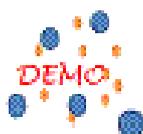


## MESURE DU DEPOT ATMOSPHERIQUE ET VALIDATION DE SA REPRESENTATION DANS LES MODELES REGIONAUX (DEMO)



## ATMOSPHERIC DEPOSITION MEASUREMENT AND VALIDATION OF DEPOSITION INTO REGIONAL MODELS (DEMO)

Programme PRIMEQUAL 2

Rapport de fin de contrat

G. Bergametti<sup>1</sup>, B. Laurent<sup>1</sup>, R. Losno<sup>1</sup>, J. Vincent<sup>1</sup>, E. Bon Nguyen<sup>1</sup>, S. Chevaillier<sup>1</sup>,  
N. Ouboulmane<sup>1</sup>, C. Schmechtig<sup>1</sup>, G. Siour<sup>1</sup>, P. Coddeville<sup>2</sup>, S. Sauvage<sup>2</sup>

*avec le concours de P. Roulet (ICARE)*



<sup>1</sup>LISA, UMR CNRS 7583, Université Paris Est-Créteil, Université Paris-Diderot

<sup>2</sup>Mines Douai, Département Sciences de l'Atmosphère et Génie de l'Environnement (SAGE)

Responsable du projet :

G. Bergametti, LISA



15/01/2014

N° de contrat : 0962c0067

Date du contrat : 17/12/2013

## **Résumé du projet**

Le dépôt est un des termes prépondérants du bilan de masse des espèces particulaires atmosphériques à distance des sources. Ce terme est aujourd'hui peu contraint dans les modèles régionaux de transport d'aérosols en raison du nombre insuffisant de mesures adaptées. L'objectif de ce projet est de tester à partir de mesures de dépôt réalisées dans des conditions similaires sur différents sites distants de plus de 2000 km le champ de dépôt simulé par de tels modèles. La stratégie vise à s'intéresser au dépôt des poussières sahariennes en Méditerranée occidentale et dans le sud de la France dans la mesure où ces espèces sont peu réactives et que les événements de dépôts associés sont généralement intenses donc facilement mesurables. Par ailleurs, les trajectoires de ces panaches sont bien établies et permettent en conséquence de définir une stratégie d'échantillonnage optimale. Enfin, ces poussières sont très souvent responsables des dépassements de seuil en PM10 observés au moins dans le sud de la France. Un collecteur spécifique et automatique (CARAGA) développé dans le cadre de ce projet a été implanté sur six sites où les données complémentaires à l'interprétation des données collectées et à la validation des modèles (épaisseur optique, concentrations en PM10, distribution en taille) sont disponibles (réseau MOOSE, dispositif MERA, station de Lampedusa, Observatoire de Corse). Ce projet a bénéficié du contexte de la composante ChArMEx du programme MISTRALS qui lui a fourni à la fois de nouvelles données complémentaires et qui a permis d'étendre la durée des mesures des dépôts. L'échantillonnage réalisé simultanément et de manière identique par les CARAGA a permis d'acquérir un jeu de données unique pour étudier la variabilité spatiale et temporelle de l'occurrence et de l'intensité des dépôts sahariens en masse (sur la période 2011-2013). Le caractère pulsé des événements de dépôts sahariens est observé avec 10 événements de dépôt majeurs échantillonnés à Lampedusa et 6 à Majorque sur une période d'une année. Par ailleurs, le gradient sud-nord de l'intensité de ces dépôts est quantifié (maxima observés : 2,66 g.m<sup>-2</sup> à Lampedusa ; 0,54 g.m<sup>-2</sup> à Majorque ; 0,33 g.m<sup>-2</sup> au Frioul ; 0,16 g.m<sup>-2</sup> au Casset). Enfin, les champs de dépôts sec et humide simulés avec le modèle de chimie-transport CHIMERE sont confrontés à ce jeu de données et la pertinence des paramétrisations de dépôt discutées.

**Mots-clés :** *Dépôt atmosphérique, mesure, modèles, Méditerranée, poussières sahariennes*

## **Project summary**

Deposition is one of the major terms controlling the mass budget of the atmospheric particulate matter far from its sources. However, this term is always poorly constrained in regional aerosol transport models mainly because the number of relevant deposition measurements is very limited. This project aims to test the deposition field as simulated by models by comparing it with new deposition measurements performed in similar conditions and obtained over sites distant from 2000 km. The strategy is based on the measurements of Saharan dust deposition over the Western Mediterranean Sea and South of France. The special interest given to this species is mainly due to their low atmospheric reactivity and to the high intensity of dust events which made deposition measurement quite easy. Moreover, the trajectory of dust events over the Mediterranean and the South of France are well known allowing to define a precise sampling strategy. Lastly, this dust is very often responsible for the goings beyond of threshold in PM10 observed at least in the south of France. A specific and automatic collector (CARAGA) developed within the framework of this project has been deployed on six sites where the data complementary to interpretation of the collected data and the validation of the models (optical thickness, concentrations in PM10, size distribution) are available (MOOSE network, MERA stations, stations of Lampedusa, Corsica Observatory). This project has benefited from the context of ChArMEx, a component of the MISTRALS Program, which provided complementary data and allowed to extent the duration of the deposition measurements. The sampling was performed simultaneously and identically by using the CARAGA samplers has allowed to obtain a unique data set in order to study the spatial and temporal variability of the occurrence and intensity of Saharan dust deposition (over the period 2011-2013). The pulsed nature of the Saharan events is observed with 10 major deposition events collected in Lampedusa and 6 in Mallorca over a period of one year. Moreover, the south-north gradient in the intensity of these deposits has been quantified (maxima observed: 2.66 g m<sup>-2</sup> to Lampedusa 0.54 gm<sup>-2</sup> in Mallorca, 0.33 gm<sup>-2</sup> at Frioul, 0, 16 gm<sup>-2</sup> at Le Casset). Finally, simulated fields of dry and wet deposition obtained with the chemistry-transport

model CHIMERE have been compared to this dataset and the relevance of the existing parameterizations for deposition processes are discussed.

**Key-words:** *Deposition, measurement, models, Mediterranean Sea, Saharan dust*

## 1- CONTEXTE

Le contenu de l'atmosphère en polluants particuliers dépend de l'intensité relative des sources et des puits. Le poids relatif de ces deux termes (sources vs puits) sur le contenu atmosphérique évolue au cours du transport. Si l'on prend le cas simple des espèces primaires, on comprend aisément qu'à proximité des sources, les émissions sont le terme prépondérant expliquant le niveau et la variabilité des concentrations observées. A l'inverse, au fur et à mesure que l'on s'éloigne des zones d'émission, c'est à dire plus le transport s'effectue sur de longues distances, plus les termes puits (en l'occurrence les dépôts sec et humide) vont devenir prépondérants dans le bilan de masse des espèces particulières. En conséquence, dès lors que l'on va s'intéresser au transport à longues distances, une attention particulière doit être apportée à une représentation correcte de ces termes de dépôt, et en particulier à leur représentation dans les modèles.

Ces termes de dépôt sont censés être bien connus pour les particules : la physique du dépôt sec, au moins en atmosphère calme, est correctement décrite au travers d'une représentation des termes de sédimentation, d'impaction et de diffusion brownienne dans un schéma de résistances en série (voir par exemple, *Slinn and Slinn, 1980 ; Wesely, 1989 ; Venkatram and Pleim, 1989*). Pour le dépôt humide, si les principes de base sont bien posés (incorporation des particules dans les nuages, lessivage sous nuages) (voir par exemple, *Zender et al., 2003 ; Garcia Nieto et al., 2004*) et les variables impliquées bien identifiées (propriétés hygroscopiques, taille...), des incertitudes demeurent sur la façon de traiter au mieux ces dépendances dans les modèles. Cependant, la plupart de ces paramétrisations ont été testées dans des conditions contrôlées (souvent en soufflerie) et l'on ne dispose que de très peu de données expérimentales en conditions réelles pour conforter leur application. De fait, la plupart des simulations d'aérosol sont généralement validées uniquement à partir de mesures de concentrations ou d'épaisseur d'optique. Ceci est insuffisant compte tenu du fait que le bilan de masse n'est pas contraint, les émissions utilisées en entrée des modèles étant généralement entachées d'une forte incertitude. Il est donc indispensable pour s'assurer de la cohérence des simulations de valider les sorties des modèles sur au moins deux des trois termes du bilan de masse (émissions, contenu atmosphérique et dépôt. Evidemment, les plus facilement accessibles par la mesure sont le contenu atmosphérique (via les concentrations ou les épaisseurs optiques qui peuvent servir de proxy) et le dépôt.

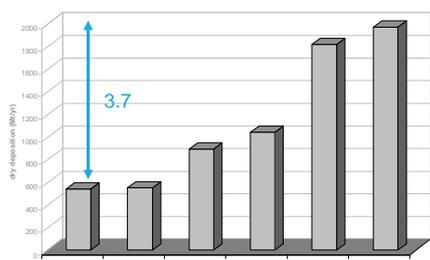
Une illustration de cette absence de contrainte sur le bilan de masse des modèles d'aérosols est illustrée par la figure 1 tirée des résultats de l'exercice d'intercalibration des modèles de poussières AEROCOM (*Textor et al., 2006 ; 2007*). Cette figure montre que les différents modèles divergent très fortement dans leurs estimations des flux de dépôt. Dans le cas où les modèles fonctionnent dans leur configuration nominale (expérience A : chacun fait ses simulations avec les émissions, distributions, en taille, etc... qui lui paraissent les meilleures), les écarts entre les flux de dépôts sec et humide simulés par les différents modèles atteignent un facteur 2 à 3. Plus inquiétant en ce qui concerne la représentation du dépôt dans les modèles est l'expérience B. Dans ce cas, ces mêmes modèles utilisent tous une distribution en taille, des flux d'émission et des hauteurs d'injection identiques. On observe que si les écarts sur le dépôt sec sont très légèrement réduits (un facteur 2 demeure néanmoins !), les écarts sur le dépôt humide sont très amplifiés puisqu'ils atteignent un facteur 7 ! Ce résultat montre clairement qu'il existe des incertitudes très fortes sur la représentation du dépôt dans les modèles d'aérosols et ceci bien que tous ces modèles reproduisent assez correctement les épaisseurs optiques mesurées. Ces divergences des modèles sur le terme de dépôt ont des conséquences importantes sur le temps de résidence des particules (c'est dire le rapport du contenu atmosphérique

sur les puits ou sur les sources). En effet, les temps de résidence simulés par ces modèles sont compris entre 1,5 et 7 jours c'est à dire des temps de résidence traduisant des aptitudes très différentes de ces particules au transport à longues distances. Enfin, l'absence forte de contraintes sur le dépôt rend également difficile toute évaluation de la précision avec laquelle les émissions sont connues : en effet, le dépôt étant, sur une échelle de temps suffisamment longue, égal aux émissions, sa connaissance précise permettrait d'apporter une contrainte supplémentaire sur les inventaires d'émission. Dans le cas cité en exemple ici, les différences sur les émissions entre les modèles sont évidemment exactement égales à celle sur le dépôt total soit un facteur 4.

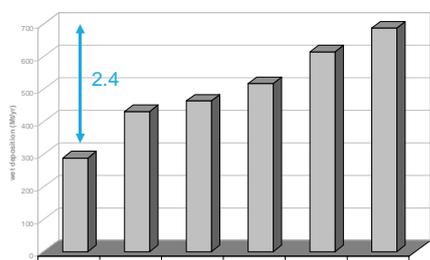
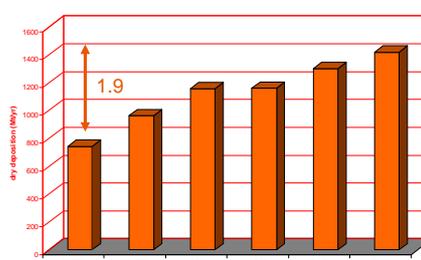
Pour partie, l'absence d'études approfondies du dépôt et de la qualité de sa représentation dans les modèles est liée au faible nombre de mesures disponibles pour les espèces particulières. Compte tenu de leur intérêt en termes d'impacts sur la santé ou les écosystèmes, les réseaux de mesures de dépôt existants se sont naturellement focalisés sur la mesure d'espèces sulfatées ou nitrées ayant une composante secondaire importante. Le fait qu'une partie non négligeable des concentrations ou dépôt mesurés résultent de transformations chimiques ayant lieu au cours du transport rend moins directe l'utilisation de ces mesures pour qualifier directement la représentation des termes de dépôt dans les modèles (une part des écarts observés pouvant en effet résulter d'une mauvaise représentation de la chimie de ces espèces dans ces modèles).

L'objectif du projet DEMO était donc de mettre en place un ensemble de mesures permettant de contraindre du mieux possible la représentation des termes de dépôt dans les modèles de chimie transport d'échelle régionale. Il visait donc à assurer non seulement une représentation correcte des concentrations simulées à distance des sources mais également à vérifier que ces concentrations simulées ne sont pas correctes au détriment d'une sur ou sous-estimation du dépôt. Dit autrement, l'idée générale est de tester le bilan de masse dans les modèles, c'est-à-dire de se doter des moyens de s'assurer de la cohérence globale entre émissions, concentrations dans l'atmosphère et dépôt dans les simulations.

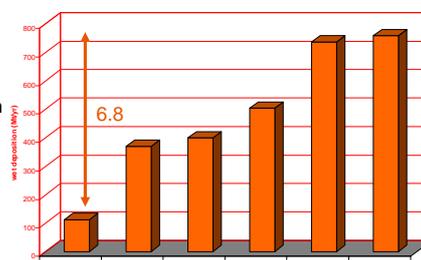
Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi de focaliser sur la mesure des espèces minérales, principalement celles liées aux événements de transport de poussières sahariennes sur la Méditerranée Occidentale et l'Europe.



Dry deposition



Wet deposition



**AEROCOM EXPERIENCE A**  
No constraint on dust sources

**AEROCOM EXPERIENCE B**  
Mass fluxes, injection height and emitted particle size prescribed

**Figure 1** : Intercomparaison des dépôts sec et humide dans différents modèles de chimie transport (cas des poussières minérales). L'expérience A correspond à des simulations réalisées dans les conditions standard de fonctionnement de chaque modèle. L'expérience B correspond à des simulations réalisées avec les mêmes modèles mais utilisant tous les mêmes émissions, la même distribution en taille et la même hauteur d'injection du panache (Bergametti and Dulac, 3<sup>rd</sup> International Dust Workshop, Leipzig, 2008).

Les raisons du choix de ces espèces sont les suivantes :

- les processus de dépôt sont très fortement dépendants de la taille des particules. Il est donc essentiel de tester la représentation du dépôt dans les modèles sur une large gamme de diamètre. Les poussières minérales présentent dans cette optique l'avantage de couvrir un spectre de taille large allant de quelques dixièmes de  $\mu\text{m}$  à une dizaine de  $\mu\text{m}$  ;

- les poussières minérales sont d'origine primaire et leur masse totale n'est que très peu affectée par les transformations chimiques subies au cours du transport, rendant plus direct le lien entre émission et dépôt ;

- ces épisodes de poussières sont suffisamment fréquents dans le bassin Méditerranéen (Bergametti et al., 1989 ; Löye-Pilot and Martin, 1996) et le sud de la France (une vingtaine d'évènements par an en moyenne) pour assurer un échantillonnage suffisamment important pour disposer d'un nombre raisonnable de cas d'études ;

- ces événements sont très intenses (ils sont responsables dans de nombreuses stations de surveillance de la qualité de l'air de dépassements de seuil d'alerte en PM) et permettent donc de réaliser des mesures précises ; ceci signifie que durant ces événements, la contribution des autres types d'aérosol à la masse totale déposée peut être négligée ;

- les sources sont géographiquement bien connues (le Sahara) et les trajectoires de transport bien identifiées (transport associé à des régimes de vent de sud) (Bergametti et al., 1989), il est aisé d'imaginer une stratégie expérimentale permettant de documenter le gradient de dépôt au cours du transport ;

- enfin, les proposants disposent d'une expertise internationalement reconnue sur l'étude de ces événements, tant en ce qui concerne la mesure de ces espèces que la modélisation de ces événements.

Le présent projet a été divisé en deux volets : un volet expérimental visant à disposer d'un jeu de données de dépôt en masse pertinent pour contraindre les champs simulés et un volet de modélisation visant à tester, vis-à-vis de ce jeu de données la qualité du dépôt dans les modèles.

## **2- VOLET EXPERIMENTAL**

Idéalement, le volet expérimental de ce projet aurait dû inclure des mesures de concentrations massiques des aérosols, des mesures de la distribution en taille, des mesures distinctes du dépôt sec et du dépôt humide. Compte tenu des contraintes spatiales et temporelles développées ci-dessous, un tel projet dépassait de beaucoup les possibilités financières de l'appel à propositions de recherche. Il a donc été focalisé sur le plan expérimental sur la mesure du dépôt total. Néanmoins, pour pallier ces limitations, le choix des sites de mesures a tenu compte de l'existence de stations déjà instrumentées de façon à bénéficier de mesures complémentaires ou de l'existence à proximité de mesures dans des stations des AASQA non urbaines.

### **2.1 QUELQUES CONTRAINTES A RESPECTER**

### *Contrainte spatiale*

Qualifier le dépôt dans les modèles de chimie-transport nécessite d'abord de s'assurer que la cohérence du gradient spatial du dépôt simulé est correct. En effet, le dépôt sec étant très dépendant de la taille des particules, son intensité décroît fortement au fur et à mesure que l'on s'éloigne des sources, et ce d'autant plus pour des espèces comme les poussières minérales qui ont un spectre en taille très étendu. Il est donc indispensable de disposer d'un ensemble de stations correctement réparties sur un transect nord-sud. Nous avons donc choisi d'instrumenter avec un collecteur automatique (voir ci-dessous) quatre stations situées dans le bassin méditerranéen et de nous appuyer sur certaines stations du dispositif MERA (Mesure et Evaluation en zone Rurale de la pollution Atmosphérique à longue distance), stations localisées en milieu rural en France continentale. Ceci permettait d'assurer une couverture spatiale suffisamment large pour tester le dépôt simulé tant en sortie du continent africain que sur le territoire national et de mesurer, pour un même événement, des flux de dépôt variant sur plusieurs ordres de grandeur.

L'objectif était donc d'instrumenter avec une **instrumentation homogène** six sites aussi représentatifs que possibles d'une atmosphère régionale et situés sur un gradient sud-nord, allant des côtes sud de la Méditerranée au Jura (figure 2). Les stations retenues sont :

La station de Lampedusa (Italie)

La station du Cap Corse

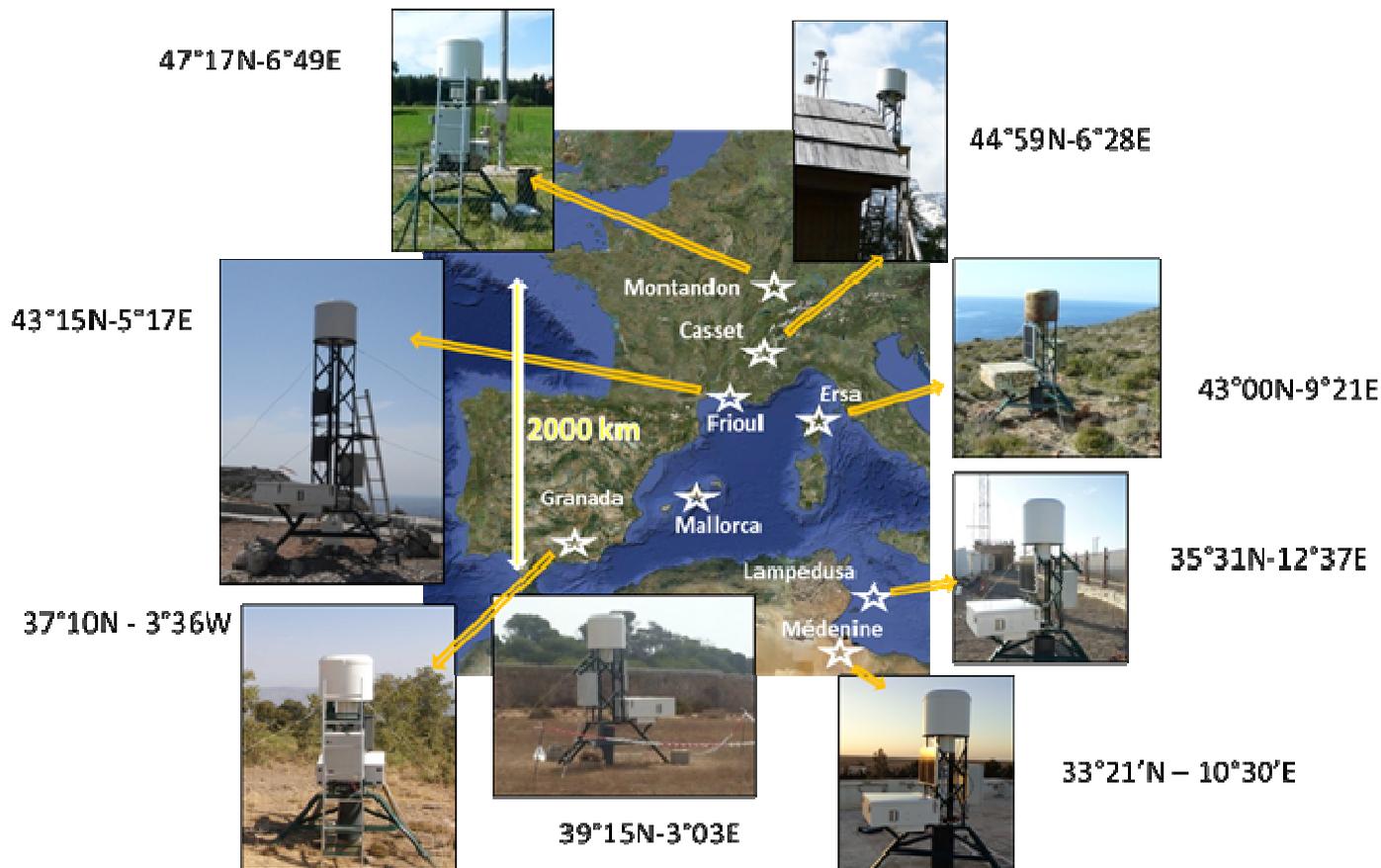
Une station située sur l'île de Majorque (Baléares, Espagne)

Une station du réseau Moose de l'INSU (l'île du Frioul)

Deux stations du dispositif MERA (les sites du Casset et de Montandon)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> On notera qu'en marge de ce projet, deux stations ont été équipées du même collecteur : une en Espagne dans la Sierra Nevada (sous la responsabilité du Dr Rafael Morales Baquero) et une à Medenine (Tunisie) dans le cadre d'une coopération entre le LISA et l'Institut des Régions Arides (Tunisie).



**Figure 2 :** Le réseau de mesures de dépôt installé en Méditerranée

La station de Lampedusa, île italienne située au large de la Tunisie, donc en sortie du continent africain permet de disposer de mesures caractéristiques d'un panache encore peu décanté où la composante liée au dépôt sec des plus grosses particules devrait donc être importante. Sur ce site se trouve une station permanente de surveillance climatique gérée par des collègues italiens de l'ENEA avec qui des contacts existaient depuis plusieurs années. Sur, cette station, qui était un des super sites du programme ChArMEx, sont disponibles, en plus des mesures de dépôt que nous avons mises en place, les données recueillies par cette station (mesures photométriques, lidar, mesures de flux radiatifs) de façon continue ou celles acquises par le laboratoire durant la SOP ChArMEx (juin-juillet 2013).

La station du Cap Corse est également un des super sites du programme ChArMEx. Elle est équipée de divers instruments de mesures des aérosols (photomètre, granulomètre, mesures chimiques...) ce qui permet de disposer des mesures complémentaires nécessaires.

La station du Frioul (à proximité de Marseille) est une des stations du réseau MOOSE (Mediterranean Ocean Observing System on Environment) de l'INSU. Elle est gérée par des personnels de l'OSU Pytheas qui ont assuré l'hébergement et la surveillance du matériel.

Enfin, les stations de Le Casset (Alpes) et de Montandon (Jura) sont des stations du réseau MERA (Mesure et Evaluation en zone Rurale de la pollution Atmosphérique à longue distance). Ce réseau coordonné par l'ADEME et constitué de 9 stations situées en zones rurales éloignées de sources directes de pollution, permet ainsi le suivi de l'acidité et de la composition chimique des eaux de pluie, des teneurs en ozone, de la gravimétrie des PM10 et, pour

certain sites, de la spéciation des COV et des aérosols. Nous avons choisi d'implanter des collecteurs dans la station du Casset qui est fréquemment soumise à des arrivées de poussières désertiques et dans celle de Montandon qui permettra de disposer d'un point de mesures à longue distance.

Un intérêt des stations du réseau MERA tient au fait que des mesures régulières du dépôt soluble y sont faites depuis plus de 15 ans. Parmi les espèces mesurées, le  $\text{Ca}^{++}$  est un bon indicateur des dépôts d'origine saharienne (Avila and Roda, 2002) et ces mesures permettent de donner de la profondeur temporelle aux mesures réalisées dans ce projet.

Cet ensemble de 6 sites, distants de plus de 2000 km, a permis de suivre l'évolution du dépôt au cours du transport de panaches sahariens et donc de tester la capacité des modèles à reproduire le gradient de dépôt.

### *Contrainte temporelle*

Une des caractéristiques des événements de transport de poussières désertiques est leur sporadicité. En effet, ces événements ne se produisent que quand les conditions nécessaires à leur émission depuis les zones désertiques sont remplies (en particulier la présence de vents forts) et que la situation météorologique est propice à leur transport vers l'Europe.

Une vingtaine d'événements de ce type est généralement observée chaque année dans le bassin méditerranéen occidental et le sud de la France. Ce caractère sporadique impliquait de mettre en œuvre des mesures continues si l'on souhaite échantillonner un nombre suffisant d'événements. La mise en œuvre de mesures continues sur un nombre relativement important de sites nécessite de disposer de systèmes de collecte aussi automatisés et autonomes que possible.

## 2.2 DESCRIPTION DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU COLLECTEUR DEVELOPPE

Pour répondre à ces contraintes, nous avons conçu un instrument spécifique, développé dans le cadre de cette étude, le CARAGA (Collecteur Autonome de Retombée Atmosphérique à Grande Autonomie). Cet instrument a été pensé pour être produit ensuite en petite série dans l'optique d'établir un réseau de collecte standardisé des flux de retombées insolubles<sup>2</sup> Il inclut une filtration passive en ligne pour éviter la conservation de gros volumes d'eau de pluie, un passeur de filtres de grande autonomie, et un panneau solaire pour pouvoir le déployer en zone isolée.

Plus précisément, l'instrument développé, appelé CARAGA (pour Collecteur Automatique de Retombées Atmosphériques insolubles à Grande Autonomie ; figure 2) se compose d'un collecteur ouvert de grande surface ( $0.2 \text{ m}^2$ ) équipé de systèmes vibrants et de rinçage pour minimiser l'accumulation sur les parois. L'eau de pluie ou de rinçage s'écoule vers un système Nalgène de porte-filtre à réservoir de liquide amont de façon à filtrer l'eau en ligne par gravité. Le filtrat est évacué. Un disque tournant motorisé permet de changer d'unité porte-filtre avec une fréquence déterminée. Pour assurer une autonomie d'au moins 1 mois, même avec un pas de temps court (1 jour), le disque porte vingt-cinq porte-filtres chargés en laboratoire et est conçu pour que l'opérateur puisse effectuer sur le terrain un échange standard du bloc de collecte sans intervenir sur chacun des porte-filtres. L'objectif est d'une part de standardiser la procédure et d'autre part de minimiser les interventions des opérateurs locaux. La structure de collecte repose sur un trépied ajustable aux irrégularités de surface de façon à positionner la surface de collecte suffisamment haut (2.5 m) pour minimiser la collecte de poussières de sol locales. Une centrale programmable permet de paramétrer le fonctionnement du système et un panneau solaire le rend autonome en énergie. Cet instrument a été réalisé en collaboration entre le LISA et la société ICARE.

---

<sup>2</sup> Outre les collecteurs installés en Espagne et Tunisie (voir ci-dessus), la Société ICARE qui commercialise ces instruments a vendu en Chine et a été contactée par le Pr Prospero en vue de l'installation de deux instruments à Miami.

Le premier prototype a été déployé à la station du Frioul mi-2010 pour une période d'environ 6 mois afin de détecter les éventuels problèmes de fonctionnement, et de réaliser ensuite les modifications nécessaires avant la fabrication de la série d'instruments opérationnels.

### 2.2.1 Résultats des tests de fonctionnement effectués à l'île du Frioul et modifications apportées au collecteur

Suite à la période de test du collecteur sur le site de l'île du Frioul, différentes modifications ont été apportées pour améliorer son fonctionnement ou pour faciliter sa maintenance :

- Le système de vibration de l'entonnoir (utilisé pour le décollement des particules des parois de l'entonnoir) était bridé par un montage trop ajusté de l'ensemble cuvelage, circuit de lavage et entonnoir. Ceci a été corrigé. Par ailleurs, le mode de fixation du système de vibration a dû être revu avec un montage sur supports souples et sans aspérité à l'intérieur du cône de prélèvement.

- Modification du raccord entre l'entonnoir et la tubulure d'échantillonnage avec un cône de raccordement en polyéthylène haute densité avec filetage permettant un raccordement du type «Swagelock » également en polyéthylène.

-Modification du module d'échantillonnage (barillet) :

- un renfort en acier a été installé pour éviter les déformations par forte chaleur ;

- un ressaut à l'intérieur du boîtier a été mis en place pour contenir et évacuer l'eau résultant d'un éventuel débordement des portes ;

- le bidon de lavage en polyéthylène a été remplacé par un bidon opaque avec couvercle à large col sur lequel sont fixés les raccords de tubulures.

- Problème des fortes pluies. Le système initial ne permettait pas d'assurer la filtration de la collecte en situation de pluie importante. La solution trouvée est un système qui bloque le remplissage du porte-filtre quand celui-ci est plein puis libère à nouveau l'écoulement dès que le niveau dans le porte-filtre a suffisamment baissé.

- Chauffage du corps de l'entonnoir au moyen de rubans chauffants et d'un bilame assurant le chauffage dès que la température est inférieure à 2°C a été ajouté pour les collecteurs qui équipent les sites du Casset et de Montandon, les plus exposés à des précipitations neigeuses ou du gel.

- Transport des échantillons. Ce sont les porte-filtres, tout équipés et avec leur couvercle, qui sont manipulés. Il est nécessaire qu'ils soient toujours manipulés en position verticale et une valise ad hoc a été conçue à cet effet.

Consécutivement à ces modifications et au temps requis pour la production en série, le déploiement progressif des instruments sur site a démarré mi- 2011.

L'échantillonnage a été réalisé avec une fréquence d'un échantillon toutes les semaines. La durée de l'échantillonnage prévu était d'une année mais a été prolongée dans le cadre de ChArMEx pour deux années supplémentaires.

### 2.2.2 Détermination de la masse collectée

#### a-Choix des filtres

Diverses contraintes pèsent sur le choix des filtres utilisés pour assurer la filtration des eaux de collecte. Une des plus importantes, compte-tenu du système de filtration passif par gravité, concerne la perte de charge du filtre et donc la vitesse d'écoulement. Une vitesse d'écoulement trop faible peut conduire à des débordements lors d'événements extrêmes.

Divers types de filtres intégrés ou non dans des systèmes de filtration ont été testés. Le test consistait à déterminer le temps nécessaire à écouler 100 ml d'eau pure à travers le filtre (pour un échantillon de volume total 200 ml).

Les filtres testés ont été (i) des filtres en polycarbonates de type Nucléopore AAX (47mm, 0.4  $\mu\text{m}$  de pore), (ii) des filtres nylon (47 mm, 0.45  $\mu\text{m}$  de pore), (iii) des filtres à usage unique en nitrate de cellulose, (iv) des filtres en ester de cellulose Millipore AA (47 mm, porosité 0.8  $\mu\text{m}$ ), (v) des filtres en fibre de quartz Whatman QMA sans pad 2.2  $\mu\text{m}$ .

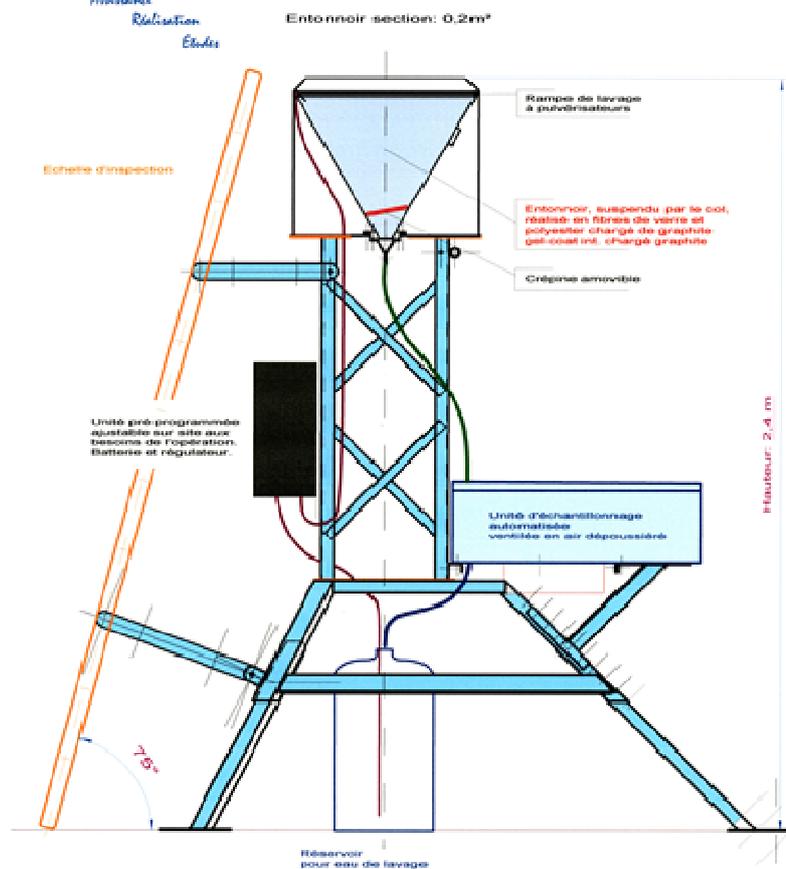
Les résultats ont montré que les filtres Millipore en ester de cellulose étaient ceux donnant les meilleurs résultats avec en particulier un temps de filtration très court de l'ordre de 5mn pour 100 ml.

Des tests additionnels concernant les éventuelles pertes de masse du filtre suite à au passage des 100 ml d'eau ont été réalisés. Des pesées de filtres ont donc été effectuées avant et après filtration. Après filtration, différents traitements ont été appliqués (1h à l'étuve 40°C, 3h à l'étuve 40°C, 17h à température ambiante, 23h à température ambiante). Les pesées sont réalisées dans une coupelle en aluminium pour éviter les variations dues à l'électrostatisme des matériaux en plastique. Pour résumer brièvement, les résultats montrent pas ou peu de perte de masse des filtres Millipore AA en ester de cellulose, l'essentiel de la variabilité provenant des mesures (0.3 mg +/- 0.1 mg).

#### b-Pesée et calcination

La pesée des premiers filtres collectés sur l'île du Frioul a révélé des contraintes particulières. En effet, les particules prélevées peuvent avoir un diamètre assez important (une dizaine de microns) et par conséquent peuvent ne pas bien adhérer au filtre. Une perte de matière lors de la manipulation est donc possible, malgré les précautions prises, en particulier pour les filtres les plus chargés. Par ailleurs, l'objectif étant de caractériser le dépôt des particules minérales, la présence de particules de pollution ou dérivées de composés biogéniques (par exemple d'aérosols organiques) peut, dans certaines conditions, affecter notablement la détermination de la masse d'aérosols minéraux déposés. Aussi, nous avons décidé de tester une procédure de pesée après calcination, procédure qui limite le nombre de manipulations et permet une destruction des particules ayant une forte volatilité comme c'est souvent le cas pour les aérosols organiques.

Différents tests comparatifs entre pesées directes et pesées après calcination ont donc été conduits à la fois sur des filtrations de proxy de poussières minérales (sol érodable tamisé de Douz en Tunisie et loess du Cap-Vert) (Tableau 1) et sur les premiers filtres collectés sur l'île du Frioul (Tableau 2).



**Figure 3** : Schéma de principe du collecteur automatique de retombées atmosphériques insolubles à grande autonomie (CARAGA).

Nous avons d'abord déterminé les masses résiduelles du filtre vierge après calcination et cela pour plusieurs cycles différents de calcination. La calcination des filtres vierges a démontré la destruction totale de ces filtres entre 350 et 550 °C. Les résultats ne montrent aucun résidu détectable statistiquement du filtre après calcination. Néanmoins, nous avons noté une variabilité après calcination des poids des creusets dans lesquels sont effectuées les pesées. Une pesée de ces creusets après calcination sans filtre a confirmé cette observation et a montré une variabilité des pesées des creusets de l'ordre du milligramme.

Après filtration d'échantillons de sol de Tunisie tamisé et du loess du Cap-Vert, différentes combinaisons (plafonds en température à 350 °C, 550 °C et 950°C) de calcination des filtres avec des programmes en 2 ou 3 étapes et des temps de montée et de tenue de plafond en température différents ont été testées. Pour éviter de perdre de

la matière pendant la calcination, les tests montrent qu'il faut contrôler la montée de température entre 200 et 350 °C au rythme d'un degré par minute.

Echantillons	Dépôt initial	filtre+ dépôt avant calcination	filtre + dépôt après calcination 350°C	filtre + dépôt après calcination 550°C	filtre + dépôt après calcination 950°C
Douz 1	0,126	0,215	0,131	0,122	0,113
Douz 2	0,134	0,217	0,137	0,128	0,119
Douz 3	0,257	0,337	0,260	0,251	0,240
Cap Vert 1	0,012	0,095	0,018	0,011	0,012
Cap Vert 2	0,012	0,098	0,015	0,011	0,012
Cap Vert 3	0,015	0,100	0,020	0,013	0,015

**Tableau 1 :** Résultats des comparaisons de pesée de filtration d'échantillons de sol de Douz (Tunisie) et de loess du Cap-Vert pour différentes procédures de calcination (en g/filtre).

Ces deux séries de tests n'ont pas révélé de limites supplémentaires au protocole. Les résultats montrent que la pesée directe et la pesée du calcinat donnent des résultats cohérents pour les échantillons de sol. Ces tests ont également confirmé que la précision de la calcination est de l'ordre du mg. Concernant les échantillons collectés au Frioul, les six premiers filtres n'avaient pas été pré-pesés et pour les six derniers aucun dépôt mesurable n'a été observé. Sur les trois filtres complets, on remarque une perte au feu plus importante que pour les échantillons tests de Tunisie et du Cap Vert (respectivement 24%+/-2%, 9%+/-2% et 0%), sans doute attribuable à la perte des aérosols organiques pour les échantillons collectés sur l'île du Frioul.

Pour limiter les erreurs dues à la variabilité après calcination des poids des creusets dans lesquels sont effectuées les pesées, nous avons changé le matériel (utilisation de creusets plus petits, achat d'un four mieux adapté). Les tests réalisés avec ce nouveau matériel montrent une très bonne stabilité de la pesée. Par exemple, la masse des creusets après calcination à 950°C varie de 0.4 mg+/-0.06 mg.

En conclusion, la pesée directe de filtres et la pesée après calcination conduisent au même niveau de précision (incertitude < 0.5 mg). Cependant, la pesée directe des filtres est plus contraignante pour des échantillons de dépôt contenant de « grosses » particules. La pesée après calcination permet de limiter les manipulations et d'éliminer les aérosols organiques qui se volatilisent dès les basses températures. Nous avons décidé de privilégier cette méthode. Une semaine de préparation et de lavage en laboratoire est nécessaire pour conditionner une série de 25 filtres/portes-filtres avant de partir sur le terrain. Au retour du terrain le traitement d'une série de 25 filtres échantillonnés demande également une semaine de travail en laboratoire pour en déterminer la masse minérale.

Echantillons	Dépôt initial	filtre+ dépôt avant calcination	filtre + dépôt après calcination 350°C	filtre + dépôt après calcination 550°C	filtre + dépôt après calcination 950°C
Frioul filtre 1	Pas de masse pour les filtres vierges	0,091	0,020	0,014	0,013
Frioul filtre 2		0,097	0,025	0,019	0,017
Frioul filtre 3		0,116	0,044	0,037	0,032
Frioul filtre 4		0,122	0,049	0,042	0,036
Frioul filtre 5		0,087	0,014	0,009	0,009
Frioul filtre 6		0,107	0,032	0,024	0,021
Frioul filtre 7	0,011	0,089	0,017	0,009	0,009
Frioul filtre 8	0,091	0,165	0,090	0,082	0,068
Frioul filtre 9	0,145	0,221	0,139	0,131	0,106
Frioul filtre 10	0,000	0,076	0,003	0,000	0,001
Frioul filtre 11	0,000	0,075	0,007	0,000	0,001
Frioul filtre 12	0,000	0,077	0,002	0,000	0,001
Frioul filtre 13	0,000	0,077	0,001	0,000	0,000
Frioul filtre 14	0,000	0,078	0,003	0,001	0,001
Frioul filtre 15	0,000	0,078	0,003	0,001	0,000

**Tableau 2:** Résultats des comparaisons de pesée de filtration d'échantillons réels collectés sur le site de l'île du Frioul pour différentes procédures de calcination (en g/filtre).

### 2.2.3 Installation des CARAGA sur sites

Suite aux modifications demandées consécutivement aux tests réalisés, les premiers exemplaires de la série de collecteurs ne nous ont été livrés que fin avril 2011 au rythme d'environ 2 tous les mois. Nous disposons donc fin juin des 6 collecteurs prévus.

Outre celui installé sur l'île du Frioul qui a été rehaussé et modifié conformément aux recommandations ci-dessus, deux collecteurs ont été installés à Montandon et au Casset en collaboration avec les ASQAA de Franche-Comté et de Rhône-Alpes et le parc des Ecrins. Un collecteur a été installé mi-juillet 2011 sur le site des Salinas sur l'île de Majorque (Espagne) et placé sous la responsabilité d'Antonio Tovar Sanchez (IMEDEA CSIC-Université des Iles Baléares). De même, un accord a été obtenu avec le Laboratory for Earth Observations and Analyses de l'ENEA pour installer un CARAGA sur l'île de Lampedusa (Italie), collecteur qui a été placé sous la responsabilité d'Alcide Giorgio di Sarra. Celui-ci a été installé à l'automne 2011. Le dernier collecteur a été installé en Corse en février 2012.

Par rapport au plan initial, deux sites ont été modifiés : nous avons privilégié le site de l'île du Frioul plutôt que ceux du Cap-Ferrat ou Porquerolles pour des raisons de logistique. Par ailleurs, après analyse, il nous a semblé que disposer de trois sites (avec Le Casset) dans cette zone côtière méditerranéenne ne correspondrait pas à une utilisation optimale des collecteurs disponibles au regard de l'objectif recherché (à savoir établir un champ de dépôt bien contraint depuis les sources africaines jusqu'au nord-est de la France). Nous avons donc choisi d'équiper le site de Majorque, plus central, plus représentatif plutôt qu'un autre site côtier sur la frange nord de la Méditerranée.

L'ensemble des collecteurs (figure 3) sont donc opérationnels depuis février 2012.

## 2.3 RESULTATS

### 2.3.1 Résultats des mesures de dépôt

La figure 4 reporte les flux de dépôts de matière insoluble mesurés sur les 5 stations les plus proches des sources sahariennes. Si la série la plus longue est naturellement celle du Frioul (presque deux ans), nous disposons pour chaque station d'au moins une année de mesure avec une période de recouvrement d'au moins une année, exceptée pour la station d'Ersa (Corse) installée plus tardivement pour les raisons évoquées précédemment. Le taux de récupération des données est très satisfaisant avec peu de périodes sans collecte, confirmant a posteriori la pertinence du choix d'un collecteur automatique et démontrant son opérationnalité.

Ces résultats font ressortir un gradient très net des dépôts atmosphériques avec des maxima hebdomadaires de près de  $3 \text{ g m}^{-2}$  à Lampedusa, de  $0,5 \text{ g m}^{-2}$  à Majorque, de  $0,33 \text{ g m}^{-2}$  à l'île du Frioul et de  $0,16 \text{ g m}^{-2}$  au Casset. La valeur maximale mesurée à Ersa est du même ordre de grandeur que celle mesurée au Casset, ce qui est à la fois un peu étonnant mais qui pourrait s'expliquer (au moins en partie) par une période d'échantillonnage plus courte.

De façon plus générale, les flux de dépôts mesurés dans le nord du bassin occidental sont bien plus faibles que ceux mesurés à la fin des années 80 par *Bergametti et al. (1989)* et *Löye-Pilot and Martin (2006)* en Corse. Ces auteurs reportent en effet des flux annuels de dépôt total de poussières de l'ordre de  $10 \text{ g m}^{-2} \text{ an}^{-1}$  avec une occurrence d'événements de transport de poussières de l'ordre de 10 à 20 par an. Même si nos résultats ne considèrent que la part insoluble du dépôt de poussières (très majoritaire dans la masse totale), nos mesures, avec des flux moyens de l'ordre de  $2 \text{ à } 3 \text{ g m}^{-2} \text{ an}^{-1}$  et des fréquences d'événement d'environ 6 à 10 par an à Majorque et Lampedusa respectivement, semblent suggérer qu'en 2011 et 2012 la partie nord-occidentale du bassin méditerranéen a été moins soumise, et de façon notable, à l'influence de dépôt de poussières sahariennes qu'elle ne l'a été à la fin des années 1980. Cette constatation est renforcée par les mesures réalisées à Lampedusa, très au sud du bassin et donc proche des sources sahariennes : les flux de dépôt mesurés sont d'environ une dizaine de  $\text{g m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ , soit du même ordre que ce qui avait été mesuré en Corse (donc bien plus au nord) à la fin des années 80. Si les dernières années de mesure dont nous disposons confirmaient cette tendance, il serait intéressant de rechercher les causes de cette diminution des dépôts mesurés à 30 ans d'écart (diminution des émissions ? changement dans la fréquence des régimes de transport de sud ? modification des champs de précipitation ?...). Répondre à ces questions nécessitera sans doute de simuler les années 1985-1990.

Un autre élément frappant de ces résultats est la très grande différence observée dans la dynamique temporelle de ces apports. On notera qu'à Lampedusa et à Majorque, certaines semaines se distinguent très nettement du lot avec des dépôts très importants. Ces événements semblent plutôt intervenir en fin d'été à Majorque et au printemps à Lampedusa. Cette saisonnalité des événements forts de dépôts est en accord avec les voies de transport privilégiées des poussières sur la Méditerranée Occidentale (*Bergametti et al., 1989*). Ce caractère pulsé des dépôts avait déjà été relevé à partir des mesures réalisées en Corse dans les années 85-90 pour lesquelles les auteurs mentionnaient qu'un seul événement de dépôt de poussières pouvait représenter à lui seul un tiers du

dépôt annuel. Etrangement, cette forte dynamique temporelle des dépôts ne se retrouve pas aussi marquée sur les stations situées plus au nord du bassin, celles-ci montrant, malgré quelques « pics » de moyenne intensité, un dépôt beaucoup plus régulier en intensité au cours de l'année.

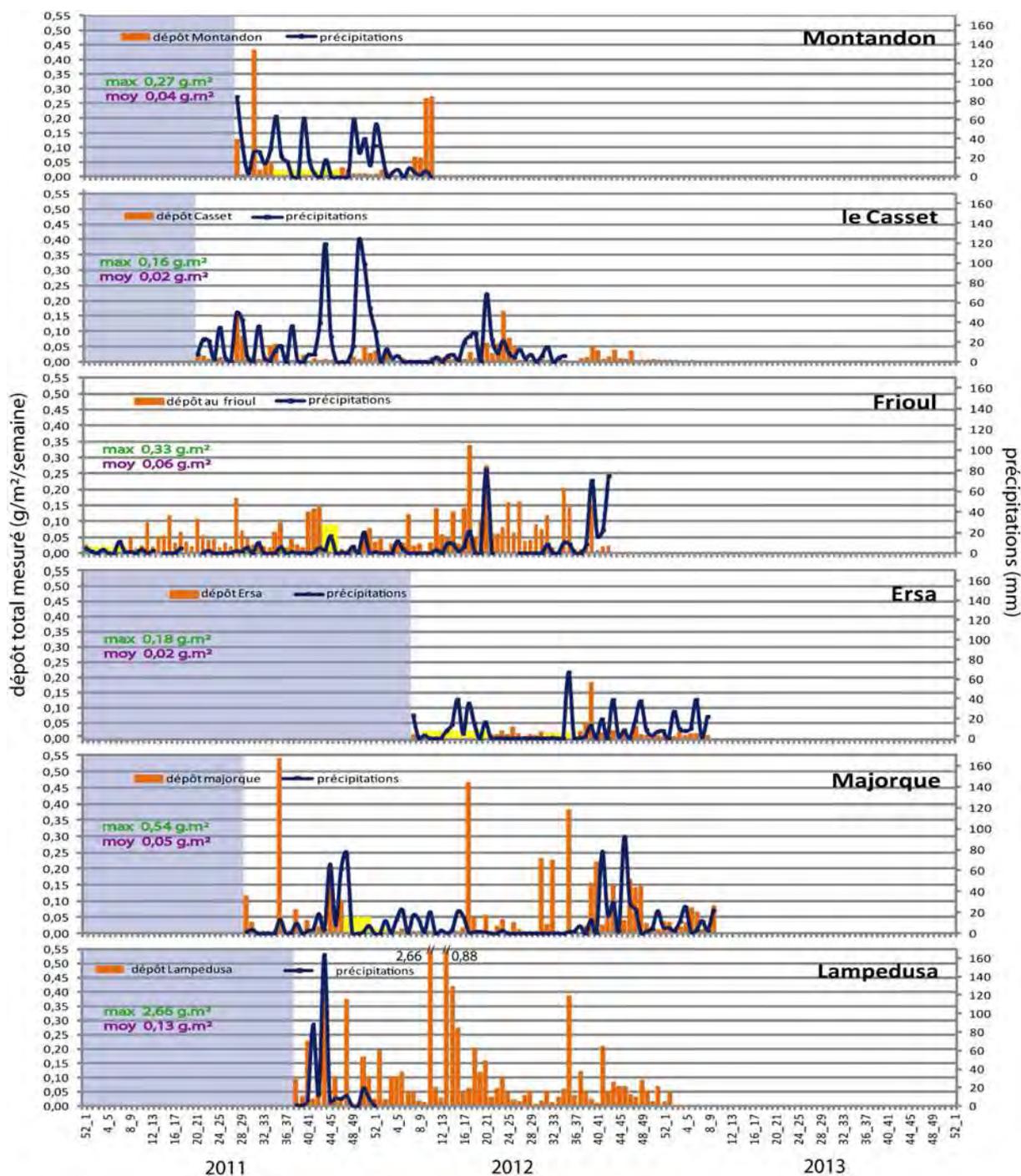


Figure 4 : Flux de dépôt atmosphérique insoluble mesuré sur des stations du réseau DEMO.

Enfin, on notera, qu'en raison de cette saisonnalité différente, elle-même résultant de voies de transport différentes, la plupart des événements ne sont enregistrés que sur 2 ou 3 stations et pas sur les autres.

### 2.3.2 Données complémentaires

Le projet DEMO nécessite d'identifier quelques cas de transport de poussières sur le bassin occidental méditerranéen, aussi bien documentés que possible, pour tester la capacité des modèles à les simuler et notamment à simuler le dépôt. Pour conduire ce travail, des données complémentaires aux données de dépôt sont nécessaires afin de contraindre autant que possible les simulations. Le retard pris par le programme MISTRALS du CNRS et par sa composante ChArMEx nous pose à ce titre problème. Il était en effet prévu qu'un nombre important de données additionnelles soient acquises au cours des SOPs (Special Observations Period) ChArMEx. Celles-ci n'ont finalement eu lieu qu'en juin-juillet 2013 (alors qu'elles auraient dû avoir lieu en 2010 ou 2011 !) induisant un retard mais aussi une disponibilité encore restreinte à ce jour des données encore en cours de traitement et/ou de validation. Ceci limite et reporte une partie de l'exploitation des données acquises. Pour pallier à cet inconvénient, nous avons examiné les autres données disponibles d'intérêt pour DEMO.

Nous avons donc pour chaque épisode :

- calculé les trajectoires des masses d'air arrivant à chaque station à différents niveaux d'altitude ; ceci nous permet d'identifier les voies de transport de chaque épisode, de déterminer quelles sont les stations affectées par l'événement...

- récupéré les données d'épaisseur optique restituées par satellite au-dessus de la mer (données MODIS TERRA/AQUA) et au-dessus du continent africain (MODIS Deep Blue). Ces données nous permettent d'avoir une idée du contenu intégré en aérosol et sont directement comparables aux sorties de modèles.

- récupéré les données satellitaires de précipitation (TRMN 3B42) au-dessus du bassin afin de connaître la structure du champ de précipitation à l'échelle du bassin et de s'assurer de la nature du transport (sec ou lessivé) depuis les zones-sources

- utilisé les données à disposition du dispositif MERA pour les stations de Montandon et du Casset, notamment les concentrations en  $Ca^{2+}$  mesurées dans les précipitations. Ces données sont utilisées pour compléter l'identification des épisodes de dépôt de poussières.

La figure 5 illustre, pour le cas correspondant à la semaine du 7 au 14 juillet 2011, le travail de collecte de données effectué.

A l'aide de l'ensemble de ces données, 7 cas de transport et de dépôt de poussières sahariennes ont été sélectionnés pour faire l'objet de comparaisons modèles/mesures. Le tableau 3 résume les caractéristiques de chacun de ces événements.

Cas d'étude	7 au 14 juil 2011	1 au 8 sept. 2011	24 nov. au 1 dec. 2011	8 au 15 mars 2012	29 mars au 5 avr.2012	26 avr. au 3 mai 2012	21 juin au 5 juil. 2012
<b>Masse mesurée (g.m<sup>-2</sup>.semaine<sup>-1</sup>)</b>	Mo=0,13 ; Ca =0,16 ; Fr =0,17	Fr =0,09 ; Ma =0,53	La =0,37	Ca = 0,01 ; Fr =0,03 ; Ma = 0,01 ; La =2,66	Ca =0,02 ; Fr=0,04 ; La=0,88	Ca =0,03 ; Fr=0,33 ; Ma=0,46 ; La =0,06	Ca =0,05 ; Fr= 0,22 ; Er=0,04 ; Ma=0,04 ; La=0,03
<b>Dépôt sec</b>	Fr ; Ca ; Mo	Fr ; Ma	La	Ca ; Fr ; Ma ; La	Ca ; Fr ; Ma ; La	Ca ; Fr ; Ma ; La	Ca ; Fr ; Er ; Ma ; La
<b>Dépôt humide</b>	Fr ; Ca ; Mo	Fr ; Ma	La	Ma ; La	Ca ; Fr ; Ma	Ca ; Fr ; Ma	Ca ; Fr
<b>Précipitation</b>	Fr ; Ca ; Mo	Fr ; Ma	La	Ma ; La	Ca ; Fr ; Ma	Ca ; Fr ; Ma	Ca ; Fr
<b>Dynamique du panache sur la zone d'étude</b>	Sortie du panache depuis les côtes du Sénégal et du Maroc sur l'océan Atlantique puis remontée vers l'Espagne, le bassin méditerranéen occidental vers le sud de la France	Sortie du panache des côtes tunisiennes sur le bassin méditerranéen occidental et circulation dépressionnaire sur le bassin	Sortie du panache depuis le Maroc, l'Algérie et la Tunisie et transport seulement sur le sud du bassin méditerranéen	Sortie du panache depuis la Tunisie et la Lybie sur le bassin méditerranéen, transport vers le bassin oriental, précipitations importantes sur le sud du bassin	Sortie du panache depuis la Tunisie et la Lybie sur le bassin méditerranéen occidental et remontée sur le sud de la France	Sortie du panache depuis les côtes du Maroc, transport sur le bassin occidental vers le sud de la France	Sortie du panache depuis les côtes du Sénégal et du Maroc sur l'Océan Atlantique puis remontée vers l'Espagne, le bassin méditerranéen occidental vers le sud de la France, panache transporté en altitude (Traqa)

**Tableau 3 :** Cas d'étude de dépôt représentant des cas contrastés pour être ensuite modélisés en terme de masse déposée (cas très intenses, cas moyens), de type de dépôt sec et /ou humide, d'extension spatiale, de voie de transport (Fr=Frioul ; Ca : Le Casset ; La : Lampedusa ; Ma : Majorque ; Mo : Montanon ; Er : Ersal).

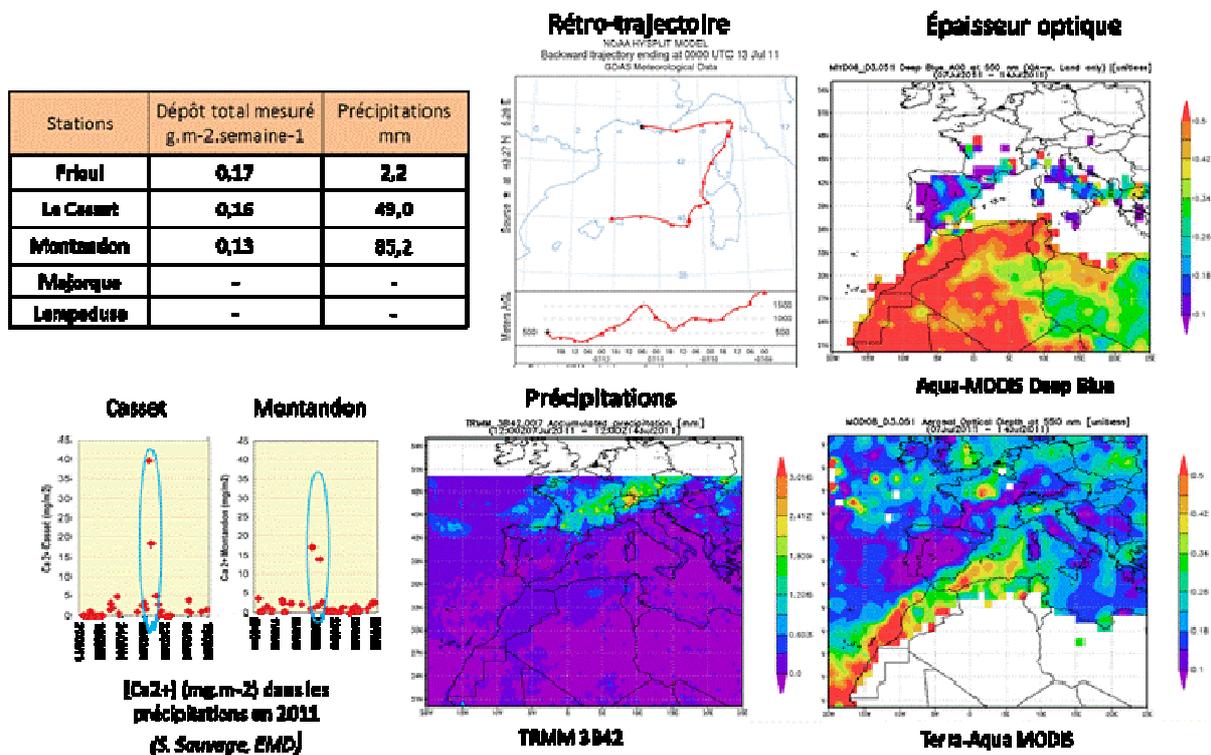


Figure 5 : Exemple de données complémentaires utilisées pour caractériser les épisodes de dépôt de poussières échantillonnées.

### 3-VOLET MODELISATION

L'objet de ce volet consistait à évaluer la capacité des modèles à reproduire correctement à la fois les champs de dépôts et les contenus en aérosols minéraux mesurés. Au-delà du simple cas des poussières minérales, ces résultats permettent une évaluation plus générale des schémas de dépôt utilisés dans les modèles. Pour ce faire, nous avons utilisé deux modèles (CHIMERE-Dust et Reg-CM) disposant de paramétrisations quelque peu différentes (distribution en taille à l'émission, nombre de bins pour le transport des aérosols, paramétrisation du dépôt humide...).

#### 3.1 DESCRIPTION DES MODELES UTILISES

CHIMERE-Dust est une version dédiée à la simulation du cycle des particules minérales du modèle d'échelle régionale CHIMERE, utilisée dans le système de prévision de la qualité de l'air Prev'air (Vautard et al., 2001). Le modèle comprend le schéma d'émission développé au LISA (Marticorena and Bergametti, 1995 ; Marticorena et al., 1997) et utilise les bases de données des propriétés de surface des zones désertiques (type de sol, texture, rugosité...) également développées au LISA (Marticorena et al., 2004 ; Laurent et al., 2008). Ce schéma d'émission a été évalué en comparant les simulations réalisées sur plusieurs années avec un pas de 6h aux données des stellites TOMS et Meteosat (Marticorena et al., 1997 ; Laurent et al., 2008). Le modèle inclut également une représentation de la dépendance des seuils d'érosion à l'humidité des sols (Fécan et al., 1999). La gestion de la distribution en taille est effectuée soit en utilisant un schéma à 20 bins iso-log couvrant le domaine 0.1-63  $\mu\text{m}$ , soit en utilisant un schéma optimisé en iso-gradient de vitesse de dépôt (Forêt et al., 2006 ; Menut et al., 2007). Ce modèle utilise des champs météorologiques issus soit d'ECMWF (Centre Européen) soit des champs issus de modèles météorologiques de méso-échelle (RAMS, WRF). Le schéma de dépôt sec utilisé est un schéma en résistances (Venkatram and Pleim,

1999). Actuellement, le dépôt humide ne concerne que le lessivage sous nuage, les particules minérales étant généralement considérées comme hydrophobes.

Les simulations réalisées avec le modèle CHIMERE-Dust sur la zone Afrique/Atlantique/ Méditerranée ont pu être confrontées de façon assez exhaustive aux diverses données de concentrations ou d'épaisseur optique disponibles dans la région. Basés sur des tests statistiques assez contraignants pour ce type de simulations, les accords mesures/modèles obtenus sont significatifs, en particulier lorsqu'ils sont intégrés sur une période d'une à deux semaines, durée correspondant au temps d'échantillonnage moyen des dépôts. Les zones d'émission semblent correctement simulées, en particulier celles situées au nord du Sahara, sources qui conditionnent tout particulièrement les transports de poussières vers la Méditerranée (*Schmechtig et al., 2011*).

Le modèle Reg-CM est un modèle à aire limitée, historiquement basé sur différentes versions du modèle météorologique méso-échelle du NCAR (MM4 et MM5). Actuellement développé à l'ICTP (Trieste, Italie), il a été utilisé et enrichi pour l'étude du climat régional sous l'angle météorologique et hydrologique (*Giorgi et al., 2006*). Ce modèle peut fonctionner à des résolutions horizontales fines (jusqu'à 10 km) permettant un downscaling physique par rapport aux modèles globaux. Les conditions aux limites sont prescrites à partir de champs grande échelle analysés (ECMWF, NCEP) pour l'étude des climats actuels et passés, ou par des projections issues de modèle de climat globaux. Ces dernières années un module d'aérosol a été couplé à RegCM3 (*Solmon et al., 2006 ; Zakey et al., 2006*) prenant notamment en compte l'émission de poussières désertiques (utilisant une paramétrisation basée sur *Marticorena and Bergametti, 1995, Alfaro et al., 2003*) et leur transport / dépôts ainsi que leurs effets radiatifs directs. Pour permettre l'intégration sur des périodes pluri-annuelles, la distribution en taille est représentée selon un nombre de bins réduit à quatre, ce qui représente une forte simplification par rapport à un modèle comme CHIMERE-Dust. RegCM3 a été appliqué récemment à l'étude de l'impact climatique des poussières sur les précipitations en Afrique de l'ouest (*Solmon et al., 2008 ; Konaré et al., 2008*). Des tests de sensibilité ont montré que la spécification des propriétés optiques (reliées aux distributions en taille), la charge troposphérique et la distribution verticale des poussières étaient un aspect crucial pouvant conduire à des réponses climatiques sensiblement différentes. Or ces facteurs simulés ont été jusqu'ici uniquement évalués par rapport à des données intégratives comme les épaisseurs optiques.

Dans le cadre de ce projet, nous avons testé différents aspects liés au dépôt pour des cas sélectionnés :

- Une comparaison directe des concentrations, épaisseurs optiques et dépôt total mesurés sur la zone d'intérêt avec les deux modèles. Pour cela, les données recueillies dans ce projet, les données acquises dans diverses stations méditerranéennes et du sud de la France (y compris les mesures de PM10 obtenues dans certaines stations « rurales » du réseau de surveillance de la qualité de l'air), les épaisseurs optiques au-dessus de la Méditerranée dérivées de capteurs satellitaires (MODIS et MSG en particulier) ont été utilisées. Les modèles pouvant avoir des incertitudes sur les émissions, on a particulièrement testé les gradients de concentration, d'épaisseur optique et de dépôt.
- Une comparaison particulière a été conduite sur des épisodes de dépôt sec pour tester spécifiquement la représentativité de ce terme dans les modèles.
- Une attention particulière aurait dû être portée à la comparaison entre distributions en taille simulées et observées dans la mesure où ces distributions en taille contrôlent en grande partie la vitesse de dépôt sec. Pour cela, il était prévu d'utiliser les données des campagnes complémentaires et les données acquises dans d'autres stations, en particulier à Erba et Lampedusa. Malheureusement, à ce jour ces données ne sont pas encore disponibles. Ces travaux seront donc conduits dès que les données acquises par nous-même et d'autres équipes au cours de l'été 2013 seront validées et accessibles.

- Le dépôt humide dépend pour partie des paramétrisations utilisées pour le décrire mais également de la qualité du champ de précipitation en entrée du modèle. Nous évaluerons d'abord la capacité des modèles à reproduire les événements précipitants en comparant les champs de précipitation du modèle aux données de précipitations des stations météorologiques et aux données satellitaires (TRMM 3B52). Ceci permet d'évaluer l'incertitude dû aux champs de précipitations dans le dépôt simulé.

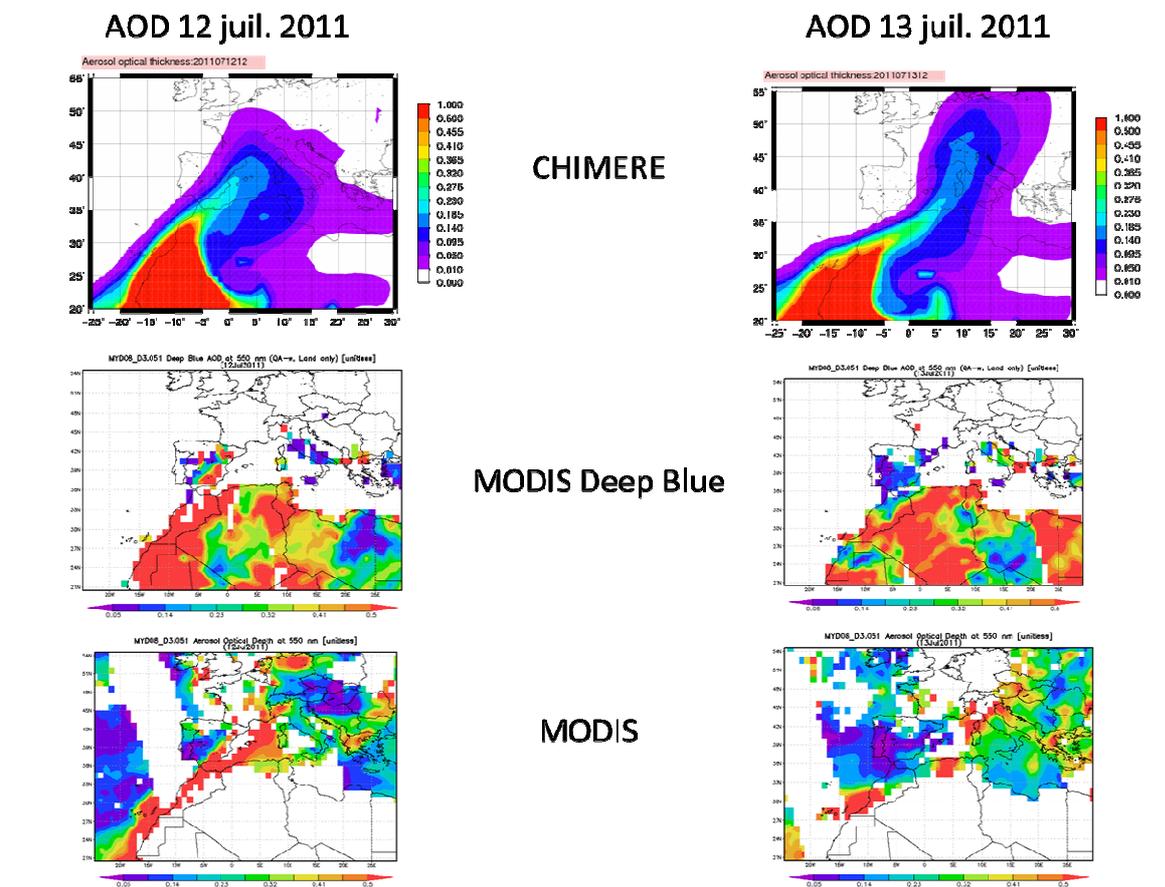
## 3.2 RESULTATS

Nous illustrerons le travail mené jusqu'à présent au travers de trois cas de transport de poussières choisis pour la diversité des situations qu'ils permettent d'illustrer.

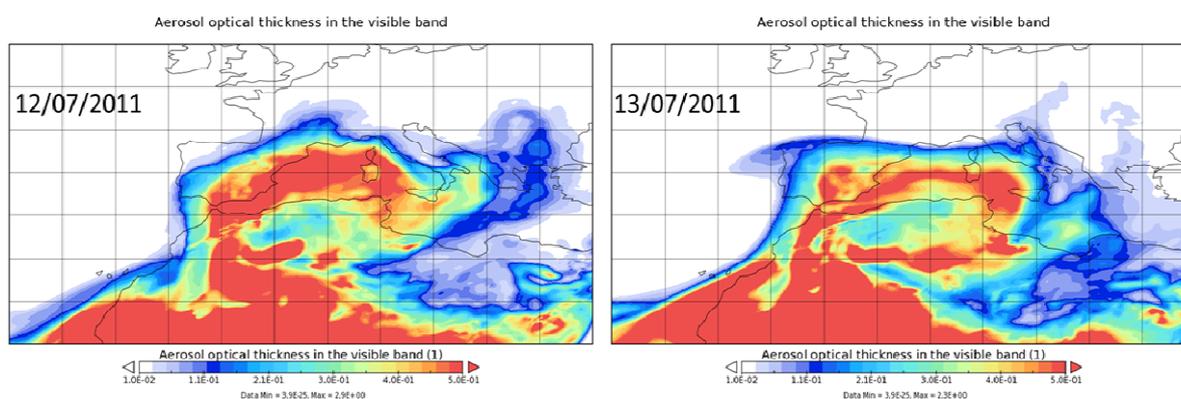
### *3.2.1. Cas du 7 au 14 juillet 2011*

Cet épisode de poussières est bien visible sur les images satellitaires des 12 et 13 juillet 2011 (figure 6). Les AOD (Aerosol Optical Depth en anglais, Epaisseur Optique en aérosol en français) issues de MODIS Deep Blue font ressortir le 12 juillet des sources de poussières (en rouge) importantes localisées sur la partie nord de l'Afrique, notamment au Maroc et Mauritanie, nord-est de l'Algérie et e sud tunisien avec des sources également situées dans le sud algérien, le Tchad et le Niger. Le 13 juillet, le front de poussières s'est déplacé et occupe tout le Sahara central du nord e l'Algérie au Mali. Des sources additionnelles apparaissent également à l'Est de la Lybie et en Egypte. Le modèle CHIMERE-Dust reproduit très bien la source située sur l'Afrique de l'ouest mais manque totalement les sources additionnelles situées plus à l'est.

Les données MODIS quant à elles permettent de visualiser les poussières au-dessus de la mer. Le 12 juillet le nuage de poussières issu du Maroc et de Mauritanie est expulsé vers l'Atlantique et repris dans un courant de sud-ouest qui l'amène à recouvrir toute la partie ouest du bassin méditerranéen occidental. Le 13 juillet, les poussières se sont transportées vers l'est de la France, la Suisse et l'Allemagne. Apparemment, la partie orientale du bassin occidentale (la partie à l'est de la Corse et la Sardaigne) n'a pas été concernée par cet épisode.



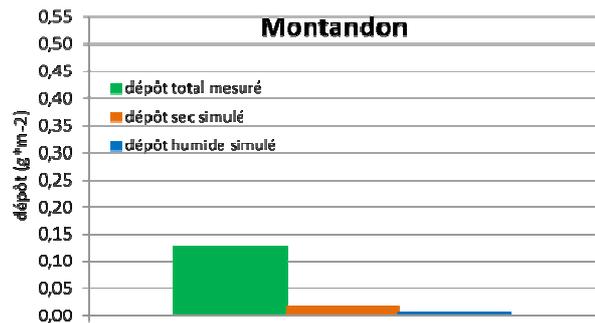
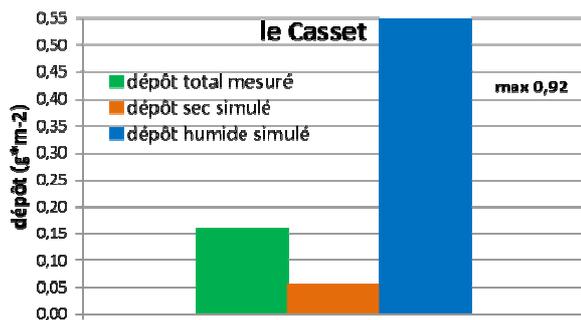
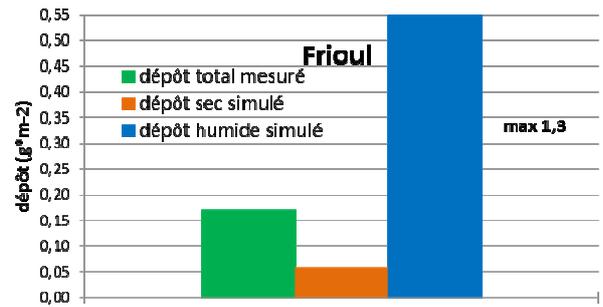
**Figure 6 :** Epaisseurs optiques en aérosol simulées par CHIMERE et observées par MODIS Deep Blue (au-dessus des continents) et par MODIS (au-dessus de la mer) pour les 12 et 13 juillet 2011.



**Figure 7 :** Epaisseurs optiques en aérosol simulées par le modèle REG-CM pour les journées des 12 et 13 juillet 2011.

La figure 7 reporte les épaisseurs optiques simulées par le modèle REG-CM. La dynamique du panache est quelque peu différente de celle simulée par le modèle CHIMERE-DUST (transport vers le sud-est de la France et le nord de l'Italie) et celles REG-CM (transport plus cantonné sur le bassin occidental de la Méditerranée).

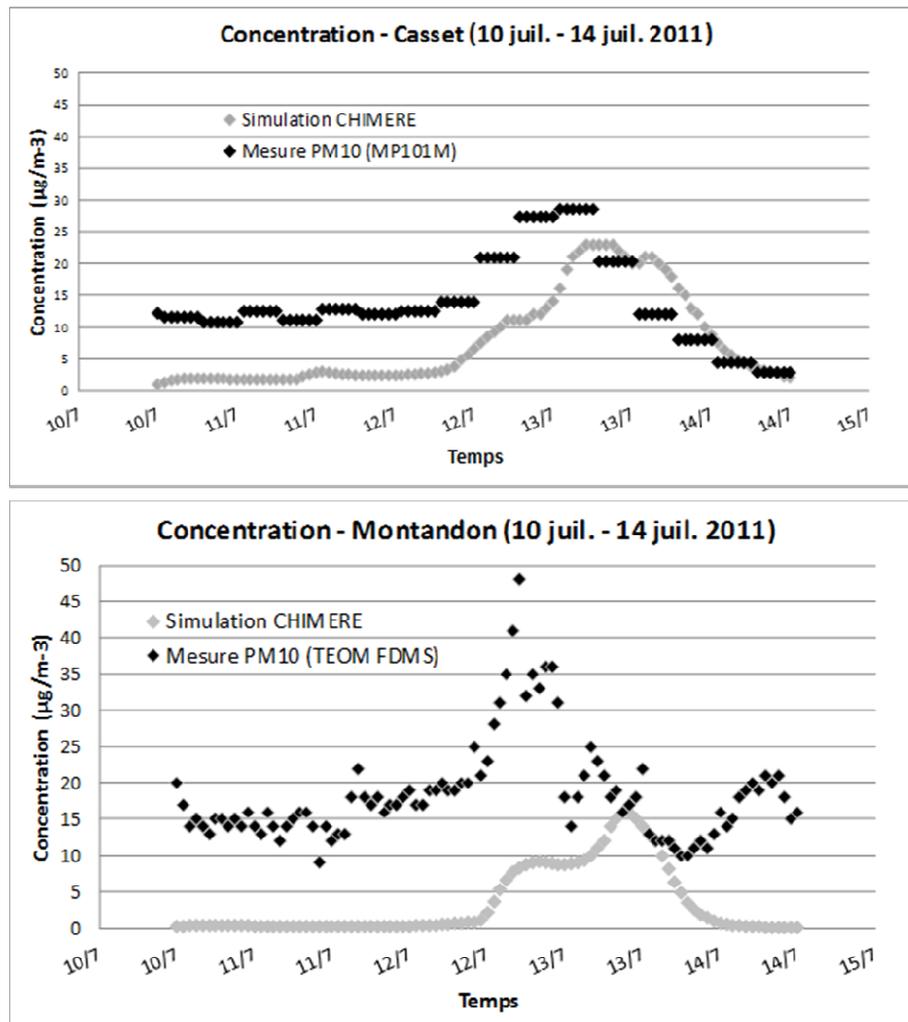
Stations	Dépôt total mesuré g.m-2.semaine-1	Précipitations mm
Frioul	0,17	2,2
Casset	0,16	49,0
Montandon	0,13	85,2
Majorque	-	-
Lampedusa	-	-



**Figure 8 :** Dépôts total (mesuré et simulé), sec et humide (simulé) aux stations du Frioul, du Casset et de Montandon lors de l'épisode observé durant la semaine du 7 au 14 juillet 2011.

Les données collectées aux différentes stations ne permettent pas de trancher en ces deux simulations (figure 8). Sachant que les stations de Majorque, Lampedusa et Ersa n'étaient pas opérationnelles à cette date, les mesures effectuées au Frioul, au Casset et à Montandon suggèrent un événement de grande ampleur avec des dépôts assez importants et du même ordre de grandeur compris entre 0.13 et 0.17 g m<sup>-2</sup> semaine<sup>-1</sup>.

Les dépôts simulés par le modèle CHIMERE-Dust (figure 8) sur ces stations sont notablement surestimés (environ un facteur 6 à 8) au Frioul ou au Casset avec notamment des flux de dépôt par voie humide très important. A l'inverse à Montandon, où il n'y a eu que très peu de précipitations à cette période, le dépôt simulé, dominé par le dépôt par voie sèche, est significativement sous-estimé.



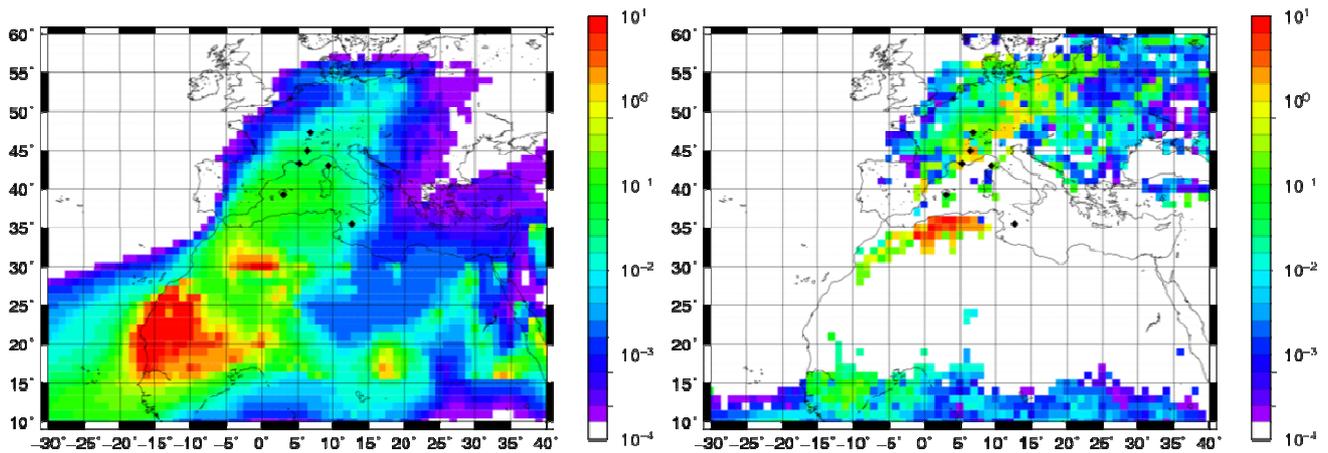
**Figure 9 :** Concentrations de poussières dans la couche de surface simulées par le modèle CHIMERE-Dust et mesurées au Casset et à Montandon entre le 10 et le 14 juillet 2011.

Les mesures de PM et les simulations des concentrations de surface sont reportées sur la figure 9. Si les lignes de base, plus élevées pour les mesures, ne sont pas directement comparables (les mesures intègrent toutes sortes de particules alors que les simulations ne représentent que les concentrations en poussières désertiques), la comparaison entre l'amplitude des pics (pour lesquels on peut faire l'hypothèse raisonnable que l'augmentation est bien liée à l'arrivée de poussières) est un bon indicateur de la capacité du modèle à reproduire les niveaux de concentrations liés à cet événement. Sur ce plan, l'accord est plutôt bon, tant au Casset qu'à Montandon où les mesures comme les simulations montrent des pics de concentrations dont l'amplitude (pic-ligne de base) est d'environ 15 à 20  $\mu\text{g m}^{-3}$ . Par contre, les pics sont décalés en temps, les simulations étant en retard sur la date d'arrivée des poussières d'environ 12h au Casset et de 24h à Montandon. Ce décalage, s'il est phasé avec les précipitations, pourrait expliquer la forte surestimation observée des dépôts humides. Une étude des précipitations avec une résolution temporelle plus fine devrait permettre de tester cette hypothèse.

La figure 10 montre la cartographie des dépôts sec et humide simulés. On notera que la distribution spatiale de ces dépôts suit l'allure générale du panache telle qu'observée sur les AOD et surtout que les dépôts humides observés sur le bassin occidental (voir figure 5, données TRMM) et simulés sont en bordure des 2 stations de mesure du Frioul et du Casset. Ceci suggère qu'un manque de résolution horizontale pourrait expliquer en partie les désaccords observés entre les dépôts simulés et mesurés.

Dépôt sec simulé et cumulé  
7/07 – 14/07 2011 ( $\text{g m}^{-2} \text{ période}^{-1}$ )

Dépôt humide simulé et cumulé  
7/07 – 14/07 2011 ( $\text{g m}^{-2} \text{ période}^{-1}$ )



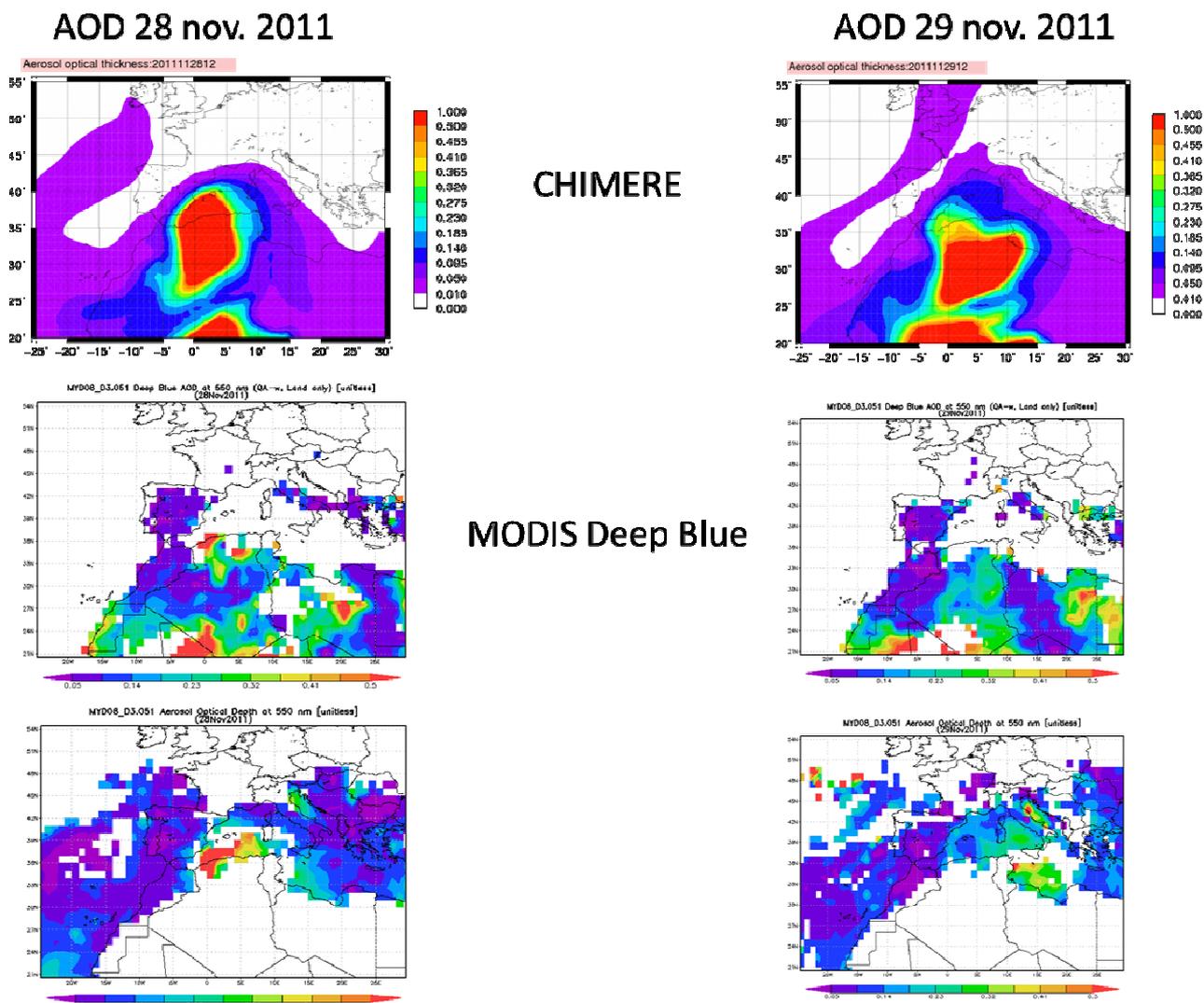
**Figure 10 :** Distribution spatiale des dépôts sec (à gauche) et humide (à droite) pour la période de collecte (7-14/07/2011).

### 3.2.2 Cas du 24 novembre au 1 décembre 2011

L'image MODIS DEEP BLUE du 28 novembre 2011 (figure 11) fait ressortir une source de poussières modérée localisée sur le nord algérien et une autre située plus au sud, à la frontière algéro-nigérienne. Le 29 novembre, ces zones-sources sont masquées par la présence de nuages mais elles semblent, notamment celle située au nord de l'Algérie, bien moins actives.

Le modèle CHIMERE-Dust reproduit bien les sources de poussières en termes de localisation même si la source nord algérienne semble un peu plus étendue et un peu plus intense dans les simulations. De même, la source sahélienne est décalée dans les simulations : alors qu'elle est située entre 0 et 5W sur les observations, elle est plutôt positionnée entre 0 et 5 E dans les simulations. Le 29 novembre, les deux sources simulées sont bien localisées et d'étendue correcte même si la source nord algérienne semble encore un peu surestimée dans les simulations.

L'image MODIS du 28 novembre montre qu'à cette date seule la frange côtière algérienne (et les îles Baléares cachées sous des nuages ?) semble affectée par les poussières alors que le 29 novembre, le nuage s'est déplacé et affecte principalement tout le Golfe de Gabès et le Golfe de Syrte, pratiquement jusqu'à la latitude de la Sicile.



**Figure 11:** Epaisseurs optiques en aérosol simulées par CHIMERE et observées par MODIS Deep Blue (au-dessus des continents) et par MODIS (au-dessus de la mer) pour les 28 et 29 novembre 2011.

Les données collectées sur les différentes stations du réseau DEMO confirment bien ces observations (figure 12) : pratiquement aucun dépôt n'est observé à cette période dans les stations les plus au nord du bassin occidental (Frioul, Casset, Montandon) alors que la station de Lampedusa, située au nord du Golfe de Gabès est celle qui enregistre le dépôt le plus important ( $0.37 \text{ g m}^{-2} \text{ semaine}^{-1}$ ). La station de Majorque, sous les nuages le 28 novembre, semble avoir également été affectée par le panache avec un dépôt de  $0.24 \text{ g m}^{-2} \text{ 5 semaine}^{-1}$ ). On notera cependant que ce dépôt a été mesuré sur 5 semaines en raison d'un problème de rotation du collecteur.

Le dépôt simulé par le modèle CHIMERE-Dust (figure 12) est en bon accord avec ces mesures avec un dépôt simulé à Lampedusa d'environ  $0.2 \text{ g m}^{-2} \text{ semaine}^{-1}$  et de  $0.26 \text{ g m}^{-2} \text{ semaine}^{-1}$  pour Majorque (ce qui est correct si l'on admet l'absence d'épisodes supplémentaires pendant la période de collecte de 5 semaines de cet échantillon sur ce site). Cette hypothèse semble raisonnable au vu de la figure 4.

Concernant la spatialisation simulée des dépôts sec et humide, la figure 13 montre un dépôt sec important sur la partie sud du bassin méditerranéen et un dépôt humide simulé limité aux seules zones marines et aux bords de côtes d’Afrique du nord.

Stations	Dépôt total mesuré g.m-2.semaine-1	Précipitations mm
Lampedusa	0,37	-
Frioul	0,01	0,0
Casset	0,00	0,2
Montandon	0,01	0,4
Majorque	0,24 Pour 5 semaines	75,8

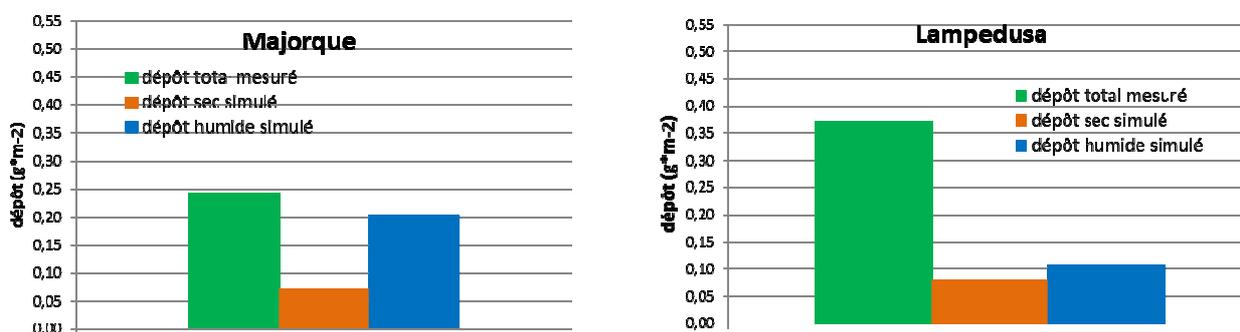


Figure 12 : Dépôts total (mesuré et simulé), sec et humide (simulé) aux stations de Majorque et de Lampedusa lors de l’épisode observé durant la semaine du 24 novembre au 1 décembre 2011.

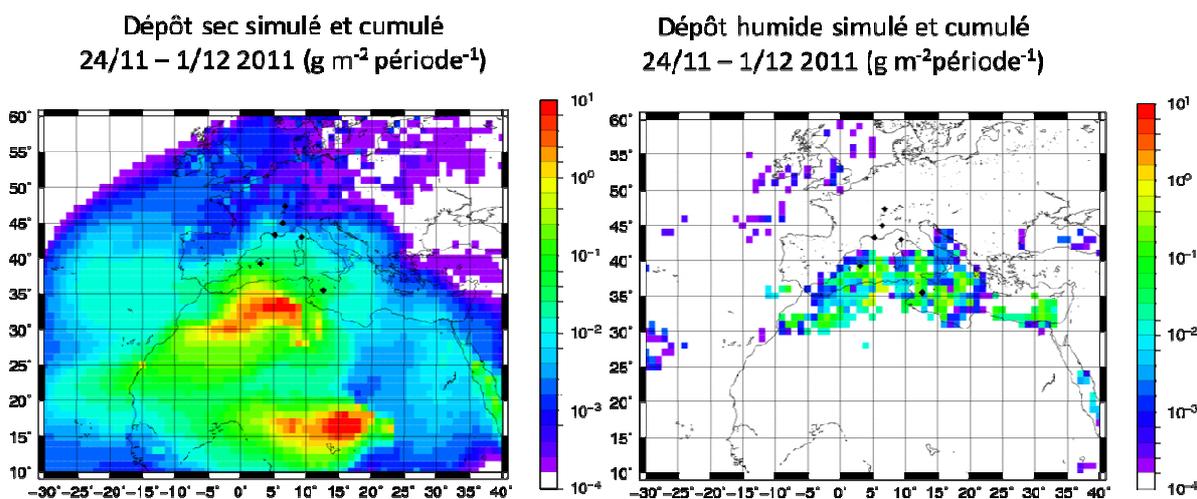


Figure 13 : Distribution spatiale des dépôts sec (à gauche) et humide (à droite) pour la période de collecte (24/11-1/12/2011).

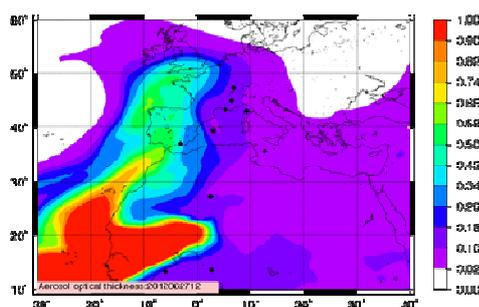
### 3.2.3 Cas du 21 juin au 5 juillet 2012

L'épisode observé au cours de la semaine du 21 juin au 5 juillet 2012 est intervenu les 28 et 29 juin. La figure 14 montre le 28 juin des sources de poussières essentiellement situées dans la bande sahélienne, principalement au niveau du Niger et du Mali. Le lendemain, les sources actives sont toujours au même endroit mais on voit que le panache s'est transporté vers le nord-ouest puisque des épaisseurs optiques relativement importantes (de l'ordre de 0.8) sont observées au-dessus du Sénégal et de la Mauritanie. Les images MODIS montrent qu'effectivement le panache est expulsé vers l'ouest au niveau du Sénégal et de la Mauritanie et pris dans un courant de sud-ouest, principalement le 27 juin qui le remonte le long des côtes marocaines jusqu'au détroit de Gibraltar. Le 28 juin, des épaisseurs optiques de l'ordre de 0.5 sont observées sur toute la partie ouest du bassin méditerranéen occidentale.

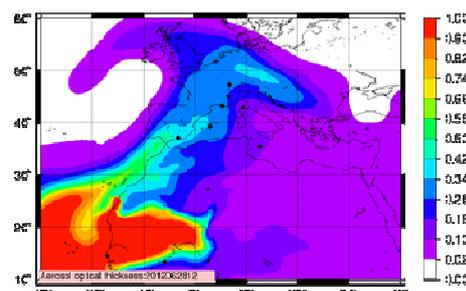
Les simulations CHIMERE-Dust reproduisent assez bien à la fois la localisation des sources (même si la source de poussières est moins étendue vers l'est), leur intensité et l'allure générale du transport, à la fois les 27 et 28 juin.

Etrangement le dépôt mesuré le plus important est observé à la station du Frioul (0.22 g m<sup>-2</sup> semaine<sup>-1</sup>) (figure 15). Les stations de Majorque, Lampedusa et Erso n'ont enregistré que de faibles dépôts. Si cela peut se comprendre pour les mesures effectuées à Lampedusa, peu affectée par ce transport de poussières, ces faibles dépôts sont bien plus surprenants pour les stations de Majorque et d'Erso clairement situées sur la route du panache, notamment le 28 juin.

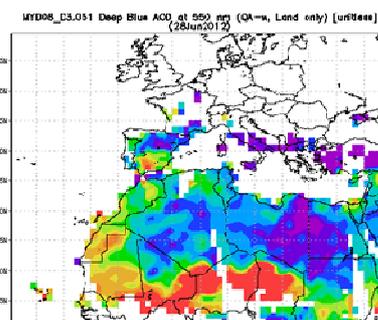
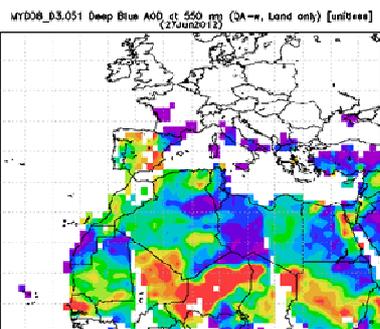
AOD 27 juin 2012



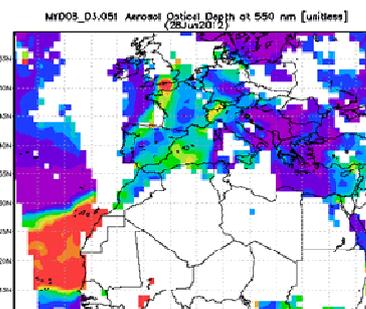
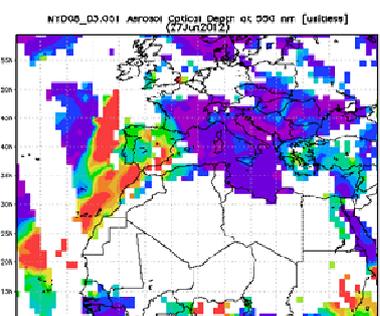
AOD 28 juin 2012



CHIMERE



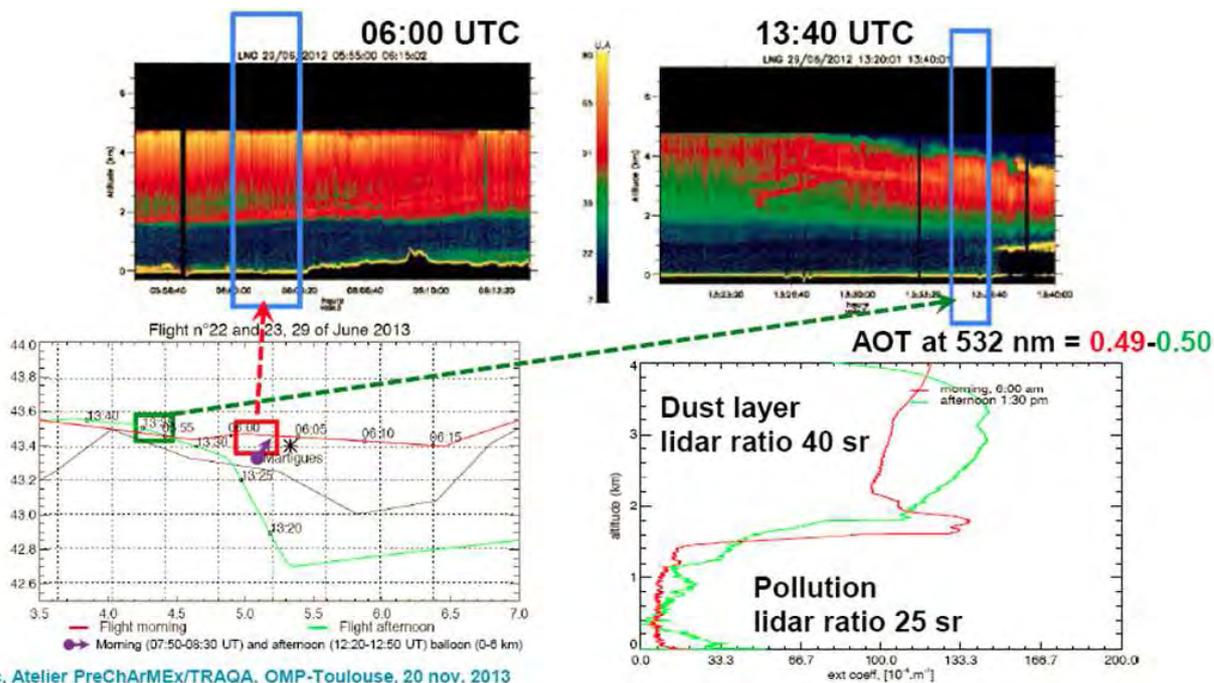
MODIS Deep Blue



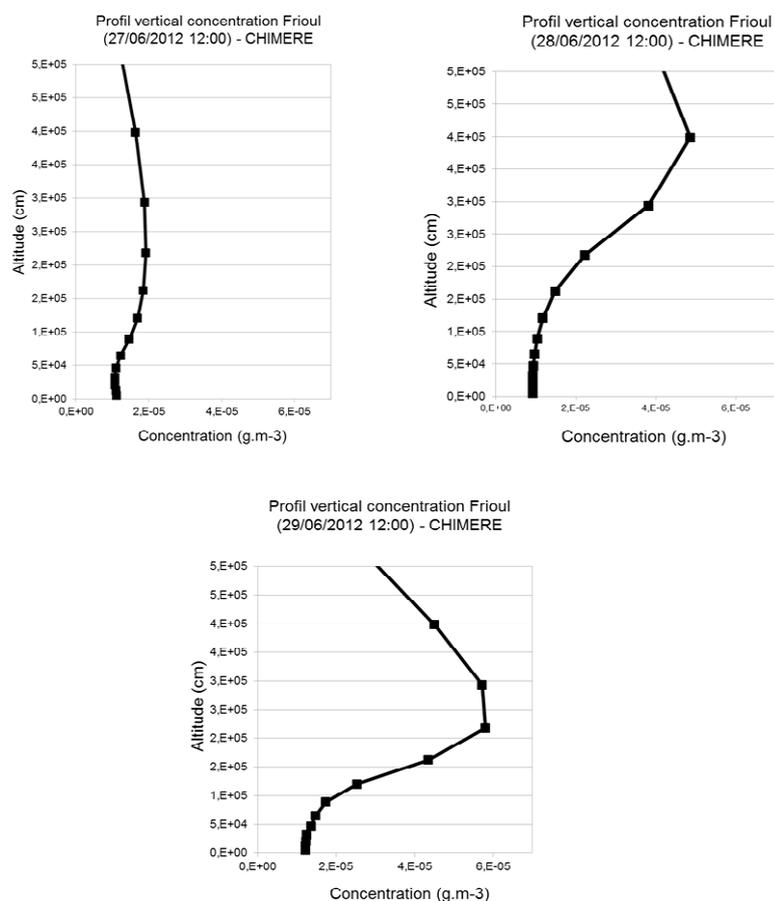
MODIS

**Figure 14 :** Epaisseurs optiques en aérosol simulées par CHIMERE et observées par MODIS Deep Blue (au-dessus des continents) et par MODIS (au-dessus de la mer) pour les journées des 27 et 28 juin 2011.

Ces très faibles dépôts alors que les épaisseurs optiques sont assez importantes au-dessus des stations suggèrent un transport de poussières à haute altitude. C'est ce que montrent à la fois les mesures LIDAR du 29 juin (figure 15) et les profils verticaux de poussières simulés par CHIMERE-Dust pour les 27, 28 et 29 juin (figure 16). Dans les deux cas, on observe en effet un nuage de poussières situé entre 2 et 4 km d'altitude au-dessus de Martigues et du Frioul respectivement.



**Figure 15 :** Profils verticaux mesurés par LIDAR aéroporté le 29 juin 2012 (données : F. Dulac, LSCE).

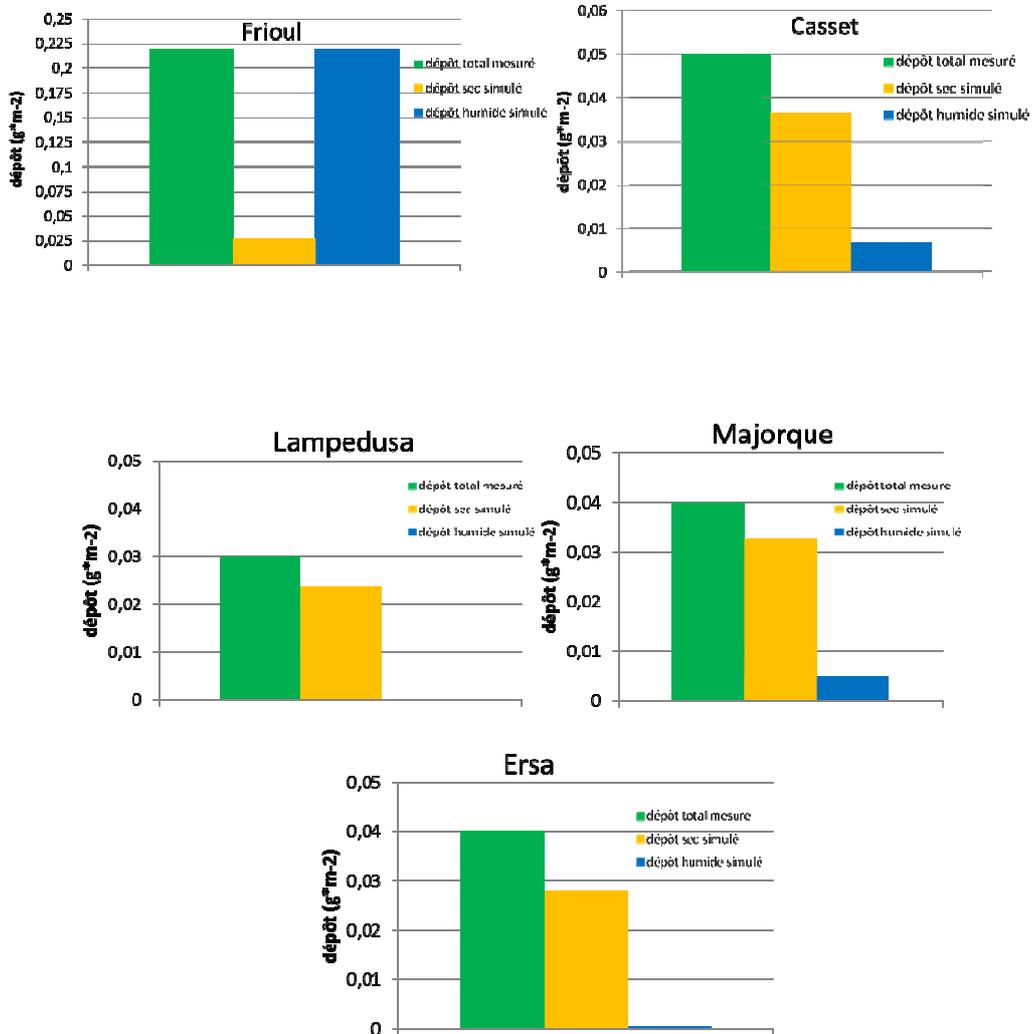


**Figure 16 :** Profils verticaux simulés par CHIMERE-Dust pour les 27, 28 et 29 juin 2012 au-dessus du Frioul

La figure 17 illustre les dépôts simulés par le modèle CHIMERE-Dust. Ceux-ci sont en très bon accord avec les mesures des stations et ce sur tous les sites. Il semblerait au vu de ces simulations que seule la station du Frioul ait subi un dépôt humide important de poussières à cette période. Pour toutes les autres stations, le dépôt, faible, résulte très majoritairement de dépôt par voie sèche.

Ces résultats sont très satisfaisants pour un cas aussi complexe que celui-là : les faibles dépôts simulés et en accord avec les observations aux stations du Casset, Lampedusa, Majorque et Erza concomitants à un dépôt important et par voie humide au Frioul suggère que le modèle a, à la fois, bien reproduit le transport à haute altitude (conduisant à un dépôt sec faible) et le champ de précipitation (permettant de rabattre les poussières par lessivage comme observé au Frioul).

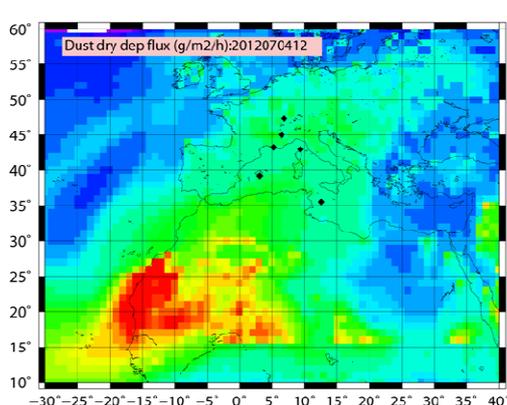
Stations	Dépôt total mesuré g.m-2.semaine-1	Precipitations mm
Frioul	0,22	11,6
Casset	0,05	17,0
Montandon	-	-
Mejorque	0,04	0
Lampedusa	0,03	0
Ersa	0,04	0



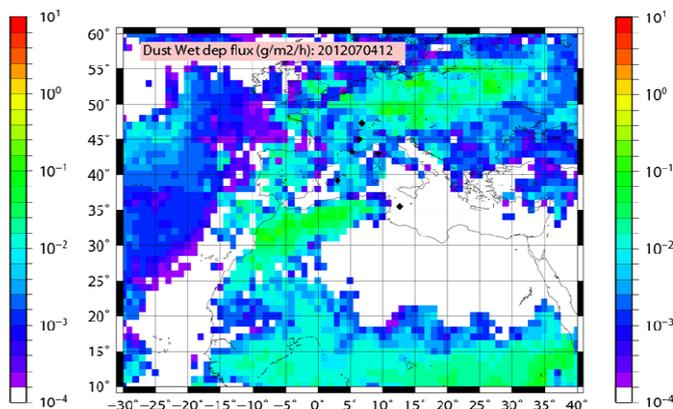
**Figure 17** : Dépôts total (mesuré et simulé), sec et humide (simulé) aux stations du Frioul, du Casset, de Majorque, Lampedusa et Ersa lors de l'épisode observé durant la période comprise entre le 20 juin et le 4 juillet 2012.

Le champ de dépôt simulé et reporté sur la figure 18 fait ressortir un dépôt sec faible et assez homogène sur toute la Méditerranée occidentale associée à du dépôt humide plus hétérogène.

### Dépôt sec simulé et cumulé 20/06 – 4/07 2012 ( $\text{g m}^{-2} \text{ période}^{-1}$ )



### Dépôt humide simulé et cumulé 20/06 – 4/07 2012 ( $\text{g m}^{-2} \text{ période}^{-1}$ )



**Figure 18 :** Distribution spatiale des dépôts sec (à gauche) et humide (à droite) pour la période de collecte (20/06-4/07/2012).

### 3.3. CONCLUSIONS

Concernant cette partie modélisation, les résultats obtenus sur les cas simulés suggèrent globalement un accord plutôt satisfaisant sur la localisation des zones sources simulées et sur les trajectoires de transport. Les ordres de grandeur des épaisseurs optiques simulées sont voisins de ceux restitués par satellite tant au-dessus du continent qu'au-dessus de la mer. Pour les cas où des données de concentrations de surface sont disponibles, celles-ci sont globalement en accord avec les simulations mais un décalage temporel important est observé sur l'apparition du pic de poussières pour le cas de juillet 2011.

Les dépôts simulés sont en assez bon accord avec les mesures notamment pour les cas de novembre 2011 et juin 2012, cas pourtant difficiles à simuler. A l'inverse, les dépôts, notamment humides, sont très fortement surestimés pour le cas de juillet 2011, sans doute en lien avec un décalage temporel important dans la date d'apparition du panache. Ces résultats sont donc globalement assez encourageants.

Une analyse plus approfondie devra naturellement être conduite sur chaque cas lorsque les données de dépôt et les données complémentaires acquises pendant ChArMEx au cours de l'été 2013 seront disponibles.

### **4- DIFFICULTES RENCONTREES**

Les difficultés rencontrées ont été de différentes natures :

D'abord, **d'ordre calendaire**. En effet, après la période de tests du collecteur, les adaptations nécessaires ont pris, vu leur complexité, davantage de temps que ce que nous avons initialement prévu. De plus, la société ICARE, par ailleurs très impliquée sur ce projet et très compétente, n'a pu assurer les livraisons des instruments à la cadence prévue. L'ensemble de ces éléments a conduit à un retard de l'installation des collecteurs sur sites.

Ensuite, **d'ordre financier**. Ces mêmes modifications ont alourdi le coût du collecteur d'environ 20% ce qui nous a contraint à n'acquérir que cinq collecteurs sur les six prévus. Néanmoins, pour tenir compte de nos engagements initiaux, la société ICARE qui produit ces instruments a accepté à titre exceptionnel, de nous en louer un sixième à un tarif « très amical ».

Enfin et surtout, **d'ordre programmatique**. Le projet, tel qu'il était conçu et programmé, devait être une composante intégrée du Programme ChArMEx/MISTRALS piloté par l'INSU/CNRS. Malheureusement, petit à petit, la

mise en place de ce programme et son financement ont pris du retard au point que les campagnes ChArMEx prévues en 2011 se sont déroulées... au cours de l'été 2013 et que l'implémentation des super sites (Corse, Baléares et Lampedusa) telle qu'elle était prévue a été revue à la baisse pour certains d'entre eux. Les conséquences pour ce projet sont que les mesures additionnelles nécessaires à une exploitation pleine et entière des données recueillies ne sont encore que partiellement disponibles à ce jour. Le retard pris dans la livraison et donc l'installation des CARAGA aura finalement été, vu sous cet angle, plutôt bénéfique car elle a permis de maximaliser la période de recouvrement de l'échantillonnage collective avec les campagnes ChArMEx. On notera, par ailleurs, que le programme ChArMEx/MISTRALS a financé deux années supplémentaires de mesure pour assurer l'acquisition de données de dépôt pendant les périodes de campagnes intensives.

Pour pallier à ces inconvénients et disposer d'un minimum de données additionnelles, l'Ecole des Mines de Douai a installé sur les sites du Casset et de Montandon des instruments complémentaires : à Montandon, ont été mis en place une mesure en continue de la concentration massique en  $PM_{10}$  par un analyseur automatique Thermo TEOM-FDMS et le comptage granulométrique des particules par un compteur GRIMM (1105) et au Casset, un analyseur Environnement SA MP101M également pour la concentration massique en  $PM_{10}$  équipé du module de comptage CPM. Les conséquences de ces différents retards sont une exploitation qui ne peut être que partielle des résultats à ce jour.

## 5- CONCLUSION

Le projet DEMO a permis d'obtenir un certain nombre de résultats originaux :

- Un collecteur de retombée atmosphérique insoluble à grande autonomie (près de six mois) a été développé dans le cadre de ce projet, testé sur site et adapté notamment pour répondre à des contraintes de type événements intenses ou précipitations neigeuses ;
- Une méthode de détermination des masses collectées par calcination a été développée et comparée avec la technique classique des pesées directes ;
- Ce collecteur a été déployé sur 6 stations (8 en comptant les sites partenaires en Espagne et Tunisie) dont deux stations étrangères pour constituer un réseau de mesures des dépôts atmosphériques insolubles en Méditerranée Occidentale ;
- Des mesures ont été acquises en continue sur des périodes d'au moins deux ans et allant jusqu'à 3 ans ;
- Les résultats montrent des dépôts décroissant en intensité lorsqu'on s'éloigne des côtes africaines avec des valeurs annuelles moyennes de l'ordre de  $10 \text{ g m}^{-2} \text{ an}^{-1}$  à Lampedusa (très près des sources) et de  $2-3 \text{ g m}^{-2} \text{ an}^{-1}$  pour les stations situées au milieu du bassin occidental. Ces valeurs sont notablement plus basses que celles qui avaient été reportées à la fin des années 1980 à partir de prélèvements réalisés en Corse ;
- Les simulations des cas sélectionnés, et bien que leur interprétation soit incomplète en raison des difficultés mentionnées ci-dessus, montrent un accord satisfaisant avec les mesures dans la plupart des cas. Des situations variées, avec des cas de transport complexe, ont été correctement simulées. D'une façon générale, un des problèmes potentiellement important semble être lié à une surestimation de dépôt humide. Les traitements complémentaires qui seront conduits devraient éclaircir ce point.

## BIBLIOGRAPHIE

- Avila, A. and F. Roda (2002)  
Assessing decadal changes in rainwater alkalinity at a rural Mediterranean site in the Montseny mountains (NE Spain), *Atmos. Environ.*, 36, 2881-2890.
- Bergametti, G., L. Gomes, E. Remoudaki, M. Desbois, D. Martin and P. Buat-Ménard (1989)  
Present transport and deposition patterns of African dusts to the North-Western Mediterranean, in *Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and past patterns of global atmospheric transport*, M. Leinen and M. Sarnthein eds, NATO ASI SERIES Series n° 282, Kluwer Publ. Company, Dordrecht, pp 227-252.
- Fécan, F., B. Marticorena and G. Bergametti (1999)  
Parameterization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas, *Ann. Geophysicae*, 17, 149-157.
- Forêt, G., G. Bergametti, F. Dulac and L. Menut (2006)  
An optimized particle size bin scheme for modelling mineral dust aerosols, *J. Geophys. Res.*, 111, D17310, doi:10-1029/2005JD006797.
- Garcia Nieto, P. J., B. Arganza Garcia, J. M. Fernandez Diaz and M. A. Rodriguez Brana (1994)  
Parametric study of selective removal of atmospheric aerosol by below-cloud scavenging, *Atmos. Environ.*, 28, 2235–2342.
- Giorgi, F., J.S. Pal, X. Bi, L. Sloan, N. Elguindi and F. Solmon (2006)  
Introduction to the TAC Special Issue: The RegCNET network. *Theor. Appl. Climatol.*, 86, 1-4.
- Konaré A., A. S. Zakey, F. Solmon, F. Giorgi, S. Rauscher, S. Ibrah and X. Bi (2008)  
A regional climate modeling study of the effect of desert dust on the West African monsoon, *J. Geophys. Res.*, 113, D12206, doi:10.1029/2007JD009322.
- Laurent, B., B. Marticorena, G. Bergametti, J.F. Léon and N. M. Mahowald (2008)  
Modeling mineral dust emissions from the Sahara desert using new surface and soil developments, *J. Geophys. Res.*, 113, D14218, doi:10.1029/2007JD009484.
- Löye-Pilot, M.D. and J.M. Martin (1996)  
Saharan dust input to the Western Mediterranean: an eleven years records, in *The Impact of Desert Dust across the Mediterranean*, S. Guerzoni and R. Chester eds, Kluwer Publishing Company, 191-199.
- Marticorena, B. and G. Bergametti (1995)  
Modeling the atmospheric dust cycle: 1-Design of a soil derived dust production scheme, *J. Geophys. Res.*, 100, 16415-16430.
- Marticorena, B., G. Bergametti, B. Aumont, Y. Callot, C. N'Doumé and M. Legrand (1997)  
Modeling the atmospheric dust cycle: 2-Simulation of Saharan sources, *J. Geophys. Res.*, 102, 4387-4404.
- Marticorena, B., P. Chazette, G. Bergametti, F. Dulac and M. Legrand (2004)  
Mapping the aerodynamic roughness length of desert surfaces from the POLDER/ADEOS bi-directional reflectance product, *Int. J. Remote Sens.*, 25, 603-626.
- Menut, L., G. Forêt and G. Bergametti (2007)  
Sensitivity of mineral dust concentrations to the model size distribution accuracy, *J. Geophys. Res.*, 112, D10210, doi: 10.1029/2006JD007766.
- Slinn, S. A. and W. G. N. Slinn (1980)  
Prediction for particle deposition on natural waters, *Atmos. Environ.*, 14, 1013–1016.
- Solmon, F., M. Mallet, N. Elguindi, F. Giorgi, A. Zakey, and A. Konaré (2008)  
Dust aerosol impact on regional precipitation over western Africa, mechanisms and sensitivity to absorption properties, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L24705, doi:10.1029/2008GL035900.
- Solmon F., Giorgi F. and Liousse C. (2006)

Aerosol modeling for regional climate studies: Application to anthropogenic particles and evaluation over a European/African domain. *Tellus B*, 58, 51-72.

Textor, C. et al. (2006)

Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1777–1813.

Textor et al. (2007)

The effect of harmonized emissions on aerosol properties in global models – an AeroCom experiment, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4489–4501.

Vautard R., M. Beekmann, J. Roux and D. Gombert (2001)

Validation of a deterministic forecasting system for the ozone concentrations over the Paris area, *Atmos. Environ.*, 35, 2449-246.

Venkatram, A. and J. Pleim (1999)

The electrical analogy does not apply to modeling dry deposition of particles, *Atmos. Environ.*, 33, 3075– 3076.

Wesely, M. L. (1989)

Parameterizations of surface resistance to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models, *Atmos. Environ.*, 23, 1293– 1304.

Zakey, A. S., Solmon, F. and Giorgi, F. (2006)

Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4687-4704.

Zender, C. S., H. Bian, and D. Newman (2003)

The mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: Description and 1990's dust climatology, *J. Geophys. Res.*, 108, 4416, doi:10.1029/ 2002JD002775.

#### **Articles en préparation sur le projet DEMO :**

S. Chevaillier, B. Laurent, R. Losno, G. Bergametti, P. Roullet, J. Vincent, E. Bon Nguyen, N. Ouboulmane, S. Triquet, A new automatic collector to sample total insoluble atmospheric dust deposition, *Atmospheric Environment*, Technical notes, en prép.

J. Vincent, B. Laurent, G. Bergametti, R. Losno, E. Bon Nguyen, S. Chevaillier, P. Roulet, S. Sauvage, P. Coddeville, N. Ouboulmane, A. Tovar Sanchez, A. Massanet, R. Morales Baquero, A. Di Sarra, D. Sferlazzo, F. Dulac, M. Fournier, C. Coursier  
Mineral dust deposition network in the western Mediterranean Basin, *ACPD - ChArMEx special issue*, en prép.

J. Vincent, P. Nabat, B. Laurent, M. Mallet, G. Bergametti, G. Siour, S. Somot, F. Dulac  
Saharan dust deposition simulations with regional models over the western Mediterranean Basin, *ACPD - ChArMEx special issue*, en prép.

#### **Communications:**

J. Vincent, B. Laurent, G. Bergametti, G. Siour, R. Losno  
Measurements and simulations of Saharan dust in the Western Mediterranean Basin, 2<sup>nd</sup> International Chimere Workshop, France, novembre 2013.

J. Vincent, B. Laurent, G. Bergametti, R. Losno, E. Bon Nguyen, S. Chevaillier, P. Roulet, S. Sauvage, P. Coddeville, N. Ouboulmane, G. Siour, A. Tovar Sanchez, A. Massanet, R. Morales Baquero, G. Di Sarra, D. Sferlazzo, F. Dulac, M. Fournier, C. Coursier  
Mineral dust deposition in Western Mediterranean basin, *European Geosciences Union*, Autriche, avril 2014.

