

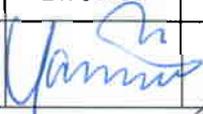
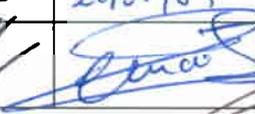
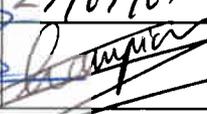
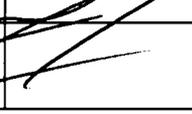
IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Impact radioécologique des retombées de poussières sahariennes

**Episode majeur du 21/02/2004
dans le sud de la France**

Olivier Masson, Laurent Pourcelot,
Rodolfo Gurriaran, Pascal Paulat

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'INTERVENTION
Service d'Etude et de Surveillance
de la Radioactivité
dans l'Environnement

Demandeur	Auto saisine SESURE				
Référence de la demande					
Numéro de la fiche programme					
<p>Impact radioécologique des retombées de poussières sahariennes</p> <p>Evènement majeur du 21 février 2004 dans le sud de la France</p> <p>Laboratoire d'Etude Radioécologique du milieu Continental et Marin</p> <p>Rapport DEI/SESURE n° 2005-04</p>					
	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur*	Chef du SESURE	Directeur DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	O. MASSON	Ph. RENAUD	N. LEMAITRE	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	21/02/05	23/02/05	23/05/05	25/05/05	
Signatures					

* rapport sous assurance de la qualité

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteur	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires
0	21/02/2005	Olivier MASSON		Emission du document
1	03/05/2005	Olivier MASSON		Prise en compte corrections de N. LEMAITRE

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Organisme
Olivier MASSON	IRSN / DEI / SESURE / LERCM
Laurent POURCELOT	IRSN / DEI / SESURE / LERCM
Rodolfo GURRIARAN	IRSN / DEI / STEME / LMRE
Michèle AGARANDE	IRSN / DEI / STEME / LMRE
Pascal PAULAT	IRSN / DEI / SESURE / LERCM
Jean-Michel MÉTIVIER	IRSN / DEI / SECRE / LME
Guy CAUTENET	LAMP CNRS/Université Clermont-Ferrand

LISTE DE DIFFUSION

Nom	Organisme
Jacques REPUSSARD	IRSN / DG / EC
Michel BRIERE	IRSN / DG / EC
Marie-Pierre BIGOT	IRSN / DCOM / DCOM
Fabienne SOULET	IRSN / DESTQ / DICST/CRIS
Denis BOULAUD	IRSN / DESTQ / DEAS
Jean-Claude BARESCUT	IRSN / DSDRE / DPS
André OUDIZ	IRSN / DSDRE / DPS
Didier CHAMPION	IRSN / DEI / DIR
Gerno LINDEN	IRSN / DEI / DIR
Bruno DUFER	IRSN / DEI / DIR
Nathalie LEMAITRE	IRSN / DEI / SESURE/EC
Jean-christophe GARIEL	IRSN / DEI / SECRE/EC
Jean-Marc PERES	IRSN / DEI / SARG/EC
Jean-pierre MAIGNÉ	IRSN / DEI / SIAR/EC
Marie-Christine ROBÉ	IRSN / DEI / STEME/EC
Philippe DUBIAU	IRSN / DEI / SESUC/EC
Olivier ISNARD	IRSN / DEI / SESUC/BMTA
Olivier PIERRARD	IRSN / DEI / SESURE/LVRE
Bernard DESCAMPS	IRSN / DEI / SESURE/LESE
Philippe RENAUD	IRSN / DEI / SESURE/LERCM
Patrick BOUISSET	IRSN / DEI / STEME/LMRE
Serge DESPIAU	LAMP CNRS/Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand
Guy CAUTENET	LEPI CNRS/Université Toulon La Valette

RESUME

Lithométéores, « Sirocco » ou plus communément pluies et boues rouges, ont en commun un seul et même phénomène de transport éolien associant érosion et dépôt de particules désertiques.

Le 21 février 2004, la moitié sud de la France est affectée par un événement météorologique de transport éolien de particules sahariennes. Les enregistrements d'empoussièrement atmosphérique et le dépôt de poussières qui en résulte, révèlent un épisode d'ampleur exceptionnelle. En quelques heures, l'épaisseur du dépôt dépasse 1 mm (jusqu'à 4 mm en Corse) avec une charge surfacique maximum de 50 g.m^{-2} (soit encore 50 tonnes au km^2). Les charges en particules de type PM_{10} ¹ dans l'air, enregistrées par les associations de surveillance de la qualité de l'air, indiquent des concentrations multipliées par dix au maximum au passage du nuage et une emprise au sol du panache comprise entre 300 000 et 350 000 km^2 . Au final, 2 millions de tonnes sont déposés sur une portion du territoire située au sud d'une ligne allant de Nantes à Besançon.

L'impact radioécologique de cet événement se traduit par des niveaux d'activité massique conséquents dans les dépôts : $38 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ sec}$ en ^{137}Cs , $1 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ sec}$ en $^{(239+240)}\text{Pu}$ et $0,46 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ sec}$ en ^{241}Am . La radioactivité artificielle déposée sur l'ensemble de la surface touchée par les dépôts est estimée à 37.10^{10} Bq . En terme de flux de dépôt atmosphérique, cet épisode représente à lui seul, un dépôt de ^{137}Cs équivalent à celui cumulé en moyenne sur une année. Les données de cette étude montrent que ces épisodes météo-climatiques génèrent aujourd'hui les échantillons de l'environnement qui en moyenne, présentent les niveaux d'activité en radionucléides artificiels les plus importants et les flux les plus élevés, dépassant par exemple ceux des sédiments du Rhône déposés par les crues.

En routine, l'évolution des niveaux d'activité des radionucléides artificiels dans le compartiment atmosphérique proche du sol est mise sur le compte d'une remise en suspension d'aérosols antérieurement déposés. Dans le cas particulier d'épisodes porteurs de poussières sahariennes, au-delà du mécanisme de remise en suspension à l'origine du soulèvement des particules de sols sahariens, d'autres mécanismes sont susceptibles d'intervenir tout au long du transport et jusqu'au dépôt sur le sol français. Ces mécanismes, déjà identifiés pour d'autres composés atmosphériques ou polluants, sont des pistes pour tenter d'expliquer l'enrichissement en radioactivité, relatif ou absolu, des particules minérales originaires du Sahara. Deux hypothèses sont avancées pour expliquer l'enrichissement : la chute rapide des particules minérales les plus grosses et également les moins marquées sur le plan radioactif qui se traduit par une augmentation relative de l'activité massique, un processus s'apparentant à un « lessivage horizontal » des composés ou polluants présents dans l'atmosphère au cours du transport.

La contribution de ces phénomènes sporadiques aux dépôts atmosphériques à l'échelle annuelle comme à celle des dix ou vingt dernières années, ne peut être négligée. Des études complémentaires sont nécessaires pour évaluer le poids de ces phénomènes à l'échelle pluriannuelle dans l'appauvrissement du compartiment atmosphérique et à un niveau de connaissance encore plus approfondi, celui des dépôts d'activité associés à des poussières désertiques, par les voies sèche et humide. Un suivi régulier de ces événements représente, compte tenu des performances météorologiques en place aujourd'hui à l'IRSN, une opportunité pour le suivi atmosphérique des isotopes du plutonium.

MOTS-CLES

SAHARA, POUSSIÈRES, RADIONUCLÉIDES, REMISE EN SUSPENSION, DÉPÔTS, IMPACT, FÉVRIER 2004, FRANCE.

¹ Particules en suspension d'un diamètre aérodynamique moyen inférieur ou égal à 10 microns. Cette limite correspond aux particules respirables.

ABSTRACT : Radioecological impact of saharan dust fallout - Case study of a major event in south part of France in February 2004

Lithometeors, Sirocco or more commonly "red mud" are all in fact related to a single phenomenon which affects France every year: the wind transport and deposit of desert particles from the Sahara. On the 21st of February 2004, the southern part of France is swept by a weather event of wind transport of Saharan particles. The recordings of atmospheric dust contamination and the deposit of dust, which results from it, make an episode of exceptional width. In a few hours, the thickness of the deposit exceeds 1 mm (up to 4 mm in Corsica) with a maximum density of surface charge of 50 g.m⁻² (50 tons per km²). The loads of the PM₁₀ type particles in the air, recorded by associations of monitoring of the quality of the air, indicate concentrations multiplied to the maximum by 10 and an influence on the ground of the plume ranging between 300 000 and 350 000 km². To the end, 2 million tons are deposited on a portion of the territory located at the south of a line from Nantes to Besançon.

This event also had a significant radio-ecological impact, leading to significant ¹³⁷Cs, (²³⁹⁺²⁴⁰)Pu, ²⁴¹Am, activity levels of 38 Bq.kg⁻¹ sec, 1 Bq.kg⁻¹ sec and 0,46 Bq.kg⁻¹ sec, respectively. Quality of air monitoring organisations recorded 10-fold increases in the concentration of charged PM₁₀² type particles within the cloud; ground coverage stretched over a 300 000 km² surface area. Across this whole area, the artificial radioactivity deposits are estimated to 37.10¹⁰ Bq. In term of flow of deposit, this episode represents, with him only, i.e. in a few hours, a ¹³⁷Cs deposition equivalent to that recorded on average in a cumulated time of one year. Data from this study show that these weather-climatic episodes generate today, environmental samples which on average, present the highest levels and flux of artificial radioactivities, more than those in the sediments of the Rhone river deposited by flood events, for example.

Changes in artificial radionuclide activity levels in the atmospheric area close to ground level are routinely attributed to resuspension of formerly deposited aerosols. In the particular case of the Saharan dust deposits, apart from the resuspension mechanisms that caused the Saharan soil particles to be taken up, other mechanisms may have intervened during transports up until deposit on French soil. Such mechanisms, which have already been identified for other atmospheric compounds or pollutants, give a lead in attempting to understand the enhanced relative or absolute radioactivity of the mineral particles. Two hypotheses have been put forward to explain this enhanced radioactivity: either a process rather like a "horizontal leaching" of compounds or pollutants present in the atmosphere during transport, or the early fall of the heavier and thus less radioactive mineral particles, giving rise to a relative increase in specific activity.

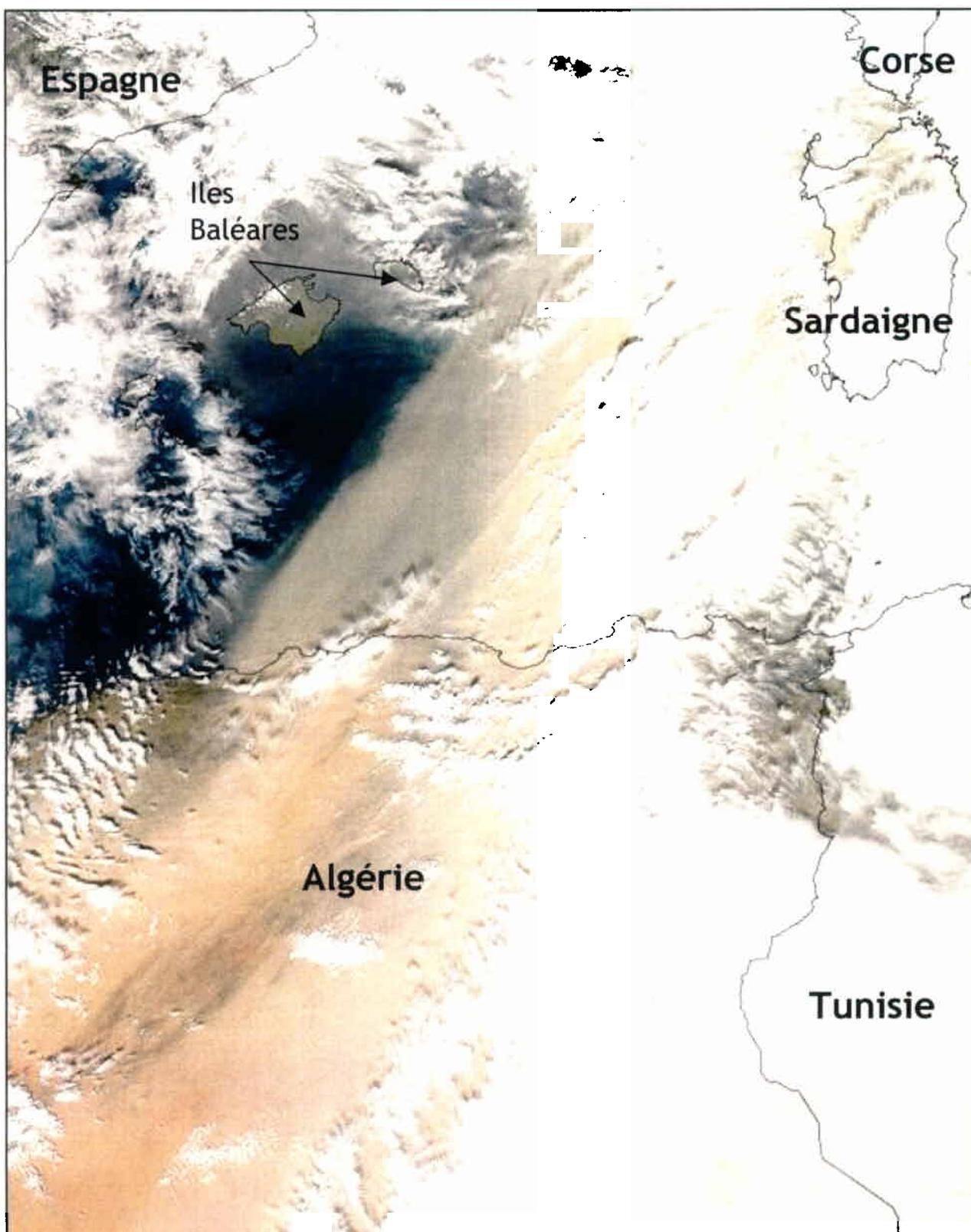
One cannot overlook the contribution these sporadic phenomena make to atmospheric deposits on an annual basis. Further studies are needed to evaluate the weight of these phenomena on a multiannual scale in the reduction of activity levels in the atmospheric compartment by dry or wet process and at short time scale the deposition of radioactivity with dust from remote regions.

Taking into account current metrological performance devices at the IRSN (Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety), regular monitoring of these events allow opportunity to follow the changes of plutonium isotopes in the atmosphere.

KEY WORDS

SAHARA, DUST, RADIONUCLIDES, RESUSPENSION, DEPOSITS, IMPACT, FEBRUARY 2004, FRANCE.

² Particulate matter with aerodynamic diameter less or equal to 10 microns (breathable particles)



Panache de poussières désertiques sur l'Algérie, à destination de la France et de l'Italie, le 21/02/04. Photo prise par le radiomètre MODIS embarqué sur le satellite TERRA à 13h00 TU au-dessus de l'Algérie.

Remerciements

Les auteurs expriment leurs remerciements aux organismes ayant gracieusement mis à disposition leurs informations et mesures relatives à l'épisode du 21 février 2004, sans lesquelles une partie de ce travail n'aurait pu être réalisée, en particulier :

- l'association « MétéoSudEst »,
- les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQUA) :
 - o Air-APS : Surveillance de la qualité de l'air de l'Ain et des Pays de Savoie,
 - o AirAQ : Surveillance de la qualité de l'air en Aquitaine,
 - o Airfobep : Surveillance de la qualité de l'air de l'étang de Berre et de l'Ouest des Bouches du Rhône,
 - o Air-LR : Surveillance de la qualité de l'air en Languedoc - Roussillon,
 - o Airmaraix : Surveillance de la qualité de l'air à l'Est des Bouches du Rhône, du Var et du Vaucluse,
 - o Airparif : Surveillance de la qualité de l'air en Ile-de-France,
 - o AirPL : Surveillance de la qualité de l'air des Pays de la Loire,
 - o Ampasel : Surveillance de la qualité de l'air sur Saint Etienne et le Département de la Loire,
 - o Arpam et Asqab: Surveillance de la qualité de l'air en Franche-Comté,
 - o Ascoparg : Contrôle et préservation de l'air dans la région grenobloise,
 - o Asquadra : Surveillance de la qualité de l'air en Drome et Ardèche,
 - o Atmo-Auvergne : Surveillance de la qualité de l'air en Auvergne,
 - o Atmo-CA : Surveillance de la qualité de l'air en Champagne-Ardenne,
 - o Atmo-Poitou-Charentes : Surveillance de la qualité de l'air en Poitou-Charentes,
 - o Atmosfair : Surveillance de la qualité de l'air en Bourgogne,
 - o Coparly : Comité pour le contrôle de la Pollution Atmosphérique sur le Rhône et la région lyonnaise,
 - o Ligair : Surveillance de la qualité de l'air en région Centre,
 - o Limair : Surveillance de la qualité de l'air en Limousin,
 - o Oramip : Observatoire pour la surveillance de la qualité de l'air en Midi-Pyrénées,
 - o Qualitair : Surveillance de la qualité de l'air dans les départements des Alpes Maritimes, Alpes de Haute Provence et Hautes Alpes.
- EDF Corse,
- le Laboratoire de Météorologie Physique de l'Université Blaise Pascal / CNRS de Clermont-Ferrand.

SOMMAIRE

1 CONTEXTE DE L'ETUDE	6
2 ETAT DES LIEUX DE LA RADIOACTIVITE DU COMPARTIMENT ATMOS-PHERIQUE	6
3 IMPACT RADIOECOLOGIQUE DES RETOMBES DE POUSSIERS DESERTIQUES: LES QUESTIONS POSÉES	8
4 EVENEMENT DU 21/02/04	8
4.1 SITUATION METEOROLOGIQUE	8
4.2 ORIGINE DU PANACHE	9
4.3 COLLECTE D'ECHANTILLONS	12
4.4 TRAITEMENTS ET CARACTERISATION DE L'ECHANTILLON	13
4.5 ETENDUE DES ZONES IMPACTEES	16
5 IMPACT RADIOECOLOGIQUE DES DEPOTS DE POUSSIERS SAHARIENNES: LES REPNSES	18
5.1 NIVEAUX D'ACTIVITE DANS LES ECHANTILLONS	19
5.1.1 Radioactivité naturelle	19
5.1.2 Radioactivité artificielle	20
5.1.3 Estimation de l'activité totale déposée le 21/02/04	25
5.2 CONTRIBUTION DES EPISODES EOLIENS ANCIENS A L'EVOLUTION DES NIVEAUX D'ACTIVITES ARTIFICIELLES DANS LES SOLS EN FRANCE	27
5.3 ESSAIS NUCLEAIRES FRANÇAIS AU SAHARA	29
6 MECANISMES D'ENRICHISSEMENT	30
7 CONCLUSION	31
8 PERSPECTIVES	32

1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Les études sur le transport et les variations de concentrations en aérosols font actuellement l'objet d'une attention soutenue de la part de la communauté scientifique française et internationale pour le rôle direct sur les modifications des propriétés microphysiques et radiatives des nuages, leur formation et les précipitations, et indirectement sur les changements climatiques induits à court et long termes (colloque CNRS AEI - Paris février 2004). Les sources actuelles d'incertitudes résultent d'un déficit de compréhension des mécanismes physiques et chimiques impliqués, notamment sur les interactions avec les autres composants de l'atmosphère (gaz, autres aérosols et nuages) et d'un manque de données expérimentales adaptées (2nd workshop on mineral dust - Paris septembre 2003).

Les aérosols désertiques sont un constituant majeur des aérosols atmosphériques (Dulac 1996) et arrivent en tête des sources naturelles ou anthropogènes d'émission de particules de tailles inférieures à 100 µm, avec des estimations comprises entre 500 et 2000 millions de tonnes/an (D'Almeida (1986) cité par A. Renoux et D. Boulaud, Goudie (2001)). D'ores et déjà, la recrudescence des épisodes de poussières désertiques depuis 35 ans avec des conditions de sécheresse aggravantes et les mouvements de populations, au Sahel notamment, est clairement établie (communication personnelle Cyril Moulin LSCE, Nouaceur 2001, Goudie 2003). Des simulations récentes prévoient d'ici 2100, l'augmentation dans un rapport de 1 à 3 des épisodes de production de poussières désertiques et de façon connexe, de la charge en poussières dans le compartiment atmosphérique (Woodward 2003). Ces simulations sont basées sur l'accroissement des étendues désertiques du fait du réchauffement climatique ou de la gestion humaine des espaces et sur les modifications du bilan radiatif de l'atmosphère, liées au chargement atmosphérique en poussières (cf. Annexe 1).

Le rôle des épisodes de transport éoliens de particules désertiques est bien documenté dans la littérature pour les apports de particules, d'azote, de phosphore, d'aluminium et de fer notamment au milieu marin méditerranéen (Loje-Pilot 2003, Programme ADIOS). En revanche, peu de travaux concernent les flux et dépôts de radioactivité artificielle sur les sols, sous forme de retombées sèches et/ou humides, lors d'épisodes de poussières désertiques. Papastefanou (1989, 2001) établit un lien entre les résultats d'activité en ¹³⁷Cs dans des poussières atmosphériques et plusieurs épisodes de transport éolien de particules désertiques sur la Grèce. Dans son étude, Lee (2002) met en évidence que l'origine des apports atmosphériques en ¹³⁷Cs, ⁽²³⁹⁺²⁴⁰⁾Pu et ²⁴¹Am n'est plus stratosphérique mais intègre une composante terrestre. La contribution de ces épisodes, à la totalité des activités déposées via l'atmosphère dans la partie occidentale de la Méditerranée sur une année, est estimée à 34 % pour le ⁽²³⁹⁺²⁴⁰⁾Pu, 35 à 41 % pour le ²⁴¹Am et entre 29 et 37% pour le ¹³⁷Cs (Lee 2003). D'après les données de Lee (2003), ces épisodes de poussières sahariennes déposent chaque année dans la partie occidentale de la Méditerranée, entre 2 et 3 fois plus de ¹³⁷Cs et entre 1,2 et 1,4 fois plus de ²⁴¹Am que les apports par le Rhône, en moyenne annuelle.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet « EXTREME » mené au sein de la Direction de l'Environnement et de l'Intervention, visant à étudier les conséquences sur l'environnement, et donc sur l'homme, des situations événementielles susceptibles de générer des activités supérieures à celles attendues à partir de la modélisation des processus de transfert moyen, et de produire des flux souvent équivalents aux flux cumulés sur plusieurs mois, voir plusieurs années. (Cf. Rapport DEI/SESURE n° 2005-07).

2 ETAT DES LIEUX DE LA RADIOACTIVITE DU COMPARTIMENT ATMOSPHERIQUE

Les données de l'Observatoire Permanent de la Radioactivité de l'environnement (réseau OPERA de l'IRSN) permettent de résumer l'évolution spatiale et temporelle des niveaux d'activité en ¹³⁷Cs dans les aérosols atmosphériques collectés en France, de la façon suivante : d'un point de vue géographique, la figure 1a montre l'existence d'un gradient croissant d'activité en ¹³⁷Cs dans les aérosols, entre les stations situées à l'ouest du territoire (Bordeaux, Alençon) et les stations situées à l'est (Dijon, Charleville et La Seyne/Mer) présentant les niveaux les plus élevés. D'un point de vue historique, le niveau d'activité du ¹³⁷Cs, dans les basses couches atmosphériques deux ans avant l'accident de Tchernobyl, était calqué sur celui du ⁷Be, d'origine cosmogénique et reflétait les échanges de masses d'air entre la stratosphère (le réservoir alimenté par les explosions d'engins thermonucléaires) et la troposphère. A partir de 1987, le compartiment terrestre contribue de façon graduellement croissante à ce niveau d'activité atmosphérique en ¹³⁷Cs par l'intermédiaire de la remise en suspension de particules déposées ; pour en devenir depuis 1998, le contributeur principal dans les aérosols au voisinage du sol (Bouisset 2004).

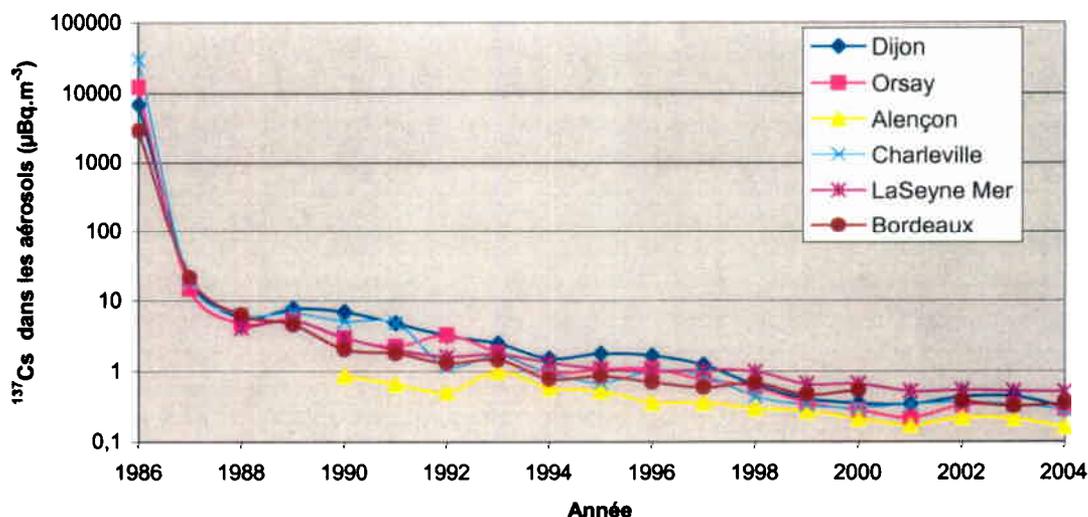


Figure 1a : Evolution du niveau d'activité en ¹³⁷Cs dans les aérosols, en France. Détail par station du réseau OPERA - Contribution déduite de l'incident d'Algésiras (fin mai - début juin 1998)

Aujourd'hui, les niveaux d'activités en ¹³⁷Cs dans les aérosols en France (comme pour l'ensemble des radionucléides artificiels) sont à leur niveau le plus bas jamais rencontré, entre 0,2 et 0,3 $\mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ d'air, depuis le début de la période des tirs (Figure 1b).

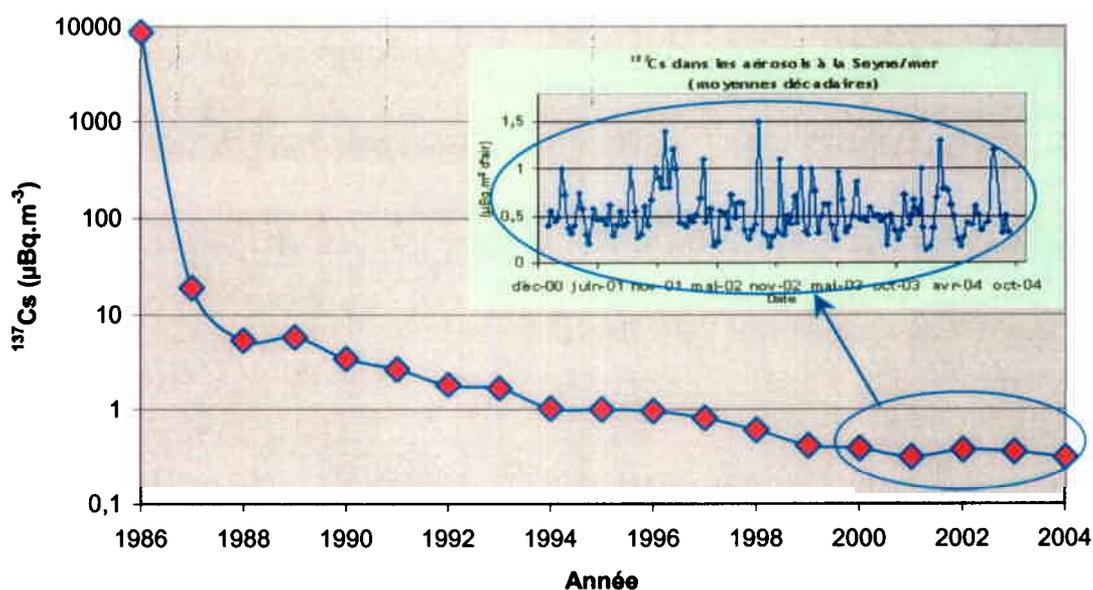


Figure 1b : Evolution moyenne du niveau d'activité en ¹³⁷Cs dans les aérosols, en France (contribution déduite de l'incident d'Algésiras de mai 1998) et détail sur la variabilité temporelle à la station de la Seyne/Mer

La stabilisation à l'échelle annuelle du bruit de fond a tout au plus entre 3 et 5 ans d'existence, ce qui reste insuffisant pour pouvoir dégager une tendance significative qui signerait uniquement la décroissance du niveau d'activité en césium 137 due à sa période radioactive. La variabilité, obtenue au rythme de prélèvement décadaire, témoigne d'un équilibre entre remise en suspension et dépôt de particules. A ces phénomènes quasi-permanents s'ajoute ponctuellement celui des dépôts massifs de particules désertiques.

En ce qui concerne les isotopes du plutonium et l'Américium 241, les niveaux d'activité volumique sont, depuis 1995, inférieurs aux limites de détection estimées à environ 1 $\text{nBq}\cdot\text{m}^{-3}$.

3 IMPACT RADIOECOLOGIQUE DES RETOMBÉES DE POUSSIÈRES DESERTIQUES : LES QUESTIONS POSÉES

D'un point de vue radioécologique, un certain nombre de questions se posent :

- Quel est l'impact de ces épisodes, passés, présents et à venir sur l'évolution des niveaux d'activités artificielles dans l'air, l'eau et les sols en France ?
- Quelle est l'origine des activités présentes dans ces poussières : retombées globales des tirs atmosphériques, essais nucléaires français au Sahara, accident de Tchernobyl ?
- En quoi ces épisodes ont pu « accélérer » les retombées atmosphériques et participer ainsi à l'épuisement des stocks de radionucléides au niveau du compartiment troposphérique ?
- En quoi les retombées de poussières sahariennes, souvent associées à des précipitations, peuvent-elles influencer les relations pluie/dépôt ?
- Quelle incidence a pu avoir l'épisode de poussières désertiques enregistré sur la Corse peu de temps après l'accident de Tchernobyl ?

Pour apporter des éléments de réponse à ces questions, il convient de s'intéresser aux caractéristiques initiales des particules sahariennes, à leurs modifications au cours du transport et aux mécanismes mis en jeu, en particulier :

- à la radioactivité initiale des sols sahariens,
- à l'évolution des spectres granulométriques et de densité des particules avec l'éloignement de leur zone de formation,
- au mécanisme de remise en suspension de particules de sol,
- à l'enrichissement absolu ou relatif des particules minérales au cours de leur transport :
 - o par ségrégation en fonction de la densité des particules,
 - o par agglomération des particules minérales entre-elles ou avec d'autres aérosols présents avant l'arrivée du nuage de poussières et porteurs de traces de radioactivité,
- à la réactivité chimique de ces poussières,
- à la part de ces retombées sous forme humide et sous forme sèche,

L'étude des mécanismes est abordée dans la seconde partie du document.

4 EVENEMENT DU 21 FEVRIER 2004

4.1 SITUATION METEOROLOGIQUE

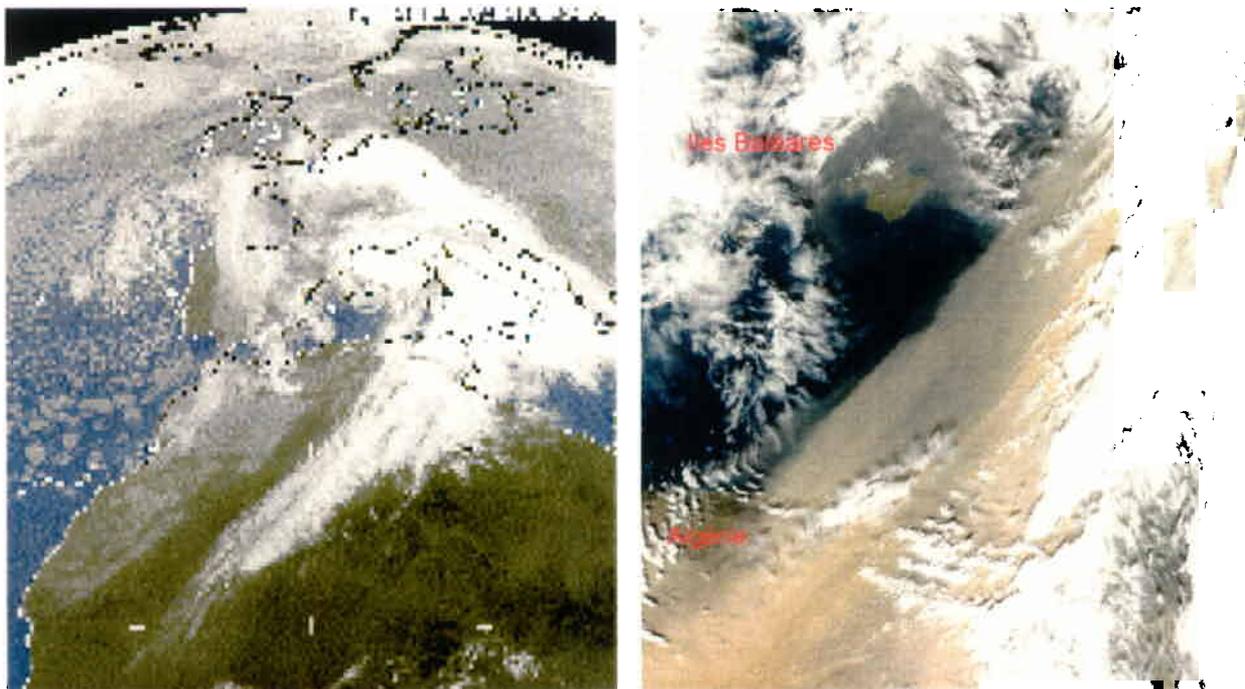
Vendredi 20 février 2004 en début de soirée et samedi 21 février 2004, une dépression située sur le proche Atlantique engendre sur la France un rapide flux cyclonique de sud. De l'air chaud et humide en basses couches remonte de l'Afrique du Nord pendant qu'une tempête d'Est affecte le pourtour méditerranéen. Ce courant d'Est engendre un spectaculaire effet de Föhn sur la façade ouest de la Corse avec 24,2 °C mesurés à Ajaccio à 4h00 du matin (source : Bulletin hebdomadaire d'études et de renseignements Météo-France : Météo-hebdo n° 2004-8).

Le 21 février 2004 au lever du jour, une brume de sable et un dépôt de sable et de boue (d'une épaisseur de 2 à 4 mm) sont observés à Calvi. L'importance des dépôts en fait un événement climatique qualifié d'exceptionnel par Météo-France. Habituellement, les dépôts induits par ces épisodes atteignent en moyenne quelques dixièmes de millimètre tout au plus.

Associés à un courant de Sud en altitude, des pluies instables mêlées de boue et de sables affectent la Corse, la Provence et les Alpes du sud. Ces précipitations faiblissent l'après-midi et restent dans l'ensemble très limitées en région PACA : 3,6 mm à Aubagne (13) ; 3,0 mm à Peypin (13) ; 1,2 mm à Château-Gombert (13) ; 9,8 mm à La Roque d'Anthéron (13) ; 7,1 mm à Besse/Issole (83) ; 9,8 mm à Nîmes (30) ; 4,7 mm à Valensole (04) ; 5,6 mm à Vinon/Verdon (83).

4.2 ORIGINE DU PANACHE

D'après les images satellites, l'origine du panache est localisée dans la région située au sud du Maroc (Figure 2a). Le nuage se déploie ensuite sur l'Algérie (Figure 2b) où les villes de Bejaïa, Touggourt, Hassi-Messaoud, Constantine et Annaba sont balayées par une tempête de sable, avant de traverser la Méditerranée (Source : <http://membres.lycos.fr/meteopeypin/Relevés.html>, dossier « Boue »).



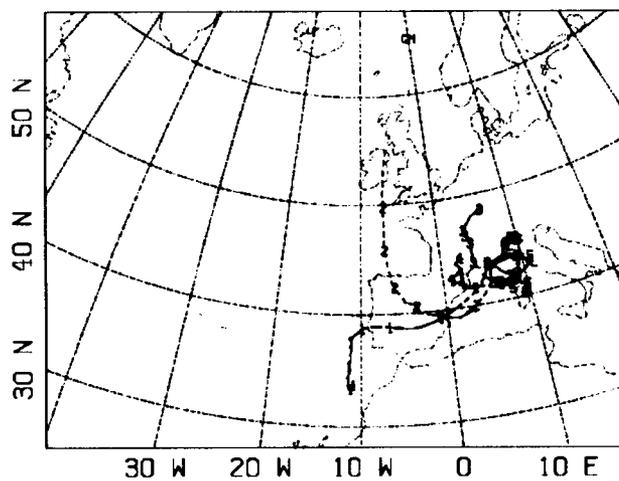
Figures 2a et 2b : Images satellite MODIS³ du panache de poussières sahariennes du 21/02/04

Une modélisation de la dispersion du panache a également été réalisée par le Laboratoire de Météorologie Physique (LAMP) de Clermont-Ferrand (Figure 4) pour délimiter les zones impactées. Les calculs ont été réalisés à l'aide du modèle RAMS⁴. En première estimation, une maille de calcul de 100 X 100 km a été jugée suffisante pour rendre compte de l'origine et des principales zones concernées par la dispersion du panache de particules. Dans un premier temps, les précipitations n'ont pas été considérées. La prise en compte du dépôt humide a été réalisée ultérieurement. Le modèle réalise un forçage à grande échelle utilisant les données du centre de prévision météorologique de Reading (UK) à partir desquelles le modèle recalcule les champs de température, d'humidité et de vent pour plusieurs niveaux de pression. Concernant le polluant, ici des poussières, un module de soulèvement développé par le LISA (Université Paris XII) est mis en oeuvre ainsi qu'un module de dépôt sec, retenu en première approximation compte tenu des faibles niveaux de précipitations enregistrés.

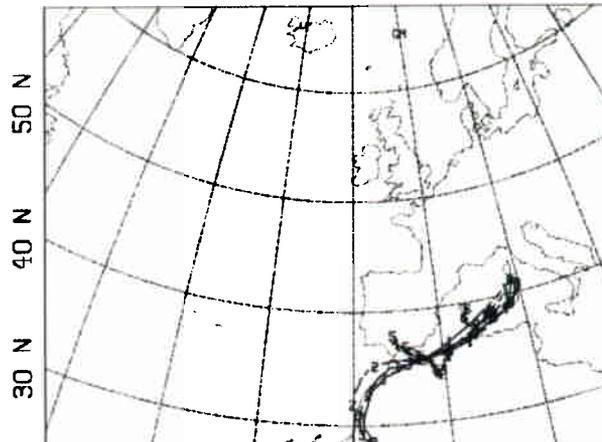
Afin de préciser l'origine géographique de la zone de soulèvement des poussières au cours du temps, un calcul de retro-trajectoires a été réalisé pour les sites de Manosque et Bonifacio où ont été collectés des dépôts (Figure 3). Le 20 février, un cisaillement dans le plan vertical traduit l'origine différente des masses d'air au-dessus de Manosque alors qu'au même instant, Bonifacio est déjà soumis à un système organisé provenant d'Algérie, quelle que soit l'altitude. Le 21 février, les deux stations sont sous l'influence d'une masse d'air empruntant un couloir unique passant par le centre de l'Algérie, excepté autour de 500 m sur Manosque. Le 22 février, la situation est analogue à celle du 21 février, avec toutefois des trajectoires légèrement plus septentrionales que la veille du fait de du glissement de la dépression.

³ MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

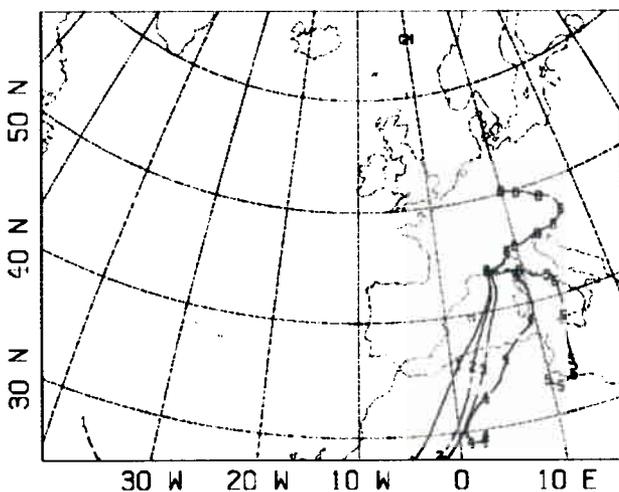
⁴ Le modèle RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) est un modèle numérique de l'atmosphère à moyenne échelle pour produire des prévisions météorologiques quotidiennes. Le modèle RAMS peut être appliqué à un large éventail de conditions limites et de schémas de paramétrage. A des fins de recherche ou pour obtenir une résolution spatiale élevée (par exemple 25 m de résolution verticale et 500 m à l'horizontale dans l'atmosphère), le modèle effectue un calcul sur des grilles de tailles différentes, emboîtées les unes dans les autres. Il s'agit d'un modèle aux différences finies qui résout, sur une grille tridimensionnelle, les équations aux dérivées partielles décrivant l'écoulement et la thermodynamique des fluides. Il offre ainsi une méthode de pointe axée sur des principes physiques pour la modélisation météorologique à haute résolution spatiale.



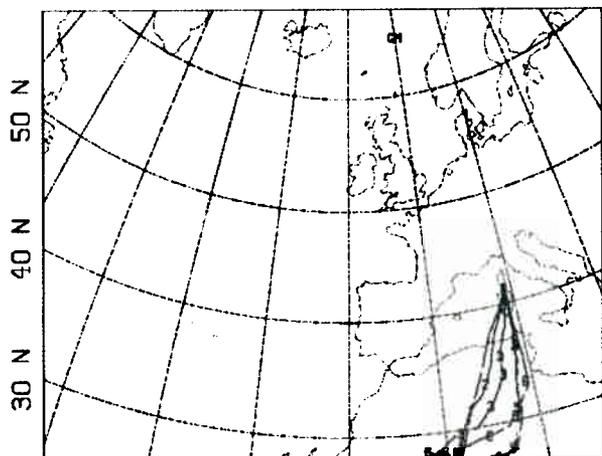
Arrivée sur Manosque le 20/02/04 à 12h00 TU



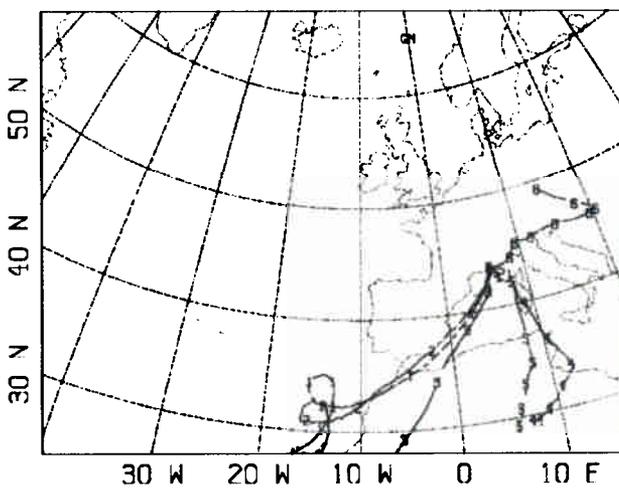
Arrivée sur Bonifacio le 20/02/04 à 12h00 TU



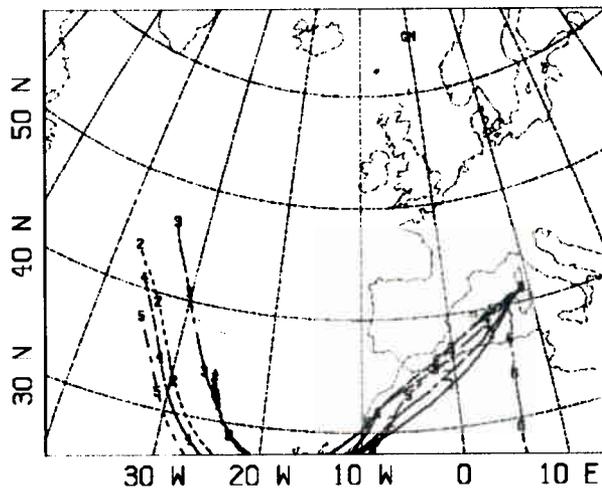
Arrivée sur Manosque le 21/02/04 à 12h00 TU



Arrivée sur Bonifacio le 21/02/04 à 12h00 TU



Arrivée sur Manosque le 22/02/04 à 12h00 TU



Arrivée sur Bonifacio le 22/02/04 à 12h00 TU

Figure 3 : Retro-trajectoires des masses d'air arrivant sur Manosque et Bonifacio, entre le 20/02/04 et le 22/02/04. (Source : G. Cautenet, Laboratoire de Météorologie Physique de l'Atmosphère. CNRS/Université Clermont-Ferrand).

Le chiffre placé à côté d'une trajectoire indique l'altitude considérée au-dessus du niveau de la mer : 1 = 4300 m ; 2 = 3000 m ; 3 = 2000 m ; 4 = 1200 m ; 5 = 1000 m ; 6 = 500 m.

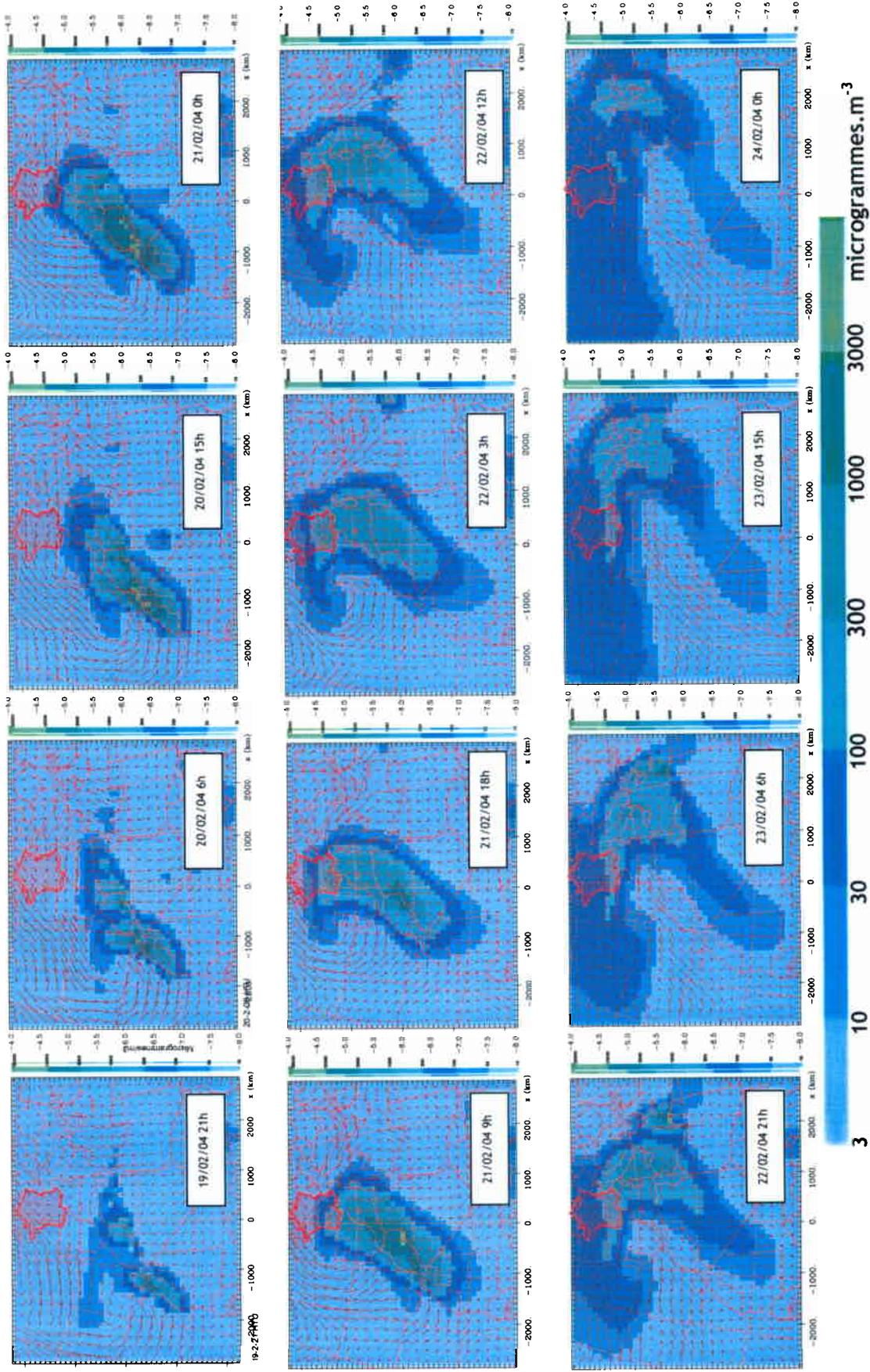


Figure 4 : Modélisation de la dispersion du panache de poussières sahariennes entre le 19/02/04 et le 24/02/04 (sans prise en compte des précipitations) Source : Guy Cautenet, Laboratoire de Métrologie Physique de l'Atmosphère. CNRS/Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand)

4.3 COLLECTE D'ÉCHANTILLONS

Un échantillon spécifique de poussières désertiques a été collecté le 21 février 2004 à Manosque, à l'état de boue liquide de couleur brune (Figures 5a et 5b). Ce dépôt a d'abord eu lieu sous forme sèche dans la nuit du 20 au 21 février, puis sous la forme de pluie à partir de 10 heures et jusqu'en début d'après-midi du 21 février. La collecte spécifique du dépôt a été réalisée sur une bâche de 37 m² ce qui a permis la constitution d'un échantillon conséquent de 390 grammes, soit un dépôt surfacique de 10,5 g.m⁻². A cet échantillon, s'ajoutent ceux collectés en routine dans le cadre :

- de l'observatoire OPERA :
 - poussières en suspension (aérosols) à 1,5 m du sol, prélevées par filtration de 32 750 m³ d'air entre le 20 et le 25 février 2004, à la station de la Seyne/Mer. La masse de particules piégées est de 3,16 g pour un volume filtré de 32 749 m³, soit une charge particulaire équivalente de 96 µg.m⁻³; valeur cohérente avec celle déduite des enregistrements de PM₁₀ pendant le temps de présence du panache sur le site ; évalué à 37 heures (Figure 7).
 - précipitations à la station de la Seyne/Mer du 1^{er} au 28 février 2004.
- du réseau de surveillance de la radioactivité géré par le SESURE/LVRE et relatif aux filtres journaliers d'aérosols prélevés entre le 19 et le 22 février 2004 (sur environ 200 à 300 m³) sur les sites de Montfaucon (Gard), Nice (Alpes Maritimes) et Cadarache (Bouches du Rhône).

D'autres échantillons pourraient venir compléter à terme ces prélèvements, notamment :

- l'eau de pluie prélevée à Toulon par la Marine Nationale du 20 au 23 février 2004,
- celle prélevée par Météo-France à Carpentras du 17 au 24 février 2004,
- celle prélevée par l'AIEA-Monaco, le 21 février 2004,
- le dépôt de poussières collecté en Corse par la station de l'ENS-Paris, pour la journée du 21 février 2004,
- celui collecté au sommet du Monte Cimone en Italie, le 21 février 2004.



Figure 5a : Aspect du ciel le 21/02/04 au matin



Figure 5b : Collecte du dépôt sur une bâche

4.4 TRAITEMENTS ET CARACTERISATION DE L'ECHANTILLON

Différentes analyses ont été réalisées sur l'échantillon de poussières déposées sur Manosque afin de le caractériser d'un point de vue minéralogique, organique, granulométrique et isotopique. Les résultats des deux premières caractérisations signent l'origine africaine des particules déposées. Considérés isolément, les tableaux de résultats des différentes analyses réalisées ne permettent pas d'avoir une vision précise de la provenance des particules déposées. C'est le recoupement entre plusieurs analyses qui permet d'affiner la localisation géographique au même titre que les images satellites.

Le dépôt collecté sous forme de boue rouge a été séché à 40 °C pendant 5 jours à l'étuve afin d'éliminer la phase aqueuse. La masse de produit sec a été répartie de la façon suivante :

- 47,5 g pour les analyses granulométrique et organique,
- 10 g pour l'analyse des éléments traces et des majeurs après séchage à 110 °C, la détermination des formes d'argiles et des minéraux,
- 63 g de matière sèche puis broyée et homogénéisée avant conditionnement en géométrie de 60 ml pour le mesurage des émetteurs gamma,
- 181 g pour les mesurages des actinides et des isotopes du Plutonium.

Analyse organique

Les mesures ont été obtenues par oxydation sulfochromique. Les résultats indiquent moins de 3 % en masse de matières organiques dans les poussières déposées.

Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique des dépôts sont indiqués dans le tableau 1.

Tableau 1 : Répartitions granulométriques (en %) des poussières désertiques déposées le 21/02/04 - Détermination selon la norme NF X 31 107

Matrice	Constituant	Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers
	Classe granulométrique (µm)	< 2	2 < < 20	20 < < 50	50 < < 200	200 < < 2000
↓						
Dépôt de poussières désertiques du 21/02/04		27,2	55,7	16,7	0,3	0,1

Les retombées de poussières sahariennes du 21 au 22 février 2004 sur la France, visibles sous la forme de boues rouges, sont constituées à 83 % de limons fins et d'argiles. La répartition granulométrique obtenue concorde avec celle attendue pour ce type de particules (tailles moyenne et médiane comprises entre 5 et 30 µm avec une composante inférieure à 5 µm) d'après les indications de Goudie (2001). La différence avec un sol se traduit par l'absence significative de sable au sens granulométrique du terme, à l'inverse des sols qui possèdent toujours une composante de sables fins (18,3 % en moyenne) et grossiers (40,3 % en moyenne). Cette absence est due à la chute des particules les plus grosses qui intervient dès les premiers kilomètres et se poursuit sur des dizaines voire des centaines de kilomètres de distance de la zone de soulèvement.

Analyse des éléments majeurs et des éléments traces

Les tableaux 2 et 3 présentent, par ordre d'abondance décroissante, les résultats des mesures d'ICP-MS obtenues sur l'échantillon du 21 février 2004 ainsi que ceux relatifs à un deuxième épisode de dépôts sahariens sur Manosque, le 4 mai 2004. D'un épisode à l'autre, les concentrations et pourcentages restent les mêmes à l'exception de ceux de l'étain, du zinc, du plomb et de l'antimoine, en quantités plus importantes le 4 mai 2004. Dans les deux cas, les particules sont issues des roches et sont donc riches en oxydes de fer, de calcium et d'aluminium.

Tableau 2 : Dosage des éléments traces
Concentrations en ppm
dans l'échantillon à 110 °C

Elément	21/02/04	04/05/04
Ba	448	471
Sr	244	281
Zr	196	181
Sn	126	698
V	93	94
Zn	93	212
Rb	86,7	79,5
Cr	82	88
Ce	68,4	60,7
Ni	36	39
La	34,4	31
Nd	29,9	26,6
Y	28	26
Pb	27,8	50,7
Co	15,2	13,4
Nb	13,8	12,2
Th	8,63	7,78
Pr	8,07	7,16
Sm	5,88	5,27
Hf	5,14	4,29
Gd	4,81	4,25
Dy	4,67	4,1
Cs	4,09	3,81
Er	2,5	2,15
Yb	2,35	2,03
U	1,85	1,79
Sb	1,35	3,42
Eu	1,31	1,14
W	1,19	1,32
Ta	1,13	1
Ho	0,95	0,84
Mo	0,95	1,42
Tb	0,78	0,68
Lu	0,38	0,34
Tm	0,37	0,32
Perte à 1000 °C	16,31	20,14

Tableau 3 : Dosage des éléments majeurs
Concentrations en % dans
l'échantillon à 110 °C

Elément	21/02/04	04/05/04
SiO ₂	47,5	46,4
Al ₂ O ₃	12,5	11,6
CaO	10,5	8,9
Fe ₂ O ₃	5,37	4,98
MgO	2,98	2,99
K ₂ O	2,83	2,64
TiO ₂	0,716	0,66
Na ₂ O	0,359	0,556
P ₂ O ₅	0,18	0,216
MnO	0,079	0,063
Somme	99,33	99,19
Perte 110 °C	2,89	2,75
Perte 1000 °C	16,31	20,14

Tableau 4 : Rapports caractéristiques
en éléments majeurs

Rapport	21/02/04	04/05/04
Si/Al	3,80	4,00
Fe/Al	0,43	0,43
Ti/Ca	0,07	0,07
Ti/Fe	0,13	0,13
Al/Ca	1,19	1,30

Les études menées par le LISA⁵ ont montré que la composition des poussières différait suffisamment selon leurs origines géographiques pour permettre l'identification de traceurs spécifiques des régions de production de poussières : sont étudiés en particulier les rapports Fe/Al, Si/Al. L'étude de ces rapports donne lieu à une typologie géographique dans laquelle trois secteurs se distinguent :

- Tunisie, Est de l'Algérie et Libye : Si/Al = 2,20 +/- 0,12 ; Fe/Al = 0,52 +/- 0,06
- Maroc et Ouest de l'Algérie : Si/Al = 2,67 +/- 0,11 ; Fe/Al = 0,67 +/- 0,05
- Au sud du 30° Nord : Si/Al = 2,92 +/- 0,28 ; Fe/Al = 0,88 +/- 0,34

Les deux premières régions sont caractérisées par des teneurs plus fortes en argiles et en carbonates tandis que la dernière présente des teneurs en quartz plus importantes avec moins d'aluminium. Les échantillons collectés sont caractérisés par des rapports (Tableau 4) indiquant des teneurs plus importantes en silice et en aluminium mais avec moins de fer que dans les zones identifiées par le LISA. Les rapports Ti/Ca, Ti/Fe, Al/Ca sont en accord avec les valeurs moyennes (0,071 +/- 0,031; 0,095 +/- 0,11; 0,728 +/- 0,536, respectivement) obtenues sur 50 épisodes de dépôts de poussières sahariennes en Italie et en Hongrie (Borbély-kiss 2004).

Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique a été effectuée par diffraction à rayon X par l'université de Strasbourg. Les minéraux, classés par ordre d'abondance décroissant, sont :

quartz > calcite > feldspath > dolomite > illite > kaolinite > chlorite > swelling chlorite

Les minéraux argileux sont soulignés dans la liste. Caquineau (1998) a montré que le rapport illite/kaolinite répondait bien à l'exigence d'un traceur discriminant des grands secteurs productifs de poussières désertiques et de plus qu'il restait conservatif au cours du transport.

Généralement, les sols érodables par les processus éoliens et les poussières issues de ces sols possèdent le même cortège de minéraux mais dans des proportions différentes. Le fractionnement granulométrique entraîne un fractionnement minéralogique de l'aérosol par rapport au sol, et en fonction des conditions de turbulence. En particulier l'aérosol est enrichi en mica, chlorite et dans le cas du Niger en kaolinite. La kaolinite est classiquement considérée comme un minéral typique des zones à climat chaud et hydrolysant (Chamley, 1989 cité dans Van Welden A. 2004). Elle est particulièrement abondante en Afrique du Nord, où elle est parfois accompagnée de palygorskite (Figure 6). Ces deux minéraux subissent un transport par les vents sahariens vers la Méditerranée et le Golfe du Lion (cf. références bibliographiques dans Van Welden A. 2004).

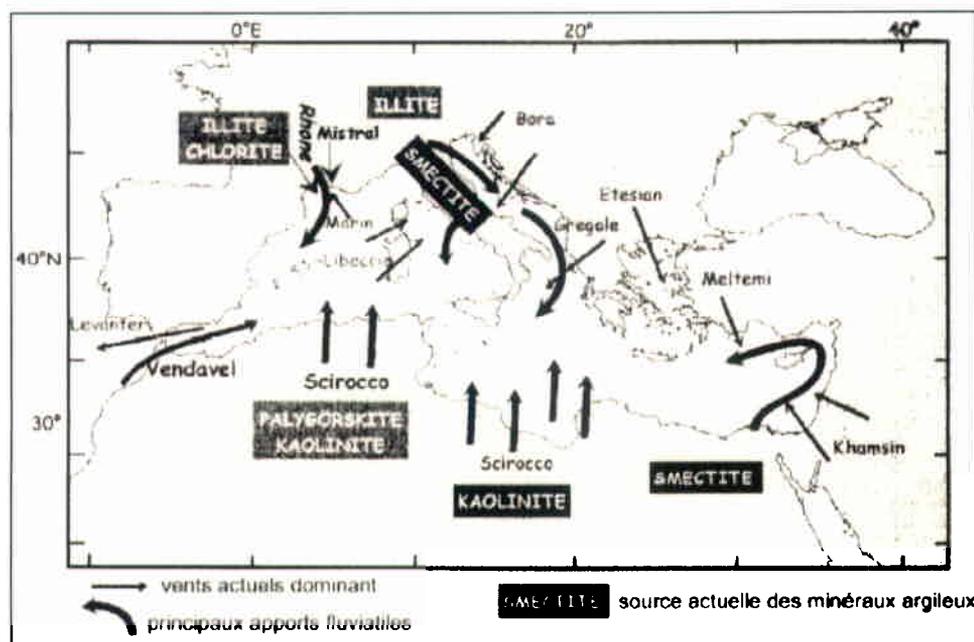


Figure 6 : Carte de répartition des minéraux argileux et des agents dynamiques en Méditerranée (d'après Bout et al., 2003 comm. pers. citée dans Van Welden A. 2004).

⁵ Laboratoire Inter-Universitaire des Systèmes Atmosphériques, Université de Créteil, Paris-XII

Dans chaque cas, l'aérosol s'enrichit en minéraux de plus forte cohésion (Alfaro, http://www.lisa.univ-paris12.fr/aerosol/aer_desert.htm). Parmi les éléments minéraux les plus récurrents dans les analyses de poussières sahariennes collectées dans le nord de l'Espagne par Avila (1998), on trouve principalement des argiles ou assimilés : illites (de 25 à 50 %), viennent ensuite la kaolinite (argile) et la palygorskite, silicate assimilé à une argile (de 4 à 13%), ou encore les smectites (de 0,5 à 30 %). Les autres constituants sont représentés par les quartz (13 à 25%), la calcite (2 à 20 %), la dolomite (2 à 7 %), les feldspaths (2 à 5 %).

Analyse des isotopes radioactifs

Le mesurage des radionucléides émetteurs gamma dans les échantillons de poussières déposées et ceux d'aérosols de la station de la Seyne/Mer, a été réalisé au DEI/STEME/LMRE (laboratoire accrédité COFRAC⁶) sur des détecteurs bas bruit de type germanium hyper pur, de haute efficacité (> 65 %). Les temps de comptage ont été respectivement de 80 000 et 240 000 secondes.

Les échantillons d'aérosols du SESURE/LVRE provenant des stations de Nice, Montfaucon et Cadarache ont été mesurés également par le LMRE sur un spectromètre germanium de type puits de très grand volume (900 cm³ de Ge) et ultra bas bruit de fond, installé au Laboratoire Souterrain de Modane. Ce détecteur a été spécialement conçu pour mesurer des échantillons environnementaux ayant des activités spécifiques très basses et/ou pour lesquels la quantité disponible est réduite. Pour ce type d'échantillon, le très grand rendement de détection et le très faible niveau du bruit de fond ambiant en font la meilleure - dans certains cas l'unique - solution permettant d'atteindre les sensibilités requises pour quantifier les radionucléides (Gurriaran 2004). Ces filtres d'aérosols ont été placés dans un tube à essai et mesurés pendant en moyenne 5 jours.

Le mesurage des émetteurs alpha (²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et ²⁴¹Am) a également été réalisé au LMRE par séparation radiochimique. Les isotopes du plutonium (²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu) ont été quantifiés par ICP-MS, après reprise de l'électro-dépôt et purification dans un mélange d'acides nitrique et chlorhydrique à chaud. La mesure a été faite par dilution isotopique selon le protocole détaillé par Agarande (2004).

Du point de vue des études relatives aux stocks et flux de radionucléides du compartiment atmosphérique, il convient de noter que les retombées atmosphériques des épisodes de poussières sahariennes constituent aujourd'hui, d'après les résultats présentés dans ce rapport, la seule opportunité de quantifier les dépôts atmosphériques des radionucléides artificiels émetteurs alpha sans avoir recours à des techniques d'ajouts dosés.

4.5 ETENDUE DES ZONES IMPACTEES

Grâce aux données de 21 des 36 associations métropolitaines, agréées pour la surveillance de la qualité de l'air (AASQUA, cf. Annexe 3), il a été possible de déterminer l'emprise au sol du nuage de poussières sahariennes sur le territoire français et d'en déduire une carte des dépôts. Au-delà des frontières, le nuage a été détecté dans le nord de l'Italie. La superficie impactée sur le territoire français est comprise entre 300 et 350 000 km².

Les quantités de matières déposées sont estimées à près de 2 millions de tonnes, uniquement sur la France.

Ces déterminations s'appuient sur les concentrations en particules (PM₁₀ et PM_{2,5})⁷ au voisinage du sol (exemple Figure 7), relevées en continu du 19 au 23 février 2004 sur 75 sites en France. Les mesures au sol de PM₁₀ montrent une bonne adéquation avec les prévisions du modèle RAMS (Figure 4).

La station la plus méridionale est celle d'Ajaccio ; les plus septentrionales ayant été marquées par le panache, à savoir présentant des charges particulaires dans l'air supérieures en moyenne journalière à celle des jours précédant l'événement, se situent au sud d'une ligne allant de Nantes à Besançon.

⁶ COmité FRANçais d'ACcréditation

⁷ PM₁₀ et PM_{2,5} : poussières atmosphériques d'un diamètre équivalent inférieur à 10 µm et 2,5 µm respectivement (cf. détails en Annexe 2). Par définition, il s'agit des particules pénétrant les voies respiratoires

Les enregistrements des stations de mesures situées en limite d'emprise du nuage présentent la particularité d'un niveau d'empoussièrément quasi-constant les 21 et 22 février 2004, en lieu et place d'un profil typique de pollution particulaire avec deux pics journaliers caractéristiques du trafic routier aux heures de pointes (cf. Annexe 3).

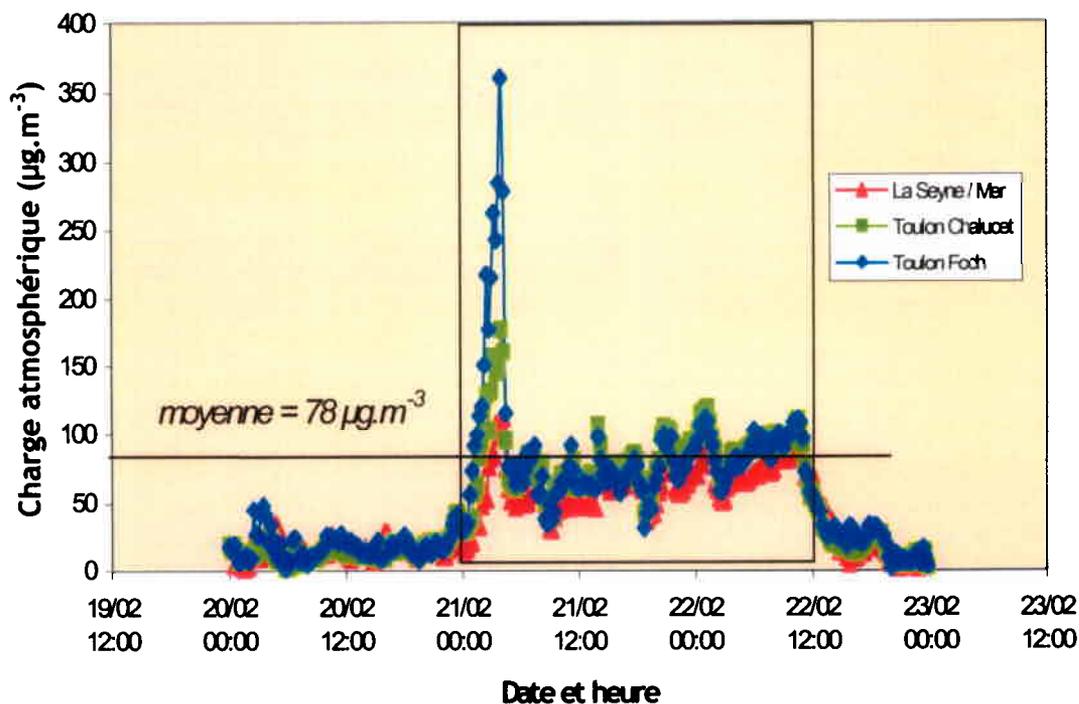


Figure 7 : Evolution de la charge atmosphérique des particules de diamètre aérodynamique supérieur ou égale à 10 µm. Stations du réseau Airmaraix de Toulon et environs

La figure 8 présente l'estimation des dépôts spécifiquement ajoutés. Le bruit de fond ambiant en PM₁₀ à cette période de l'année a été préalablement déduit. La signature du panache se perd dès lors que les concentrations descendent aux environs de 30 (voire 40 µg.m⁻³) : valeur moyenne caractéristique de l'empoussièrément atmosphérique d'un site péri-urbain ou urbain (source Airmaraix).

Cette carte a été obtenue par la méthode de krigeage ordinaire proposée par le logiciel ArcView®. Le modèle utilisé ici pour le krigeage ordinaire est un modèle sphérique avec un semi-variogramme présentant un palier de 90 et une portée de 850 km. Les 75 points de mesure utilisés sont assez bien répartis, avec une forte tendance à la décroissance du sud vers le nord, accompagnée d'une légère décroissance de l'est vers l'ouest.

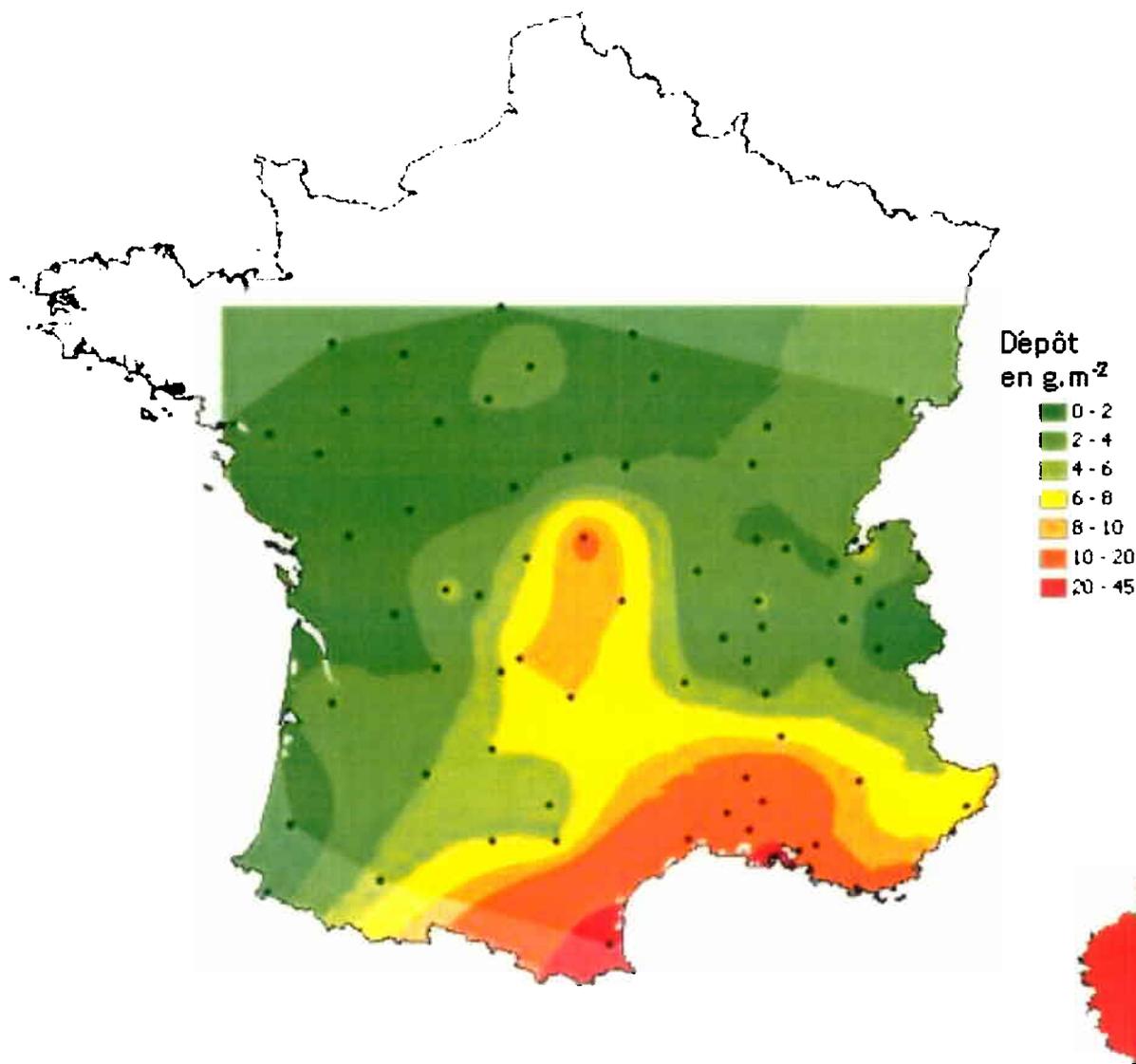


Figure 8 : Estimation des dépôts ajoutés uniquement par le nuage de poussières sahariennes entre le 20 et le 22 février 2004

5 IMPACT RADIOECOLOGIQUE DES DEPOTS DE POUSSIÈRES SAHARIENNES : LES REPONSES

Le détail chronologique des activités en ^7Be , ^{210}Pb et ^{137}Cs , juste avant l'arrivée et pendant le passage du nuage de poussières sahariennes dans la région PACA, est indiqué dans le tableau 5. Ces premiers résultats mettent en évidence la relative diminution du niveau d'activité en ^7Be et en ^{210}Pb dans l'air au passage du nuage, et à l'inverse l'augmentation nette du niveau d'activité en ^{137}Cs .

Le tableau 6 synthétise l'ensemble des résultats des mesurages gamma et alpha des prélèvements spécifiques réalisés dans le cadre de cette étude et permet la comparaison avec d'autres valeurs trouvées dans la littérature pour des échantillons de sols et de poussières sahariennes.

5.1 NIVEAUX D'ACTIVITE DANS LES ECHANTILLONS

5.1.1 RADIOACTIVITE NATURELLE

Dans les aérosols, le niveau d'activité volumique en ^7Be se situe plutôt dans le bas de la fourchette habituelle (2000 - 7000 $\mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$). Son activité diminue avec l'arrivée du nuage de particules. Pham (2003) note également cette diminution en précisant que le comportement du ^7Be dans les particules est différent de celui dans l'air ou dans les précipitations. Dans les dépôts, la variabilité du niveau d'activité massique en ^7Be est importante si l'on compare les événements survenus en 2004 et ceux détectés en Grèce ou à Monaco. Les valeurs élevées correspondent à des périodes de l'année, propices à des injections de masses d'air chargées en ^7Be , de la stratosphère (siège de la formation du ^7Be) vers la troposphère, tel que décrit dans Bouisset (2004) à partir des données OPERA.

Lors d'un deuxième épisode de poussières sahariennes, rencontré en mai 2004 et ayant fait l'objet d'un prélèvement sur Manosque, le niveau d'activité en ^7Be dans les poussières dépasse les 16 000 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ sec. Cette valeur élevée est due au cycle saisonnier des injections de masses d'air de la stratosphère, siège des réactions conduisant à la formation du ^7Be , vers la troposphère (Bouisset 2004). Au cours de ce cycle, on observe classiquement une remontée importante des niveaux d'activité en ^7Be autour des mois d'avril et mai (Figure 9).

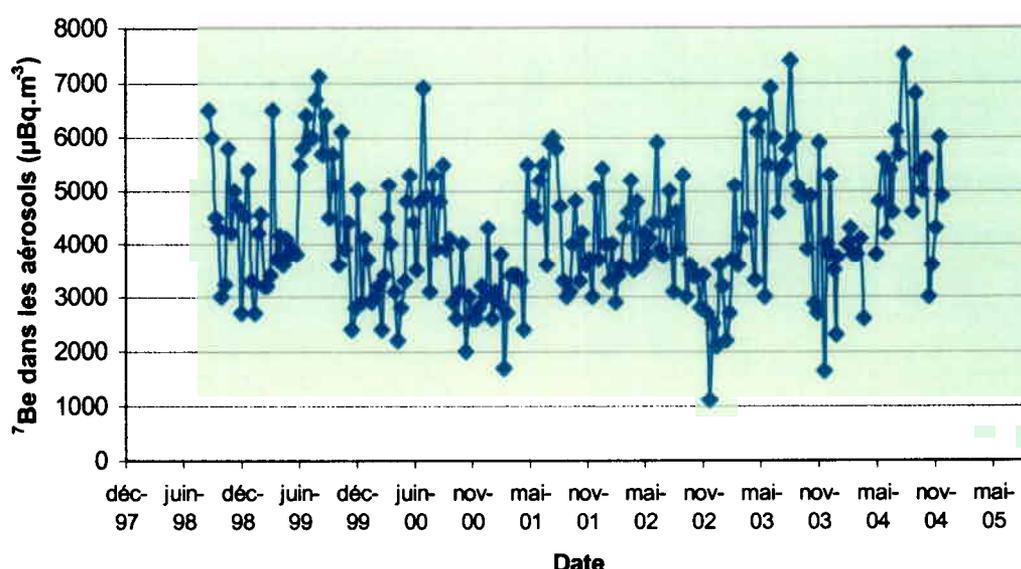


Figure 9 : Evolution du Béryllium 7 dans les aérosols prélevés à la station OPERA de la Seyne/Mer de 1998 à fin 2004

Le niveau d'activité du ^{210}Pb correspond aux valeurs basses de la fourchette habituelle (400-1500 $\mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) tout en restant proche de la valeur moyenne. La valeur plus élevée obtenue en mai 2004 est cohérente avec l'augmentation de la concentration en plomb mise en évidence par l'analyse des éléments traces (Tableau 2) pour cet échantillon. Le rapport $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}$ varie de 3,1 à 6 dans les dépôts et de 3,5 à 8,3 dans les aérosols.

A l'inverse du plomb, l' ^{228}Ac est entre 2 et 2,5 fois plus élevé que les quelques valeurs significatives détectées à de rares occasions dans les aérosols OPERA. C'est également le niveau le plus fort jamais rencontré dans les aérosols collectés dans le cadre de l'observatoire OPERA. Issu de la famille du thorium 232 et par conséquent d'origine tellurique, sa présence significative témoigne typiquement des phénomènes de remise en suspension de particules de sols ce qui en fait un élément discriminant particulièrement intéressant (plus que le césium 137) pour l'identification des événements de poussières sahariennes dans les chroniques de résultats (Cf. § 5.3). Le ^{40}K est 2,5 fois plus élevé qu'en moyenne et par ailleurs à son plus fort niveau enregistré à cette station, sur les six dernières années.

Tableau 5 : Activités volumiques ($\mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ d'air) dans des échantillons d'aérosols avant et pendant le passage du nuage de poussières en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Date	Lieu	Volume filtré (m^3)	^7Be	$\pm/$	^{210}Pb	$\pm/$	^{137}Cs	$\pm/$
19/02/2004	Cadarache	262	3050	360	805	70	<1,2	
20/02/2004	Cadarache	280	2230	260	460	40	<0,7	
21/02/2004	Cadarache	278	1690	210	350	35	2,2	0,6
22/02/2004	Cadarache	290	1550	220	440	40	2,2	0,6
19/02/2004	Nice	188	4200	825	1150	100	<1,3	
20/02/2004	Nice	221	3100	550	490	50	<1,3	
21/02/2004	Nice	188	1300	330	290	35	1,2	0,85
22/02/2004	Nice	260	570	250	165	20	1,6	0,5
19/02/2004	Montfaucon	239	1900	450	525	50	<0,9	
20/02/2004	Montfaucon	208	1800	425	410	40	<1,1	
21/02/2004	Montfaucon	235	1590	415	560	50	1,5	0,6
22/02/2004	Montfaucon	179	2550	550	640	60	3,5	0,9

Source : filtres aérosols du DEI/SESURE/LVRE mesurés par le DEI/STEME/LMRE à Modane

5.1.2 RADIOACTIVITE ARTIFICIELLE

Le tableau 5 montre clairement que l'activité volumique du ^{137}Cs dans les aérosols augmente avec l'arrivée du nuage de poussières.

La station de la Seyne/Mer sert de site de référence pour l'analyse des niveaux d'activité dans les aérosols. Cette station fournit traditionnellement les niveaux d'empoussièrement mais aussi les niveaux d'activité en ^{137}Cs , les plus élevés (entre 1,5 et 3 fois ceux relevés sur les autres stations OPERA métropolitaines). Les raisons tiennent à son environnement industriel, sa situation géographique par rapport au couloir rhodanien dont elle récupère les polluants par Mistral tout comme à sa position par rapport aux remontées trans-méditerranéennes des nuages de poussières sahariennes. L'activité volumique en ^{137}Cs relevée à cette station entre le 20 et le 25 février 2004 ($1,96 \pm 0,28 \mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) est 4 fois plus forte que la valeur moyenne obtenue pour cette station en 2003 (Tableau 6). C'est également la valeur la plus forte relevée durant les 3 dernières années sur ce site. Pendant la seule durée de présence du panache (21 et 22 février), cette valeur a été évaluée à $5,95 \mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, ce qui ponctuellement porte à 10 l'augmentation par rapport à la valeur moyenne annuelle de 2003. Le rapport $^{137}\text{Cs} / ^{40}\text{K}$ est classique et égal à 0,04.

Les niveaux d'activité dans les aérosols sont également exprimés par unité de masse pour l'échantillon collecté à la Seyne/Mer du 20 au 25 février 2004 de même que l'estimation des niveaux atteints uniquement entre le 21 et le 22 février 2004 : période correspondant à la durée de présence du nuage (Tableau 8). Pendant l'épisode, le niveau d'activité massique en ^{137}Cs dans les particules aurait ainsi été en moyenne de $77 \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{sec}$, soit jusqu'à 13 fois plus que la moyenne à cette station en 2003.

Dans les dépôts, le niveau d'activité en ^{137}Cs atteint $38,7 \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{sec}$ à Manosque (Tableau 6), ce qui correspond typiquement aux niveaux rencontrés dans des sols de l'est de la France figurant parmi les plus touchés par les retombées de l'accident de Tchernobyl. Au même moment à Monaco, l'AIEA obtient $42 \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{sec}$ (communication personnelle M^{me} Pham). Ces résultats permettent de considérer en première approximation que la « qualité radiologique » des poussières est homogène dans le nuage.

La cohérence de la valeur trouvée pour Manosque est vérifiée en la comparant au rapport de l'activité volumique des aérosols ($2,2 \mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) prélevés sur Cadarache (au sud de Manosque) à la charge particulaire moyenne dans l'atmosphère relevée au nord de Manosque ($65,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Depuis 2000, que ce soit pour le ^{137}Cs ou pour les actinides (Pu et Am), les niveaux d'activités massiques rencontrés dans les dépôts de poussières sahariennes collectés sur le pourtour nord de la Méditerranée (Manosque, Monaco, Thessalonique) sont du même ordre de grandeur. Une différence est très nette avec l'épisode de poussières désertiques enregistré en avril 1988 en Grèce pour lequel les $1000 \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{sec}$ en ^{137}Cs sont atteints.

Le tableau 7 indique les activités surfaciques ajoutées sur Manosque et la Seyne/Mer par les retombées de l'événement du 21 février 2004. La quantité déposée par mètre carré n'ayant pas été mesurée à la Seyne/Mer, celle-ci a été estimée à partir de la charge des particules dans l'atmosphère et évaluée à $16,5 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (cf. § 5.2.1). Une correction a été réalisée pour tenir compte de la durée de l'épisode à la Seyne/Mer (1,5 jours); durée inférieure à la période de filtration (5 jours), en retranchant l'activité attendue dans les dépôts pour les jours qui ne correspondent pas à la présence du nuage saharien.

Tableau 6 : Activités dans les échantillons d'aérosols ($\mu\text{Bq.m}^{-3}$ d'air) et de poussières (Bq.kg^{-1} sec), collectés au cours d'épisodes de poussières désertiques. Comparaison avec les valeurs de la littérature (poussières déposées et différents sols)

Référence	Date	Lieu	Matrice	^{241}Am +/-	$^{239,240}\text{Pu}$ +/-	^{238}Pu +/-	^{137}Cs +/-	^7Be +/-	^{40}K +/-	^{22}Na +/-	^{228}Ac +/-	^{232}Th +/-	^{210}Pb +/-	
Papastefanou (2001)	du 20 au 25/02/04	La Seyne/Mer	Aérosols de poussières sahariennes	<0,5	ND	ND	2,0 0,3	3500	46 8	0,46 0,17	2,4 0,6	< 5	420 50	
	21-22/02/2004	Nice	Aérosols de poussières sahariennes	ND	ND	ND	1,4 0,7	935	ND	ND	ND	ND	227 27,5	
		Montfaucon Cadarache (proche Manosque)		ND	ND	ND	2,5 0,7	2070	ND	ND	ND	ND	600 55	
Cette étude	Année 2003 *	La Seyne/Mer	Aérosols	ND	ND	ND	0,5	4540	18	0,5	0,9	< 6	942	
				Manosque	1,042 0,032	0,0291 0,0021	0,026 0,004	38,7 3,4	2330 205	696 65	<1,0	42 5	28 10	707 76
				Manosque	0,92 0,04	0,026 0,004	0,026 0,004	34,9 2,7	16500 1200	650 50	<0,9	40 10	28 5	2750 250
Papastefanou (1989)	9-10/04/2000	Thessalonique	Poussières sahariennes déposées	ND	ND	ND	26,6 4,4	4580 40	488 7	ND	ND	ND	ND	
	4 - 5/04/1988	Thessalonique	Poussières sahariennes déposées	ND	ND	ND	1000,6 5,0	2200 24	402 19	ND	ND	ND	ND	
Lee (2003)	07/06/2001	Monaco	Poussières sahariennes déposées	0,32 0,02	0,76 0,05	0,04 0,02	28,6 1,3	10540 490	550 30	ND	ND	ND	2260 14	
	11/11/2001	Monaco	Poussières sahariennes déposées	0,27 0,02	0,74 0,03	0,03 0,02	37,0 0,7	5700 50	550 30	ND	ND	ND	1840 40	
Duffa (2001)	Etude pluriannuelle	Marcoule	Sols * (0-30 cm)	0,08 0,007	0,19 0,01	0,0107 0,0014	17,4 1,1	19,5 3,2	515 39	<0,4	37,5 2,7	41 6	59 6	
Baggoura B. (1998)	1993	Sahara algérien	Sols * (0-15 cm)	ND	0,44 0,03	0,013 0,008	22,1 2,3 (de 12 à 43)	ND	(93 à 376)	ND	(7 à 25)	ND	ND	

ND : non déterminé ; * : valeurs moyennes et/ou fourchette de valeurs (en gras) lorsque le nombre de données est insuffisant pour pouvoir calculer la moyenne

L'activité surfacique en ^{137}Cs , ajoutée sur Manosque, est évaluée à $0,41 \text{ Bq.m}^{-2}$. Cette valeur est 12 fois plus élevée que la moyenne du cumul mensuel relevé sur l'ensemble des stations OPERA pour les 24 derniers mois. Autrement exprimé, l'activité ajoutée sur Manosque pendant la dizaine d'heures correspondant à la durée locale de l'événement, est comparable au cumul déposé en moyenne en France au bout d'un an. Par rapport aux données de la station de la Seyne/Mer (station OPERA la plus proche) et traditionnellement la plus impactée des stations OPERA en terme d'activité surfacique déposée, l'activité surfacique ajoutée à Manosque est 6 fois plus élevée que la moyenne des cumuls mensuels. A la Seyne/Mer, l'activité surfacique ajoutée par les dépôts est estimée à $1,26 \text{ Bq.m}^{-2}$ entre le 21 et le 22 février soit environ 40 fois la valeur moyenne estimée hors épisode de poussières sahariennes.

Les niveaux d'activité en ^{239}Pu sur les aérosols collectés dans le cadre d'OPERA sont aujourd'hui à des niveaux inférieurs aux limites de détection (de l'ordre du nanoBq.m^{-3}). Les rapports d'activité (Tableau 9) sont caractéristiques des retombées globales de la période des tirs atmosphériques (Tableau 10). Ces observations corroborent celles de Lee (2003). Dans le cadre d'un suivi mensuel des précipitations prélevées pendant deux ans à Monaco, Lee (2002) a montré que les variations temporelles du ^{137}Cs , du $^{239,240}\text{Pu}$ et de ^{241}Am témoignaient des mêmes phénomènes de remise en suspension et d'attachement aux particules.

En complément du tableau 7, la figure 10 montre que les dépôts de poussières sahariennes (points cerclés sur la figure) issus de retombées sèches ou associés à des précipitations, constituent les échantillons de l'environnement qui, en moyenne, présentent aujourd'hui les niveaux d'activité les plus forts en ^{137}Cs et en particulier pour le $^{239+240}\text{Pu}$. A titre de comparaison sont mentionnées les valeurs (ou plages de valeurs) obtenues pour différents sols : ceux de Vaison-la-Romaine pour lesquels le niveau en ^{137}Cs reflète l'impact prépondérant des retombées de Tchernobyl, un sol de la région de Clermont-Ferrand (où l'impact des retombées de Tchernobyl est moindre) ou encore ceux prélevés sur le territoire algérien où l'impact de Tchernobyl est considéré en première approximation comme négligeable devant celui des retombées globales des tirs. Des valeurs obtenues dans des sédiments du Rhône en crue et dans des pluies hors événement de poussières sahariennes complètent celles des sols.

La proximité avec la plage théorique du rapport $^{137}\text{Cs}/^{239+240}\text{Pu}$ caractéristique des retombées globales des tirs, actuellement compris entre 30 et 40, traduit la prédominance des retombées des tirs tant pour le ^{137}Cs que pour le $^{239+240}\text{Pu}$ dans ces échantillons. Plus la distance à cette référence est grande et plus grande est la part du ^{137}Cs lié aux retombées de l'accident de Tchernobyl. Cette caractérisation se vérifie au niveau de l'échantillon de poussières mixtes (Lee 2003) constitué d'un mélange d'aérosols issus d'une remise en suspension locale (Monaco) et de poussières sahariennes. Dès lors, il paraît envisageable d'estimer la contribution de la remise en suspension locale ainsi que la part du ^{137}Cs provenant des retombées de Tchernobyl pour les prochains épisodes de dépôt de poussières sahariennes sur la France.

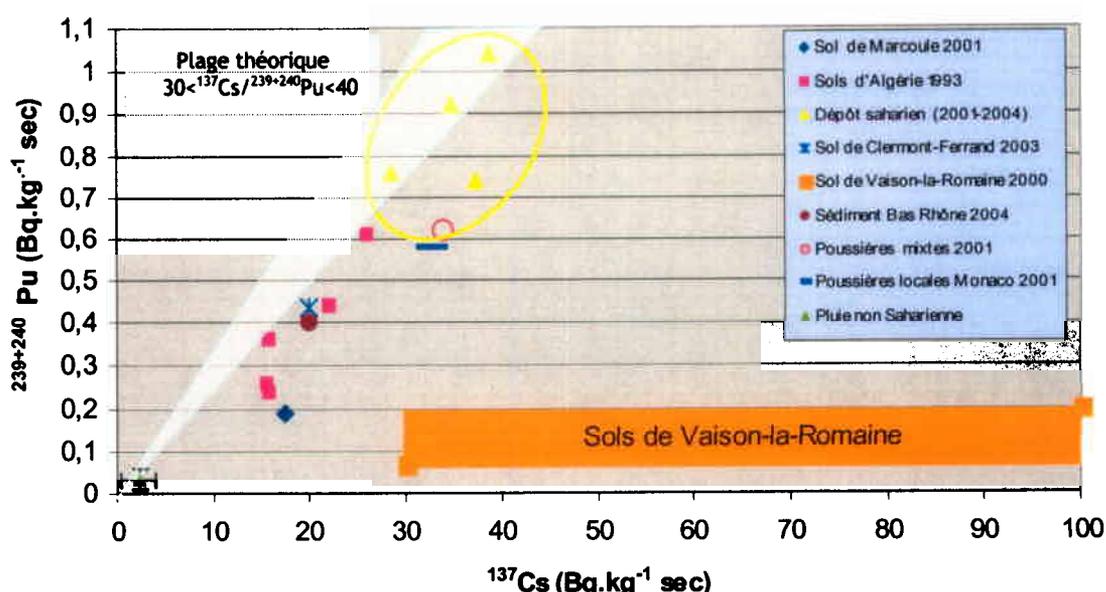


Figure 10 : Niveaux de radioactivité artificielle des dépôts de poussières sahariennes vis à vis d'autres matrices environnementales

Tableau 7 : Niveaux d'activité surfacique ajoutés au sol par les retombées de poussières désertiques (en Bq.m⁻²), le 21/02/04, à Manosque et estimations à la Seyne/Mer

Date	Lieu	Matrice	²⁴¹ Am +/-	^{239,240} Pu +/-	²³⁸ Pu +/-	¹³⁷ Cs +/-	⁷ Be +/-	⁴⁰ K +/-	²³² Th +/-	²²⁸ Ac +/-	²³⁴ Th +/-	²¹⁰ Pb +/-						
20 au 25/02/2004	La Seyne /Mer	Poussières sahariennes	ND	ND	ND	0,41	0,06	50	1,7	0,10	0,03	0,50	0,13	50	88,8	10,6		
21 et 22/02/04	La Seyne /Mer	Poussières sahariennes	ND	ND	ND	1,26	0,14	50	0,89	0,26	0,72	6,52	0,72	50	50	50		
21/02/2004	Manosque	Poussières sahariennes déposées	4,78.10 ⁻³	10,9.10 ⁻³	0,3.10 ⁻³	0,305.10 ⁻³	0,022.10 ⁻³	24,5	2,2	7,31	0,68	-0,01	0,44	0,05	0,29	0,10	7,42	0,80

ND : non déterminé ; SO : sans objet, l'épisode de poussières sahariennes n'entraîne pas d'augmentation du niveau d'activité pour ce radionucléide

Nota : les deux premières lignes du tableau correspondent à des estimations déduites d'après l'activité volumique des aérosols et l'empoussièrément. Dans le cas de l'²²⁸Ac, celui-ci n'étant quantifié significativement dans les aérosols qu'à titre exceptionnel, l'estimation de la valeur maximale atteinte entre le 21 et le 22 février a été calculée en retranchant la valeur moyenne des limites de détection divisée par 2 en 2003, pour la période du 20 au 21 et du 22 au 25 février 2005.

Tableau 8 : Niveaux d'activité massique estimés dans les aérosols de poussières désertiques (en Bq.kg⁻¹ sec) collectés du 20/02/04 au 25/02/04 et comparaison avec les activités massiques moyennes dans les aérosols collectés à la station OPERA de la Seyne/Mer en 2003

Date	Lieu	Matrice	¹³⁷ Cs +/-	⁷ Be +/-	⁴⁰ K +/-	²³² Th +/-	²²⁸ Ac +/-	²³⁴ Th +/-	²¹⁰ Pb +/-		
20-25/02/2004	La Seyne/Mer	Aérosols de poussières sahariennes	25,1 (à 76,9 [*])	3,6 (à 2,1 [*])	590	100	2,2	31	8	5400	640
Année 2003	La Seyne/Mer	Aérosols hors événement saharien majeur	6,02	2,55	210	80	2,4	13	6	10900	5000

Valeur suivie par un astérisque (*) = valeur estimée pour la seule durée de présence du panache sur le site de la Seyne/Mer entre le 21 et le 22/02/04

Tableau 9 : Rapports d'activité et, dans le cas de $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, rapport de masse

Référence	Date	Lieu	Matrice	$^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}$	$^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	$^{239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}/^{239,240}\text{Pu}$
Cette étude	21/02/2004	Manosque	Poussières sahariennes déposées	3,29	0,03 +/- 0,01	0,44	3,11	0,20	0,027	37,1
	4 - 5 /05/2004	Manosque	Poussières sahariennes déposées	6,0 +/- 4,8	0,028 +/- 0,01	0,39	ND	ND	0,026	37,9
Lee 2003	7/06/01	Monaco	Poussières sahariennes déposées	4,7 +/- 0,2	0,04 +/- 0,02	0,43 +/- 0,13	ND	ND	0,026 +/- 0,002	38,5
Pham *	Nov. 2001 à nov. 2002	Monaco	Poussières sahariennes déposées	3,76 +/- 0,16	0,04 +/- 0,02	0,38 +/- 0,03	ND	ND	0,030 +/- 0,002	33,4
Baggoura 1998	1993	Sahara algérien	Sols* (0-15 cm)	ND	De 0,029 à 0,044	ND	ND	ND	de 0,020 à 0,008	de 50 à 125
Duffa 2001	Etude pluriannuelle	Marcoule	Sols* (0-30 cm)	0,33	0,035 De 0,0208 à 0,057	0,42	ND	ND	0,011	91,6

* : valeur moyenne et /ou fourchette de valeurs. Dans le cas de Marcoule, n'ont été retenus que les sols soumis aux dépôts atmosphériques en excluant les zones inondables susceptibles de recevoir des sédiments du Rhône marqués par les rejets.

Tableau 10 : Rapports caractéristiques des retombées globales des tirs d'après les niveaux d'activité (dans le cas de $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, rapport de masses)

$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ Rapport d'activité	$^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ Rapport d'activité	$^{241}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ Rapport d'activité au 01/01/2005	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ Rapport de masse	$^{239+240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ Rapport d'activité au 01/01/2005	$^{137}\text{Cs}/^{239+240}\text{Pu}$ Rapport d'activité au 01/01/2005
0,024	0,37	3	0,18 +/- 0,02	0,030	30

La relation précédente a été appliquée à l'ensemble des sites pour lesquels une mesure en continu de charge particulaire existait. Le dépouillement des 75 enregistrements correspondants a permis de déterminer une valeur moyenne et une durée de présence du nuage, pour chacun des sites instrumentés. La détermination de ces deux paramètres est d'autant plus délicate que le niveau d'empoussièrement dû au nuage de poussières sahariennes est proche de la valeur moyenne ambiante (bruit de fond relevé les jours précédents), ce qui est le cas pour les sites les plus septentrionaux ou situés en bordure de la zone touchée par le nuage de particules. Une autre source d'imprécision vient du fait qu'une valeur unique de bruit de fond ($25,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) a été retranchée pour tous les sites, en première approximation.

Les stations pour lesquelles le niveau d'empoussièrement saharien diffère peu du bruit de fond habituel local, sont de ce fait sujettes à une plus grande dispersion des valeurs. Malgré ces différentes sources d'imprécision, la figure 12 montre que la proportionnalité du dépôt par rapport à la charge atmosphérique peut être retenue.

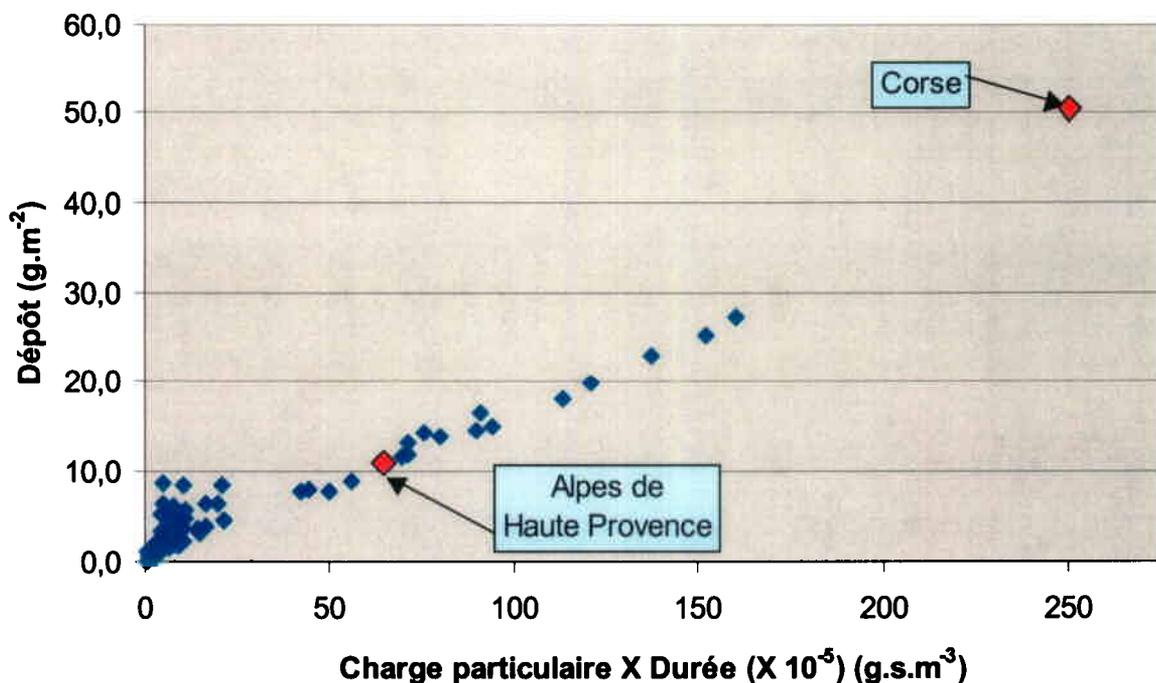


Figure 12 : Estimation du dépôt en fonction du produit de la charge particulaire par la durée de présence d'un nuage de poussières sahariennes

Cette figure permet de valider l'estimation du potentiel de retombée de particules sahariennes à partir des enregistrements des mesures de PM_{10} et de déduire le dépôt. L'étude d'évènements à venir devrait permettre de vérifier la linéarité du phénomène, obtenue dans le cas présent.

L'estimation de la radioactivité artificielle ajoutée par l'épisode de poussières sahariennes du 21 au 22 février 2004 sur la France, déduite de la carte des dépôts, est détaillée dans le tableau 11. Cette estimation est basée sur l'hypothèse suivante : l'activité massique du dépôt est considérée comme une constante et ne varie donc d'un site à un autre qu'en fonction de la valeur de l'empoussièrement atmosphérique sur le site considéré. Cette hypothèse est sous-tendue par la relative constance des activités massiques dans les dépôts, rencontrée dans la littérature pour différents épisodes récents (postérieurs à 2001) et par celle des activités volumiques dans les aérosols au cours de l'épisode du 21 février 2004.

Cette hypothèse pourra être testée dès la récupération du dépôt collecté en Corse et les mesures d'activité afférentes. En première approximation, les valeurs d'activité massiques obtenues sur Manosque ont été extrapolées à l'ensemble du territoire impacté par les dépôts de particules désertiques.

L'utilisation des figures 8 et 12 a permis d'obtenir une estimation de l'activité totale déposée pour différents radionucléides artificiels : ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{241}Pu et ^{241}Am (Tableau 11).

Là encore, les épisodes à venir permettront de préciser l'erreur commise et la variabilité de la « qualité radioactive » des particules présentes dans le nuage. Pour un radionucléide donné, l'activité totale ajoutée correspond à la somme du produit du dépôt surfacique (g.m^{-2}) par l'activité massique (Bq.kg^{-1}) de ce radionucléide pour chaque surface d'iso-dépôt, entre 0 et Z (Z = superficie totale impactée par les dépôts).

$$\text{Activité}_{RN} = \sum_{i=0}^{i=Z} S_i \times D_S \times A_M$$

Tableau 11 : Ordres de grandeur des activités (Bq) des principaux radionucléides artificiels, ajoutées par les dépôts de poussières sahariennes, du 21 au 22/02/2004 sur la France

Radionucléide	^{238}Pu	$^{239+240}\text{Pu}$	^{241}Pu	^{241}Am	^{137}Cs
Activité totale ajoutée (Bq)	1,3 E+10	1,0 E+07	3,6 E+08	1,1 E+09	3,6 E+11

La radioactivité artificielle ajoutée par l'épisode de poussières sahariennes du 21 février 2004 serait ainsi de l'ordre de 37.10^{10} Bq et essentiellement due au ^{137}Cs .

A titre de comparaison, on peut noter dans un communiqué du SCPRI qu'un événement de ce type, survenu le 9 novembre 1984, a généré un dépôt compris entre 30 000 et 100 000 tonnes de poussières sahariennes sur environ 1/3 du territoire et déposé une activité totale ajoutée de l'ordre de 37.10^{13} Becquerels, d'origine naturelle (cf. Annexe 6).

La radioactivité naturelle pouvant être considérée comme constante dans le temps, l'ordre de grandeur estimé pour la radioactivité artificielle déposée répond bien au rapport de 1 à 1000 existant entre les niveaux d'activités du césium et du béryllium⁹ qui sont les contributeurs principaux de la radioactivité respectivement artificielle et naturelle ; ce qui valide l'estimation faite pour l'épisode du 21 février 2004.

5.2 CONTRIBUTION DES EPISODES EOLIENS ANCIENS A L'EVOLUTION DES NIVEAUX D'ACTIVITES ARTIFICIELLES DANS LES SOLS EN FRANCE

Dans les années 90, la remise en suspension locale de particules de sol était principalement à l'origine des niveaux d'activité artificiels dans les basses couches de l'atmosphère. Plusieurs études récentes réalisées au Japon (Hirose 2003, Furukawa 2002, Igarashi 2003) ont montré que les dépôts radioactifs et momentanément, les niveaux d'activité dans l'atmosphère, n'étaient pas issus d'une remise en suspension des sols locaux mais étaient conditionnés par la remise en suspension de sols situés à plusieurs milliers de kilomètres, soumis à l'érosion éolienne et générateurs de nuages de poussières désertiques. Ainsi, les niveaux d'activités des sols au sud de l'archipel japonais sont conditionnés principalement par les épisodes de transport éolien de poussières désertiques en provenance du désert chinois du Takla Makan (Furukawa 2002). La question peut se poser également pour les sols de la moitié sud de la France et de la Corse régulièrement enrichis des retombées de poussières sahariennes.

Pour répondre à cette question, il convient de dresser la liste des épisodes significatifs ayant impacté la France au cours des dernières décennies pour en estimer l'importance globale. Cette question peut également être abordée par le produit des activités moyennes dans les dépôts et de la masse annuelle moyenne déposée, estimée entre 25 g.m^{-2} , pour les latitudes comprises entre 39° et 42° Nord, et 1 g.m^{-2} dans les Alpes (Van Welden). Ce travail sera réalisé ultérieurement d'après la synthèse des épisodes majeurs de dépôts de poussières sahariennes sur la France en collaboration avec le SESURE/LVRE et les partenaires universitaires identifiés au Chapitre 8.

⁹ cette comparaison reste valable même si dans le cas du ^7Be , son niveau varie d'un facteur 3 en fonction de la saison

Les niveaux d'activités des radionucléides artificiels (^{137}Cs , ^{241}Am et isotopes du Pu) mesurés dans des dépôts de poussières sahariennes en différents sites du pourtour nord de la Méditerranée (Tableau 6) indiquent une relative constance des valeurs depuis au moins l'année 2000.

Cette observation va de paire avec la relative constance des niveaux d'activité en ^{137}Cs dans les aérosols atmosphériques, à mettre sur le compte d'un état d'équilibre entre dépôts et remise en suspension.

Les zones sahariennes, bien que théoriquement moins impactées que l'Europe par les retombées globales des tirs et celles de l'accident de Tchernobyl, ont néanmoins reçu des retombées atmosphériques (cf. Pan et Stevenson 1996). Les mesures des niveaux d'activités dans la zone saharienne sont rares. Chappell (1998) fournit des activités en ^{137}Cs au sud-ouest du Niger. Ces valeurs mettent en évidence des phénomènes d'enrichissement local des sols par accumulation de poussières désertiques (15 à 30 μm) riches en ^{137}Cs , notamment en présence d'un couvert végétal qui piège les particules. La valeur de référence à considérer pour l'inventaire du ^{137}Cs , au sud Niger du moins, est de 2066 +/- 125 Bq.m^{-2} pour l'année 1998, estimation moyenne calculée sur une épaisseur de sol d'une cinquantaine de centimètres.

En l'absence d'autres données précises sur les niveaux d'activité des radionucléides artificiels des zones sahariennes, les données de l'UNSCEAR (1982), établies pour le ^{90}Sr , peuvent être utilisées pour estimer l'activité des sols sahariens. La répartition latitudinale du ^{90}Sr et l'utilisation d'un rapport $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ à peu près constant et compris entre 1,6 et 1,9 permet d'estimer la densité de dépôt en ^{137}Cs dans les zones de production de poussières sahariennes (cf. Tableau 12).

Pour les autres radionucléides artificiels mentionnés dans le tableau, on a supposé que la répartition mondiale des retombées par bande latitudinale était la même que celle du ^{90}Sr . Dans le cas du ^{137}Cs (période de 30 ans) et du ^{241}Pu (période de 14,4 ans), les données ont été corrigées de la décroissance radioactive.

Ces estimations permettent ainsi de fixer un ordre de grandeur des niveaux que l'on pourrait mesurer aujourd'hui. Ces valeurs restent pour autant majorantes puisqu'elles ne prennent pas en compte les pertes par érosion et transport éolien ou par migration dans les sols.

Tableau 12 : Ordres de grandeur des répartitions latitudinales des dépôts en ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Pu et ^{241}Am , d'après les données de l'UNSCEAR (1982) établies à partir de mesures de ^{90}Sr , valeurs corrigées de la décroissance radioactive pour l'année 2005

Bandes latitudinales occupées par le Sahara	Densités de dépôt intégré				
	^{238}Pu (Bq.m^{-2})	$^{239+240}\text{Pu}$ (Bq.m^{-2})	^{241}Pu (Bq.m^{-2})	^{241}Am (Bq.m^{-2})	^{137}Cs (Bq.m^{-2})
10 - 20 ° N	0,7	27,3	86	11,8	1000
20 - 30 ° N	1,15	44,3	140	19,1	1500

5.3 ESSAIS NUCLEAIRES FRANÇAIS AU SAHARA

Faute de données accessibles et suffisantes, la question d'une activité résiduelle induite spécifiquement par les retombées des tirs français¹⁰ au Sahara (cf. carte, Annexe 5) dans les dépôts collectés dans le cadre de cette étude, ne peut être abordée qu'avec un grand nombre de réserves.

Plusieurs rapports isotopiques sont utilisés dans la littérature pour distinguer une contribution particulière par rapport aux retombées globales. Le rapport $^{137}\text{Cs}/^{239+240}\text{Pu}$ caractérisant les retombées globales de la période des tirs est de l'ordre de 30 à 40 (valeur corrigée de la décroissance du ^{137}Cs pour l'année 1998, Czidiel 1999, Hodge 1996) et tend à diminuer sensiblement avec le temps compte tenu de la période relativement courte du césium 137. Pour une même date, des valeurs plus faibles d'un facteur 1,5 traduisent une ou plusieurs autres sources locales de plutonium. Ces valeurs peuvent chuter jusqu'à 3,2 autour du site de Windscale en Angleterre (Eakins cité dans Hodge 1996) voire 1, à proximité du site des tests américains au Nevada.

Les poussières collectées en France le 21 février 2004 sont caractérisées par un rapport d'activité de 37,1 (Tableau 9) et par conséquent, caractéristiques des retombées globales. Les autres rapports isotopiques ($^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$, $^{241}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$, $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, $^{137}\text{Cs}/^{239+240}\text{Pu}$) également utilisés ne permettent pas d'incriminer une source locale de plutonium.

L'étude réalisée sur des sols algériens en 1993 par Nouredine (1997) en collaboration avec l'AIEA et reprise par Baggoura (1998) montre que les valeurs des rapports d'activité $^{137}\text{Cs}/^{239+240}\text{Pu}$ et $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ s'inscrivent aussi dans la fourchette des valeurs caractéristiques des retombées globales des tirs et ne permettent pas d'identifier une signature particulière des essais français. La quantification des émetteurs alpha a été réalisée en 5 endroits seulement, notamment dans la région centrale de l'Algérie saharienne (province de Ghardaïa située entre 300 et 700 km au nord-nord-est de la zone des tirs atmosphériques français).

C'est également dans cette province que la valeur moyenne des mesures en césium 137 dans les 15 premiers centimètres de sol est la plus forte (> 12 Bq.kg⁻¹ sec avec un maximum à 43).

Au-delà des valeurs des rapports d'activité, il convient également de noter, que les niveaux d'activité des radionucléides artificiels sont élevés pour la région, dans la mesure où :

- ceux des actinides sont identiques aux plus fortes valeurs rencontrées en France au voisinage immédiat de l'installation de retraitement du combustible de Marcoule pour lesquelles Duffa (2001) a montré qu'elles résultaient des rejets anciens du site,
- ceux du ^{137}Cs sont similaires à ceux trouvés dans l'est de la France ayant reçu des retombées de Tchernobyl en relation avec des pluies importantes entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 (Renaud 2004), que l'on ne peut envisager au Sahara (pluviométrie moyenne inférieure à 100 mm voire 30 mm par an),
- il serait admis que le nuage radioactif de Tchernobyl ne semble pas être passé par l'Algérie (communication personnelle A. Nouredine),
- la répartition des retombées des tirs selon les latitudes conduit normalement à des dépôts plus faibles aux latitudes du Sahara qu'en France.

Malgré la controverse sur l'étendue des retombées des tirs, le nombre de mesures disponibles reste trop faible, en particulier sur les transuraniens (5 déterminations pour l'ensemble du territoire Algérien) pour pouvoir en déduire un état des lieux représentatif d'une contamination résiduelle qui plus est, imputable aux essais français au Sahara ; même si les valeurs sont fortes pour la région.

A l'heure actuelle, les mesures qui ont pu être réalisées dans le cadre de ces essais ne sont pas accessibles et à moins d'envisager des prélèvements et des mesures spécifiques, il faut attendre, a minima, la parution prochaine du rapport de synthèse de l'AIEA sur les tirs français au Sahara, pour pouvoir préciser les retombées globales ou celles spécifiques des tirs français ainsi que leur reprise lors des phénomènes éoliens importants.

¹⁰ quatre tirs atmosphériques : le dernier en 1961 depuis Reggane plus l'essai sous-terrain « Béryl » avec rejet accidentel à l'air, le 01/05/62 depuis In Ecker et les expérimentations complémentaires de surface

6 MECANISMES D'ENRICHISSEMENT

La question du caractère « inné » ou acquis de la radioactivité artificielle dans les poussières sahariennes collectées en France laisse entrevoir plusieurs pistes possibles pour expliquer les niveaux d'activité trouvés dans les dépôts. Toutes ces hypothèses se réalisent vraisemblablement mais leur contribution respective aux niveaux de radioactivité dans les dépôts de poussières désertiques reste à définir par des études approfondies. Des analyses isotopiques sur des prélèvements dans le nuage ou au sol (en mer) et à différentes distances des zones de formation des panaches de poussières apporteraient de précieux indicateurs sur l'importance respective des mécanismes intervenant.

La remise en suspension de particules déposées au sol est considérée comme le mécanisme prédominant, responsable du maintien d'un bruit de fond résiduel de radionucléides artificiels au niveau de la troposphère.

Différents épisodes de transport éolien relatés dans la littérature (Lee 2003), mettent en évidence la formation de dépôts mixtes issus du soulèvement de poussières sahariennes mais aussi de poussières originaires de sols situés sur la rive nord de la Méditerranée.

Dans le cas de l'épisode du 21 février 2004, l'importance des radionucléides d'origine tellurique (^{40}K , ^{228}Ac), valide la prédominance de la remise en suspension de particules de sol. Toutefois, celle-ci n'intervient vraisemblablement qu'à l'origine du phénomène à savoir au niveau des sols sahariens, mais pas ou peu depuis les sols français. En effet, les retro-trajectoires (Figure 3) indiquent un survol direct de la Méditerranée. De ce fait, les particules déposées sur la rive nord de la Méditerranée proviendraient exclusivement de l'Afrique du Nord comme en témoigne leur signature minéralogique ou leur composition en éléments majeurs dans les dépôts. La fourchette d'estimation des niveaux d'activité massique en ^{137}Cs dans les aérosols prélevés à la station littorale de la Seyne/Mer (Tableau 8) correspond bien à la valeur trouvée dans les dépôts prélevés sur Manosque. Ceci permet de conclure que la radioactivité des dépôts prélevés sur Manosque est bien l'image de celle des sols sahariens et non pas issue des sols voisins de la zone de dépôt.

Quant à l'importance des niveaux de concentrations observés dans les dépôts en France, celle-ci peut s'expliquer par une augmentation apparente de l'activité issue de la perte des particules les plus grosses et par ailleurs les moins marquées en activité, au cours du transport sur de longues distances. C'est probablement le deuxième mécanisme d'importance dans le processus conduisant au flux de radionucléides lors de ces épisodes. L'efficacité de ce mécanisme est amplifiée dès le soulèvement des particules, par l'éclatement des agglomérats de sables¹¹ sous l'effet des frottements entre particules.

D'autres mécanismes sont susceptibles de contribuer à la charge radioactive des particules déposées mais n'ont pas le caractère systématique et incontournable des deux mécanismes précédemment cités. C'est le cas du lessivage du nuage de particules par les pluies ; elles-mêmes potentiellement induites par les poussières¹² qui survient près d'une fois sur deux (Escudero 2003). L'évaporation partielle ou totale des gouttes de pluie qui lessivent les particules minérales au cours de leur chute conduit à la formation de boues et d'agglomérats de poussières (Ganor 2003).

L'annexe 7 rassemble d'autres mécanismes susceptibles d'intervenir.

¹¹ mécanisme de « sand blasting » (cf. Annexe 1)

¹² même s'il semble que les poussières désertiques ne constituent pas de bons noyaux de condensation

7 CONCLUSION

Le 21 février 2004, un épisode de transport éolien et de dépôt de poussières désertiques, sans précédent depuis au moins vingt ans, touche le sud-est de la France. La différence entre cette situation et une situation habituelle tient à l'importance de la charge en particules dans l'atmosphère au voisinage du sol (jusqu'à $450 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à comparer à la trentaine de $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ rencontrés en moyenne annuelle en site urbain) et à l'importance du dépôt (jusqu'à 50 tonnes au km^2 en Corse). La surface concernée par les dépôts couvre environ $300\,000 \text{ km}^2$, au sud d'une ligne allant de Nantes à Besançon. La quantité totale de matières déposées sur le territoire national est estimée à 2 millions de tonnes. Le nuage de particules est également détecté en Italie et en Suisse. Les analyses, minéralogique, granulométrique et celle des éléments majeurs, signent la provenance saharienne de ces particules.

D'un point de vue radioécologique, le niveau d'activité massique en ^{137}Cs des aérosols sahariens est 13 fois supérieur au niveau habituellement rencontré. Dans les dépôts, les activités massiques des radionucléides artificiels sont proches des valeurs les plus élevées rencontrées dans les sols français : $38 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ sec}$ en ^{137}Cs , $1 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ sec}$ en $^{(239+240)}\text{Pu}$ et $0,46 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ sec}$ en ^{241}Am . D'autres épisodes relatés dans la littérature et ayant donné lieu à la collecte de dépôts sur la rive nord de la Méditerranée après 2000, présentent des valeurs semblables. Les épisodes de poussières sahariennes génèrent aujourd'hui, les échantillons de l'environnement qui en moyenne présentent les niveaux d'activité en radionucléides artificiels les plus importants et les flux les plus élevés, devançant par exemple ceux dans les sédiments du Rhône lors des crues. En terme de flux de particules, cet événement, conjuguant une charge particulaire élevée et des niveaux d'activités massiques conséquents, dépose, à lui seul et sur une durée comprise entre 10 et 20 heures, autant de ^{137}Cs que le cumul d'activité dans les dépôts sur une année (hors événement de ce type). La radioactivité artificielle (^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Pu , ^{241}Am) déposée par cet épisode sur la France est estimée à $37 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

L'analyse des rapports isotopiques, notamment ceux des plutoniums, signe les retombées globales des tirs atmosphériques. Les essais nucléaires français au Sahara, mettant en œuvre des bombes à fission de plutonium 239, ont contribué aux retombées globales des tirs. Leur contribution spécifique à la charge radioactive des poussières désertiques recueillies en France en février 2004 ne peut donc être exclue mais est, aujourd'hui, difficile à distinguer sur la base de ces rapports. D'autres mesures d'activité dans les sols sahariens au voisinage des zones de tirs ainsi que dans les dépôts le long des trajectoires des nuages de poussières permettraient de préciser le caractère résiduel et d'estimer le potentiel d'exportation de cette radioactivité issue des tirs français. En l'état actuel, faute de données suffisantes, cette question ne peut être tranchée.

Le caractère « inné » ou acquis de la radioactivité des poussières sahariennes au cours de leur transport, semble pouvoir être imputé principalement aux sols sahariens. Toutefois, les zones de production de poussières désertiques présentant des niveaux d'activité en radionucléides artificiels en moyenne inférieurs à ceux des sols en France, un enrichissement de l'activité massique des particules se produirait donc au cours du transport. Cet enrichissement est vraisemblablement dû au fait que les particules les plus grosses, par conséquent les moins marquées, quittent rapidement le nuage et ne sont pas transportées sur de longues distances. D'autres mécanismes d'enrichissement par voie sèche (impaction, interception) d'autres aérosols ou par voie humide (rainout, washout) sont décrits dans la littérature mais leur rôle d'amplificateur éventuel de la charge radioactive de particules sahariennes reste à étudier. L'évolution des caractéristiques granulométriques et un travail de fond sur les niveaux d'activité et les rapports isotopiques des particules avec l'éloignement par rapport à leur zone de soulèvement, constituent une thématique pour laquelle une collaboration de plusieurs équipes est nécessaire.

En ce qui concerne la relation pluie/dépôt lors d'épisodes de poussières sahariennes, la littérature précise que les quantités déposées ne dépendent pas des hauteurs de précipitation à l'inverse de ce qui est généralement considéré en terme d'activité déposée sur la base de hauteurs moyennes annuelles. L'étude du dépôt radioactif sur des échelles de temps correspondant à la durée de vie des épisodes météo-climatiques comme les nuages de poussières sahariennes ou plus communément pour chaque précipitation permettra de mesurer la variabilité des coefficients de lessivage.

D'un point de vue dosimétrique, la dose efficace engagée liée à l'inhalation des poussières sahariennes serait négligeable (10^{-9} à 10^{-10} Sv) compte tenu des niveaux d'activité massique et des niveaux d'empoussièrement mesurés.

8 PERSPECTIVES

Très peu d'équipes en France étudient le couplage « poussières désertiques - radioactivité ». Le CEA/LSCE, le LGGE¹³ ou encore l'université de Perpignan au sein du programme ADIOS¹⁴ (clos depuis fin 2003), travaillent essentiellement sur les radionucléides naturels (²¹⁰Pb, ⁷Be, ¹⁸O, ¹⁴C,...) pour étudier les mouvements des masses d'air, les grands bouleversements climatiques anciens ou l'évolution actuelle du climat. A l'échelle nationale comme internationale, hormis les travaux réalisés sur les radionucléides naturels ou, en ce qui concerne les radionucléides artificiels, les travaux de l'AIEA-Monaco¹⁵, ceux de l'Institut de recherche météorologique du Japon, et quelques chercheurs américains (Biegalski 2000), on peut s'étonner de ne pas trouver plus de littérature traitant du couplage entre les épisodes de poussières désertiques, les précipitations et la radioactivité, artificielle en particulier, alors qu'il s'agit d'événements présentant un marquage notable.

Les épisodes éoliens de transport et de dépôts massifs de particules terrigènes désertiques constituent aujourd'hui une des dernières opportunités pour mesurer¹⁶ les Pu atmosphériques présents en situation normale à des niveaux trop faibles dans l'atmosphère pour être détectés significativement. De même, des études récentes montrent clairement la corrélation entre l'accroissement des zones désertiques chinoises soumises à l'érosion éolienne et l'augmentation des dépôts en plutonium au Japon. L'annexe 1 propose une ébauche méthodologique pour l'étude de ces épisodes.

D'un point de vue méthodologique et scientifique, une veille rapprochée de ces événements est d'actualité. En effet, l'observation de ces phénomènes, précisément en Mauritanie (Nouaceur 2001), atteste d'une recrudescence depuis les années 70 et confirme une plus grande efficacité de l'action éolienne sur les substrats fragilisés par les récents changements climatiques et les nouveaux comportements humains. Selon l'auteur, le déficit pluviométrique constitue le premier maillon de la dégradation. Un lien très fort existe entre la réduction de la pluviométrie et l'augmentation de la fréquence des épisodes de poussières sahariennes.

En s'intéressant à l'impact radioécologique des épisodes de poussières sahariennes, l'IRSN développe son expertise des retombées atmosphériques lors d'épisodes météo-climatiques particuliers, à l'origine d'une variabilité des coefficients de lessivage de l'atmosphère. Cette étude contribue aux travaux menés par la communauté scientifique universitaire et CNRS, notamment par la caractérisation des facteurs de transferts par voies sèche et humide, à partir de l'étude des niveaux d'activités rencontrés dans l'atmosphère et ceux déposés au cours de ces événements. Ce travail permettrait également de mettre à disposition des données expérimentales qui participeraient à la validation des modèles, internes ou externes, de dépôts de matières particulaires et de radionucléides. En retour, ces modèles permettraient de mieux appréhender l'étendue spatiale de ces événements et l'importance des quantités et des activités totales déposées à l'échelle du territoire.

Afin d'apprécier la validité des relations pluie/dépôt (Renaud 2004) définies à partir de moyennes annuelles, au cas particulier des retombées de poussières sahariennes ; un travail de suivi des épisodes individuels pluvieux et/ou de poussières désertiques doit être mené. Dans le cadre du projet « Extrême » relatif aux flux de radionucléides les plus importants, il y a lieu d'appréhender les événements météo-climatiques, comme les épisodes de poussières désertiques ou les premières pluies faisant suite à une longue période d'absence de pluie, sur des pas de temps correspondants à ces événements, soit de quelques heures à quelques jours. Cette proposition sera traitée ultérieurement dans une note de synthèse sur les dépôts engendrés par la pluie et la variabilité des coefficients de lessivage de l'atmosphère, à l'échelle individuelle de chaque événement. Un programme de travail axé sur les dépôts de radionucléides associant des études expérimentales et une modélisation permettraient de préciser l'efficacité du lessivage d'après les caractéristiques intrinsèques des précipitations considérées individuellement.

¹³ Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement - Grenoble

¹⁴ Atmospheric Deposition and Impact of pollutants, key elements and nutrients on the Open Mediterranean Sea

¹⁵ Pham - sous presse, Lee 2002, Lee 2003

¹⁶ Avec les moyens métrologiques de pointe fonctionnant actuellement en routine à l'IRSN/DEI/STEME

Cadre des futures études

Afin de répondre aux conditions d'une labélisation en Observatoire de Recherche en Environnement¹⁷, l'observatoire OPERA cherche à développer des études à caractère scientifique et des partenariats avec la communauté scientifique CNRS et universitaire. Dans le cadre des projets « SENSIB » et « Extreme », un programme de recherche sur les transferts atmosphériques par temps sec et/ou humide s'appuyant notamment sur la logistique et les études réalisées dans le cadre d'OPERA, a été proposé. Ce programme vise à caractériser des événements météo-climatiques particuliers sur des pas de temps correspondants à leur durée contrairement à l'approche calendaire réalisée jusqu'à présent, en particulier sur : les premières pluies, les averses, la neige, le brouillard et les épisodes des transports éoliens et de dépôt par voie sèche et/ou humide de poussières sahariennes. Ces phénomènes ont tous en commun une efficacité de rabattement ou de lessivage de l'atmosphère bien supérieure à ce qui a lieu par temps sec.

Un certain nombre de partenariats scientifiques et logistiques internes ou externes ont été identifiés pour contribuer à l'étude de ces événements et à la rédaction de documents :

- SESURE / LVRE pour les échantillons SCPRI et OPRI identifiés « poussières sahariennes » pouvant faire l'objet de remesurages ou de mesurages complémentaires,
- STEME / LMRE pour les mesures alpha et gamma à très bas niveau, à l'aide de moyens métrologiques comme le détecteur « puits » de Modane permettant d'envisager l'étude des niveaux d'activité par classe granulométrique de poussières désertiques,
- Université de Clermont-Ferrand, laboratoire de Météorologie Physique pour la modélisation des processus, les retro-trajectoires des masses d'air, la collecte de poussières. L'étendue verticale de la couche limite atmosphérique, susceptible d'être concernée par des remises en suspension locale des particules de sols de la région Centre, atteint rarement le sommet du Puy de Dôme (1465 m). C'est l'une des raisons pour lesquelles le sommet du Puy de Dôme a été retenu pour l'implantation d'une station OPERA et la caractérisation du bruit de fond de radioactivité dans la troposphère libre. L'absence d'injection récente dans ou au-dessus de la troposphère ainsi que l'absence d'influence des phénomènes locaux cités précédemment conduisent vraisemblablement à des niveaux d'activité en ¹³⁷Cs plus faibles et caractérisés par une moindre variabilité que ce qui est observé au voisinage du sol en plaine. Il se trouve que l'altitude à laquelle les panaches de poussières désertiques voyagent se situe dans la troposphère libre. Bien que relativement éloignée du littoral méditerranéen, cette station présente l'intérêt d'effectuer des prélèvements à une altitude (1500 m) proche de l'altitude moyenne du centroïde des nuages de poussières sahariennes,
- Station Corse du Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure de Paris, pour la collecte et la fourniture d'échantillons anciens ainsi que de la liste, événement par événement, des retombées de poussières désertiques en Corse sur les 20 dernières années. La Corse est souvent impactée par des dépôts de poussières désertiques. Un suivi des événements et une collecte systématique sont réalisés par l'Ecole Normale Supérieure de Paris. Ces données doivent compléter celles prévues sur le continent par l'IRSN et l'université de Toulon. L'ensemble des informations doit permettre de préciser l'existence d'une variation de l'activité massique en fonction de l'éloignement à la source d'émission des poussières et par conséquent s'il y a lieu de considérer un enrichissement au cours du transport ou s'il est juste de penser que la radioactivité mesurée dans les dépôts en France n'est que l'image de celle déposée sur le continent africain. Le redéploiement en Corse de l'ex-station OPERA atmosphérique antérieurement installée à Saint Denis de la Réunion, fournira les niveaux d'activité dans les aérosols en complément des dépôts,
- Université de Toulon - La Valette, Laboratoire d'Etude des Echanges Particulaires aux Interfaces, pour la collecte et la caractérisation temps réel des spectres granulométriques des aérosols ainsi que l'étude individuelle des pluies. En complément de la station au Puy de Dôme, ce site scientifique instrumenté figure, avec la Corse, parmi les sites métropolitains les plus fréquemment exposés et présentant des dépôts intermédiaires entre ceux de la Corse et ceux des régions plus continentales. De plus, cette station permettra d'élargir la palette de type de pluie en intégrant à l'étude les précipitations brusques et intenses de type méditerranéen,
- AIEA-Monaco pour la collecte et les calculs de flux des activités déposées,

¹⁷ Label ORE décerné par le Ministère de la Recherche

- L'IRD (ex-ORSTOM), le CIRAD ou le BRGM pour l'accès à leur banque d'échantillons de sols africains en vue de mesure des niveaux d'activité après tamisage,
- Université Paris-XII, Laboratoire Inter-Universitaire des Systèmes Atmosphériques pour l'étude du comportement des aérosols et l'accès à leur échantillon de filtres d'aérosols africains + contacts africains du LISA,
- Associations agréées du réseau ATMO de surveillance de la qualité de l'air pour la fourniture des concentrations en PM_{10} , $PM_{2.5}$ et ozone dans l'atmosphère,
- ADEME pour sa banque de données sur la qualité de l'air (BDQA),
- Marine nationale Toulon pour compléter au pas de temps journalier les prélèvements d'eau de pluie mensuels de la station OPERA de la Seyne/Mer,
- Université de Bologne en Italie, Institut Paul Scherrer en Suisse,
- Organismes en charge de la surveillance radiologique dans les pays du Maghreb, pour la collecte d'échantillons de poussières déposées.

Cet événement a été l'occasion de prendre la mesure de ce type de phénomène et d'envisager l'élaboration d'un projet afin de sérier les questions, en établir un ordre de priorité et pouvoir engager les moyens humains et matériels ainsi que les collaborations nécessaires à sa réalisation.

BIBLIOGRAPHIE

- Agarande M., Schmidt S., Neiva-Marques A. M., Bouisset P. (2004) Plutonium, Protactinium, Uranium, Thorium determination in environmental samples by SF ICP-MS. Recueil des communications Congrès Ecorad 2004, Aix-en Provence, septembre 2004.
- Avila A., Alarcón M., Queralt I. (1998) The chemical composition of dust transported in red rains - its contribution to the biogeochemical cycle of a holm oak forest in Catalonia (Spain). *Atmospheric Environment* (1998), Vol. 32, n° 2, pp 179-191.
- Baggoura B., Noureddine A., Benkrid M (1998). Level of natural and artificial radioactivity in Algeria. *Appl. Radiat. Isot.* Vol 49, N° 7, pp. 867-873.
- Bataille Ch., Revol H. (2001). Les incidences environnementales et sanitaires des essais nucléaires effectués par la France entre 1960 et 1996 et éléments de comparaison avec les essais des autres puissances nucléaires. Rapport de l'Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, présenté au Sénat (n°207) et à l'Assemblée Nationale (n°3571).
- Biegalski S. R., Hosticka B., Mason L. R. (2001). Cesium-137 concentrations, trends and sources observed in Kuwait City, Kuwait. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chem.*, vol 248, n° 3, 2001, 643-649.
- Bonasoni P., Cristofanelli P., Calzolari F., Bonafè U., Evangelisti F., Stohl A., Zuali Sajani S., Van Dingenen R., Colombo T., Balanski Y. (2004) Aerosol-Ozone correlations during dust transport episodes. *Atmos. Chem. Phys.* 4, 1201-1215.
- Borbély-Kiss I., Kiss A. Z., Koltay E., Szabó Gy., Bozó L. (2004) : Saharan dust episodes in Hungarian aerosol: elemental signatures and transport trajectories. *J. of Aerosol Science*, 35 (2004), 1205-1224.
- Bouisset P., Barker E., Masson O., Gurriaran R., Cagnat X., Mekhlouche D., Aubry S., Hadjaj M., Saey L (2004). Concentration de ¹³⁷Cs et de ⁷Be dans les aérosols en France de 1959 à 2002. *Radioprotection* vol 39 n° 3 (2004).
- Boyer J. (1967) : Incidences des retombées sur la radioactivité des pluies, du sol et de certaines plantes en fonction du calendrier des explosions nucléaires expérimentales 1961-1965. CEA/DPS- CEN FAR / Ministère de l'Agriculture CREGR. Bulletin technique de Génie Rural 1967, n° 82
- Calmet D., Bouisset P., Kerlau G., Allenou J. (1994). Les observatoires permanents de la radioactivité de l'IPSN. Evolution du césium 137 dans les aérosols atmosphériques entre 1958 et 1994. International conference on "Radiation and Society" : Comprehending Radiation Risks, 24-28/10/1994.
- Caquineau S., Gaudichet A., Gomes L., Magonthier M.C., Chatenet B. (1998) : Saharan dust : Clay ratio as relevant tracer to assess the origin of soil-derived aerosols. *Geophysical research letters*, vol. 25, n° 7, 983-986, april 1, 1998
- Chappell A., Warren A., Olivier M. A., Charlton M. (1998) : The utility of ¹³⁷Cs for measuring soil redistribution rates in southwest Niger. *Geoderma* 81 (1998) 313-337.
- Duffa C. (2001) : Répartition du plutonium et de l'américium dans l'environnement terrestre de la basse vallée du Rhône. Thèse CEA-r-5977, ISSN 0429-3460 (178 p).
- Duffa C., Renaud Ph., Calmet D. (2001) ²³⁸Pu and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu activities in lower Rhône valley cultivated soils. *Compte-rendus de l'Académie des Sciences - Earth and planetary Sciences*, 332, 275-281.
- Dulac F. Moulin C, Planquette H., Schulz M., Tartar M. (2004) African dust deposition and ocean colour in the eastern Mediterranean. Rapport Commission internationale CIESM, vol 37, 2004, p190. Congrès de juin 2004 Barcelone.
- Cizdiel J., Hodge V., Faller S. (1999) Resolving Nevada test site and global fallout plutonium in attic dust and soils using ¹³⁷Cs/²³⁹⁺²⁴⁰ Pu activity ratios. *Health Physics* Jul 1999 V 77, n° 1, 67-75.
- Escudero M., Castillo S., Viana M.D.M., Querol X., Alastuey A., Moreno N., Avila A. (2003) Statistical and Meteorological analysis of wet and dry African dust episodes over the eastern Iberian Peninsula for the period 1996-2002. 2nd Workshop on Mineral Dust Paris, 10-12 septembre 2003

- Furukawa M., Tokonami S., Ishikawa T., Sun Q., Hou C., Narazaki Y. Eolian dust "Kosa" from China is an enhancer for the radioactivity in Japan.
- Gordon McBean, Andrew Weaver et Nigel Roulet : La science des changements climatiques : où en sont nos connaissances ? ISUMA, Volume 2 N° 4 • Hiver 2001 · ISSN 1492-0611
- Goudie A.S., Middleton N.J.: Saharan dust storms : Nature and consequences. *Earth Science Reviews* 56 (2001) 179-204.
- Griffin W., Kellog Ch. A., Shinn E. Dust in the wind (2001) : Long range transport of dust in the atmosphere and its implications for global public and ecosystem health. *Global Changes & Human health*, vol. 2 n°1, (2001).
- Guerzoni S., Chester R (1996). Editors. The impact of desert dust across the Mediterranean, 389 pp. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- R. Gurriaran, E. Barker, P. Bouisset, X. Cagnat, C. Ferguson (2004). Calibration of a very large ultra-low background well type Ge detector for environmental sample measurements in an underground laboratory. *Nuclear Instruments and Methods A* 524 (2004) 264-272.
- Hirose K., Igarashi Y., Aoyama M., Kim, C. K., Kim C. S., Chang B. W. (2003). Recent trends of plutonium fallout observed in Japan : plutonium as a proxy for desertification. *J. Environ. Monit.*, 2003, 5, 302-307.
- Hodge V, Smith C., Whiting J. (1996) : Radiocesium and plutonium still together in "background" soils after more than thirty years. *Chemosphere*, Vol 32, n° 10, pp 2067-2075.
- Igarashi Y., Aoyama M., Hirose K., Miyao T., Nemoto K., Tomita M., Fujikawa T. (2003) Resuspension : decadal monitoring time series of the anthropogenic radioactivity deposition in Japan. *J. Radiat. Res.* 44, 319-328.
- Lee S. H., La Rosa J., Levy-Palomo I., Oregioni B., Pham M. K., Povinec P. P., Wyse E. (2003). Recent inputs and budgets of ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ^{239,240}Pu and ²⁴¹Am in the northwest Mediterranean sea. *Deep-sea research II* 50 (2003) 2817-2834.
- Lee S. H., Pham M. K., Povinec P. P. (2002) Radionuclides variations in the air over Monaco. *J. of radioanalytical and nuclear chemistry*. Vol. 254, n° 3, 445-453.
- Loÿe-Pilot M.D. Benyaha L. and the ADIOS atmospheric network team (2003). Saharan dust input to the Mediterranean : temporal and spatial variation during the ADIOS experiment. 2nd Workshop on Mineral Dust Paris, 10-12 Septembre 2003
- Loÿe-Pilot M. D., Martin J. M ; (1996). Saharan dust input to the western Mediterranean, An eleven years record in Corsica. In S. Guerzoni & Chester editors. The impact of desert dust across the Mediterranean. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 191-199.
- Loÿe-Pilot M. D., Martin J. M., Morelli J., (1986). Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature* 321, 427-428
- Miquel J. C., Fowler S. W., La Rosa J., Buat-Menard P. (1994). Dynamics of the downward flux of particles and carbon in the open northwest Mediterranean sea. *Deep sea research I* 41, 243-261.F
- Moulin C. (2005). Intensification du transport des poussières d'Afrique depuis 35 ans : relations avec les changements climatiques et avec l'augmentation de la population au Sahel. CEA / LSCE (séminaire LSCE janvier 2005 Saclay).
- Nouaceur Z. (2001). L'évolution des lithométéores en Mauritanie confirme une plus grande efficacité de l'action éolienne. *Revue Européenne de Géographie*, n° 203, 18/12/2001. Cybergeo
- Noureddine A., Baggoura B, Larosa J. J., Vajda N. (1997). Gamma and alpha emitting radionuclides in some Algerian soil samples. *Applied Radiation Isotops*. Vol. 48, n°8, pp 1145-1148.
- Ozer P. (2005) Estimation de la pollution particulaire naturelle de l'air en 2003 à Niamey (Niger). *Environnement, Risques et Santé*. Vol.4, n° 1, janvier-février 2005.
- Papastefanou C., Manolopoulou M., Stoulos S., Ionnidou A., Gerasopoulos E. (2001) Coloured rain dust from Sahara is still radioactive. Technical note. *J. of Environmental Radioactivity* 55 (2002) 109-112.
- Papastefanou C. (sous presse) : Radioactivity as tracers of environmental processes.
- Pham M. K., La Rosa J. J., Lee S. H., Oregioni B., Povinec P. P. : Deposition of Saharan dust in Monaco rain 2001-2002 : Radionuclides and elemental composition. (sous presse).

- Pham M. K., Povinec P. P., Lee S. H., Oregioni B. (2003) : Transport atmosphérique de particules de l'Afrique du Nord à Monaco. Bulletin du Bureau National de Métrologie. Journées de spectrométrie gamma et X - Saclay 15-17 octobre 2002. Vol. 2003-2, n° 123. ISSN 0982-2232.
- Rapp, A. 1984. Are terra rosa soils in Europe eolian deposits from Africa? Geologiska Foereningens I Stockholm Foerhandlingar 105, 161-168.
- Renaud Ph., Louvat D. (2004). Magnitude of fission product depositions from atmospheric nuclear weapon test fallout in France. Health Physics, 04/2004, vol. 86, n° 4, 353-358.
- Renoux A., Boulaud D.: Les Aérosols. Physique et métrologie des aérosols. 301 pages Editions Lavoisier Tec & Doc, édition 2001.
- Sauvage L., Pelon J., Fierli F., Chazette P., Goloub P., Munoz C., Srivasta K., Wiegner M. Evènement de transport d'aérosols sahariens vers l'Europe, observé par des réseaux de lidars et de photomètre français et européens (EARLINET et AERONET) et par des mesures satellitales.
- Schwikowski M., Seibert P., Baltensperger U., Gäggeler H. W. (1995) : A study of an outstanding saharan dust event at the high-alpine site Jungfrauoch, Switzerland. Atmospheric Environment, Vol. 29, n° 15, pp 1829-1842.
- Unsear (1982) : Rayonnements ionisants : Sources et effets biologiques. Rapport à l'assemblée générale du comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants. Annexe E : Irradiation due aux explosions nucléaires.
- Valmari T, Tarvainen M, Lehtinen J, Rosenberg R, Honkamaa T, Ossintsev A, Lehtimäki M, Taipale A, Ylätaalo S, Zilliacus R (2002), aerosol sampling methods for wide area environmental sampling (waes). Finnish support to IAEA. STUK. ISBN951-712-560-7 (print) ISBN951-712-561-5 (pdf), ISSN 0785-9325.
- Van Welden A. 2004 : Variations haute résolution des apports terrigènes dans le golfe du Lion pendant la dernière période glaciaire : Caractérisation des événements climatiques rapides. (juin 2004) Mémoire de DEA de l'université des Sciences et Techniques de Lille. UMR CNRS 8110 Processus et Bilans des Domaines Sédimentaires.
- Westphal D. L., Toon O. B., Carlson T. N., (1987). J. Geophys. Research. 92, 3027-3049.
- Woodward S., Robberts D. L., Betts R. A., The response of mineral dust to future changes in climate and vegetation. 2nd Workshop on Mineral Dust Paris, 10-12 Septembre 2003.

Sites Internet

- Réseau d'observation Météorologique MétéoSudEst, dossier "Boue du 21/02/04" : <http://membres.lycos.fr/meteopeypin/Relevés.html>
- Goudie A.S. (2004) : Interview par Inter Press Service (Johannesburg) du 26/08/04. Texte intégral en ligne à la page <http://fr.allafrica.com/stories/200408260708.html>
- Heussner et al. 2003 programme ADIOS du Cefrem - Université de Perpignan <http://adios.univ-perp.fr>
- Prévisions journalières à 3 jours des charges en poussières atmosphériques, des dépôts secs et humides autour du bassin méditerranéen par l'université d'Athènes (Pr. G. Kallos): <http://forecast.uoa.gr/dustindx.html>
- Prévisions journalières à 3 jours des concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5} d'après les observations des Associations Agréées de Surveillance de la QUALité de l'air en France (AASQUA) http://prevair.ineris.fr/prevision_pm10.php
- Observatoires des armes nucléaires : <http://obsarm.org/>
- Images satellites des nuages de poussières sahariennes : <http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS/HTML/dust.html>
- Travaux en cours au Laboratoire Inter universitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA - université Paris XII) sur les aérosols désertiques : http://www.lisa.univ-paris12.fr/aerosol/aer_desert.htm
- Travaux en cours au Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA - université Lille 1) sur les aérosols désertiques : <http://www-loa.univ-lille1.fr/Aerosols/fr/>
- Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Banque de données sur la qualité de l'air : <http://www.atmonet.org>

ANNEXE 1

PRESENTATION DES EPISODES DE POUSSIÈRES DESERTIQUES

Les événements de poussières désertiques prennent naissance sur des étendues planes et désertiques où le couvert végétal dispersé voire absent ne peut entraver l'action érosive du vent sur les sols. Les déserts africains du Sahara et du Sahel (Mauritanie, Mali, centre et sud de l'Algérie et sud du Maroc, Libye, Tchad), de l'Australie, de la Chine intérieure, ainsi que les plaines de l'Ouest américain sont le berceau de ces phénomènes. Les panaches des poussières soulevées sont susceptibles de se déplacer à plusieurs milliers de kilomètres de leur zone de formation, à une altitude moyenne de l'ordre de 2 à 3 km et sur une épaisseur typique d'1 à 2 km. La largeur caractéristique d'un panache de poussières désertiques est de l'ordre de 200 km (Goudie, 2004). Des scientifiques financés par la NASA ont montré que du sable provenant du désert chinois du Takla-Makan pouvait parcourir plus de 20 000 km pour se retrouver dans les Alpes françaises. Ils ont, pour cela, utilisé un modèle informatique de l'atmosphère terrestre. Des recherches menées en 1994 avaient permis de trouver des particules de sable dans les Alpes et les Pyrénées. L'étude montre que les particules de sable auraient fait le tour du monde en deux semaines environ. Avant d'atteindre les Alpes, elles auraient traversé la Chine, l'Océan Pacifique, l'Amérique du Nord et l'Océan Atlantique.

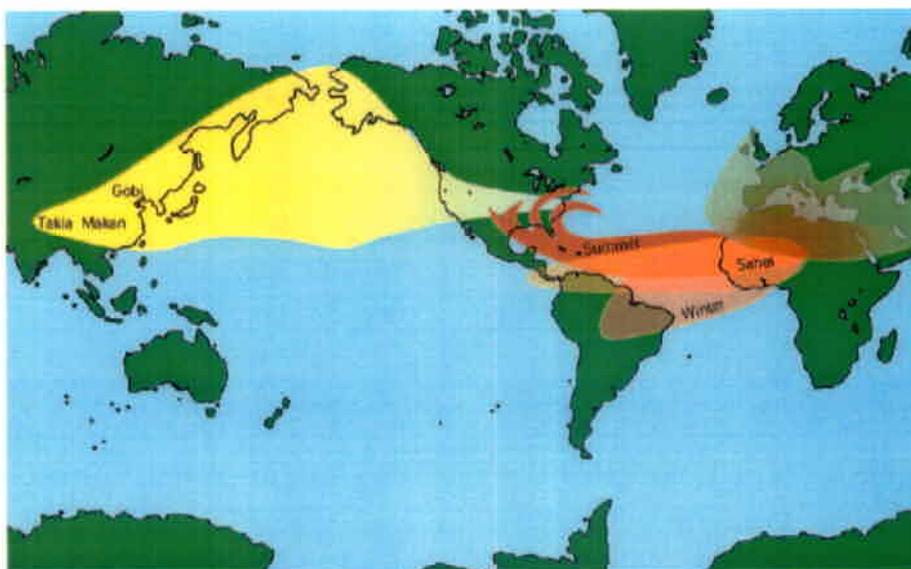


Figure 1 : Les poussières sont véhiculées par deux systèmes majeurs de transport : (1) à partir du Sahara et du Sahel vers les Amériques, l'Europe et le Proche Orient ; (2) à partir des déserts chinois de Takla-Makan et de Gobi au travers de la Chine, vers la Corée, le Japon, l'Océan Pacifique jusqu'aux Etats-Unis.

Les particules de sols concernées par le soulèvement ne correspondent pas aux plus petites pour lesquelles des forces de cohésion restent plus importantes que pour celles de taille supérieure, les empêchant d'être soulevées. A l'opposé, les très grosses particules qui peuvent être soulevées ont un parcours aérien assez limité et progressent essentiellement par saltation, de proche en proche. La taille optimum des particules soulevées par les vents se situe aux environs de 100 μm et correspond à des agrégats essentiellement formés de silicates et d'argiles. Ces agrégats se désagrègent¹ ensuite pour donner des particules plus fines qui seront transportées sur de longues distances. La fraction du sol qui fournit les particules de 20 μm dans les dépôts de poussières peut donc être constituée à l'origine, de particules de taille supérieure.

En terme de contenu radioactif, cela signifie que les niveaux mesurés pour une classe granulométrique des particules déposées pourraient ne pas correspondre aux niveaux d'activité de la même classe granulométrique du sol soumis à l'érosion éolienne.

Maintenues en suspension par des effets dynamiques associés à des systèmes de front, les « grosses » particules (microniques) forment des nuages de poussières et sont transportées (Figure 12). Le nuage est le siège d'une ségrégation en fonction de la taille et de la densité des particules ainsi que des conditions de turbulence atmosphérique. Les particules les plus fines (sub-microniques) arriveront à atteindre des régions situées à des milliers de kilomètres (de la Chine vers les Etats-Unis, du Sahara à la Scandinavie, la Floride, les Caraïbes ou l'Amérique du Sud..., cf. Figure 1).

¹ Mécanisme dit de "sandblasting" (= "explosion des grains de sable")

Au cours du transport, les particules font office de « gros porteurs » vis à vis d'autres composés de taille inférieure et de natures diverses : organique, métallique, chimique, biologique et présents à l'état particulaire ou gazeux dans l'atmosphère. Ces processus d'incorporation par impaction seront d'autant plus importants que les particules auront pu capter des molécules d'eau. *In fine* elles « nettoient » l'atmosphère lorsqu'elles chutent à l'état sec ou mieux encore, sous la forme de pluie (Figure 2). A l'état sec, ces particules minérales sont généralement assez peu réactives chimiquement. Par contre leur caractère hydrophile dû à la présence d'argiles les rend aptes, en présence d'eau, à des réactions acido-basiques et de ce fait beaucoup plus réactives, ce qui ajoute au potentiel de lessivage de l'atmosphère dû uniquement à la pluie (communication personnelle de Gilles Bergametti. LISA paris).

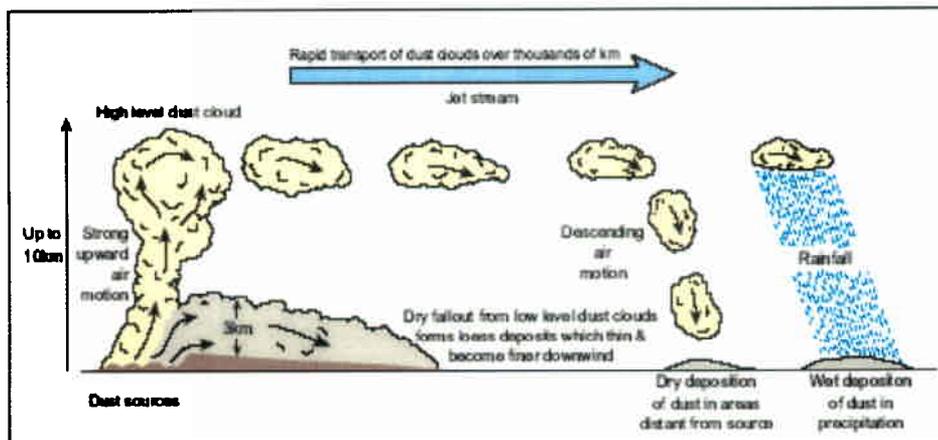


Figure 2 : Mécanismes de soulèvement et de dépôt de poussières désertiques. Source : Plaquette de présentation du programme International Year of Planet Earth. Août 2004 IUGS Secretariat - Geological Survey of Norway. www.esfs.org

Les dépôts de poussières désertiques constituent la principale source de nutriments, notamment en phosphore, par ailleurs en concentration limitante dans les écosystèmes marins et terrestres ; de sels minéraux et de métaux (cuivre, gallium, manganèse, plomb, cadmium et fer en particulier au milieu marin hauturier) pour l'océan nord-Atlantique et la Méditerranée. En Méditerranée, les apports en fer arrivent en tête devant ceux du Rhône. Cette fertilisation retentit sur la production de biomasse phytoplanctonique en Méditerranée (Loÿe-Pilot 1986, Miquel 1994, Dulac 1994). Pour les écosystèmes oligotrophiques terrestres, les apports alcalins liés aux poussières sahariennes permettent d'équilibrer les retombées acides liées à la pollution industrielle et au trafic automobile (pluies acides) et de limiter ainsi les pertes en nutriments dans les sols (Loÿe-Pilot 1996).

De bénéfiques, les conséquences de ces épisodes peuvent s'avérer néfastes pour l'homme et son environnement lorsqu'il y a transport concomitant de pesticides, de spores ou encore de germes pathogènes et toxines (Griffin 2001). Selon le niveau d'empoussièrement, l'air respiré peut entraîner des problèmes d'infections respiratoires ou de maladies cardio-vasculaires qui se traduisent par une augmentation de la mortalité : +0,72% à chaque accroissement de $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Ozer, 2005). On a ainsi recensé aux Caraïbes une augmentation d'un facteur 17 du nombre de crises d'asthme liées aux apports de particules désertiques en provenance du Sahara. Toujours aux Caraïbes, l'US-Geological Survey a établi le lien entre le déclin de la barrière de corail et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de poussières sahariennes. Notons enfin que l'ajout de poussières aux surfaces terrestres peut affecter à la longue la formation et les caractéristiques des sols (Rapp, 1984).

Situé entre les degrés 29 et 16 de latitude Nord, le Sahara est le plus grand (4 millions de kilomètres carrés soit huit fois la France) de tous les déserts et aussi celui qui produit le plus de poussières éoliennes (A. S. Goudie et al. 2001). A eux seuls, les épisodes de transport éolien de poussières sahariennes peuvent générer entre 50 et 90 % de la masse des dépôts atmosphériques particuliers tandis que leur fréquence d'apparition correspond à 10 % du temps (Heussner et al. 2003). Entre 600 et 900 millions de tonnes (Ozer, 2005) voire jusqu'à trois milliards de tonnes (Goudie, 2004) sont exportées annuellement du Sahara ; 80 à $120 \cdot 10^6$ tonnes (Goudie, 2001) voire $500 \cdot 10^6$ tonnes (Cautenet, 2003) partent en direction du Nord, chaque épisode pouvant charrier vers l'Europe 20 à 30 millions de tonnes de poussières.

La France est impactée chaque année par ces événements. Deux grandes trajectoires sont identifiées : soit directement après le survol de la Méditerranée, soit par un retour de vent d'ouest après contournement du Portugal et de l'Espagne par l'ouest. Ce dernier cas a donné notamment les épisodes enregistrés sur le bassin parisien en novembre 1984, plus récemment en février 2002.

Ceux-ci peuvent concerner exceptionnellement le Nord de la France (mars 1991) voire le Jura. Le sud-est de la France (une demi-douzaine de fois par an) et plus particulièrement la Corse, de 12 à 20 évènements² par an (Bergametti et al. 1989)³ sont régulièrement associés à des retombées de poussières provenant d'Afrique. Les périodes les plus propices sont le printemps et l'automne, bien que cela soit très irrégulier, avec un maximum d'amplitude au printemps (Loÿe-Pilot et Martin 1996).

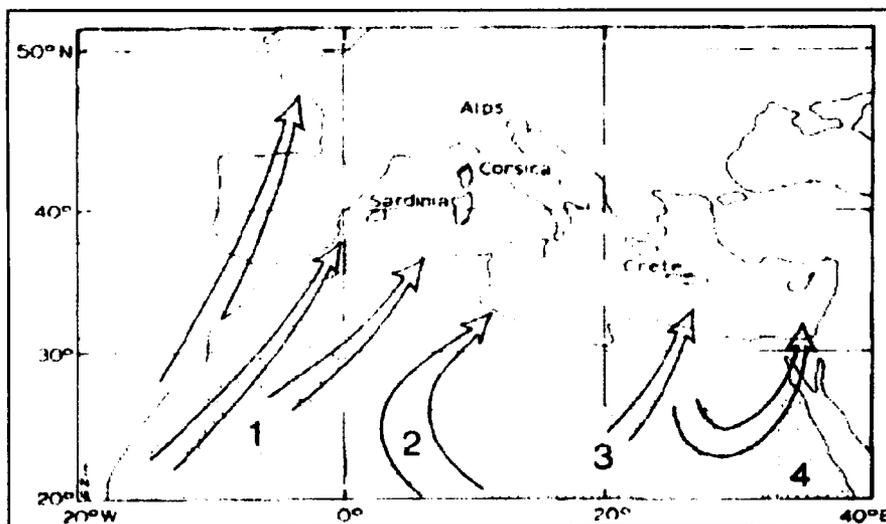


Figure 3 : Zones les plus productives de poussières sahariennes et trajectoires préférentielles vers la Méditerranée et l'Europe. Modifié d'après D'Almeida (1986) par Guerzoni et al., 1997 tel que cité dans Van Welden (2004).

Comme on peut s'y attendre, les dépôts diminuent avec l'éloignement à la source (Figure 4). Les dépôts sont estimés en moyenne à $10 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ dans la partie ouest de la Méditerranée (cf. référence dans Lee 2003). Selon Loÿe-Pilot (1996), la variabilité des dépôts annuels de particules atmosphériques en Corse (4 à $26,2 \text{ g.m}^{-2}$ pour une moyenne de $12,5 \text{ g.m}^{-2}$) est en grande partie liée à ces événements majeurs.

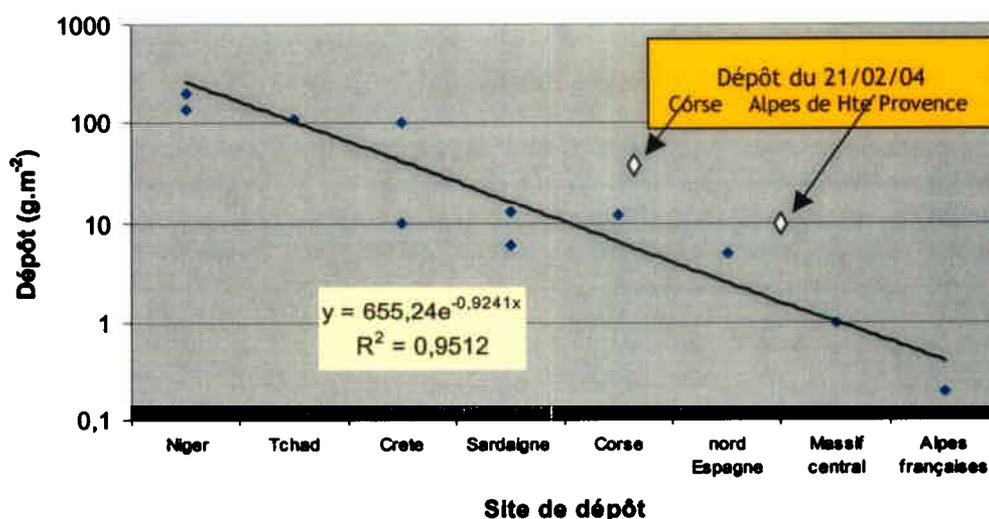


Figure 4 : Dépôt moyen annuel de poussières sahariennes du sud au nord (indépendamment des zones de formations des panaches) d'après les auteurs cités dans Goudie et Middleton (2001)

Dans une interview de 2004 (Cf. référence Internet en bibliographie), A.S. Goudie indique que des études récentes ont mis en évidence une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de transport de poussières sahariennes, depuis les années 40 ; faisant passer ce phénomène du statut d'exceptionnel à celui de récurrent. En France, De Angelis et Gaudichet (1991) dans les Alpes et Loÿe-Pilot et Martin (1996) en Corse soulignent, à la fin des années 80, une augmentation des dépôts liés à ces épisodes.

² d'une durée moyenne généralement inférieure à trois jours (Loÿe-Pilot 1996)

³ avec des concentrations au sol $> 100 \text{ µg.m}^{-3}$

ANNEXE 2

Méthodologie pour l'étude des épisodes de poussières sahariennes

Le suivi et l'interprétation des épisodes à venir nécessitent de recouper les informations suivantes :

- Prévision et détection : utilisation des données satellitaires MODIS et AERONET, ainsi que des prévisions de dépôts et de charge particulaire de l'université d'Athènes, accessibles sur Internet.
- Localisation des zones sources :
 - o calcul des retro-trajectoires,
 - o analyse granulométrique (essentiel des tailles de particules < 20 µm = provenance lointaine),
 - o composition des éléments majeurs et vérification des rapports Si/Al, Fe/AL, Ti/Ca, Ti/Fe, Al/Ca,
 - o analyse minéralogique : présence d'argiles : illites, kaolinites, palygorskites, dolomites et feldspaths, de quarts et de calcite et vérification des rapports illite/kaolinite,
 - o mesure du pH de la pluie : neutre ou basique = présence d'aérosol d'origine tellurique ; acide = présence d'aérosols ayant une composante urbaine ou industrielle,
 - o analyse organique : faible pourcentage de matières organiques.
- Emprise spatiale des zones impactées :
 - o utilisation des données AASQUA de charge en poussières : discrimination du début et de la fin de l'événement, d'après les valeurs du rapport PM_{2,5}/PM₁₀ et des mesures d'ozone,
 - o par calcul de la dispersion à l'aide de modèle de type RAMS et couplage SIG.
- Collecte d'échantillons :
 - o spécifiques de l'événement et de sa durée,
 - o dépôt : idéalement 50 g (d'où surface de collecte importante),
 - o eau de pluie et aérosols en complément des dépôts.
- Stock et flux radioactifs :
 - o comparaison des niveaux d'activités dans des échantillons spécifiques de sols, de pluies et d'aérosols avec ceux habituellement obtenus localement,
 - o quantification de l'augmentation des activités en ²²⁸Ac ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu, (²³⁹⁺²⁴⁰)Pu, ²⁴¹Am, ²⁴¹Pu, et de la baisse du ⁷Be,
 - o rapports isotopiques d'intérêt dans les dépôts :
 - ²³⁸Pu / ²³⁹⁺²⁴⁰Pu : 0,03 typique des retombées globales des tirs. Si rapport < 0,03 alors signature d'une contamination locale liée à une zone d'essai,
 - ²⁴⁰Pu / ²³⁹Pu (rapport de masse) : 0,18-0,2 typique des retombées globales des tirs. Si < ou > à 0,18-0,2 alors signature d'une contamination locale liée à une zone d'essai (exemple Nevada r = 0.042 ; Bikini r = 0.21-0.36),
 - ²⁴¹Am / ^{239,240}Pu : 0,37 typique des retombées globales des tirs,
 - ^{239,240}Pu / ¹³⁷Cs : compris normalement entre 30 et 40 (pour l'année 2000),
 - ¹³⁷Cs / ⁹⁰Sr : si = 1,6-1,9 alors caractéristique des retombées globales.
Si < 1,6-1,9 alors signature d'une contamination locale liée à une zone d'essai.
- Impact radioécologique des épisodes de poussières sahariennes :
 - o activités déposées (Bq.m⁻²) par zone d'iso-activités,
 - o comparaison avec les activités déposées hors évènements de poussières sahariennes, avec des pluies ou par temps sec.

ANNEXE 3

DONNEES DE CHARGE PARTICULAIRE ATMOSPHERIQUE RELEVES PAR LES ASSOCIATIONS AGREES DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR (AASQUA)

Les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air au nombre total de 40 sont regroupées au sein du réseau Atmo (Figure 1).



Figure 1 : Répartition des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air

Ces associations possèdent des stations de mesures en direct ou en différé des polluants atmosphériques parmi lesquels : l'ozone, les oxydes d'azote, le dioxyde de soufre, le monoxyde d'azote, le monoxyde de carbone, divers composés aromatiques polycycliques, gaz (ammoniac, sulfure d'hydrogène), métaux lourds, pesticides, composés organiques volatils), dioxines et particules en suspension (PM).

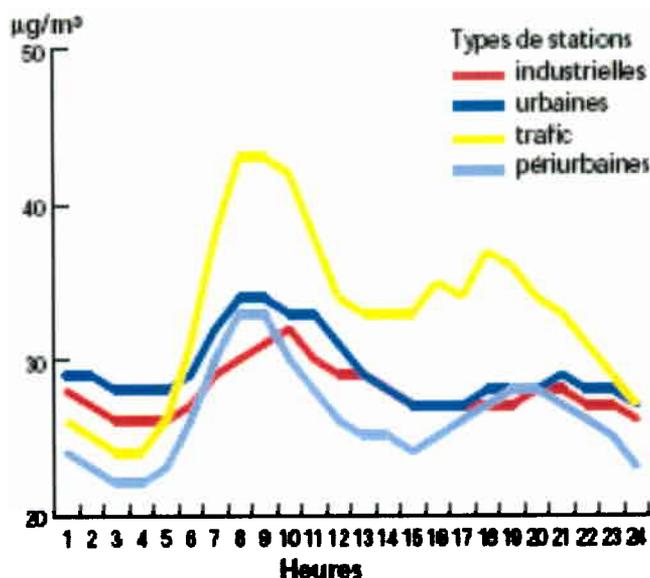
PM₁₀ ou PM_{2,5} ?

PM = Particulate Matter (matière particulaire) de diamètre aérodynamique moyen inférieur ou égal respectivement à 10 µm ou à 2,5 µm. Les plus grosses (PM₁₀) sont retenues par les voies aériennes supérieures. Les plus fines (PM_{2,5}) pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire où elles peuvent provoquer une inflammation et altérer la fonction respiratoire dans son ensemble. Les particules ultra-fines sont suspectées de provoquer également des effets cardio-vasculaires. Certaines particules ont des propriétés mutagènes et cancérogènes : c'est notamment le cas de certaines particules émises par les moteurs diesel qui véhiculent certains hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Technique de mesure : la mesure est obtenue par pesée sur une micro-balance munie d'un oscillateur à quartz. La fréquence du quartz diminue lorsque la masse déposée sur le filtre augmente. Cette variation de fréquence est convertie en variation de masse. La balance est munie d'une résistance chauffante pour éliminer la contribution des gouttes de pluie par évaporation. Ces particules sont quantifiées en masse mais leur nombre peut varier fortement en fonction de leur taille. La quantification des PM₁₀ intègre la composante PM_{2,5}. La détermination des PM_{2,5} est moins courante (actuellement environ une station de mesure de poussière sur 10 la possède). Selon le degré d'urbanisation et d'industrialisation, l'évolution journalière typique des PM₁₀ est différente comme le montre le schéma de la page suivante. Le pic du matin s'explique par le fait que les déplacements s'effectuent hors domicile essentiellement dans la tranche de 7 à 9 heures. A l'inverse, les départs du lieu de travail sont plus étalés dans le temps d'où des valeurs plus faibles.

Cycles journaliers des concentrations de PM₁₀ par types de stations (en semaine, 1997-1999)

Source : ADEME-BDOA (juillet 2000)



Aspect normatif :

D'après les standards de l'Union Européenne dans le domaine de la santé et des concentrations massiques en aérosols (concernant seulement les concentrations en PM₁₀), la limite journalière de PM₁₀ est de 50 µg.m⁻³ ; cette limite ne doit pas être dépassée plus de 35 fois par an. Le seuil critique concernant la concentration annuelle en PM₁₀ est de 40 µg.m⁻³ [Joint Research Center, 2003]. La concentration massique en PM_{2,5} n'intervient pas dans l'évaluation de la qualité de l'air (indice ATMO).

DECRET FRANCAIS 2002-213 du 15 février 2002 Valeurs réglementaires pour les particules en suspension (PM ₁₀)						
Type de seuil	Valeur à respecter (en µg.m ⁻³)		Périodes et statistiques pour le calcul	Dépassements autorisés avant la date d'application (en µg.m ⁻³)		
				2002	2003	2004
Objectif de qualité	30	Moyenne annuelle	Année civile			
Valeur limite	50	Moyenne journalière	Centile 90,4 des moyennes journalières sur l'année civile	65	60	55
	40	Moyenne annuelle	Année civile	44	43	41

A titre d'information, le tableau suivant présente des valeurs de recommandations du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) et de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), ainsi que des valeurs prévues à plus long terme par les directives européennes :

D'après les données de Ozer (2005), l'application des standards de l'Union Européenne (50 µg.m⁻³ en moyenne journalière moins de 35 jours par an) au cas des mesures faites à Niamey (Niger) en 2003 révèle un dépassement pratiquement 1 jour sur 3, avec 5 valeurs journalières dépassant 500 µg.m⁻³.

Type de seuil	RECOMMANDATIONS du CSHPF pour la santé humaine concernant les particules (PM ₁₀) (en µg.m ⁻³)		Type de seuil	DIRECTIVE EUROPEENNE 1999/30/CE concernant les particules (PM ₁₀)							
	Valeur à respecter en 2010 (en µg.m ⁻³)	Dépassements autorisés entre 2005 et 2010 (en µg.m ⁻³)									
		2005		2006	2007	2008	2009	2010			
Objectif de qualité	30	Moyenne sur 8h	Objectifs de valeurs limites	50	Moyenne journalière	En 2010, 7 jours de dépassement autorisés par an (centile 98,1) contre 35 jours en 2005 (centile 90,4)					
Seuil d'information	80	Moyenne mobile sur 24h				20	Moyenne annuelle	40	36	32	28
Seuil d'alerte	125	Moyenne mobile sur 24h									

Source : Site Internet Atmo Rhône-Alpes (<http://www.atmo-rhonealpes.org/site/air/normes>)

A noter que le quota de 7 jours de dépassement autorisés à l'horizon 2010, risque fort d'être amputé voire réduit à néant par le seul fait des épisodes de poussières sahariennes.

Episode du 21 février 2004

Au moment du passage du nuage de poussières, l'augmentation de la concentration en PM10 est particulièrement importante (X 10) à Marseille et dans sa région où elle entraîne un indice Atmo¹ de 9 (= mauvais) sur une échelle de 10. La méthodologie retenue ici pour évaluer la durée de passage du panache de poussières sahariennes est basée sur la valeur du rapport des concentrations en PM_{2,5}/PM₁₀. Ce rapport est généralement compris entre 0,6 et 0,7 en site urbain. Au passage d'un nuage de poussières désertiques ou suite à un incendie, ce ratio chute à 0,3 - 0,4 voire jusqu'à des valeurs de 0,1 en relation avec une augmentation très nette des particules les plus grosses ; conséquence d'une disparition des particules ultrafines qui coaguleraient entre elles selon les mesures réalisées par Schwikowski (1995). Le rapport PM_{2,5}/PM₁₀ devient dès lors, un indicateur pertinent de ces évènements.

¹ ATMO : indice global de la qualité de l'air dont les valeurs vont de 1 (très bon) à 10 (très mauvais).

ANNEXE 4

ESSAIS NUCLEAIRES FRANÇAIS ATMOSPHERIQUES AU SAHARA

La France a effectué 4 essais nucléaires atmosphériques sur le site de Reggane : 3 en 1960, 1 en 1961. L'essai sous-terrain Béryl a également relâché de la radioactivité dans le compartiment atmosphérique.



Figure 1 : Localisation des zones de tirs de surface de Reggane ($0^{\circ}04'W/23^{\circ}19'N$ et $0^{\circ}09'W/26^{\circ}06'N$)



Figure 2 : Implantation du réseau de postes de contrôle de radioactivité (Source : Bataille Ch., Revol H. 2001)

Le tableau suivant extrait du site Internet de l'observatoire des armes nucléaires, regroupe les caractéristiques des bombes françaises (fission de plutonium 239) tirées à Reggane au Sahara. Seule la première fût de puissance moyenne (60-70 kilotonnes de TNT), les trois autres étant d'intensité nettement inférieure.

Date	Nom	Localisation	Mode de tir	Objectif	Puissance (kt)
13/02/1960	Gerboise Bleue	Reggane ($0^{\circ}04'W/23^{\circ}19'N$)	tour de 100 m	effets	60/70
01/04/1960	Gerboise blanche	Reggane ($0^{\circ}09'W/26^{\circ}06'N$)	plateforme	militaire	< 20
27/12/1960	Gerboise rouge	Reggane	tour de 100 m	effets	qq kt
25/04/1961	Gerboise Verte	Reggane	tour	?	< 1

Le rapport annuel du CEA de 1960 indique l'existence d'une zone contaminée de 150 km de long environ. Le dossier de plainte avec constitution de partie civile déposé auprès du tribunal de grande instance de Paris fait état de zones contaminées plus importantes (> 500 km).

ANNEXE 5

LISTE NON EXHAUSTIVE DES EVENEMENTS MAJEURS DE TRANSPORT DE PARTICULES SAHARIENNES SUR LA FRANCE

Quand	Où	Source	Référence	Commentaires
1/11/84 9/11/84	Tiers sud de la France	SCPRI	Communiqué de presse de novembre 1984	10 000 Curies (370 TBq) -de naturels répartis sur 1/3 du territoire
17/08/87	Région parisienne	SCPRI	Communiqué	10 kBq.kg ⁻¹
6-8/05/88	Picardie et Ile-de-France	CNRS	Mme Coudé-Gaussen G	
20/10 au 3/11/88	Région parisienne	SCPRI	Communiqué	
14/05 au 1/06/89	Région parisienne	SCPRI	Communiqué	
29/10/89	Moitié sud de la France	Atmo-auvergne	n° 58 de l'IFEN	> ½ de la France
25/02/90	Région parisienne	SCPRI	Communiqué	
20 au 23/03/90	France et Suisse	Atmospheric Environment	Vol. 29, n° 15, pp 1829-1842	Contournement de l'Espagne par l'ouest
5 au 9/03/91	De la Sicile à la Suède et la Finlande	Goudie 2001	Burt 1991, Bûcher et Dessens 92, Franzen 95	= 320 000 km ² au total
6/03/92	Région parisienne	SCPRI	Communiqué	
6/05/92	Région parisienne	SCPRI	Communiqué	
11/10/01 au 16/10/01	Nord et ouest de la France, puis vers l'est le lendemain	L. Sauvage	2 workshop on mineral dust Paris 2003	
11/11/01	Bouches du Rhône / Monaco / Corse	Pham et all / MeteoSudEst / Loÿe-Pilot		
12-13/02/02	Paris		Airparif	
15/11/2002 23-24/11/2002	Monaco + région PACA	Pham et all (AIEA) Qualitair	Bulletin de novembre 2002	15 g sec/m2 > 500µg.m ⁻³ en PM10
23/11/03	Tarn	ORAMIP	Bilan 2003	
21/02/04	Sud de Nantes à Besançon	Cette étude		Episode extrême
4-5/05/04	Sud-est	Cette étude		
4/09/04	Vaucluse	C. Vassas		Peu intense pas de collecte
25/08/04	Manosque Cadarache	O. Masson		Peu intense pas de collecte
17/03/04	Auvergne	Atmo-auvergne	Bulletin trimestriel 01-02-03/04	
24/07/04	Corse	http://www.redtailcanyon.com/items/301255.aspx		

ANNEXE 6

Communiqué de presse du SCPRI relatif à un épisode de retombées de poussières sahariennes

SERVICE CENTRAL DE PROTECTION CONTRE LES RAYONNEMENTS IONISANTS

RETOMBÉES DE SABLE SAHARIEN DU 9 NOVEMBRE 1984

SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS

Le 9 novembre 1984, une précipitation de sable africain a déposé plusieurs dizaines de milliers de tonnes de sable en quelques heures sur environ 1/3 du territoire national. (Lorsque le sable qui est périodiquement soulevé par de violentes tempêtes sur le Ténéré (Sahara) est repris par les vents du Sud, il retombe en partie sur l'Europe, et plus particulièrement la France. Sa teinte ocre est due à l'oxyde de fer et on y note la présence de calcium, d'aluminium etc, mais il n'est pas radioactif à l'origine.

Lors de sa traversée de la haute atmosphère, ce sable, d'une granulométrie comprise entre 10 et 100 micromètres, s'est chargé de Beryllium 7, radioélément naturel produit par spallation sous l'effet du rayonnement cosmique ; l'activité de ce radioélément dans la région parisienne était de 19 pCi/m² (0,70 Bq/m²) ; elle correspond pour 1 gramme de sable, à l'activité moyenne de ce radioélément mesurée dans 2 litres d'eau de pluie ou 1 000 m³ d'air.

En retombant sur le sol, le sable a d'autre part rabattu des descendants à vies courtes (ordre de 30 minutes) du Radium et du Radon - ce phénomène peut également être observé lors de certaines pluies d'orage notamment ; l'activité instantanée, mesurée au VAsinet le 9/11/84 lors de la collecte de 20h30, était de 10 000 pCi/m² (370 Bq/m²) ; l'activité totale ainsi précipitée peut être estimée à 40 000 pCi/m² (1 500 Bq/m²).

A noter que la quantité totale de sable ainsi déversée sur environ un tiers du territoire français se situe entre 30 000 et 100 000 tonnes et que la radioactivité totale rabattue peut être évaluée à l'ordre de 10 000 curies.

La radioactivité ainsi mesurée présente un intérêt scientifique certain ; mais elle est, sur le plan sanitaire, sans aucune conséquence, ne représentant qu'une faible fraction de l'exposition naturelle annuelle de 100 millirads.

ANNEXE 7

Mécanismes d'enrichissement complémentaires

Cette annexe présente différents mécanismes décrits dans la littérature et susceptibles de participer à la charge radioactive des poussières désertiques déposées, en complément du mécanisme d'enrichissement par perte des particules les plus grosses et les moins marquées en radionucléides au cours du transport à longue distance.

Sur 116 épisodes ayant concerné l'Espagne de 1996 à 2002 (20 en moyenne par an), 45 % ont eu lieu par temps de pluie et 80 % ont entraîné une augmentation des concentrations en particules dans l'atmosphère. 50 % des particules transportées dans le panache peuvent être sous forme aqueuse (microgouttelettes) les autres restant à l'état sec. Au final, le flux total déposé sur les portions de temps sec est sensiblement équivalent au flux de dépôt par temps humide (Thévenot). La présence d'eau dans les aérosols désertiques lors de leur transport est certainement un facteur important de la capacité de ces particules à en piéger d'autres. On estime qu'une goutte de pluie subit, avant de chuter, plusieurs cycles d'évaporation et de condensation au cours desquels la concentration des solutés ne cesse d'augmenter sous l'action des effets phorétiques (condensation et diffusion). Ainsi, par temps humide, les poussières désertiques peuvent constituer, en présence de vapeur d'eau, des noyaux de condensation qui potentiellement donnent naissance à des gouttelettes puis à des gouttes de taille et de masse suffisantes pour chuter. Avant de s'enrichir en aérosols au cours de leur chute, par impaction du fait de leur inertie ou interception du fait de leur taille, les gouttes de pluies associées aux particules présenteraient dès leur naissance un contenu polluant.

Dès lors qu'un aérosol se charge en eau, sa réactivité chimique augmente ainsi que sa taille, rendant possible la captation d'autres aérosols par impaction. En s'appuyant sur un suivi des retombées de poussières sahariennes, réalisé en Corse de 1984 à 1994, il apparaît que les retombées de poussières sahariennes sont généralement significatives dès lors qu'elles coïncident avec des précipitations. Pour autant, les quantités déposées ne dépendent pas des hauteurs de précipitation (Loÿe-Pilot 1996); de très faibles pluies (1 à 5 mm) pouvant déposer entre 0,5 et 2 g.m². Ces précipitations même faibles ont un effet amplificateur qu'il convient de préciser dans le cas de ces épisodes.

Compte tenu de l'importance des apports atmosphériques par les poussières sahariennes et des niveaux d'activité intrinsèques, il convient d'estimer le retentissement de ces épisodes notamment sur la variabilité du coefficient de lessivage de l'atmosphère et les relations pluie/dépôt.

Par temps sec, la chute des particules peut être due à une baisse de la turbulence atmosphérique et/ou à des mécanismes d'agglomération de particules de petites tailles entre elles (Westphal). Il peut notamment y avoir mélange au niveau du nuage de poussières arrivant sur la France, entre des aérosols dont la présence est liée aux activités industrielles ou au trafic et des aérosols sahariens relativement pauvres en polluants atmosphériques anthropiques. Le ratio correspondant est supposé être d'autant plus faible que la trajectoire entre la France et le Sahara est directe et inversement lorsque le nuage de particules arrive sur la France par des systèmes de retour de vent d'est ou potentiellement après un survol de la péninsule ibérique.

La troisième famille de mécanisme pouvant intervenir est basée sur des propriétés de chimie-sorption et de physi-sorption de gaz à l'état de trace, à la surface des particules désertiques. Bonasoni (2004) montre ainsi que les concentrations en ozone sont significativement diminuées par l'arrivée d'un nuage de poussières désertiques. Cette capacité à « nettoyer » est également identifiée pour une atmosphère initialement polluée en SO₂ (Communication personnelle Guy Cautenet). Cette hypothèse concernerait principalement les plus grosses particules (microniques) dont la surface est suffisante pour être le siège de réactions chimiques de nature à modifier la concentration des gaz présents dans l'atmosphère (Sauvage). Le mécanisme intervenant dans ce cas relève de la chimie-sorption, ce qui diffère de l'échange ionique connu entre les argiles et le césium par exemple, en présence d'eau. En appliquant un schéma identique, les poussières désertiques viendraient s'enrichir des radionucléides présents dans les aérosols atmosphériques, à l'état de trace.

Il convient de signaler un dernier mécanisme, de nature électrique cette fois, qui pourrait conduire également un enrichissement pendant le transport. Des expériences sous Harmattan¹ ont montré qu'au passage d'un nuage de poussières, le champ électrique s'inversait brutalement pour devenir négatif ; cette polarité étant due aux frottements du vent sur les particules et entre les particules. A l'inverse, la situation électrique « normale » montrerait un léger excès de charges positives ce qui expliquerait une attirance entre les particules minérales et les aérosols présents avant l'arrivée du nuage de poussières (communication personnelle S. Despiaud - LEPI, Université de Toulon).

¹ Vent sec soufflant du Sahara vers les côtes du sud-ouest de l'Afrique durant la saison sèche.