89. La concentration en ammonium est largement surestimée par les deux modèles, en particulier par le modèle eulérien. Dans le modèle eulérien, le sulfate émis par la raffinerie impacte une zone plus étendue que dans le modèle « PinG ». Ceci conduit à de plus fortes formations de sulfate d'ammonium dans le modèle eulérien. La contribution modélisée par le modèle « PinG » correspond aux pics de concentrations observés. Le modèle présente une bonne performance pour la représentation des pics d'ammonium, avec une forte proportion imputable aux émissions de la raffinerie. La surestimation d'ammonium est notable sur toute la période de mesures, et peut être attribuable à une surestimation des émissions d'ammonium et d'ammoniac dans l'inventaire.

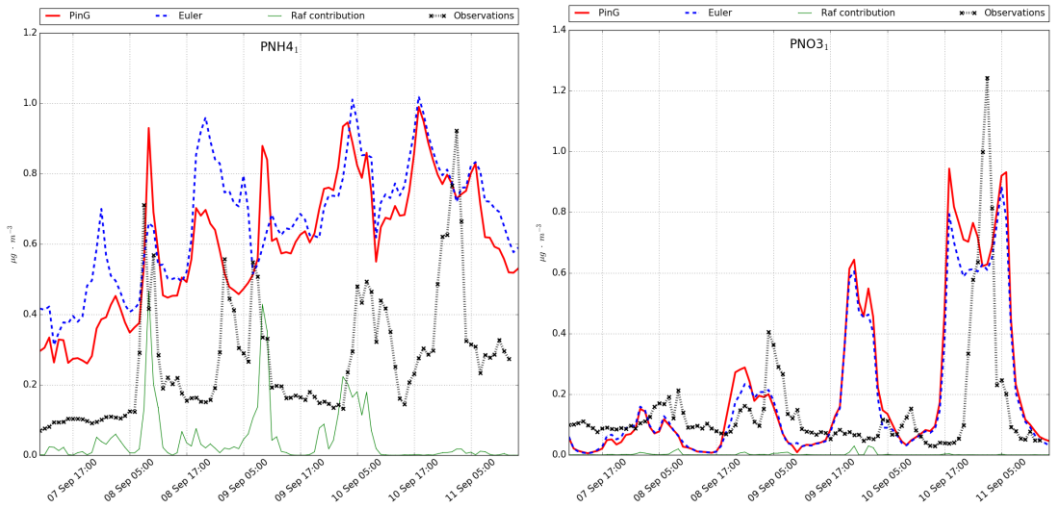


Figure 89. Résultats des simulations PinG et eulérienne pour la modélisation des nitrates (droite) et de l'ammonium (gauche), en comparaisons aux mesures de l'AMS (µg m^{-3}).

Pour le nitrate, la concentration observée est faible, de l'ordre de 0,1 µg m^{-3}. Les deux modèles donnent des résultats similaires et surestiment le pic de concentration de la période 3. La contribution de la raffinerie est pratiquement nulle sur toute la période. À cette distance et du fait des concentrations faibles en NH_3, on n'observe pas de formation de nitrate d'ammonium et le HNO_3 formé dans les bouffées restent en phase gazeuse.

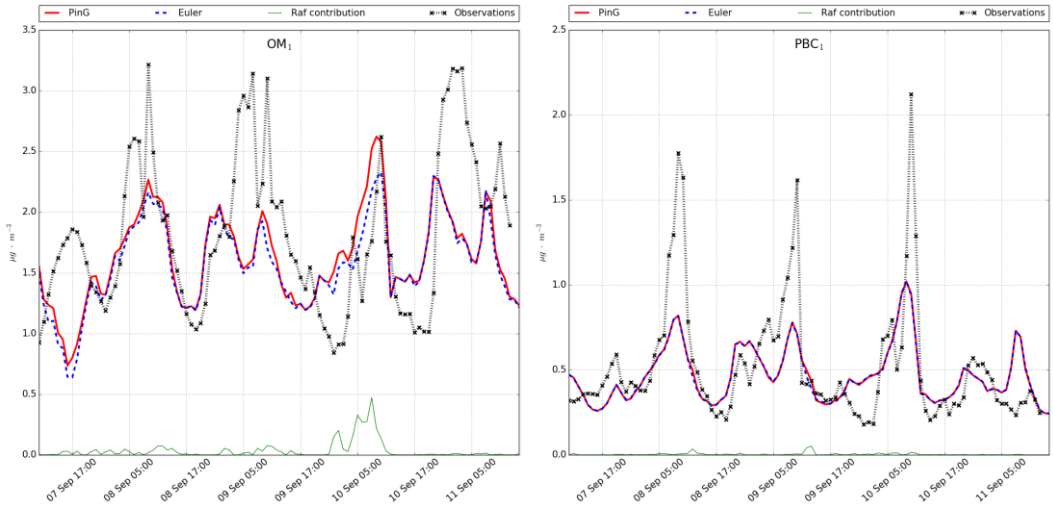


Figure 90. Résultats des simulations « PinG » et eulérienne pour la modélisation de OM (figure de gauche) et de BC (figure de droite), en comparaisons aux mesures de l'AMS (µg m^{-3}).

La
Figure 90 présente les résultats de modélisation de OM et de BC, en comparaison aux mesures de l'AMS. Les deux modèles représentent OM et BC avec des corrélations horaires relativement élevées (0,55 pour OM et 0,68 pour BC), et des biais faibles (0,1 µg m^{-3} pour OM et BC). Pour OM, les résultats des deux modèles sont similaires pour les périodes 1, 2 et 4. Le modèle « PinG » modélise une fraction de OM attribuable à la raffinerie pour la période 3. Cette fraction correspond à une formation de SOA biogéniques hydrophiles, formés à partir de la condensation des précurseurs présents dans le fond sur les particules aqueuses présentes dans les bouffées. Les pics des autres périodes sont sous-estimés par les modèles. Les pics de BC sont également sous-estimés par les deux modèles et la contribution modélisée est nulle. La non représentation des pics peut être liée aux incertitudes sur la spéciation chimiques appliquée sur les émissions de PM de la raffinerie (faible fraction de BC). Les périodes de pics sont également caractérisées par des contributions des émissions du trafic (vent de nord-est), la sous-estimation de OM et de BC peut ainsi être en partie attribuable à des sous-estimations des émissions de BC et de OM dans l'inventaire.

La composition chimique relative des PM1 est étudiée sur 3 périodes :

- Composition de fond : du 7 au 8 septembre
- Composition en période de pics attribuables à la raffinerie : 8 septembre de 7h à 11h (pic1)
- Composition en période de pics non attribuables à la raffinerie : du 10 au 11 septembre (pic 4)

Les comparaisons des compositions des PM1 modélisées par le modèle « PinG », aux mesures de l'AMS, et sur ces trois périodes, sont présentées en
Figure 91.

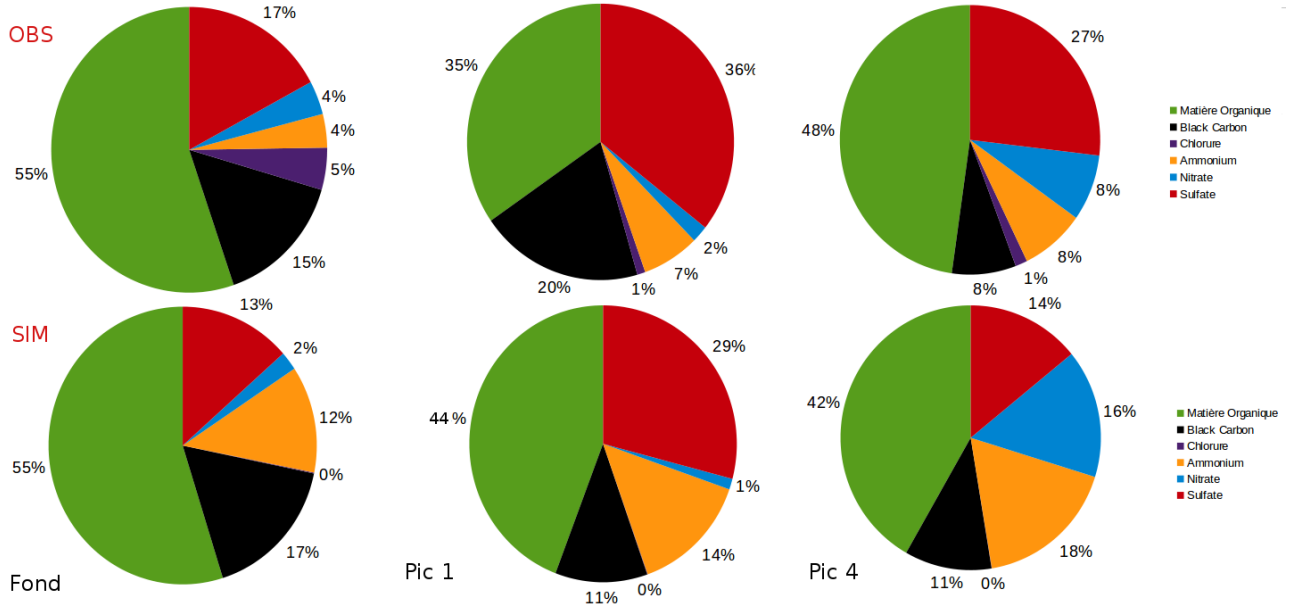


Figure 91. Comparaisons de la composition chimique des PM_1 modélisée par le modèle « PinG » (figures du bas) aux mesures de l'AMS (figures du haut).

Les concentrations de fond de sulfate, OM, BC et nitrate sont bien représentées par le modèle. La concentration d'ammonium est surestimée, comme montré en
Figure 89 et le modèle génère des quantités négligeables de chlorure. Durant la période du pic 1, les pics observés sont attribuables aux émissions de la raffinerie. Ces pics sont caractérisés par des proportions plus importantes de sulfate, peu neutralisé au regard des quantités d'ammonium. La quantité moyenne de sulfate est sous-estimée par le modèle, la quantité maximale (74 % dans la mesure) est en revanche légèrement surestimée (84 % dans la simulation). La proportion de BC est sous-estimée en partie du fait de la trop faible fraction de BC dans la spéciation chimique des émissions de la raffinerie. La sous-estimation des proportions moyennes de sulfate et de BC est aussi partiellement attribuable à un biais dans la direction du vent, comme montré en Figure 92. Les vents dominants de nord-est mesurés ne sont pas représentés dans la simulation WRF, diminuant la contribution de la raffinerie sur le site de mesures. La période de pics 4 est une période de vents de sud, bien représentés par la simulation WRF. Les pics observés ne sont donc pas attribuables à la raffinerie. Les quantités de nitrate plus importantes suggèrent que les PM ont subi des processus de vieillissement, pouvant indiquer une origine de ces PM de sources plus lointaines.

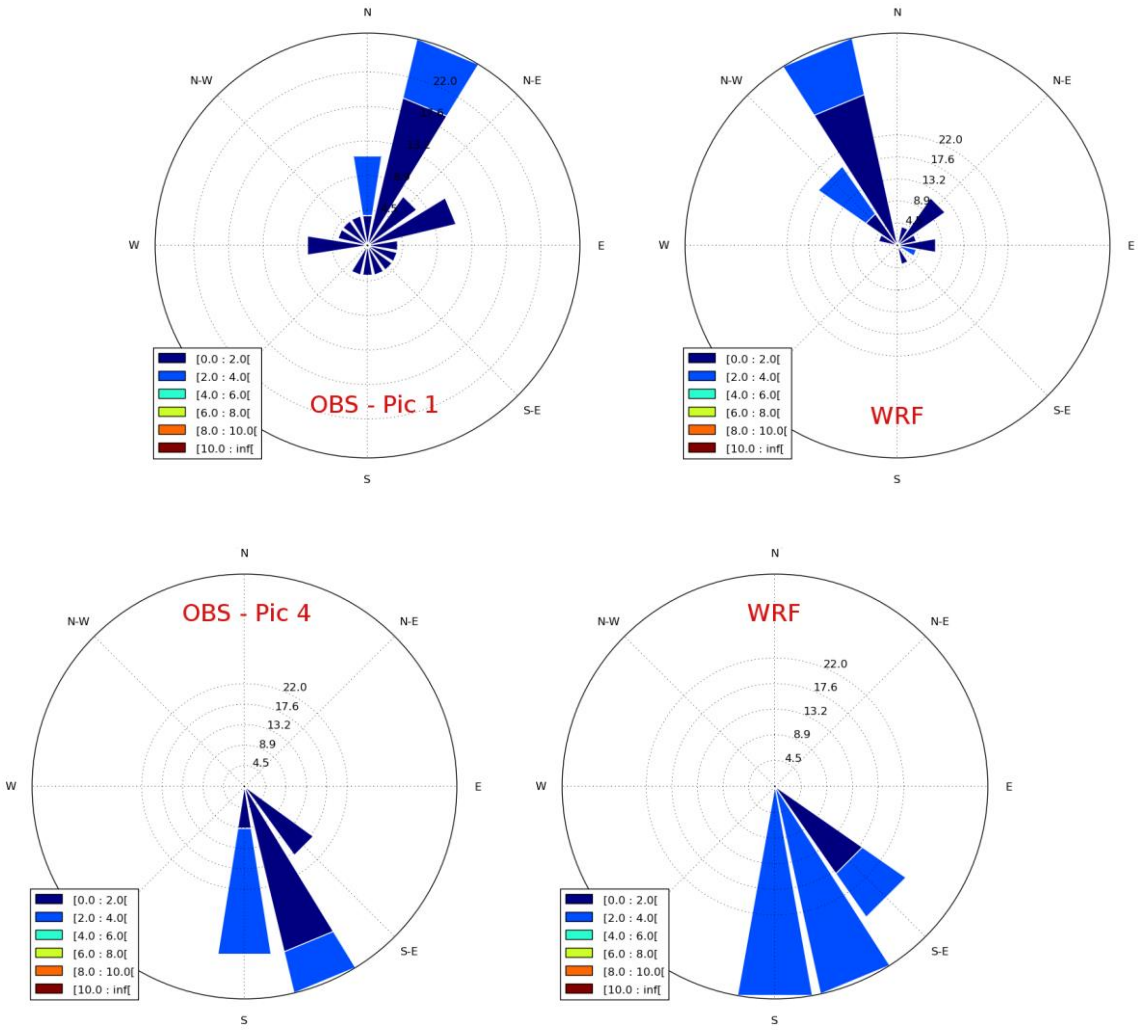


Figure 92. Roses des vents mesurés (figure de gauche) et modélisés (figure de droite), pour les périodes de pics 1 (figure du haut) et 4 (figure du bas).

Les deux modèles montrent ainsi de bonnes performances pour reproduire la concentration observée et la composition des PM_1. Le modèle eulérien sous-estime la contribution de la raffinerie lors des périodes de vent de nord-est, du fait de la dilution des panaches. La contribution de la raffinerie à la concentration en PM_1 et leurs compositions sont en revanche bien représentées par le modèle PinG. Dans ce contexte, la contribution de la raffinerie à la concentration locale en PM_1 modélisée est étudiée. La contribution moyenne de la raffinerie à la concentration locale en PM_1 est faible à l'échelle du domaine et à la station, de l'ordre de 2 à 4 %. La contribution horaire maximale en revanche atteint 82 % de la concentration en PM_1 dans la maille contenant la raffinerie. Au site STNA, la contribution maximale correspond à 63 % de la concentration en PM_1.

3.3.3. **Concentrations en nombre de particules**

Les concentrations en nombre de particules, modélisées par les modèles « PinG » et eulérien, sont comparées aux mesures de l'OPC et du SMPS. Le SMPS mesure le nombre de particules de diamètre compris entre 15 et 685 nm. L'OPC mesure le nombre de particules plus grosses, de diamètre compris entre 0,265 et 32 µm. Les résultats des simulations sont comparés aux mesures des deux appareils en Figure 93 et Figure 94. Pour les fractions plus grosses (OPC), les deux modèles représentent la concentration en nombre avec un biais faible. En revanche, les deux modèles ne reproduisent pas le pic observé du 10 au 12 septembre, attribuable aux sources localisées au sud de la raffinerie. La contribution de la raffinerie pour ces classes de taille est faible et atteint 28 % de la concentration de fond modélisée au maximum, durant la période de pics 2.

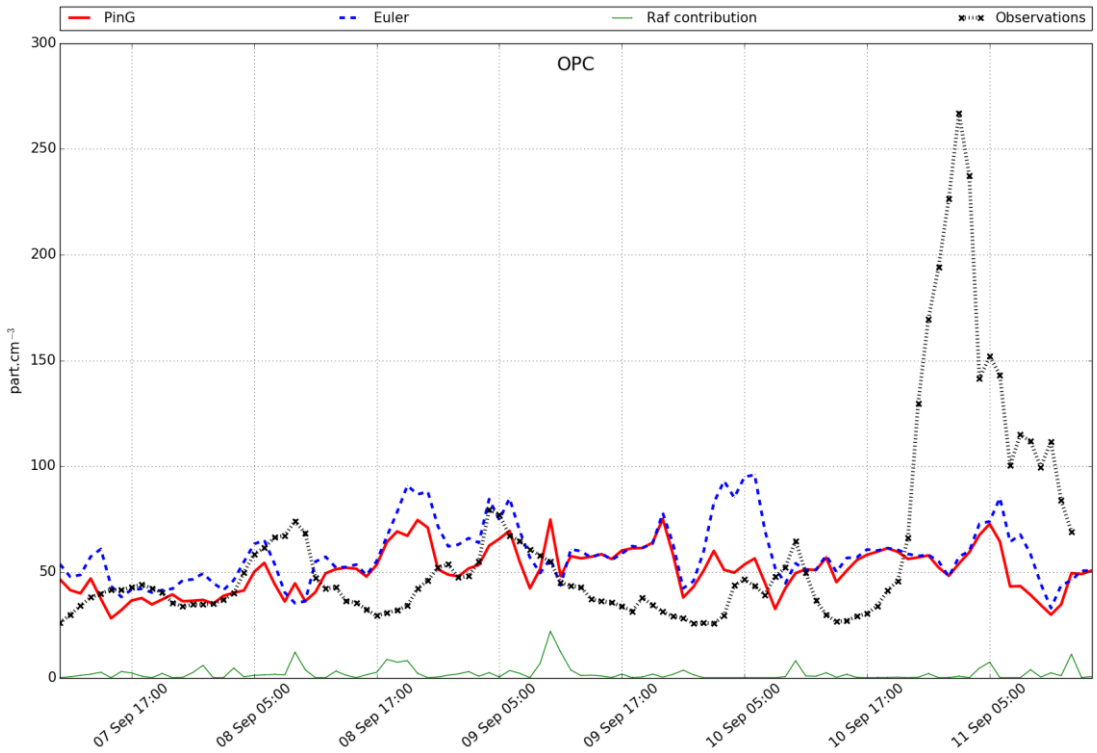


Figure 93. Concentrations en nombre des particules de diamètre compris entre 0,265 et 32 µm modélisées par les modèles « PinG » et eulérien, en comparaison aux mesures de l'OPC (part.cm^{-3}).

La Figure 94 présente les mêmes comparaisons pour les particules ultrafines et fines du SMPS. Les classes de taille mesurées par le SMPS représentent plus de 90 % du nombre total de particules. Les deux modèles présentent de bonnes performances pour la modélisation du nombre de particules, avec un biais pratiquement nul pour la concentration de fond. Les pics observés sont sous-estimés par le modèle « PinG », et ne sont pas reproduits par le modèle eulérien. La raffinerie contribue principalement à la concentration en nombre pour les particules fines. Durant la période de pic 1, la raffinerie contribue à 86 % au nombre de particules modélisé. La raffinerie contribue dans ces classes de tailles du fait de la proximité avec le site de mesures. Les panaches provenant de sources plus lointaines (période 4) ne sont pas visibles par le SMPS et contribuent au nombre de particules dans les classes de tailles plus grosses, du fait du processus de condensation, qui augmente le diamètre moyen des particules, et de coagulation, qui diminue le nombre et augmente le diamètre moyen des particules.

En comparaison avec la concentration de PM_1 (Figure 87), on observe une bonne corrélation modèle/mesure pour les pics de la période 1. En revanche, la concentration massique du pic de PM_1 de la deuxième période est surestimée par le modèle et sous-estimée dans la représentation en nombre. Le constat est identique pour le pic 3, dont l'amplitude est bien représentée en masse, mais sous-estimée en nombre. Ces différences peuvent indiquer une distribution en taille des PM émis non représentative des émissions réelles, et centrée sur des classes de tailles trop grandes

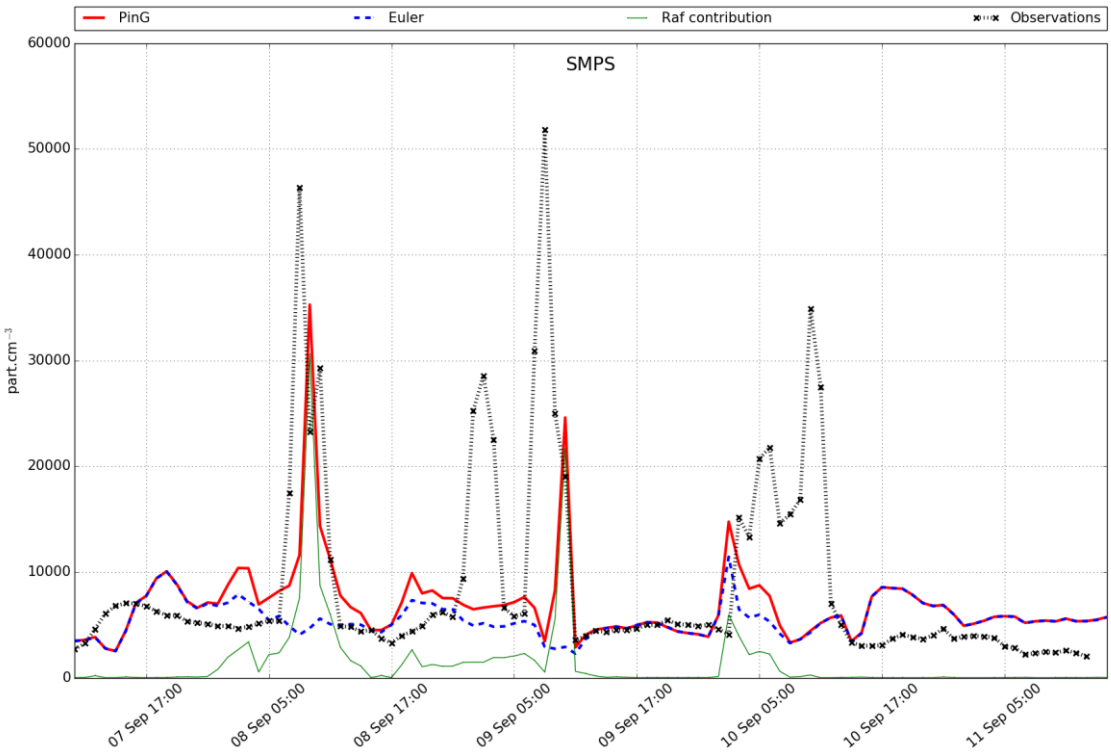


Figure 94. Concentrations en nombre des particules de diamètre compris entre 15 et 685nm modélisées par les modèles « PinG » et eulérien, en comparaison aux mesures du SMPS (part cm^{-3}).

Ces différences peuvent également être liées aux incertitudes sur la spéciation chimique appliquée aux PM émis, issue de l'inventaire et non de mesures, pouvant influer sur les processus de condensation et donc modifier la distribution en taille des PM. La Figure 94 montre que la modélisation « PinG » offre ici aussi une représentation plus précise de la contribution locale de la raffinerie, en comparaison à l'approche eulérienne, qui ne représente pas du tout les pics attribuables aux émissions de la raffinerie.

3.4. Modèle CTM CHIMERE

3.4.1. Description des simulations

Le modèle CHIMERE v2017 est un modèle eulérien de chimie-transport pour les espèces organiques et inorganiques d'origines primaires ou secondaires. Il permet des simulations sur de grands domaines avec une résolution spatiale pouvant aller de 100km à 1km. Ce modèle est utilisé en opérationnel par AirPACA pour effectuer des prévisions quotidiennes de la qualité de l'air à l'échelle régionale.
Dans le cadre de ce projet, les calculs sont réalisés sur 4 domaines : Europe à 27km ; Méditerranéen 9km ; PACA 3km et Etang de Berre 1km. Les 3 premiers domaines sont représentés sur la Figure 95. Le dernier domaine de 50km x 50 km est centré sur la raffinerie.

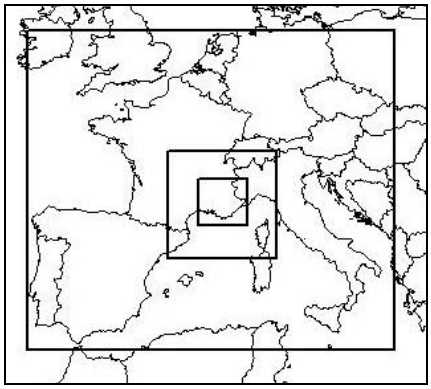


Figure 95 Emprise des domaines Europe / Méditerranéen / PACA

Les données d'entrée utilisées dans les simulations CHIMERE sont identiques à celles utilisées par le modèle Polyphemus. Les données d'émissions et de météorologie sont ainsi décrites dans les paragraphes **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** de ce rapport.

3.4.2. **Résultats**

Les résultats des modélisations réalisées avec le modèle CHIMERE sont conformes aux résultats couramment obtenus sur cette zone. En termes de statistiques sur les critères règlementaires journaliers (maximum journalier de la concentration horaire pour l'O_3 et le NO_2, moyenne journalière des concentrations horaires pour les PM10), les simulations sous-estiment les concentrations en PM10 mais surestiment les concentrations en ozone et NO_2. Les activités de transport (routières, maritimes, …) associées aux activités industrielles apparaissent comme des émetteurs significatifs sur ce territoire. A titre d'illustration, une représentation des concentrations journalières sur la zone de l'Etang de Berre à 1 km de résolution est fournie dans la Figure 96 pour la journée du 8 septembre.

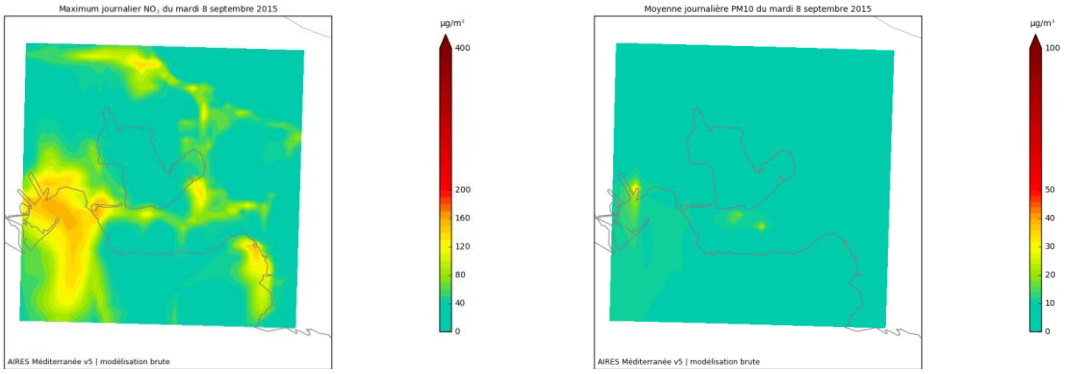


Figure 96 : Cartographie du maximum horaire en NO2 [µg/m3] et de la moyenne journalière en PM10 [µg/m3] sur le domaine « Etang de Berre -1 km» pour la journée du 8 septembre.

Les extractions des statistiques journalières au niveau de la station de la Mède d'AirPACA, mesurant les concentrations en PM10 et NO_2 montrent les mêmes tendances que les résultats sur l'ensemble du réseau (Figure 97) avec une sous-estimation des concentrations en particules mais une évolution temporelle correctement reproduite.

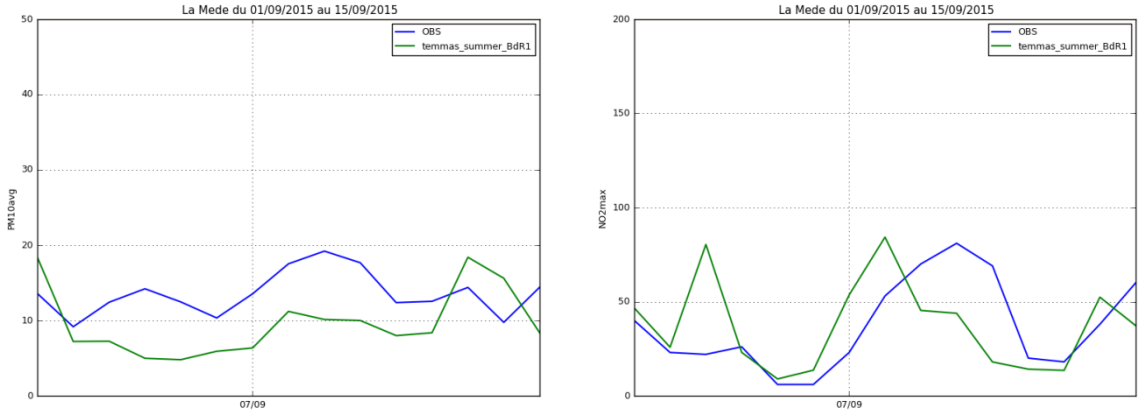


Figure 97 : Comparaison mesures (courbe bleue) et modèles (courbe verte) à la station de la Mède pour la moyenne journalière en PM10 exprimée en [µg/m3] (gauche) et pour le maximum horaire journalier en NO2 exprimé en [µg/m3] (droite).

La composition des particules a également était extraite des simulations mais pour la fraction PM2.5 au niveau de la station de la Mède (Figure 98). En comparaison des résultats décrits dans la partie **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, la situation de fond surestime les secondaires inorganiques entrainant une sous-estimation de la fraction organique de l'aérosol. En revanche la composition de l'aérosol du pic n°1 associé à une influence directe des émissions de la raffinerie montrent nettement une sous-estimation de la fraction sulfate. Enfin une différence significative apparait également dans la reconstitution du pic n°4.

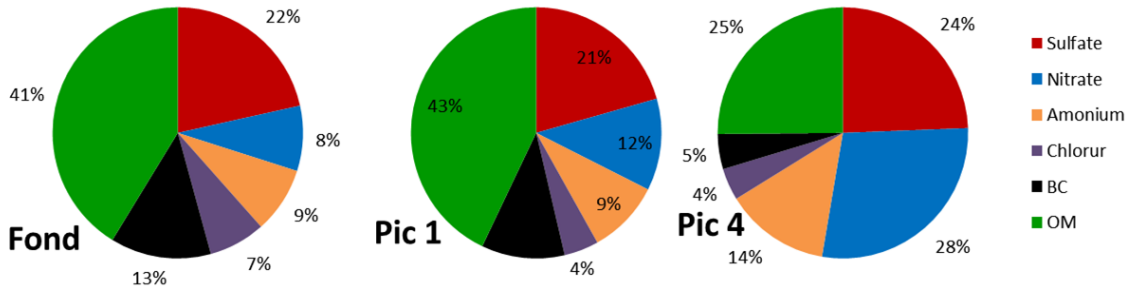


Figure 98 : Composition chimique de l'aérosol (PM2.5) modélisée par le modèle CHIMERE à 1km sur le domaine de l'Etang de Berre extraite au niveau des mesures de l'AMS.

Ces résultats mettent ainsi en évidence l'intérêt du couplage des modèles eulériens avec des modélisations de panaches sous mailles pour étudier les impacts en champs proches de sources ponctuelles.

3.5. Modèle dispersion fine échelle SLAM

3.5.1. Description des simulations

Pour représenter la complexité du site industriel et du relief escarpé, le choix du modèle de dispersion s'est orienté vers un modèle 3D Lagrangien prenant en compte la turbulence dans les écoulements d'air sur le site d'étude.

Le code de calcul utilisé, SLAM (Safety Lagrangian Atmospheric Model), a été développé par le LMFA (Laboratoire de Mécanique de Fluides et Acoustique) [Vendel, 2011] en réponse aux problématiques de dispersion avec prise en compte des obstacles complexes.

3.5.2. Maquette et maillage du site industrielle

Il a été fait le choix de réaliser une maquette représentant un domaine suffisamment grand pour représenter la situation d'émission du site, soit environ 20 km x 20 km x 2 km. Le maillage a été réalisé de sorte à obtenir un raffinement de l'ordre du mètre en certains points pour être cohérent avec la résolution des mesures effectuées lors des campagnes.

La
Figure 99 donne une visualisation de la maquette réalisée et rend de la complexité de la topographie. D'autre part la Figure 100 montre un exemple de maillage notamment autour des bacs de stockage et des bâtiments présents sur le site industriel.

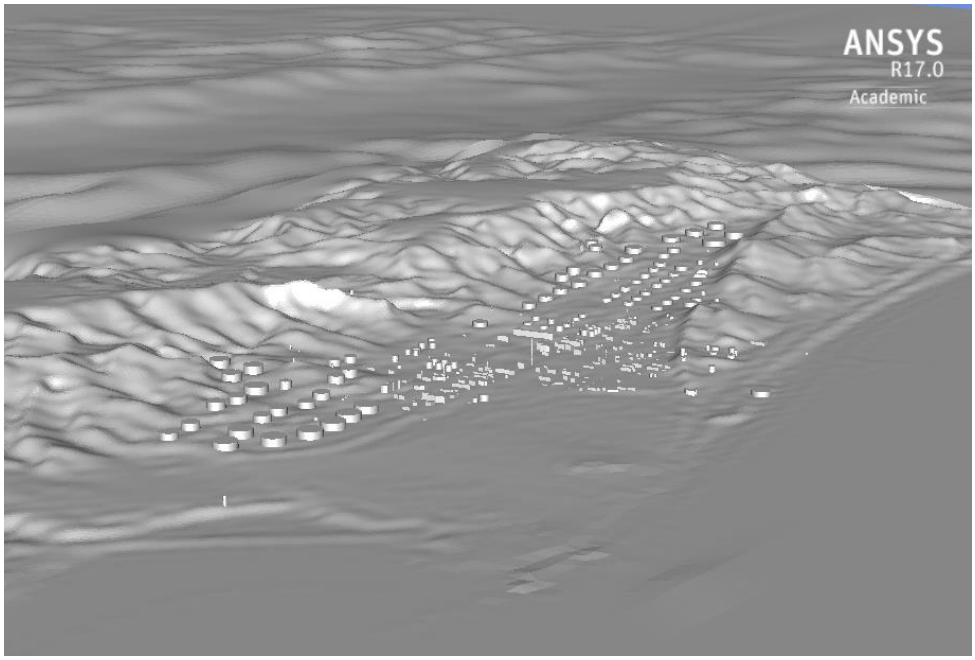


Figure 99 - Maquette 3D du site industriel et son voisinage

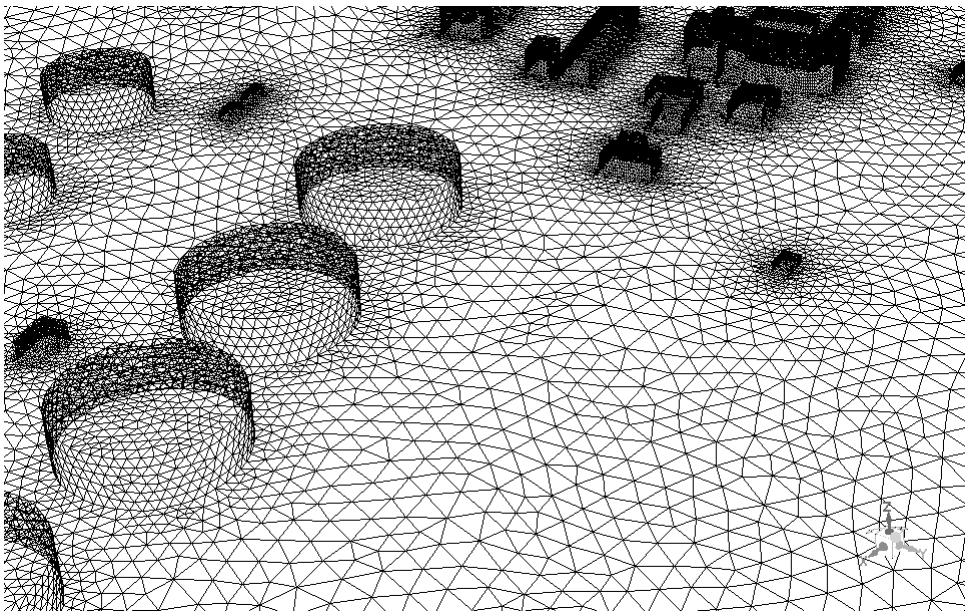


Figure 100 - Maillage de la maquette 3D au niveau de bacs de stockage

3.5.3. **Base de données de champ de vents**

Le calcul de dispersion des particules fluides par SLAM s'effectue à partir d'une base de données de champs de vents caractéristiques du site étudié. Ces champs de vents ont pour but de modéliser la dynamique des écoulements turbulents de masses d'air dans la couche limite atmosphérique au niveau du site industriel.

La base de données est réalisée par une série de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics) en condition stationnaire pour un nombre de direction et de stabilité atmosphérique représentative de la période de la campagne de mesure.
Puis,à partir d'une mesure météorologique locale, une interpolation des champs météorologique de la base de donnée conduit à un champ découlement représentatif de la condition météorologique réelle.
Le calcul de dispersion Lagrangien permet ainsi de reproduire les évolutions météorologiques.
Les données d'entrée sont alors :

- les débits des sources et les polluants émis
- la base de données de champs de vents
- la position des récepteurs sur la maquette 3D (qui correspondent aux points de mesure)
- les conditions météorologiques à savoir la direction du vent, la vitesse de frottement u_*, la température ainsi que la longueur de Monin-Obukhov L_{MO}.

La
Figure 101 est une visualisation d'un exemple de champs eulérien par vent de nord simulé sur le domaine. On remarque entre autres que les écoulements autour des obstacles mais également l'accélération subie lors du franchissement de la colline, sont cohérents.

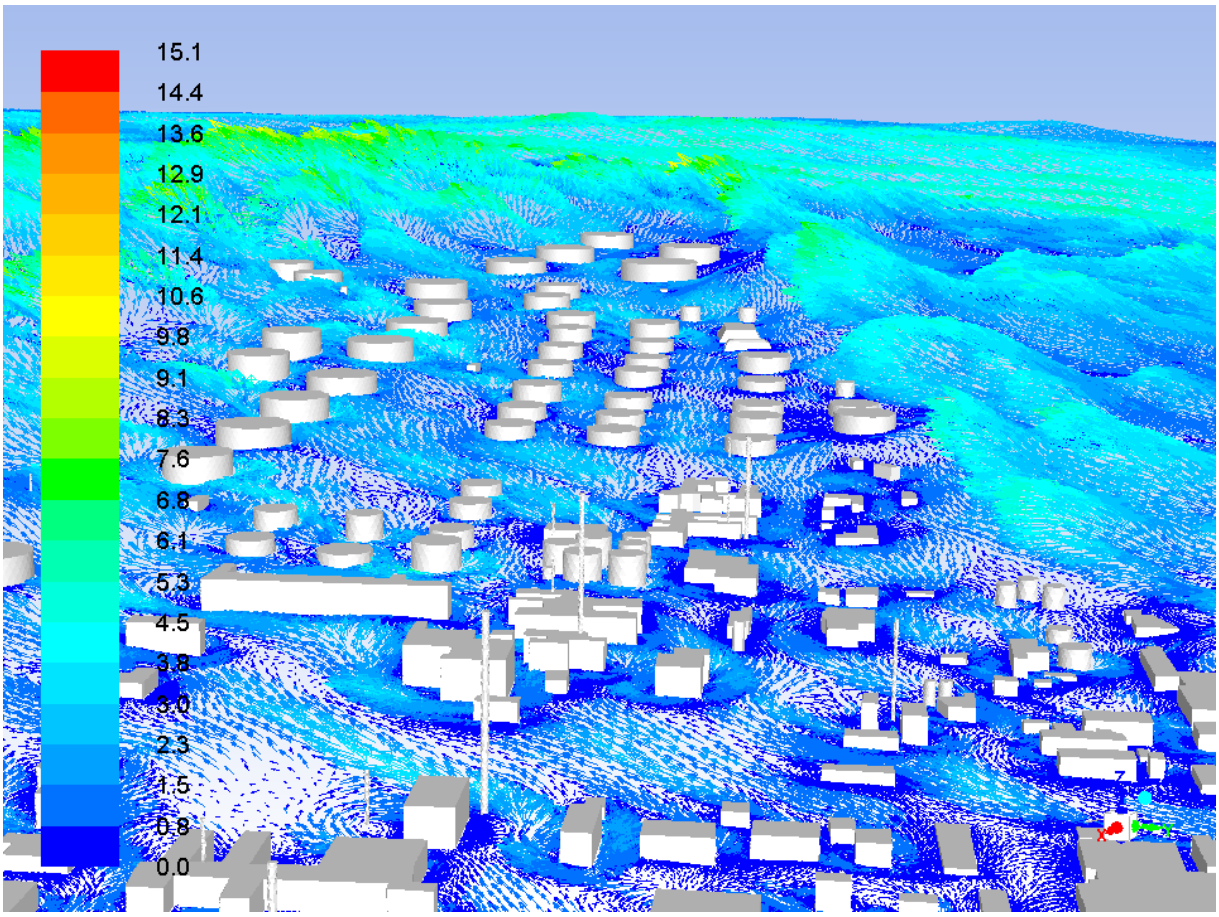


Figure 101 : Visualisation du champ de vents au sol sur le site industriel simulé par ANSYS Fluent pour la réalisation de la base de données (échelle colorée : vitesse du vent en m/s)

3.5.4. Dispersion des polluants

Prise en compte des forces volumiques

L'étape de dispersion s'effectue via le modèle SLAM et jusqu'ici l'utilisation de celui-ci se restreignait aux polluants gazeux. Or dans le cadre du projet TEMMAS, on s'intéresse également à la dispersion des polluants de type aérosol. Il a été nécessaire de rajouter au modèle une composante de sédimentation des particules (travaux par LMFA) du fait qu'elles sont sensibles à la gravité lors du transport. La formulation retenue prend en compte la densité et la granulométrie des particules [Schiller et Neumann, 1935]:

$$u_T = \frac{\rho_p}{\rho_a}\frac{g d_p^2}{18\nu}\left[1 + 0.15\left(\frac{d_p u_T}{\nu}\right)^{-0.687}\right]^{-1} \qquad (5)$$

où u_T représente la vitesse terminale de chute des particules, ρ_p leur masses volumiques, ρ_a la masse volumique de l'air, d_p le diamètre des particules, v la viscosité cinématique et g l'accélération de la pesanteur. Cette vitesse de chute est alors prise en compte en l'ajoutant à la vitesse de la particule fluide [Duman et al, 2016].

Calculs SLAM et étape de validation par la mesure

La base de données de champ de vents contient maintenant assez d'éléments pour lancer les calculs SLAM qui sont en cours. La
Figure 102 montre une visualisation du panache de polluants après une première itération de calcul SLAM.

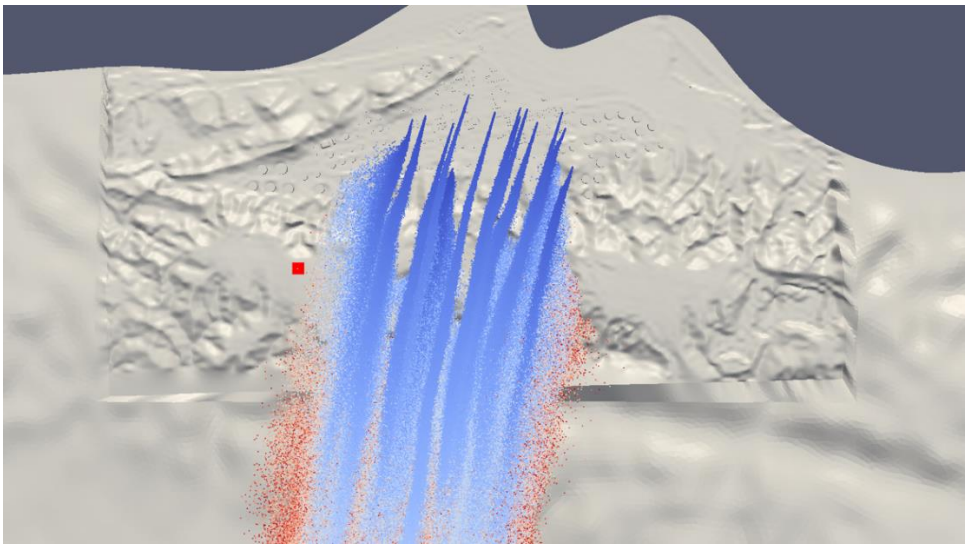


Figure 102 – Visualisation du panache de polluants après calcul SLAM

Ces résultats seront comparés aux mesures sols (plateforme Massalya et Airpaca) et au mesure par caméra hyper spectrale embarquée.

4. BILAN – SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS

4.1. Bilan des analyses des prélèvements atmosphériques

La chaine de prélèvement et d'analyse des filtres a été opérationnelle durant les deux campagnes. L'analyse chimique a été réalisée sur une quarantaine de filtres couvrant toutes les stations de prélèvements (quatre stations situées sur le site de la raffinerie et trois stations situées autour de la raffinerie). Elle a permis de caractériser de façon plus fine la composition chimique de l'aérosol par la mesure de composés organiques et inorganiques, de la matière carbonée et des métaux et éléments traces.

L'ensemble des filtres analysés a montré une contribution majoritaire de la matière organique et des sulfates à la masse de l'aérosol identifiée, le carbone élémentaire, les autres ions majeurs (ammonium et nitrates) et les métaux étant présents en plus faibles proportions. La variabilité saisonnière du carbone organique a pu être observée avec des valeurs maximales en hiver lorsque la combustion de biomasse est une source significative.

Cependant, la spéciation de la matière organique et l'analyse des métaux n'a pas clairement fait ressortir de marqueur ou une signature chimique pouvant être attribué aux émissions de la raffinerie. Du fait du caractère ponctuel des épisodes propices à l'observation des panaches venant de la raffinerie ainsi que du caractère ultrafin des particules, qui finalement apporte peu de poids sur la concentration massique totale, le prélèvement des particules PM2.5 sur une plage horaire de 24 heures s'est révélé peu adapté à cet objectif.

4.2. Bilan des mesures « on line »

En ce qui concerne les mesures en ligne, tous les instruments de la plateforme Massalya ont été opérationnels durant les deux campagnes. L'analyse de l'aérosol avec un pas de mesure de l'ordre de la minute a permis de capter ponctuellement les panaches provenant du site industriel lorsque les conditions météo étaient favorables. Ces mesures à haute résolution temporelle sont parfaitement adaptées à l'échelle de temps des phénomènes physiques (conditions météorologiques, dynamique atmosphérique) et pour ce type d'environnement où les sources d'émission sont multiples.

L'aérosol en provenance de la raffinerie s'est caractérisé par :

- Des particules ultrafines (diamètre < 150 nm) avec une distribution granulométrie centrée autour de 50 nm.
- Une composition chimique chargée en sulfates dont la neutralisation par l'ammonium n'est que partielle.
- Des pics ponctuels de particules atteignant un nombre total de 80 000 particules/cm^3 (campagne de septembre 2015) et de 60 000 particules/cm^3 (campagne de février 2016) alors que la concentration moyenne du fond était en moyenne de 5 000 particules/cm^3.
- Des concentrations massiques en PM1 comprises entre 20 et 40 µg/m^3 lors des pics de particules.
- Des COV composés majoritairement d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques dont les roses de vent suggèrent une provenance des cuves de stockage de la raffinerie.

En plus de ces épisodes d'origine industrielle, le site a été impacté durant les deux campagnes par des arrivées de masses d'air plus lointaines, caractérisées par des particules de granulométrie plus grosses (autour de 300-400 nm) et associées à des concentrations plus élevées en nitrates et en matière organique, suggérant qu'il s'agissait d'un aérosol ayant déjà subi des processus de vieillissement.

4.3. Bilan des mesures hyperspectrales

Les panaches étudiés étaient peu chargés en aérosols comme cela a été mesuré sur les différents sites de prélèvement soit du fait des forts vents (campagne hivernale) ou du non fonctionnement de l'émissaire principal (campagne estivale), néanmoins les panaches des différents émissaires ont pu être identifiés et caractérisés.

L'étendue spatiale observable des panaches est comprise entre 30 et 100m de la source en moyenne et parfois plus dans le cas de la Torchère.

Les signatures spectrales en sortie de cheminée ont montré une présence majoritaire d'aérosols diffusants (sulfates) mais aussi de façon non négligeable la présence de suie avec un pourcentage de l'ordre de 10% pour la chaudière 11. Le mode ultrafin a été confirmé par la signature optique, avec une distribution granulométrique centrée autour de 50nm.

Par méthode différentielle, il a de plus été possible de quantifier spatialement l'impact des panaches et d'initier des estimations de débits massiques de façon cohérente avec les mesures par prélèvement réalisées, à savoir de l'ordre de 50kg/j pour la cheminée de la chaudière 11.

4.4. Bilan de la comparaison modélisation / mesures

Dans le cadre du projet TEMMAS, les modèles eulérien et Plume-in-Grid de Polyphemus ont été appliqués à l'échelle des Bouches-du-Rhône, dans le but d'évaluer leur aptitude à représenter les concentrations et la composition chimique des particules, et d'améliorer la représentation des panaches de la raffinerie dans la modélisation. À l'échelle du département, les deux modèles présentent des performances statistiques similaires, en comparaison aux mesures d'AirPACA. Pour la campagne d'été, les mesures de Lidar vent et des stations météorologiques ont été utilisées pour réaliser les simulations WRF, permettant une amélioration des performances statistiques (en particulier de la corrélation temporelle), en comparaison à la simulation de la campagne d'hiver, basée sur des simulations météorologiques non assimilées. À l'échelle locale, la modélisation « PinG » permet une représentation plus précise des panaches de la raffinerie. Aux stations de la Mède et STNA, les pics de concentrations attribuables aux émissions de la raffinerie sont ainsi bien représentés par le modèle « PinG », et non représentés par le modèle eulérien.
Les résultats de la campagne d'été ont été comparés aux mesures de PM1 réalisées par le LCE. La contribution de la raffinerie aux différentes fractions chimiques des PM1 apparaît bien représentée par le modèle « PinG ». Le suivi du nombre de particules, en parallèle de la concentration massique, a été ajouté au modèle « PinG », et évalué en comparaison aux mesures de l'OPC et du SMPS. Les deux modèles présentent de bonnes performances pour la modélisation du nombre de particules. Dans le cas des particules fines, l'approche « PinG » permet à nouveau une représentation améliorée des pics de particules fines attribuables à la raffinerie, non représentés dans le modèle eulérien du fait de la dilution trop importante des panaches.
Les comparaisons aux mesures des deux campagnes TEMMAS permettent de déterminer les points d'améliorations suivants :

- Sous-estimations des NO_x et PM_{10} du trafic : liées aux inventaires d'émissions. La représentation des PM_{10} peut être améliorée en incluant la resuspension des poussières par le vent et par le trafic.

- Composition des PM_1 : les fractions de BC et OM en période de pics sont sous-estimées. Ces sous-estimations sont en partie liées à la spéciation chimique appliquée aux émissions de la raffinerie, issue de l'inventaire d'AirPACA. La proportion de BC émise est faible, et la spéciation ne comprend pas d'OM. Cette spéciation pourra probablement être améliorée avec les mesures réalisées aux cheminées de la raffinerie.

- Sous-estimation du nombre de particules fines, en période de pics : en partie liée à la spéciation chimique. Cette sous-estimation peut être également liée à la distribution en taille des PM à l'émission, centrée sur des classes de tailles trop grosses.

5. CONCLUSIONS –PERSPECTIVES - RECOMMANDATIONS

Le projet TEMMAS a permis de réaliser deux campagnes de mesures à l'intérieur et dans la périphérie du site de la raffinerie de Provence en Septembre 2015 et Février 2016. Ces mesures in-situ et de télédétection ont permis de mettre en avant les émissions propres de la raffinerie par rapport au fond d'aérosol dans la zone de l'étang de Berre, à savoir des particules ultrafines (distribution granulométrique centrée sur 50nm) composés majoritairement de sulfates et en proportion moindre de carbone élémentaire (suie). Les concentrations relevées sur les différents sites de prélèvement ont montré que durant les deux campagnes les seuils réglementaires n'ont pas été dépassés, l'influence de la raffinerie dans le premier kilomètre se traduit par une augmentation maximum de l'ordre 20µg/m^3 lors des deux campagnes.

Les mesures de télédétection hyperspectrales au niveau des émissaires principaux ont montré qu'effectivement les panaches étaient peu denses à l'émission, et que la distribution granulométrique et le rapport sulfate/suie étaient très similaires aux mesures réalisées dans l'environnement proche. De même, les prélèvements à l'intérieur et à l'extérieur de la raffinerie sont très cohérents en termes de types d'aérosols ; aucune modification notable n'a pu être mise en évidence entre la raffinerie et son environnement proche.

Les nouveaux outils de modélisation fine échelle ont montré que leur utilisation permettait de bien rendre compte des mesures réalisées en bordure du site ce qui constitue un réel apport en terme de modélisation d'impact et de prévision de la qualité de l'air à l'échelle locale.

Enfin, les partenaires sont unanimes sur le fait que ce type d'étude nécessite des campagnes de mesures plus longues, afin de maximiser les chances de rencontrer des conditions climatiques favorables (absence de pluie, vent modéré et inversion thermique pour la campagne hivernale en particulier), et de pouvoir palier à des problèmes instrumentaux (absence de mesures Lidars aérosols et de profils verticaux d'aérosols en particulier pour cette campagne suite à des aléas techniques).

Il pourrait donc s'avérer pertinent, dans le cadre de futurs projets, de prévoir un suivi temporel plus régulier sur les sites étudiés et d'identifier des installations industrielles ayant un impact environnemental plus conséquent, ce qui permettrait de consolider les comparaisons entre les mesures aéroportées, la modélisation et les mesures sols, ainsi que la procédure d'estimation de débits massique par imagerie hyperspectrale. En effet, la figure ci-dessous illustre bien le potentiel de l'imagerie hyperspectrale comme moyen de caractériser spatialement les panaches sur des distances kilométriques, et donc de réaliser des comparaisons pertinentes avec la modélisation fine échelle.

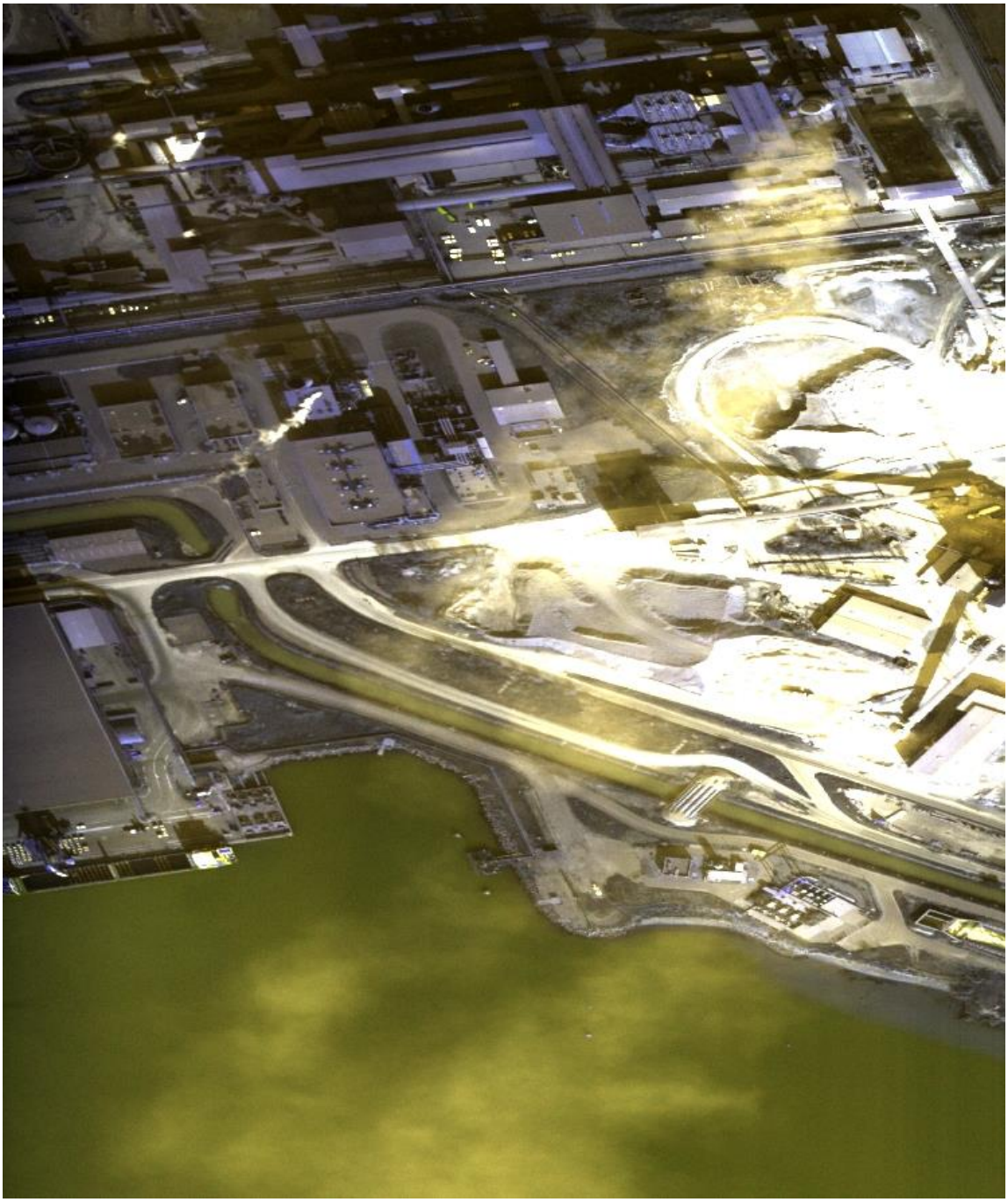


Figure 103 : Visualisation d'un panache sur le site de Fos (Industrie Métallurgique). Composition colorée obtenue à partir d'une image hyperspectrale acquise dans les mêmes conditions que les mesures TEMMAS..

Références bibliographiques

- Briant, R. and C. Seigneur and M. Gadrat and C. Bugajny. (2013). Evaluation of roadway Gaussian plume models with large-scale measurement campaigns. Geosci. Model Dev. vol. 6, 445-456, doi :10.5194/gmd-6-445-2013
- Byun, D. W., Schere, K. L. (2006). Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. Appl. Mech., Rev., 59: 51-77.
- Foucher, Massoubre, Plante, Drouaire, Lapeyrie, Marty, Mathiot, Virga, Armengaud, Hallet, Juery, Bertrand, Mengozzi, Wioland, Bourasse, Fauque : TEMMAS : rapport d'avancement 1. Plan de réalisation de campagne de mesures de propriétés des aérosols atmosphériques sur le site de la raffinerie de la Mède réalisée en septembre 2015. ADEME. 43p., avril 2016.
- Foucher, Massoubre, Plante, Drouaire, Lapeyrie, Marty, Mathiot, Virga, Armengaud, Hallet, Juery, Bertrand, Mengozzi, Wioland, Bourasse, Fauque : TEMMAS : rapport d'avancement 1. Plan de réalisation de campagne de mesures de propriétés des aérosols atmosphériques sur le site de la raffinerie de la Mède réalisée en février 2016. ADEME. 44p., décembre 2016
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P. I., Geron, C. (2006). Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). Atmos. Chem. Phys., 6: 3181-3210.
- Jaeglé, L., Quinn, P. K, Bates, T. S., Alexander, B., Lin, J.-T. (2011). Global distribution of sea salt aerosols: new constraints from in situ and remote sensing observations. Atmos. Chem. Phys., 11 : 3137-3157
- Karamchandani, P., Vijayaraghavan, K., Yen, S., Seigneur, C. et Edgerton, E. (2006). Plume-in-grid modeling for particulate matter. Atmos. Env., 40(38): 72807297
- Kim, Y., Seigneur, C. and Duclaux, O. (2014). Development of a plume-in-grid model for industrial point and volume sources : application to power plant and refinery sources in the Paris region. Geosci. Model Dev., 7, 569-585, doi :10.5194/gmd-7-596-2014
- Seigneur, C., T.W. Tesche, P.M. Roth and M.K. Liu (1983). On the treatment of point source emissions in urban air quality modeling, *Atmos. Environ.*, *17, 1655-1676*.
- de Leeuw, G., S. Kinne, J.-F. Léon, J. Pelon, D. Rosenfeld, M. Schaap, P. Veefkind, B. Veihelman, B., and D.M. Winker. Retrieval of aerosol properties. In J.B. Burrows, U. Platt & P. Borrell (Eds.), Remote sensing of tropospheric composition from space (p. 536): Springer, 2011.
- Cros, B. et al., The ESCOMPTE program: An overview, Atmos. Res., 69, 241-279, 2004.
- Boyouk, N., J.-F. Léon, H. Delbarre, P. Augustin, M. Fourmentin, Impact of sea breeze on vertical structure of aerosol optical properties in Dunkerque area, France, Atmos. Res., 101, 902-910, 2011.
- Malavelle, F., V. Pont, M. Mallet, F. Solmon, B. Johnson, J.-F. Léon, C. Liousse, Simulation of aerosol radiative effects over West Africa during DABEX and AMMA SOP-0, J. Geophys. Res.,116, D08205, 10.1029/14829, 2011.
- Mallet, M., L. Gomes, F. Solmon, K. Sellegri, V. Pont, J.C. Roger, T. Missamou and J. Piazzola, Calculations of key optical properties over the main anthropogenic aerosols over the Western French

coastal Mediterranean Sea, Atmos. Res., Vol. 101, doi:10.1016/j.atmosres.2011.03.008, 396-411, 2011.

- Solmon, F., N. Elguindi, M. Mallet, Evaluation of dust aerosol climatic impacts over West Africa as simulated by a regional climate model, Climate Research, Vol. 52:97-113, doi: 10.3354/cr01039, 2012.
- Péré, J.C., M. Mallet, V. Pont and B. Bessagnet, Impact of aerosol direct radiative forcing on the
- Veselovskii, I., A. Kolgotin, V. Griaznov, D. Müller, U. Wandingen, and D. N. Whiteman, 2002: Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding. *Appl. Opt.*, **41,** 3685-3699.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (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, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer et du ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

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.

EXPERTISES

PROJET TEMMAS

Résumé
Le projet TEMMAS : Télédétection, Mesures in-situ et Modélisation des polluants atmosphériques industriels a pour objectif de mettre en synergie les techniques de caractérisation optiques par télédétection avec les mesures in situ d'analyses des propriétés microphysiques des rejets atmosphériques d'un site industriel afin d'améliorer la compréhension de l'évolution des aérosols dans l'environnement proche et la modélisation de la qualité de l'air à fine échelle.

Dans ce cadre, deux campagnes de mesures ont été réalisées sur le site de la raffinerie TOTAL de La Mède.

Les résultats obtenus montrent de façon claire qu'il est possible de mettre en correspondance les propriétés microphysiques des aérosols avec les gaz traceurs de panache à partir de mesures sol et qu'il est possible d'associer à chaque condition de vent une ou des sources principales (raffinerie, réseau routier, air maritime,…) pour les différents points de collecte au sol. Si la cartographie des aérosols par Lidar n'a pu être réalisée suite à différents problèmes techniques lors des campagnes, les acquisitions d'images hyperspectrales ont montré la possibilité de localiser les sources d'aérosols et d'identifier le type et l'épaisseur optique en bonne adéquation avec les données sol. Enfin l'exercice de modélisation fine échelle réalisé a montré qu'il était possible de reproduire la dispersion du panache avec une très bonne résolution spatiale avec des résultats en bonne cohérence avec les mesures sols.