



anses

Brumes de sable en France métropolitaine, aux Antilles et en Guyane

État des connaissances relatives à la composition, aux effets sur la santé et aux effets sur l'environnement, la faune et la flore

Avis de l'Anses

Rapport d'expertise collective

Juin 2025

Maisons-Alfort, le 11 septembre 2025

AVIS **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire** **de l'alimentation, de l'environnement et du travail**

relatif aux brumes de sable en France métropolitaine, aux Antilles et en Guyane

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux, l'évaluation des propriétés nutritionnelles et fonctionnelles des aliments et, en évaluant l'impact des produits réglementés, la protection de l'environnement.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L. 1313-1 du Code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

L'Anses a été saisie le 2 mai 2023 par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) et la Direction générale de la santé (DGS) pour la réalisation de l'expertise suivante :
« réalisation d'une analyse de la composition et de la toxicité des tempêtes de sable et de poussière ».

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

Comme le souligne l'Organisation mondiale de la santé (OMS) dans ses lignes directrices sur la qualité de l'air publiées en 2021, les tempêtes de sable et de poussière sont un enjeu croissant pour la qualité de l'air ambiant¹ à l'échelle mondiale (WHO 2021, p152). Ces tempêtes de sable et de poussière sont des phénomènes météorologiques fréquents dans les régions arides et semi-arides. Ils surviennent en général lorsque des vents forts soulèvent dans l'atmosphère, du fait d'orages ou de dépressions, de grandes quantités de sable et de poussière. Ils impactent non seulement les régions sources et les régions situées à proximité, mais également des régions plus éloignées du fait du transport des brumes de sable issues de ces tempêtes sur de longues distances, pouvant atteindre des centaines voire des milliers de kilomètres.

Ainsi, les tempêtes de sable et de poussière surviennent à une échelle locale et sont à l'origine des brumes de sable, qui correspondent aux particules en suspension ayant été soulevées antérieurement par le vent. De nombreux termes de la langue française ont été recensés pour faire référence à ce phénomène de brumes de sable (poussières de sable, poussières désertiques...), parfois indifféremment de la terminologie « tempêtes de sable et de poussière ».

Il existe différents foyers de brumes de sable dans le monde avec des origines différentes. Les déserts situés dans l'hémisphère Nord en sont la source principale, au sein d'une zone géographique s'étendant de l'Afrique du Nord à l'Asie. D'autres sources moins actives existent, notamment en Amérique du Sud, en Afrique du Sud ou en Australie. Les tempêtes de sable et de poussière peuvent également survenir sur des terres agricoles dénudées, comme cela a pu être observé aux États-Unis en 2022 (OMM 2023), ou encore sur des lacs asséchés. La source naturelle de brumes de sable la plus importante à l'échelle mondiale provient du désert du Sahara (UNEP, WMO, et UNCCD 2016) et affecte les Caraïbes et l'Europe occidentale.

Fréquents aux Antilles et en Guyane, ces phénomènes naturels de brumes de sable peuvent également survenir en France métropolitaine, entraînant une pollution de l'air qui se manifeste notamment par un ciel jaune/orangé et des dépôts de particules. Lors de ces épisodes, une augmentation des concentrations de particules dans l'air ambiant, et plus particulièrement de la fraction PM₁₀, est observée (Madininair 2021).

Dans le contexte actuel, où le changement climatique est un facteur potentiel de l'augmentation des émissions de brumes de sable et de la fréquence des épisodes associés, il apparaît nécessaire d'actualiser les connaissances concernant de tels épisodes de pollution de l'air ambiant et de leurs effets sanitaires. L'Agence rappelle qu'elle avait publié², en 2019, le résultat d'une revue systématique de la littérature sur l'impact sanitaire des particules de l'air ambiant selon leur composition, leur source et leur granulométrie, rapport qui avait inclus les « poussières de désert ». Elle avait conclu à une indication sanitaire modérée pour cette source de particules sur la base d'un corpus de taille réduite.

¹ La terminologie « air ambiant », utilisée dans les textes réglementaires, fait ici référence à l'air extérieur.

² Avis et rapport révisé de l'Anses relatif à l'état des connaissances sur les particules de l'air ambiant (effets sanitaires associés à la composition chimique, émissions du trafic routier)

Dans ce contexte, la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) et la Direction générale de la santé (DGS) ont saisi l'Anses le 2 mai 2023. Il est demandé à l'Anses de :

1. « Documenter la composition des tempêtes de sable et de poussière, et plus particulièrement celles touchant la France, et de les comparer à la composition des particules habituellement présentes dans l'air ambiant de ces territoires.
2. Caractériser l'impact des tempêtes de sable et de poussière sur les concentrations en particules dans l'air extérieur en France métropolitaine et aux Antilles-Guyane, et le comparer à l'impact de la pollution atmosphérique en dehors des périodes de tempêtes de sable. En fonction des données disponibles, cette caractérisation pourra être élargie à d'autres polluants jugés pertinents.
3. Réaliser une revue bibliographique des effets de l'exposition à la pollution de l'air ambiant résultant des tempêtes de sable et de poussière sur la santé humaine, et identifier les personnes sensibles. Dans un esprit « One Health », il est également demandé de préciser succinctement les effets connus de ces tempêtes sur l'environnement, la flore (notamment concernant le développement des algues sargasses) et la faune.
4. Formuler des recommandations en identifiant, le cas échéant, les actions de gestion pouvant être mises en œuvre (au niveau local ou national et en particulier les recommandations aux populations) ainsi que les seuils de gestion apparaissant adaptés. Il est à noter qu'il existe déjà des seuils de gestion pour les particules PM₁₀ (pouvant notamment être constituées de sable et de poussières) dans le dispositif national, permettant de déclencher, le cas échéant, des mesures d'urgence : l'articulation des propositions avec ce dispositif pourrait être utilement explicitée. »

Au regard des échanges ayant eu lieu lors de la réunion du Comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » du 13 novembre 2023, la question 2 portant sur la caractérisation de l'impact des tempêtes de sable et de poussière a été précisée et scindée en deux demandes distinctes :

- Caractériser l'impact des brumes de sable sur les concentrations en particules dans l'air extérieur en France (en métropole et aux Antilles-Guyane) ;
- Comparer les effets sanitaires de la pollution particulaire due aux brumes de sable à ceux de la pollution particulaire en dehors de ces épisodes de brumes de sable (en analysant la relation concentration-risque).

En fonction des données disponibles, cette caractérisation de l'impact des brumes de sable (sur les concentrations en particules et les effets sanitaires) pourra être élargie à d'autres polluants jugés pertinents au cours de l'expertise.

Concernant le point 4 relatif à la formulation des recommandations, l'Anses propose d'effectuer, le cas échéant, une mise en perspective des seuils d'information / recommandation et d'alerte proposés par les autorités publiques pour les particules de l'air ambiant – PM₁₀ – avec les données de la littérature épidémiologique et toxicologique relatives aux brumes de sable, notamment en termes de composition et granulométrie.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

2.1. Modalités de traitement

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Janvier 2024) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens ». L'Anses a confié l'expertise à huit rapporteurs externes missionnés sur un des 3 axes de travail selon leurs compétences : composition ; effets sur la santé humaine ; effets sur l'environnement, la faune et la flore. Les travaux ont été présentés au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre juin 2024 et avril 2025. Ils ont été adoptés par le CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » réuni le 10 juin 2025.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet : <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

2.2. Méthodologie générale

Pour répondre aux questions de l'expertise, la première étape a été l'identification des rapports institutionnels sur le sujet des brumes de sable, à savoir les publications d'organismes nationaux et internationaux : Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA)... ; Organisation mondiale de la santé (OMS), Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD)...

Dans un second temps, une revue de la littérature scientifique a été réalisée pour compléter et actualiser les connaissances issues des rapports institutionnels existants pour les trois premières questions de l'expertise, afin d'identifier des revues et/ou des articles originaux récents.

La construction de l'équation de recherche a été scindée en deux blocs de mots clés :

- Un bloc commun à toutes les équations de recherche concernant la qualification et la définition des brumes de sable ;
- Un bloc spécifique à la question traitée.

Chaque équation de recherche a fait l'objet d'une veille jusqu'en fin avril 2025.

Comme évoqué précédemment, la source de brumes de sable affectant principalement les Caraïbes et la France métropolitaine provient du Sahara (UNEP, WMO, et UNCCD 2016). De ce fait, uniquement la littérature sur les brumes de sable originaires d'Afrique du Nord a été incluse.

Pour la partie portant sur la composition des particules de brumes de sable, des études individuelles ont été incluses. Une analyse critique de ces dernières a été réalisée en utilisant une grille de lecture adaptée aux questions de l'expertise.

Pour celle concernant les effets sur la santé humaine, des revues systématiques, narratives et méta-analyses ont été incluses. L'analyse de leur qualité a été réalisée à l'aide d'une grille

de lecture adaptée. Afin de compléter les résultats obtenus, des études individuelles, issues de ces revues et d'une équation de recherche spécifique, ont été incluses. Leur analyse a été réalisée par les auteurs des revues et par jugement d'expert.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

3.1. Résultats

3.1.1. Généralités sur le phénomène naturel de brumes de sable

Les brumes de sable sont un phénomène météorologique mondial et transfrontalier. Chaque année, environ 2 milliards de tonnes de sable et de poussière se retrouvent dans l'atmosphère (CNULCD 2023). La formation des brumes de sable suit un processus en trois phases : l'entraînement ou l'émission de matériaux de surface (généralement par les tempêtes de sable et de poussière), leur transport dans l'atmosphère et leur dépôt. Ces particules parcourent des distances pouvant atteindre plusieurs milliers de kilomètres (OMM 2017).

Le transport des brumes de sable suit différentes voies depuis les zones géographiques sources (Figure 1).

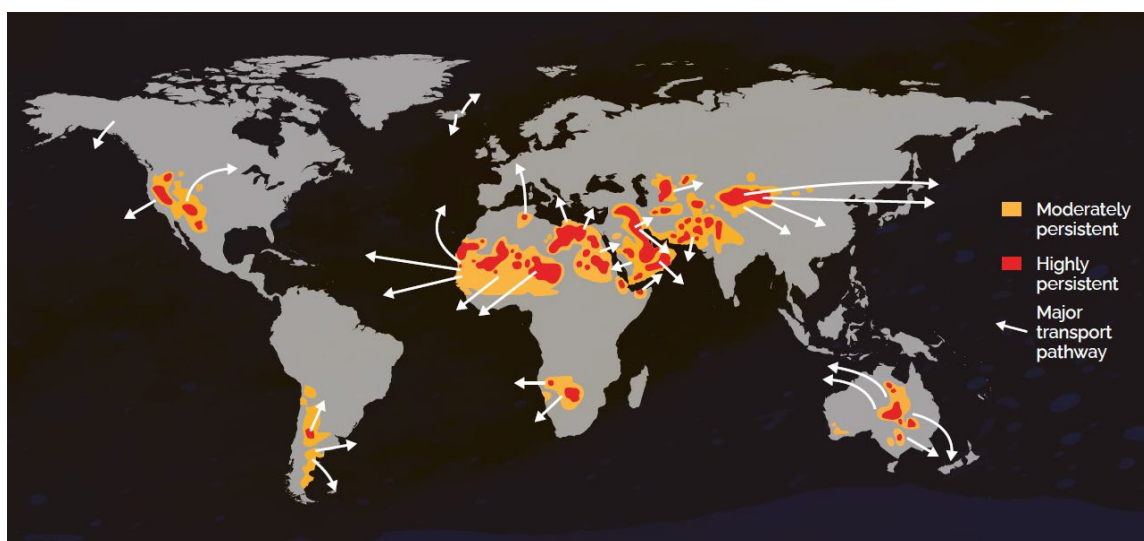


Figure 1. Sources mondiales de brumes de sable et principales voies de transport longue distance

Source : (FAO 2023), adapté de Muhs, D.R., Prospero, J.M. Baddock, M.C. & Gill, T.E. 2014. Identifying sources of aeolian mineral dust: present and past. In: *Mineral dust*, pp. 51-74. Dordrecht, Germany, Springer.

3.1.2. Composition des particules de brumes de sable

Concernant la composition chimique et minéralogique, 48 études ont été considérées. Pour toutes les zones géographiques prises en compte dans l'expertise (Afrique du Nord, Europe et Caraïbes), les éléments minéraux suivants ont été retrouvés en majorité dans les prélèvements de brumes de sable : silicium (Si), aluminium (Al), fer (Fe), calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K) et sodium (Na). D'autres éléments ont également été

identifiés dans des concentrations plus faibles : titane (Ti), phosphore (P), soufre (S), zinc (Zn). Particulièrement dans les études réalisées en Afrique du Nord, les résultats de composition chimique peuvent également être présentes sous forme minéralogique. Ainsi, les auteurs ont relevé la présence de quartz, illite, kaolinite, gypse, halite, hématite, etc.

Un nombre plus faible d'études (n=17) s'est intéressé à la composition microbiologique des brumes de sable. Parmi ces dernières, la majorité s'appuyait sur des prélèvements d'aérosols et s'intéressait aux bactéries et/ou champignons. La viabilité de certains micro-organismes (bactéries et champignons), principalement d'importance environnementale (dont les humains ne sont pas les hôtes principaux), peut être préservée lors du transport des brumes de sable, que ce soit vers l'Europe ou l'Amérique. De plus, une augmentation des concentrations de ces micro-organismes est systématiquement observée lors des jours de brumes. Même si quatre études ont mentionné la présence de quelques pathogènes opportunistes (potentiellement infectieux chez les personnes immunodéprimées), ils étaient naturellement présents dans les zones géographiques concernées et aucun pathogène strict (pouvant provoquer une pathologie quel que soit l'état immunitaire de l'hôte) n'a été identifié. Les résultats concernant les effets des brumes de sable sur la diversité bactérienne et fongique étaient divergents. En effet, le nombre d'études montrant une diversité plus élevée, était équivalent au nombre d'études montrant peu de modification de la diversité fongique et bactérienne.

Pendant les épisodes de brumes de sable, une augmentation des concentrations de l'air en éléments radioactifs a été observée. L'élément le plus étudié était le césium 137 (^{137}Cs), en raison de sa longue durée de vie (demi-vie de 30,2 ans) et de sa facilité à être mesuré. Il était détecté à l'état de traces et sa concentration journalière était liée à celle des particules de l'air ambiant mesurée en PM_{10} . Ainsi, l'augmentation des concentrations atmosphériques en ^{137}Cs lors des épisodes de brumes de sable était liée à l'augmentation de la concentration en PM_{10} . Aucune source spécifique de ces radionucléides artificiels n'a pu être mise en évidence parmi les retombées atmosphériques globales de l'ensemble des essais nucléaires ou des accidents nucléaires majeurs.

Toutes les études réalisées en Europe et en Afrique du Nord observaient une différence de composition chimique des brumes de sable selon leur zone géographique d'origine. Elles observaient une variabilité régionale et locale de la composition des sols, et donc des brumes de sable émises. De plus, la voie de transport empruntée par les brumes affectait leur composition chimique. Par exemple, dans le cas des brumes de sable atteignant l'Europe du Sud par la mer Méditerranée, des niveaux plus élevés de chlore (Cl) et sodium (Na) ont été observés en raison de l'apport de sels marins. Afin d'identifier la source des brumes, différents rapports entre les éléments chimiques majeurs ont été utilisés (Ca/Al, Fe/Al...). Les études réalisées aux Caraïbes observaient des résultats différents. En effet, la composition des brumes de sable semblait moins impactée par la composition des sols des zones sources. Toutes les études ont montré que la composition chimique des brumes de sable était influencée par des facteurs variés : transport (altitude, distance, voie empruntée...), conditions météorologiques (vent, humidité...), activités anthropiques de la zone d'origine et des zones traversées, etc.

Concernant la granulométrie des particules de brumes de sable, la majorité des études porte sur la fraction PM_{10} . Selon la source des brumes et les études, les distributions granulométriques des particules composant les aérosols de brumes de sable étaient différentes. La part de la fraction grossière (fraction $PM_{2,5-10}$) diminuait avec l'éloignement de la source. Les éléments crustaux étaient majoritairement présents dans les particules grossières, alors que les aérosols secondaires et les éléments anthropiques étaient davantage présents dans les particules fines ($PM_{2,5}$). Plus la taille des particules diminuait, plus la part des aérosols secondaires et des éléments anthropiques était importante.

3.2. Influence des brumes de sable sur les concentrations en particules dans l'air ambiant

Compte tenu de la réglementation européenne relative à la qualité de l'air ambiant³, l'Ineris - dans le cadre du LCSQA - a estimé pour la France et pour certaines années les contributions des brumes de sable aux concentrations totales en PM_{10} pour les zones concernées par des dépassements des valeurs limites en moyenne journalière⁴ (Létinois, Meleux, et Favez 2021 ; Létinois 2022 ; Létinois *et al.* 2024).

Que ce soit en Martinique ou en France métropolitaine, d'après les analyses menées par le LCSQA en considérant les moyennes journalières, les brumes de sable avaient un impact sur les concentrations en PM_{10} . En Martinique, il a été relevé que les brumes de sable pouvaient représenter environ la moitié des PM_{10} lorsque les concentrations journalières étaient supérieures à $50 \mu g/m^3$. Lors des pics journaliers les plus élevés (supérieurs à $100 \mu g/m^3$), cette contribution relative pouvait atteindre plus de 70 %. Ce phénomène concernait particulièrement les zones urbaines, probablement en raison de la remise en suspension des particules de brumes de sable déposées par le trafic routier dense.

Aucune étude s'intéressant à l'impact des brumes de sable sur les autres fractions granulométriques, notamment la fraction fine $PM_{2,5}$, n'a été identifiée.

Les épisodes de brumes de sable peuvent également induire des effets indirects sur la concentration des particules déjà présentes dans l'atmosphère. Les épisodes de brumes de sable ont été associés à une hauteur plus faible de la couche limite atmosphérique, ce qui favoriserait l'augmentation des concentrations en polluants anthropiques déjà présents localement. Plusieurs études ont observé une augmentation de ces concentrations en polluants anthropiques par la formation d'aérosols secondaires⁵ engendrés par ces épisodes.

³ Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe 2008

⁴ Dans le cadre de la réglementation européenne relative à la qualité de l'air ambiant (Directive 2008/50/CE), un dépassement de la valeur limite relative à la valeur moyenne journalière en PM_{10} ne doit pas être considéré comme tel si les États membres peuvent en prouver leur imputabilité à un phénomène naturel. La nouvelle directive européenne (Directive (UE) 2024/2881) intègre également les $PM_{2,5}$.

⁵ Les aérosols secondaires proviennent « de l'oxydation et/ou de la condensation de précurseurs gazeux (COVs, NOx, SO₂, NH₃ ...) en phase particulaire ». Source : <https://www.ineris.fr/fr/risques/dossiers-thematiques/qualite-air/qualite-air-ambiant/pollution-atmospherique-particules>

3.2.1. Effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé humaine

La revue de la littérature réalisée sur les effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé a permis d'identifier une quarantaine d'articles portant spécifiquement sur les brumes de sable en provenance d'Afrique du Nord. Les études ont porté majoritairement sur des indicateurs de mortalité et de morbidité sur les catégories d'effets cardiovasculaires et respiratoires⁶. Leurs résultats ont été mis en perspective avec les résultats de revues et de méta-analyses intégrant des études conduites à l'échelle mondiale : Europe, Asie, Moyen-Orient, Amérique ou Australie. Parmi les autres événements sanitaires, les études documentaient la santé mentale, la santé périnatale (accouchements prématurés), et les maladies infectieuses (méningite) qui ne sont pas abordées dans la synthèse qui suit en raison du peu de données disponibles.

- Etudes épidémiologiques

Le plus souvent, l'exposition aux brumes de sable était représentée par une variable binaire comparant les jours avec brumes de sable et les jours sans brumes de sable. Il convient de préciser que dans ces études, les facteurs de confusion liés aux pics de pollution hors phénomènes de brumes de sable n'étaient pas toujours pris en compte. Plus rarement, les brumes de sable ont été considérées comme une variable continue en séparant les particules d'origine désertique et les particules d'origine anthropique. La relation entre l'indicateur d'exposition et l'indicateur sanitaire a été majoritairement étudiée à l'aide de modèle de régression de type « *time-series* » ou « *case-crossover* », où la variable d'intérêt était le jour. Ces modèles ont été ajustés sur des facteurs temporels et météorologiques. La pollution particulaire les jours avec ou sans brumes de sable a été étudiée en s'intéressant à différentes fractions granulométriques (PM₁₀, PM_{2,5-10}, PM_{2,5}, PM_{1-2,5}) ainsi qu'à l'effet modificateur des brumes de sable sur l'association entre l'exposition aux particules et l'événement sanitaire.

Parmi les études incluses, 16 s'intéressaient à la mortalité et 18 aux hospitalisations et passages aux urgences. Quel que soit l'événement sanitaire étudié, la majorité des études épidémiologiques s'intéressait à l'exposition aux PM₁₀ et concernait plus particulièrement différents pays du sud de l'Europe, les Îles Canaries et les Caraïbes. La plupart des études ont mené des analyses à l'échelle d'une ville. Deux études ont réalisé une analyse à l'échelle d'une région ou d'une île. Deux études ont été réalisées à l'échelle d'un pays. Enfin, une étude multicentrique a inclus 13 villes du sud de l'Europe.

Les études sur la mortalité ont considéré différents indicateurs de mortalité : mortalité totale (non accidentelle) – qui est la plus documentée –, respiratoire, cardiovasculaire ou cérébrovasculaire. Elles ont également employé des modèles statistiques différents des études portant sur la morbidité. Les résultats des études et des méta-analyses ayant pris en compte différents indicateurs de mortalité sont présentés en Annexes 1 et 2. Pour les hospitalisations et passages aux urgences, la santé respiratoire est la plus documentée.

Pour les études ayant considéré l'exposition aux brumes de sable en tant que variable binaire, une majorité d'entre-elles ont observé une association positive entre la concentration en PM₁₀ les jours de brumes de sable et la mortalité toutes causes naturelles et par causes spécifiques cardiovasculaires. Néanmoins, dans ces études, la relation entre l'exposition aux PM₁₀ et ces causes de mortalité n'était généralement pas modifiée par rapport aux jours sans brumes de sable. Les résultats sont contrastés pour la mortalité pour causes respiratoires. Enfin,

⁶ Le détail des résultats est disponible en Annexe 1.

l'association entre l'exposition aux brumes de sable et la mortalité par accident cérébrovasculaire était peu étudiée avec seulement trois études identifiées.

Cinq études sur la mortalité se sont intéressées à d'autres fractions granulométriques ($PM_{2,5}$, $PM_{2,5-10}$). Parmi celles-ci, plusieurs études ont trouvé des associations positives entre l'exposition aux fractions $PM_{2,5-10}$ et différents indicateurs de santé : la mortalité toutes causes naturelles (3 études/4), la mortalité respiratoire (2/3) et la mortalité cardiovasculaire (2/3) les jours de brumes de sable. Pour les $PM_{2,5}$, des associations positives ont également été observées pour ces mêmes indicateurs de santé : mortalité toutes causes naturelles (2/4), respiratoire (1/3) et cardiovasculaire (2/3). Néanmoins, les intervalles de confiance sont larges et intègrent souvent la valeur unité (1).

Seules quatre études ont considéré les brumes de sable en tant que variable continue. En distinguant les contributions des sources de particules (désertique/non désertique)⁷, des associations positives ont été observées entre les concentrations en PM_{10} et la mortalité toutes causes ($n=3$) ainsi qu'avec la mortalité cardiovasculaire ($n=2$). Des excès de risque (ER) plus élevés ont été mesurés pour les PM_{10} désertiques par rapport aux PM_{10} non désertiques pour un même incrément de $10 \mu g/m^3$. Le contraire a été observé pour la mortalité respiratoire ($n=2$). En ajoutant la variable binaire « jours avec ou sans brumes de sable »⁸, pour la mortalité toutes causes ($n=1$) et la mortalité cardiovasculaire ($n=1$), des ER plus élevés ont été mesurés pour les PM_{10} non désertiques par rapport aux PM_{10} désertiques pour les jours avec brumes de sable. De plus, l'ER associé aux PM_{10} non désertiques pour ces mortalités était plus important les jours avec brumes de sable par rapport aux jours sans brumes de sable pour une augmentation de $10 \mu g/m^3$.

Concernant les hospitalisations et passages aux urgences, plusieurs études ont plus particulièrement observé un effet sur les patients atteints de bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) (4/5), notamment les jours d'épisode intense de brumes de sable. Pour les enfants de moins de 15 ans, des augmentations des passages aux urgences pour crises d'asthme ont également été observées dans ces mêmes conditions. Les études sur les pathologies cardiovasculaires sont moins nombreuses et un nombre égal d'études observe un nombre d'hospitalisations plus élevé, ou non, en lien avec les jours de brumes de sable. Seule une étude concernait les pathologies cérébrovasculaires et montrait une augmentation des hospitalisations cérébrovasculaires pour une augmentation d'un incrément de $10 \mu g/m^3$ de PM_{10} , avec un effet plus marqué les jours avec brumes de sable.

- Etudes toxicologiques

Dix-sept études toxicologiques ont été retenues. Celles-ci sont des études *in vitro*, menées essentiellement sur des modèles de cellules respiratoires exposées aux particules soit en condition submergée soit à l'interface air-liquide. Ces études portent principalement sur des mécanismes de réponse pro-inflammatoire en lien avec une exposition aux particules issues des brumes de sable du Sahara.

⁷ Modèle à 2 sources

⁸ Modèle à 3 sources

Cinq études s'intéressant au potentiel oxydant des particules lors des épisodes de brumes de sable observent que le potentiel oxydant n'est pas augmenté malgré une concentration en particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) plus élevée.

Cinq études ont été menées sur des cultures de cellules pulmonaires (BEAS-2B, A549) exposées en conditions submergées, à des PM₁₀ et/ou PM_{2,5} de brumes de sable sahariennes. Elles montraient une augmentation des biomarqueurs du stress oxydant (Nrf2, HMOX1) et des biomarqueurs pro-inflammatoires (IL-8 et IL-6). Ces études ont également montré que les endotoxines (contaminants biologiques) participaient à l'augmentation de la réponse pro-inflammatoire.

Deux études ont été menées sur des cellules immunitaires (THP-1) différenciées en macrophages exposées en conditions submergées, à des PM₁₀ et/ou PM_{2,5} de brumes de sable sahariennes. Ces études montraient une activation de l'inflammasome (NLRP3) et une augmentation des biomarqueurs de l'inflammation (IL-1 β). De la même manière, les endotoxines participaient à la toxicité des particules.

Deux études ont été menées sur des co-cultures de cellules alvéolaires (A549) et des cellules immunitaires (THP-1) différenciées en macrophages exposées à l'interface air-liquide, à des PM₁₀ et/ou PM_{2,5} de brumes de sable sahariennes. Ces études mettaient en évidence une activation de l'inflammasome (NLRP3-CASP-1) et une augmentation du relargage et de l'expression génique de biomarqueurs de l'inflammation (IL-1 β , IL-6, IL-8, GM-CSF, G-CSF...). La réponse inflammatoire évaluée après exposition des cellules aux particules de brumes de sable était plus importante que celle observée après exposition des cellules à des particules référentes de quartz (DQ12).

3.2.2. Effets des brumes de sable sur l'environnement, la faune et la flore

Les travaux disponibles sur les effets des brumes de sable sur l'environnement, la faune et la flore étaient peu nombreux.

La majorité des études concernait les écosystèmes marins, et particulièrement les effets sur la productivité de ces écosystèmes. Des études documentaient un accroissement de la productivité des écosystèmes marins, notamment par l'apport de phosphore, d'azote et de fer. Par exemple, une prolifération du phytoplancton en lien avec le dépôt de brumes de sable sahariennes a été observée dans la mer Méditerranée et le Golfe Persique. Toutefois, quelques études ont également mis en évidence des effets négatifs des brumes de sable sur les écosystèmes marins, notamment une diminution de la biomasse phytoplanctonique dans la mer Méditerranée et l'océan Atlantique. En effet, dix études ont détecté la présence de métaux lourds dans les particules de brumes de sable, y compris ceux pouvant être toxiques pour les organismes phytoplanctoniques, comme le cuivre. Finalement, deux études identifiées dans ce rapport suggéraient des effets des rayonnements UV sur la réponse du phytoplancton et des bactéries aux apports des brumes de sable.

Les effets des brumes de sable sur les coraux étaient aussi divergents. Deux études montraient qu'elles favorisaient la croissance des coraux par l'apport de métaux essentiels. Toutefois, d'autres études mettaient en avant une augmentation de la mortalité des coraux, potentiellement associée à un apport d'agents pathogènes par ces brumes.

Les effets possibles sur les écosystèmes d'eaux douces étaient beaucoup moins documentés, et les études identifiées s'intéressaient majoritairement aux lacs d'altitude. Ces travaux montraient que les brumes de sable pourraient engendrer des apports en nutriments, une augmentation de la température de surface des lacs, une augmentation de la salinité des eaux,

et un impact sur les relations entre bactéries hétérotrophes et microorganismes photosynthétiques.

Pour les écosystèmes terrestres, les travaux disponibles ont montré que, comme pour les milieux aquatiques, les brumes de sable pourraient conduire à une fertilisation des sols (notamment le bassin amazonien). Toutefois, ces phénomènes pourraient également engendrer des changements dans la composition de ces sols (par exemple une salinisation) et apporter des éléments ou micro-organismes toxiques dans ces environnements.

Par ailleurs, des études suggèrent que les brumes de sable sahariennes pourraient impacter l'hydrologie et le climat. Par exemple, l'augmentation de la productivité marine pourrait affecter l'équilibre entre les émissions (respiration) et le stockage du CO₂ (respiration versus photosynthèse / sédimentation), et ainsi influencer le bilan du cycle du carbone dans les écosystèmes marins. D'autre part, les études identifiées montraient que les dépôts de brumes de sable étaient associés à une accélération de la fonte de la neige et de la glace (notamment des lacs de haute altitude) liée à une réduction de l'albédo de la surface par le dépôt. Cette fonte prématurée pourrait ensuite avoir des répercussions sur l'hydrologie des environnements concernés.

Enfin, dans l'air, les aérosols des brumes pourraient avoir un effet sur le rayonnement net global en dispersant les rayons solaires, et ainsi réduire la température de surface sur terre. De plus, ils pourraient affecter la formation de pluie en agissant comme noyau de condensation. En revanche, les résultats des études sur le sujet sont divergents : une première étude observait une augmentation de l'intensité des précipitations, une deuxième observait une réduction, alors qu'une troisième montrait que ces effets dépendraient des conditions météorologiques et des variations nuit/jour.

3.3. Conclusions

- Composition des particules de brumes de sable

Les données analysées ne permettent pas de définir une composition chimique ou microbiologique, ni une granulométrie « types » des particules des brumes de sable, en raison :

- d'une part, des limites méthodologiques des études : absence de protocole standardisé de mesure et de caractérisation d'un épisode de brumes de sable (approche multi-outils, dépassement d'un seuil de concentration, modélisation, etc.), différences entre les éléments recherchés et les techniques analytiques,
- d'autre part, de l'influence de nombreux facteurs tels que la zone géographique source des brumes, le transport (altitude, distance, voie de transport...), les conditions météorologiques, la formation d'aérosols secondaires par réactions chimiques entre les éléments composant les brumes de sable et/ou avec les éléments déjà présents dans l'atmosphère, etc.

De manière macroscopique, les brumes de sable sont majoritairement composées des éléments Si, Al, Fe, Ca, Mg, K et Na. Les espèces minéralogiques principales identifiées sont le quartz, l'illite et la kaolinite.

Bien que peu nombreuses, des études sur la composition microbiologique montraient une tendance à l'augmentation générale des bactéries et champignons les jours de brumes de sable. Par conséquent, la viabilité de certains micro-organismes, principalement d'importance

environnementale (dont les humains ne sont pas les hôtes principaux), peut être préservée lors du transport des brumes.

Pendant les épisodes de brumes de sable, une augmentation des concentrations en éléments radioactifs, tels que le ^{137}Cs ou le ^{40}K , a été observée, liée à l'augmentation de la concentration des particules dans l'air. Ces radionucléides sont détectés à l'état de traces et ne présentent pas de risque pour la santé humaine. Aucune source spécifique de ces radionucléides n'a pu être mise en évidence parmi les retombées atmosphériques globales de l'ensemble des essais nucléaires ou des accidents nucléaires majeurs.

- Influence des brumes de sable sur les concentrations en particules dans l'air ambiant

Les épisodes de brumes de sable contribuent à une augmentation de la concentration en PM_{10} dans l'air ambiant et peuvent représenter plus de la moitié de cette concentration lors d'épisodes intenses.

En raison d'un manque de données, il n'est pas possible de conclure sur l'impact des brumes de sable sur les concentrations des autres fractions granulométriques ($\text{PM}_{2,5}$, PM_1 , PUF).

Lorsque les épisodes de brumes de sable sont associés à certaines conditions atmosphériques telles qu'un abaissement de la hauteur de la couche limite atmosphérique, l'accumulation des polluants locaux est favorisée.

- Effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé humaine

En préambule, le CES rappelle que les effets des particules (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$) sur la santé sont reconnus depuis de nombreuses années (Anses 2019 ; 2024). L'exposition à ces particules affecte particulièrement la santé respiratoire, la santé cardiovasculaire et la mortalité toutes causes (non-accidentelle). La pollution atmosphérique et les matières particulaires contenues dans la pollution atmosphérique sont classées depuis 2013 comme cancérogènes pour l'homme par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC). Les populations sensibles et vulnérables à ces expositions sont les individus présentant des affections chroniques telles que l'asthme, la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO), le diabète, l'insuffisance cardiaque et les pathologies cardiaques ischémiques, ainsi que les enfants, les femmes enceintes et les personnes âgées de plus de 65 ans (Anses 2024 ; WHO 2021).

- Études épidémiologiques

Les études épidémiologiques portant sur les effets des brumes de sable réalisées en Europe, aux Caraïbes et en Afrique du Nord étaient peu nombreuses par rapport à celles menées dans d'autres régions du monde, notamment en Asie. Les événements de santé les plus étudiés étaient la mortalité toutes causes non-accidentelle, la mortalité cardiovasculaire et la mortalité respiratoire et les fractions granulométriques les plus étudiées étaient les PM_{10} et les $\text{PM}_{2,5-10}$. Pour tous ces événements de santé et quelle que soit la fraction granulométrique, les résultats disponibles ne permettaient pas de conclure à un effet différent des particules les jours de brumes de sable par rapport à celles des jours sans brumes de sable (Annexe 1).

○ Études toxicologiques

Très peu de données toxicologiques étaient disponibles pour les brumes de sable sahariennes et les publications pertinentes portaient essentiellement sur des modèles cellulaires *in vitro* de l'arbre respiratoire et sur des mécanismes pro-inflammatoires.

Les particules issues des brumes de sable ont révélé un faible potentiel oxydant intrinsèque, suggérant un faible stress oxydant cellulaire (en dépit de la présence de métaux de transition, tels que le fer). Elles peuvent avoir des effets toxiques sur les cellules de l'arbre respiratoire, par exemple en augmentant la réponse pro-inflammatoire, selon leurs compositions chimique (ex : Fe, Al...), minéralogique (ex : quartz, albite et feldspath K) et biologique (ex : endotoxines).

Le corpus de données ne permettait pas de comparer les effets toxicologiques des particules habituellement présentes dans l'air ambiant aux effets des particules de brumes de sable.

▪ Effets des brumes de sable sur l'environnement, la faune et la flore

Peu de travaux étaient disponibles pour documenter les effets des brumes de sable sur l'environnement, la faune et la flore. La synthèse des effets connus des brumes de sable sur l'environnement est présentée en Figure 2. Cette figure résume les principaux milieux et écosystèmes potentiellement affectés par les brumes de sable ainsi que les phénomènes associés ayant été documentés. Dans l'air, les aérosols des brumes de sable pourraient disperser les rayonnements solaires et ainsi réduire la température des surfaces. Ils pourraient également agir comme noyau de condensation des gouttelettes de pluie, et donc avoir un effet sur la pluviométrie. Ces particules, composées de matières organiques et inorganiques, se déposent sur les eaux (marines et douces) et les sols, ce qui pourrait favoriser la productivité de ces écosystèmes en levant certaines limites (par exemple par le phosphore et/ou le fer) ou, au contraire, la défavoriser lorsque des contaminants sont apportés en trop grandes quantités (par exemple : certains éléments traces métalliques, du chlorure de sodium ou des pathogènes). Le cycle du carbone pourrait aussi être affecté à travers des changements en émission (organismes non-photosynthétiques) et absorption (organismes photosynthétiques) du CO₂. Le dépôt de particules de brumes de sable sur la neige ou des lacs gelés en altitude diminue l'albédo de surface, pouvant en accélérer la fonte. Selon le PNUE, il est important de reconnaître les risques, mais aussi les bienfaits des brumes de sable sur les écosystèmes (UNEP 2020).

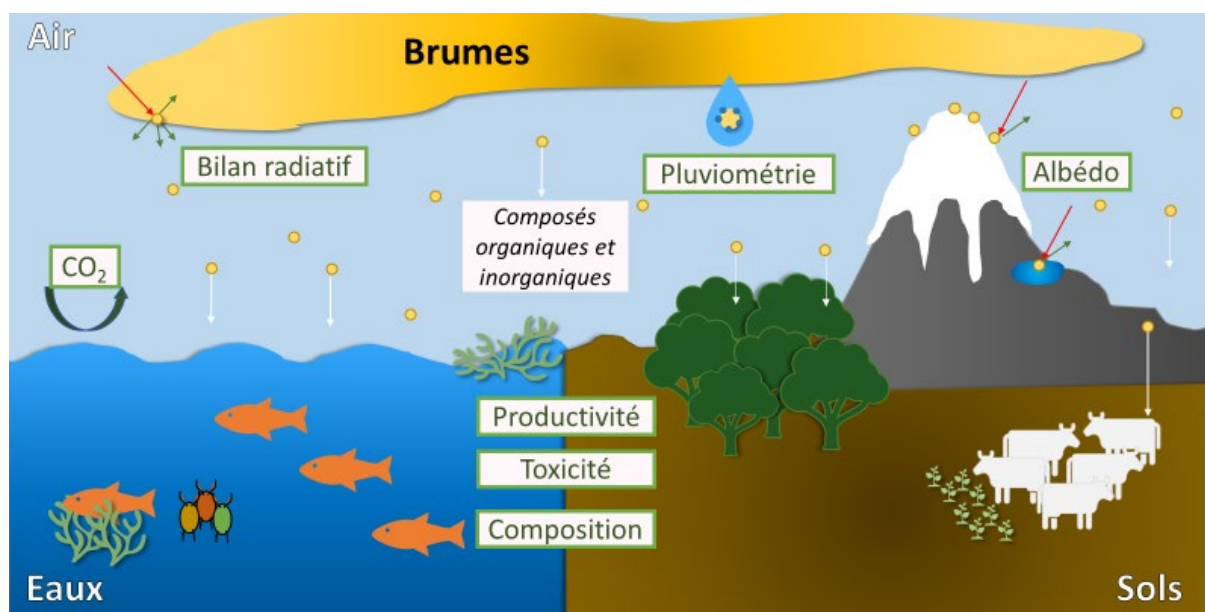


Figure 2. Schéma représentatif des milieux où se déposent les brumes de sable, et les principaux phénomènes impactés par leurs apports

Les résultats disponibles sur la question spécifique des algues sargasses suggèrent que les brumes de sable favoriseraient leur développement. Toutefois, il existe d'autres facteurs connus facilitant leur prolifération, et les brumes n'expliqueraient donc pas à elles seules ce phénomène. Parmi les études recensées, aucune n'a permis de documenter les conséquences potentielles d'une contamination chimique (contaminants organiques et inorganiques, notamment les métaux lourds) des masses d'eaux par les brumes de sable sur les réseaux trophiques⁹.

3.4. Recommandations

- Gestion des épisodes de brumes de sable

Le CES rappelle l'importance de renforcer les politiques publiques et environnementales d'amélioration de la qualité de l'air afin de mieux protéger la population des effets sanitaires de la pollution atmosphérique. Il rappelle que les modalités actuelles de gestion nationale des pics de pollution intègrent déjà des mesures s'appliquant en cas d'épisodes de brumes de sable, ces dernières étant comptabilisées dans les PM₁₀. Les données actuelles ne permettent pas de proposer des mesures de gestion différentes lors des pics de pollution dus à des épisodes de brumes de sable. Néanmoins, le CES souligne que, même si les brumes de sable sont un phénomène naturel, il est d'autant plus nécessaire de réduire les émissions anthropiques lors de ces épisodes afin de réduire la concentration particulaire totale et donc l'exposition de la population.

Dans ses lignes directrices relatives à la qualité de l'air publiées en 2021, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande des mesures de gestion à court terme sous la forme de recommandations de bonnes pratiques qui sont rappelées en Annexe 2 (WHO 2021).

⁹ Un réseau trophique se réfère à l'ensemble des liens trophiques, et donc à la circulation de biomasse et d'énergie, existant au sein d'un écosystème.

Par ailleurs, le CES alerte sur la prise en compte des pics de pollution aux $PM_{2,5}$ dans les mesures de gestion nationales issues de la nouvelle réglementation européenne relative à l'air ambiant¹⁰. En effet, les brumes de sable pourraient participer aux dépassements des futures valeurs réglementaires relatives aux $PM_{2,5}$.

Le CES souligne également qu'en raison du changement climatique, des modifications dans les schémas de circulation atmosphérique pourraient impacter la saisonnalité des épisodes de brumes de sable, en augmentant l'intensité et la fréquence d'épisodes hivernaux originaires du Sahara (Copernicus 2024).

En raison du manque de données mis en avant dans le cadre de cette expertise, le CES émet des recommandations de recherche.

- Recommandations en matière de recherche

Concernant la caractérisation physico-chimique et microbiologique des brumes de sable, le CES recommande :

- De poursuivre les travaux de recherche en documentant la composition chimique et microbiologique, ainsi que la granulométrie des particules, à la source des brumes de sable comme après leur transport, afin de mieux comprendre les processus pouvant impacter la composition de ces dernières et leur interaction avec les polluants anthropiques de leur zone de dépôt.

Pour l'étude des effets sanitaires des brumes de sable, le CES recommande :

- De mener des études épidémiologiques sur les effets des expositions aux brumes de sable originaires d'Afrique du Nord sur la santé humaine, pour des territoires plus ou moins éloignés de la source des brumes comme l'Europe et les Caraïbes ;
- D'analyser la toxicité des particules issues des brumes de sable sur des cibles cellulaires autres que celles présentes dans l'appareil respiratoire. Il serait également pertinent d'étudier l'influence de la composition chimique, minéralogique et biologique des particules de brumes de sable, et de leur morphologie, sur différentes voies de signalisation (réponses inflammatoires, inflammasome), en considérant des échantillons prélevés les jours avec et les jours sans brumes de sable.

Pour réaliser ces études, le CES recommande :

- Une harmonisation des méthodes afin d'assurer une comparabilité des résultats :
 - Harmoniser l'évaluation de l'exposition aux brumes de sable en favorisant une approche multi-outils (données de concentration en particules des stations de mesure, modélisation, observations satellitaires...) ;
 - Standardiser les protocoles des études épidémiologiques en favorisant un modèle d'exposition continue, c'est-à-dire qui utilise des niveaux de PM en continu. Les estimations d'association avec les niveaux de PM en continu les jours de brumes devraient être comparés aux estimations des

¹⁰ Directive (UE) 2024/2881 du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2024 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe (refonte) 2024

associations avec les niveaux de PM en continu les jours sans brumes. Ce type de modèle est plus précis dans le cas où l'évaluation de l'exposition est de qualité.

- De ne pas s'intéresser uniquement aux PM₁₀, mais également à d'autres fractions granulométriques (de tailles plus petites et plus grandes), qui peuvent avoir une composition différente et donc des effets différents sur la santé humaine ou sur l'environnement.
- D'étudier les facteurs modificateurs de l'effet des brumes de sable sur la santé, notamment les conditions météorologiques.
- D'étudier l'influence des brumes de sable sur les concentrations des polluants déjà présents dans l'air ambiant et leurs possibles interactions.

Concernant les effets sur l'environnement, la faune et la flore, le CES recommande de s'intéresser particulièrement aux sujets suivants :

- Algues sargasses, en étudiant les effets des brumes de sable sur les proliférations d'algues sargasses et la contribution relative, dans ces proliférations, des apports liés aux brumes de sable et de ceux provenant d'autres sources (détergents ménagers ou industriels, agriculture...) ;
- Contaminants chimiques, en étudiant les contaminations chimiques des sols et des masses d'eau par les brumes de sable et leurs conséquences sur les réseaux trophiques ;
- Paramètres environnementaux (par exemple rayonnement UV, température et pH), en étudiant l'influence de ces paramètres sur les réponses des écosystèmes aux apports des brumes de sable ;
- Temporalité des effets des brumes de sable, en améliorant les connaissances sur les délais entre les apports et les effets observés, la durée de ces effets et leur dynamique à court, moyen ou long terme, afin de mettre en place des mesures de protection ou de restauration adaptées.

Par ailleurs, le CES appuie les recommandations suivantes formulées par le PNUE (UNEP 2020) :

- Etudier les effets indirects des brumes de sable sur la santé humaine, c'est-à-dire les effets des brumes de sable sur l'environnement pouvant ensuite affecter la santé humaine (ex. les algues sargasses et les émissions d'H₂S) ;
- Développer des modèles du cycle des poussières en lien avec les modèles climatiques ;
- Estimer les pertes économiques liées aux perturbations environnementales pour appuyer la prise de décision (ex. les algues sargasses échouées peuvent affecter les économies côtières : tourisme, pêche...).

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions des experts.

En premier lieu, l'Agence rappelle l'importance de renforcer les politiques publiques d'amélioration de la qualité de l'air afin de protéger la population des effets sanitaires de la pollution atmosphérique. En effet, bien que la présente expertise concerne le phénomène naturel de brumes de sable, ce dernier est concomitant à la pollution anthropique déjà présente et est associé à une augmentation des concentrations en particules (PM₁₀, PM_{2,5}) (WHO 2021). De ce fait, il apparaît d'autant plus nécessaire de réduire les émissions locales anthropiques lors des épisodes de brumes de sable. Également, même si, dans le calcul du nombre de jours de dépassement des valeurs limites, les contributions des brumes de sable aux concentrations de PM₁₀ (et à terme aux PM_{2,5} en raison de la nouvelle directive¹¹) peuvent être déduites selon la méthodologie recommandée par la Commission européenne, cela ne modifie pas l'exposition de la population aux particules et leur incidence sur la santé. L'Agence insiste sur l'importance de réduire l'exposition à la pollution atmosphérique dans son ensemble, et à sa composante particulaire, en toutes circonstances en raison de leurs effets et impacts sur la santé déjà démontrés.

En ce qui concerne plus précisément la spécificité de l'impact sanitaire des particules apportées par les brumes de sable, les travaux antérieurs de l'Agence (Anses 2019) avaient clairement conclu sur les preuves épidémiologiques de cette source de particules, notamment sur la santé respiratoire de l'enfant. A ce jour, la nouvelle revue de la littérature conforte l'analyse antérieure mais ne permet pas de conclure à une différence – en l'occurrence sur le risque de décès (toutes causes non accidentelles, respiratoire, cardiovasculaire) – selon que les particules sont issues de brumes de sable ou non.

De ce fait, en l'état actuel des connaissances, l'Agence considère qu'il n'a pas lieu de recommander des modalités de gestion différentes de celles déjà existantes pour les épisodes de pollution aux PM₁₀. L'Agence tient à souligner que l'OMS a formulé des recommandations de bonnes pratiques spécifiques au phénomène de brumes de sable qui portent à la fois sur des politiques publiques générales et des actions à mener selon le contexte local (Annexe 2).

Finalement, l'Agence souligne le lien entre le changement climatique et l'exposition de la population à la pollution atmosphérique, ainsi qu'à sa composante particulaire, lors des épisodes de brumes de sable. L'augmentation de l'intensité et de la fréquence des épisodes pourrait augmenter l'exposition de la population à la pollution atmosphérique par des particules fines donc l'impact néfaste sur son état de santé.

Pr Benoît Vallet

¹¹ Directive (UE) 2024/2881 du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2024 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe (refonte) 2024

MOTS-CLÉS

Brumes de sable, tempêtes de sable et de poussière, particules désertiques, brumes de sable du Sahara, pollution atmosphérique

Sand haze, sand and dust storms, desert dust, Saharan dust, air pollution

CITATION SUGGÉRÉE

Anses. (2025). Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif aux effets sanitaires liés à l'exposition aux brumes de sable en France métropolitaine, aux Antilles et en Guyane. Saisine 2023-SA-0098. Maisons-Alfort : Anses, 21 p.

ANNEXE 1 – DETAILS DES RESULTATS DES ETUDES INCLUSES POUR LE VOLET SANTE HUMAINE

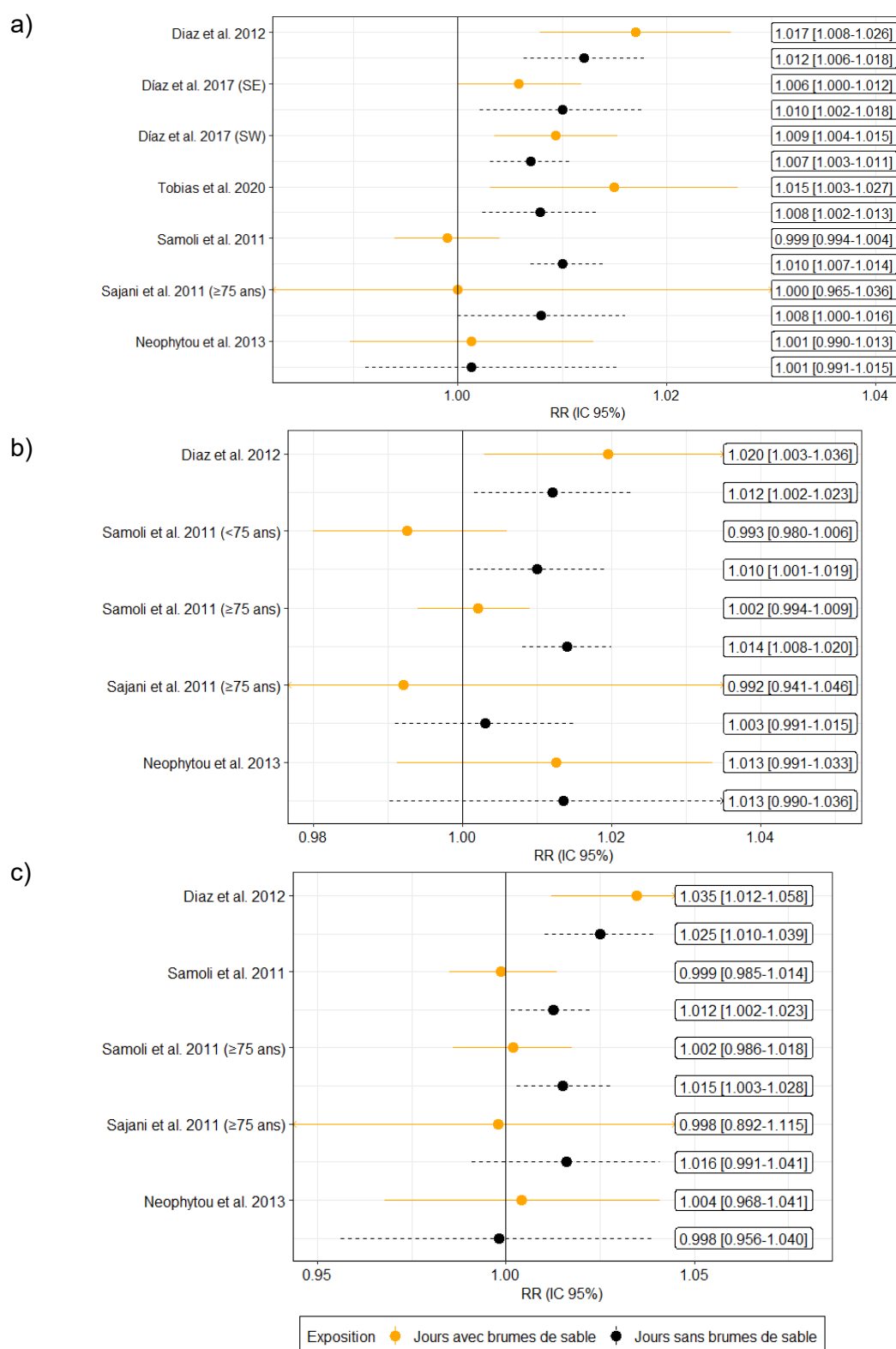


Figure 3. Risques relatifs de a) la mortalité toutes causes, b) cardiovasculaire et c) respiratoire pour une exposition à un incrément de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} les jours avec ou sans brumes de sable au lag (1). Variable binaire d'exposition aux brumes de sable considérée en tant que modificateur de l'impact sanitaire des PM_{10} .

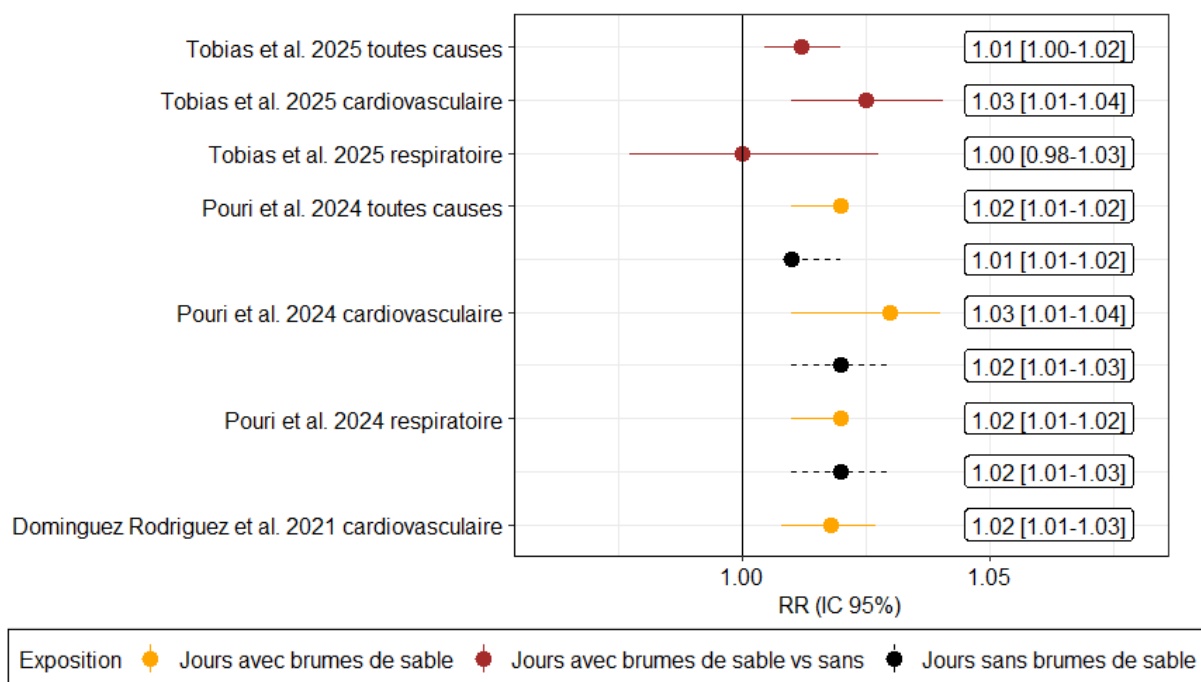


Figure 4. Résultats des trois méta-analyses concernant la mortalité toutes causes, cardiovasculaire et respiratoire.

Pour Tobias *et al.* 2025 et Dominguez Rodriguez *et al.* 2024, les résultats présentés ont été mesurés au lag 0 tandis que pour Pouri *et al.* 2024, il semble que ce soit les résultats tous lags confondus (non précisé). Tobias *et al.* 2025 donnent des RR correspondant aux résultats jours de brumes de sable *versus* jours sans brumes de sable. Pouri *et al.* 2024 présentent les RR pour les jours avec et sans brumes de sable, pour un incrément de 10 µg/m³. Enfin Dominguez Rodriguez *et al.* 2021 ne donnent les RR que pour les jours avec brumes de sable, pour un incrément de 10 µg/m³.

ANNEXE 2 – BONNES PRATIQUES FORMULEES PAR L'OMS

Traduit de l'anglais de : WHO. 2021. *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. World Health Organization. Bonn, Germany: WHO European Centre for Environment and Health, p156-157.

Encadré 4.3. Déclaration de bonnes pratiques – brumes de sable (en anglais : *sand and dust storms* (SDS))

Compte-tenu des données disponibles, le groupe ayant élaboré les lignes directrices (*Guideline Development Group* (GDG)) a décidé de formuler cinq bonnes pratiques sur les brumes de sable pour les zones les plus fréquemment affectées.

1. Maintenir des programmes appropriés de gestion de la qualité de l'air et de prévision des brumes de sable. Ces programmes devraient inclure des systèmes d'alerte précoce et des plans d'action à court terme en matière de pollution atmosphérique afin d'alerter la population pour qu'elle reste à l'intérieur et prenne des mesures personnelles pour minimiser l'exposition, et donc les effets à court terme sur la santé, lors d'épisodes de brumes de sable avec des niveaux élevés de particules.
2. Maintenir des programmes de surveillance de la qualité de l'air et des procédures de notification appropriés, y compris la répartition des sources, afin de quantifier et caractériser la composition des particules et le pourcentage de contribution des brumes de sable à la concentration ambiante globale de particules. Cela permettra aux autorités locales de cibler les émissions locales de particules provenant de sources naturelles et anthropiques en vue de les réduire.
3. Mener des études épidémiologiques, notamment sur les effets à long terme des brumes de sable, et des activités de recherche visant à mieux comprendre la toxicité des différents types de particules. Ces études sont particulièrement recommandées dans les régions où l'on manque de connaissances et d'informations suffisantes à propos des risques pour la santé liés à une exposition fréquente aux brumes de sable.
4. Mettre en œuvre un contrôle de l'érosion éolienne par le développement approprié d'une végétalisation qui prenne en compte et s'adapte aux écosystèmes locaux. Cela nécessite une collaboration inter-régionale entre les pays et régions touchés par les brumes de sable afin de lutter contre la désertification et gérer avec précaution les espaces verts.
5. Nettoyer les rues dans les zones urbaines caractérisées par une densité de population relativement élevée et par de faibles précipitations afin d'empêcher la remise en suspension des particules par le trafic routier comme une mesure de court terme après les épisodes intenses de brumes de sable engendrant un taux de dépôt élevé de particules. Le nettoyage peut être réalisé par lavage et/ou balayage. Dans le premier cas, il convient d'utiliser de l'eau non potable provenant du système de drainage du métro ou des eaux urbaines traitées (Querol *et al.* 2019). Cette intervention n'est pas réalisable dans de nombreux pays où l'eau est rare. Dans de tels cas, la réduction de certaines sources urbaines locales émettrices de poussière, telles que les activités de construction ou de démolition, peut être une meilleure intervention alternative. Avant de planifier le nettoyage des rues, les autorités locales doivent :
 - Evaluer l'ampleur du problème ;
 - Evaluer les statistiques pluviométriques ;
 - Sélectionner les rues les plus fortement touchées par le dépôt de poussière ;
 - Vérifier le taux d'accumulation des sédiments ; et
 - Déterminer la méthode de nettoyage la plus efficace (par exemple, la fréquence, le calendrier et les caractéristiques de la machine de nettoyage).

Brumes de sable en France métropolitaine, aux Antilles et en Guyane

État des connaissances relatives à la composition, aux effets sur la santé et aux effets sur l'environnement, la faune et la flore des épisodes de brumes de sable

Saisine « n°2023-SA-0098 – Brumes de sable »

RAPPORT d'expertise collective

Comité d'experts spécialisé « Évaluation des risques liés aux milieux aériens »

Juin 2025

Citation suggérée

Anses. (2025). Brumes de sable en France métropolitaine, aux Antilles et en Guyane. Saisine 2023-SA-0098. Maisons-Alfort : Anses, 180p.

Mots clés

Brumes de sable, tempêtes de sable et de poussière, particules désertiques, brumes de sable du Sahara, pollution atmosphérique

Sand haze, sand and dust storms, desert dust, Saharan dust, air pollution

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

RAPPORTEURS

- Axe de travail : composition

Mme Anne OPPLIGER – Retraitée (Département Santé au Travail et Environnement, Unisanté, Lausanne) – Compétences : Santé au Travail, bioaérosols, risques biologiques, zoonoses, One Health

Mme Florence PÉRON – Ingénieur d'études (AtmoSud) – Compétences : mesures de qualité de l'air et traitement de données, communication en qualité de l'air

- Axe de travail : effets sur la santé humaine

Mme Sophie ACHARD – Maître de conférences (Faculté de Pharmacie, Université Paris Cité) – Compétences : toxicologie, environnement, modèles expérimentaux in vitro

Mme Johanna LEPEULE – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, Inserm U1290) – Compétences : pollution de l'air, épidémiologie environnementale, santé périnatale, grossesse, épigénétique, modélisation des expositions

Mme Laurence PASCAL – Médecin épidémiologiste (Santé publique France Paca-Corse) – Compétences : épidémiologie, effets sanitaires de la pollution de l'air, évaluations quantitatives d'impact sur la santé

- Axe de travail : effets sur l'environnement, la faune et la flore

M. Jean-Louis GONZALEZ – Chercheur HDR (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer)) – Compétences : milieu marin, contaminants chimiques, géochimie marine, modélisation, échantillonnages passifs

M. Jean-François HUMBERT – Directeur de recherche HDR (UMR BIOENCO, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae)) – Compétences : microbiologie de l'eau dont cyanobactéries, écologie microbienne

M. Rodolphe LEMÉE – Professeur HDR à Sorbonne Université, directeur du Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (LOV, UMR 7093 CNRS-Sorbonne Université) – Compétences : écologie marine, écologie chimique marine, écotoxicité, microalgues nuisibles (HAB), phycotoxines, optimisation des stratégies d'échantillonnage et de dénombrement des microorganismes

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport, ont été suivis et adoptés par le CES suivant :
CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » (CES Air) – 2024-2028

Présidente

Mme Corinne MANDIN – Responsable du laboratoire d'épidémiologie (Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection) – Compétences : expologie, épidémiologie, évaluation des risques sanitaires

Vice-président

M. Fabrice LERAY – Ingénieur-conseil (Caisse d'assurance retraite et de la santé au travail Pays de la Loire) – Compétences : hygiène industrielle, expositions professionnelles, toxicologie et métrologie des polluants, amiante

Membres

Mme Sophie ACHARD – Maître de conférences (Faculté de Pharmacie, Université Paris Cité) – Compétences : toxicologie, environnement, modèles expérimentaux *in vitro*

M. Michel ANDRÉ – Directeur de recherche émérite (Université Gustave Eiffel) – Compétences : transports et impacts sur la pollution de l'air, émissions de polluants des véhicules et du trafic, métrologie et méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux

Mme Sylvie CASSADOU – Médecin épidémiologiste retraitée (Observatoire régional de santé Occitanie) – Compétences : épidémiologie, évaluation quantitative des impacts sur la santé

Mme Laureline COATES – Conseiller médical en santé au travail (Institut national de recherche et de sécurité) – Compétences : médecine du travail, toxicologie professionnelle

M. Marc DURIF – Directeur exécutif (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air) – Compétences : surveillance de la qualité de l'air, caractérisation des émissions atmosphériques, réglementations et plans d'actions

Mme Elodie GUIGON – Maître de conférences (Ecole Pratique des Hautes Etudes) – Compétences : contamination de l'environnement, transferts environnementaux, micropolluants organiques dans l'atmosphère

M. Sébastien HULO – Professeur des Universités - Praticien hospitalier (PU-PH, Centre hospitalier universitaire de Lille, Université de Lille) – Compétences : pathologies pulmonaires d'origine professionnelle, explorations fonctionnelles respiratoires

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Directrice de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail) – Compétences : épidémiologie, pollution atmosphérique

M. Hervé LABORDE-CASTEROT – Praticien hospitalier (Assistance publique-Hôpitaux de Paris Hôpital Fernand Widal, Centre antipoison et de toxicovigilance de Paris) – Compétences : pathologies professionnelles, toxicologie clinique, épidémiologie

M. Claude LAMBRE – Retraité (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Compétences : immunologie, évaluation des risques sanitaires, toxicologie des produits chimiques

Mme Juliette LARBRE – Cheffe de service (Service des Laboratoires de Santé Environnementale, Mairie de Paris) – Compétences : prélèvements et analyses dans l'air, exposition

Mme Barbara LE BOT – Professeur des Universités (École des hautes études en santé publique, Université de Rennes, Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, Unité mixte de recherche 1085) – Compétences : contamination de l'environnement intérieur, qualité de l'air et des poussières sédimentées, évaluation des expositions

M. Christophe LEROYER – Professeur des Universités et Praticien hospitalier (Centre hospitalier universitaire de Brest, Université de Bretagne Occidentale) – Compétences : asthme, bronchopneumopathie chronique obstructive, environnement

Mme Rachel NADIF – Responsable d'équipe, chargée de Recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, Centre de recherche en Épidémiologie et Santé des populations U1018) – Compétences : épidémiologie, santé respiratoire

Mme Anne OPPLIGER – Retraitée (Département Santé au Travail et Environnement, Unisanté, Lausanne) – Compétences : Santé au Travail, bioaérosols, risques biologiques, zoonoses, One Health

M. Jérémie POURCHEZ – Directeur de recherche (École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Département « Activité Biologique des Particules Inhalées », Inserm Sainbiose U1059) – Compétences : toxicologie, métrologie des aérosols, nanomatériaux

Mme Delphine PRAUD – Chercheuse en épidémiologie environnementale (Centre Léon Bérard à Lyon) – Compétences : épidémiologie, caractérisation des expositions, pollution atmosphérique, cancers

Mme Anastasia SAADE – Médecin chercheur (Centre hospitalier universitaire de Rennes, Université de Rennes, Institut de Recherche en Santé, Environnement et Travail) – Compétences : évaluation et prévention du risque infectieux, pathologies professionnelles infectieuses à transmission aérienne

Mme Audrey SMARGIASSI – Professeur titulaire et chercheuse (Université de Montréal et Institut National de Santé Publique du Québec) – Compétences : expologie, effets respiratoires des polluants atmosphériques, évaluation quantitative des risques sanitaires

Les questions de la saisine ont été discutées par le mandat suivant :

- CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » – 2021-2024

Présidente

Mme Rachel NADIF – Responsable d'équipe, chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, CESP U1018) – Compétences : épidémiologie, santé respiratoire

Vice-président

M. Hervé LABORDE-CASTEROT - Praticien hospitalier (Centre antipoison de Paris, AP-HP Nord Université de Paris) – Compétences : pathologies professionnelles, toxicologie clinique, épidémiologie, allergologie

Membres

Mme Sophie ACHARD – Maître de conférences (Faculté de Santé - Université de Paris) – Compétences : toxicologie environnementale

M. Fabrice ALLIOT – Ingénieur d'études (Ecole Pratique des Hautes Etudes) – Compétences : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, perturbateurs endocriniens

M. Michel ANDRÉ – Directeur de recherche (Université Gustave Eiffel) – Compétences : transports et pollution de l'air, métrologie et modélisation des émissions des véhicules et du trafic, méthodologies d'évaluation

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Compétences : toxicologie, évaluation des risques sanitaires, identification des mélanges et modèles de risques associés, perturbateurs endocriniens

M. Patrick BROCHARD – Professeur émérite (Université de Bordeaux) – Compétences : pneumologie, pathologies professionnelles et environnementales, impact sanitaire des particules inhalées (amiante, silice...)

Mme Fleur DELVA – Praticien hospitalier, médecin de santé publique (Centre Hospitalier Universitaire de Bordeaux) – Compétences : médecine, prévention, reproduction, épidémiologie

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Brest) – Compétences : pathologies professionnelles, pneumologie, allergologie

M. Marc DURIF – Directeur exécutif (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, LCSQA) – Compétences : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, émissions industrielles et anthropiques, caractérisation des expositions, construction de stratégies de surveillances dans l'air dans différents contextes

Mme Emilie FREALLE – Praticien hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Lille, Institut Pasteur de Lille) – Compétences : écologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur

M. François GAIE-LEVREL – Ingénieur chercheur (Laboratoire national de métrologie et d'essais) – Compétences : métrologie, pollution atmosphérique, aérosols, nanoparticules

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Compétences : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique

Mme Marianne GUILLEMOT – Responsable d'études (Institut National de Recherche et de Sécurité) – Compétences : métrologie, surveillance atmosphérique et des environnements professionnels

Mme Marion HULIN - Chargée de projet et d'expertise scientifique (Santé Publique France) – Compétences : épidémiologie, qualité de l'air intérieur, santé environnement, évaluation des expositions

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Compétences : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences (Université de Lorraine) – Compétences : toxicologie, sécurité sanitaire, particules

Mme Juliette LARBRE – Cheffe du Service des Laboratoires de Santé Environnementale – Compétences : qualité de l'air intérieur et extérieur, métrologie, santé environnement

Mme Barbara LE BOT – Professeur des Universités, Directrice adjointe du Laboratoire d'étude et recherche en environnement et santé (Ecole des hautes études en santé publique) – Compétences : évaluation des expositions, santé publique, métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air et poussières

Mme Johanna LEPEULE – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Compétences : pollution de l'air, épidémiologie environnementale, santé périnatale, grossesse, épigénétique, modélisation des expositions

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Compétences : épidémiologie, santé travail, expositions professionnelles et environnementale

Mme Corinne MANDIN – Responsable du laboratoire d'épidémiologie (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire) – Compétences : évaluation des expositions aux substances chimiques et agents physiques et des risques sanitaires associés.

Mme Anne OPPLIGER – Responsable de recherche (Université : Centre universitaire de médecine générale et santé publique de Lausanne) – Compétences : santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques

M. Pierre PERNOT – Directeur Opérationnel (Airparif) – Compétences : métrologie, surveillance et réglementation de la qualité de l'air

M. Nhan PHAM-THI – Enseignant chercheur, médecin (Institut de Recherche Biomédicale des Armées, Ecole Polytechnique) – Compétences : allergologie, pneumologie

M. Jean-Marc THIBAUDIER – Médecin du travail (Retraité - Mutualité Sociale Agricole des Alpes du Nord) – Compétences : santé travail, médecine, agriculture, produits phytosanitaires, poussières agricoles. Démission le 23 février 2023)

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme Claire DULONG – Coordinatrice d'expertise scientifique – Unité d'évaluation des risques liés à l'air – Anses

Contribution scientifique

Mme Rachna BHOONAH – Coordinatrice d'expertise scientifique – Unité d'évaluation des risques liés à l'air – Anses

Mme Florence JACOB – Coordinatrice d'expertise scientifique – Unité d'évaluation des risques liés à l'air – Anses

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – Anses

CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES AU(X) COLLECTIF(S)

Ces contributions concernent la mise à disposition de données et l'identification de ressources (rapports, littérature grise) pertinentes :

M. Marc DURIF – Directeur exécutif – Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA)

M. Olivier FAVEZ – Ingénieur Études et Recherches – Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)

Mme. Caroline MARCHAND – Responsable de l'unité Accompagnement à la surveillance de la qualité de l'air et des eaux de surfaces – Institut national de l'environnement industriel et des risques / Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (Ineris / LCSQA)

M. Olivier MASSON – Responsable de la surveillance et de la recherche sur le transfert des radionucléides dans l'atmosphère – Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR)

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations.....	11
Liste des tableaux	13
Liste des figures.....	15
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise	17
1.1 Contexte	17
1.2 Objet de la saisine	17
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	18
1.4 Méthodologie mise en œuvre.....	19
1.4.1 Méthodologie générale.....	19
1.4.2 Revue de la littérature	19
1.4.3 Consultations	21
1.5 Prévention des risques de conflits d'intérêts	21
2 Préambule sur les particules issues du phénomène naturel de brumes de sable.	22
2.1 Définitions et terminologies existantes	22
2.2 Généralités sur le phénomène naturel de brumes de sable	23
2.3 Contexte réglementaire.....	27
3 Pollution de l'air liée aux brumes de sable	29
3.1 Composition des particules de brumes de sable	29
3.1.1 Composition chimique	31
3.1.2 Composition microbiologique	53
3.1.3 Composition en radionucléides	61
3.1.4 Autres déserts	65
3.2 Influence des brumes de sable sur les concentrations en particules dans l'air ambiant 67	
3.2.1 Influence sur les concentrations en PM ₁₀	67
3.2.2 Influence sur les concentrations en particules fines et ultrafines	70
4 Effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé humaine	71
4.1 Méthodologies appliquées dans les études épidémiologiques identifiées	71
4.2 Revues et méta-analyses	73
4.2.1 Etudes épidémiologiques	74
4.2.2 Synthèse des effets sanitaires de l'exposition aux brumes de sable en provenance du Sahara et d'autres déserts d'Afrique, du Moyen-Orient et d'Asie	90
4.2.3 Etudes toxicologiques	92

5	Effets des particules de brumes de sable sur l'environnement, la faune et la flore	107
5.1	Impacts sur les écosystèmes aquatiques	108
5.1.1	Ecosystèmes marins	108
5.1.2	Ecosystèmes d'eaux douces	111
5.2	Impacts sur les écosystèmes terrestres	112
5.2.1	Hydrologie et climat	113
5.2.2	Effets sur la pluviométrie	114
6	Conclusions du groupe de travail	116
7	Recommandations du groupe de travail	119
8	Bibliographie	122
Annexe 1. Lettre de saisine		145
Annexe 2. Méthodologie mise en œuvre		147
Annexe 3. Glossaire		155
Annexe 4. Tableau périodique des éléments		158
Annexe 5. Détails des études épidémiologiques incluses dans la synthèse des effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé humaine		159
Annexe 6. Détails des principaux résultats d'études toxicologiques expérimentales menées in vitro		171

Sigles et abréviations

ADN	:	acide désoxyribonucléique
ALI	:	interface air-liquide
ARN	:	acide ribonucléique
ASNR	:	Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection
BDMA	:	bases de données médico-administratives
BEAS-2B	:	cellules épithéliales bronchiques humaines normales
BLH	:	hauteur de la couche limite atmosphérique (en anglais : <i>boundary layer heights</i>)
BPCO	:	bronchopneumopathie chronique obstructive
CES	:	Comité d'experts spécialisé
CIRC	:	Centre International de Recherche sur le Cancer
CLA	:	couche limite atmosphérique
CNULCD	:	Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (en anglais : <i>United Nations Convention to Combat Desertification</i> (UNCCD))
EC	:	carbone élémentaire
EDXRF	:	spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie
ER	:	excès de risque
G-CSF	:	Facteur de stimulation des colonies de granulocytes (en anglais : <i>Granulocyte colony-stimulating factor</i>)
GIEC	:	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais : <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (IPCC))
GM-CSF	:	Facteur de stimulation des colonies de granulocytes et de macrophages (en anglais : <i>Granulocyte-macrophage colony-stimulating factor</i>)
Ineris	:	Institut national de l'environnement industriel et des risques
IQR	:	écart interquartile
LCSQA	:	Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air
LiDAR	:	téledétection par laser (en anglais : <i>Light Detection and Ranging</i>)
LPS	:	lipopolysaccharides
MBL	:	couche limite marine (en anglais : <i>marine boundary layer</i>)
NO ₂	:	dioxyde d'azote
OC	:	carbone organique
OMM	:	Organisation météorologique mondiale (en anglais : <i>World Meteorological Organization</i> (WMO))
OMS	:	Organisation mondiale de la santé (en anglais : <i>World Health Organization</i> (WHO))
ONUAA	:	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (en anglais : <i>Food and Agriculture Organization</i> (FAO))
OR	:	odds ratio
PM	:	particules en suspension dans l'air (en anglais : <i>Particulate Matter</i>)
PM ₁	:	particules en suspension dans l'air dont le diamètre aérodynamique médian est inférieur à 1 µm
PM ₁₀	:	particules en suspension dans l'air dont le diamètre aérodynamique médian est inférieur à 10 µm
PM _{2,5}	:	particules en suspension dans l'air dont le diamètre aérodynamique médian est inférieur à 2,5 µm
PNUE	:	programme des Nations Unies pour l'Environnement (en anglais : <i>United Nations Environment Programme</i> (UNEP))
PO	:	potentiel oxydant

RNS	:	espèces réactives de l'azote
ROS	:	espèces réactives de l'oxygène
RR	:	risque relatif
TC	:	carbone total
TSP	:	particules totales en suspension (en anglais : <i>total suspended particles</i>)
UE	:	Union européenne
UV	:	ultraviolet
XRD	:	diffraction des rayons X

Liste des tableaux

Tableau 1. Classification des phénomènes météorologiques	22
Tableau 2. Forme élémentaire des minéraux	32
Tableau 3. Quantités moyennes (\pm erreur standard) des espèces chimiques collectées au cours des semaines sèches (absence totale de pluie) et des semaines pluvieuses (présence de pluie) de décembre 2000 à décembre 2002	48
Tableau 4 : Définition des indicateurs sanitaires selon les codes CIM-9 et CIM-10	72
Tableau 5. Equation de recherche utilisée pour documenter la composition des particules de brumes de sable.....	147
Tableau 6. Equation de recherche utilisée pour documenter les effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé humaine	149
Tableau 7. Equation de recherche utilisée pour documenter l'impact sanitaire des brumes de sable sur la santé humaine.....	151
Tableau 8. Equation de recherche utilisée pour documenter les effets des particules de brumes de sable sur l'environnement, la faune et la flore.....	153
Tableau 9. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité totale les jours de brumes de sable et les jours sans brumes de sable en lien avec les fractions PM ₁₀ , PM _{2,5-10} et PM _{2,5}	159
Tableau 10. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité totale en distinguant les PM d'origine désertique et non désertique pour la fraction PM ₁₀	161
Tableau 11. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité cardiovasculaire les jours de brumes de sable et les jours sans brumes de sable en lien avec les fractions PM ₁₀ , PM _{2,5-10} et PM _{2,5}	162
Tableau 12. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité cardiovasculaire en distinguant les PM d'origine désertique et non désertique pour la fraction PM ₁₀	163
Tableau 13. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité respiratoire les jours de brumes de sable et les jours sans brumes de sable en lien avec les fractions PM ₁₀ , PM _{2,5-10} et PM _{2,5}	164
Tableau 14. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité respiratoire en distinguant les PM d'origine désertique et non désertique pour la fraction PM ₁₀	165
Tableau 15. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant les hospitalisations et passages aux urgences pour causes cardiovasculaires les jours de brumes de sable et les jours sans brumes de sable en lien avec les fractions PM ₁₀ , PM _{2,5-10} et PM _{2,5}	166
Tableau 16. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant les hospitalisations et passages aux urgences pour causes cardiovasculaires en distinguant les PM d'origine désertique et non désertique pour la fraction PM ₁₀	167
Tableau 17. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant les hospitalisations et passages aux urgences pour causes respiratoires les jours de brumes de sable et les jours sans brumes de sable en lien avec les fractions PM ₁₀ , PM _{2,5-10} et PM _{2,5}	168

Tableau 18. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant les hospitalisations et passages aux urgences pour causes respiratoires en distinguant les PM d'origine désertique et non désertique pour la fraction PM ₁₀	170
Tableau 19. Principaux résultats d'études expérimentales menées in vitro sur l'impact des particules de brumes de sable du Sahara sur la réponse biologique	171

Liste des figures

Figure 1. Mécanisme de formation des brumes de sable.....	23
Figure 2. Sources mondiales de brumes de sable et principales voies de transport longue distance.....	24
Figure 3. Emissions moyennes de sable et de poussière dans le monde en mars selon différents scénarios climatiques, d'après le modèle du système Terre de l'Institut de recherche météorologique	26
Figure 4. Carte de l'Afrique du Nord	30
Figure 5. Concentration massique moyenne en pourcentage de la masse totale des particules d'aérosol obtenues pour chaque élément pour les modes fins et mixtes (fins + grossiers) des brumes de sable sahariennes d'Algérie et de Mauritanie par analyse EDXRF	33
Figure 6. Composition élémentaire moyenne répartie par nombre (pourcentage) obtenue pour les échantillons de l'AMMA SOP0 B160N3, B161N3, B161N5 et B165N7 : (en haut) fraction fine (particules submicroniques) ; (en bas) fraction grossière (particules supermicroniques).....	34
Figure 7. Rétro-trajectoires de l'épisode de brumes de sable du 7 au 13 mars 2006 à Mbour (Sénégal).....	35
Figure 8. Concentration élémentaire pour chaque site.....	37
Figure 9. Abondance relative des différents groupes de particules, en fonction de la taille, pour les deux épisodes de brumes de sable.....	40
Figure 10. Composition moyenne en volume des aérosols à Praia, déterminée en fonction de la taille, Cap-Vert, 2008.	41
Figure 11. Distribution granulométrique massique des éléments traces pendant les épisodes de brumes de sable (SD) et hors épisodes de brumes de sable (non-SD).....	44
Figure 12. Rapports de concentration élément/Si (pour les éléments : Na, Mg, Al, K, Ca et Fe) des échantillons de brumes de sable collectés (secs et humides) à la station d'Akrotiri, en Crète	47
Figure 13. Genres les plus abondants (>1%) dans les échantillons SH1, SH2 et NW.	57
Figure 14. Carte de localisation des principaux sites d'essais nucléaires atmosphériques entre 1945 et 1980	62
Figure 15. Répartition mondiale des retombées de strontium-90 en fonction de la latitude...63	
Figure 16. Minéralogie des brumes de sable selon les régions du monde. Teneur en différents groupes minéraux, en % massique.....	65
Figure 17. Evolution des moyennes journalières mesurées et corrigées sur le site de Renévill en 2021	68
Figure 18. Concentrations journalières des espèces chimiques majeures des PM ₁₀ du 28/11 au 07/12 2018 (absence de brumes de sable) et du 04/08 au 13/08 2018 (fort épisode de brumes de sable).....	69
Figure 19. Evolution des moyennes journalières mesurées et ajustées sur le site de Marseille Rabatau en 2022.....	70
Figure 20 : Risques relatifs de la mortalité toutes causes pour une exposition à un incrément de 10 µg/m ³ de PM ₁₀ les jours avec ou sans brumes de sable au lag (1). Variable binaire	

d'exposition aux brumes de sable considérée en tant que modificateur de l'impact sanitaire des PM ₁₀ .	76
Figure 21 : Risques relatifs de la mortalité toutes causes pour une exposition à un incrément de 10 µg/m ³ de PM ₁₀ désertiques ou locales au lag 0-1, 0 ou 1. Variable continue d'exposition aux brumes de sable utilisée dans un modèle à 2 sources (PM ₁₀ désertiques/PM ₁₀ non désertiques).	77
Figure 22 : Risques relatifs de la mortalité cardiovasculaire pour une exposition à un incrément de 10 µg/m ³ de PM ₁₀ les jours avec ou sans brumes de sable au lag (1). Variable binaire d'exposition aux brumes de sable considérée en tant que modificateur de l'impact sanitaire des PM ₁₀ .	79
Figure 23 : Risques relatifs de la mortalité respiratoire pour une exposition à un incrément de 10 µg/m ³ de PM ₁₀ les jours avec ou sans brumes de sable au lag (1). Variable binaire d'exposition aux brumes de sable considérée en tant que modificateur de l'impact sanitaire des PM ₁₀ .	83
Figure 24. Evolution des brumes de sable au cours de leur transport.	94
Figure 25. Evaluation comparée, à partir de différents indicateurs, de la toxicité intrinsèque des particules issues de différentes sources d'émission.	95
Figure 26. Relation entre les différents constituants des brumes de sable et les réponses biologiques	96
Figure 27. Schématisation des principales conditions expérimentales mises en œuvre pour évaluer la toxicité des particules de brumes de sable	97
Figure 28. Relation entre la concentration en particules de montmorillonite et la mort cellulaire par apoptose ou nécrose.	99
Figure 29. Représentation des voies de signalisation mises en place dans l'inflammasome NLRP3 lors d'expositions aux particules environnementales	101
Figure 30. Représentation d'une exposition à l'interface air-liquide (Cloud12©, Vitrocell™ d'une co-culture de cellules humaines : cellules alvéolaires (A549) – cellules immunitaires (THP1)	103
Figure 31. Structure et fonctionnement de l'inflammasome NLRP3	104
Figure 32. Nombre d'articles inclus dans ce rapport traitant des différents écosystèmes et thématiques environnementales.	108
Figure 33. Schéma représentatif des milieux où se déposent les brumes de sable, et les principaux phénomènes impactés par leurs apports.	118
Figure 34. Diagramme de flux correspondant à l'équation de recherche utilisée pour documenter la composition des particules de brumes de sable	148
Figure 35. Diagramme de flux correspondant à l'équation de recherche utilisée pour documenter les effets des brumes de sable sur la santé humaine.	150
Figure 36. Diagramme de flux correspondant à l'équation de recherche utilisée pour documenter l'impact sanitaire des brumes de sable	152
Figure 37. Diagramme de flux correspondant à l'équation de recherche utilisée pour documenter les effets des brumes de sable sur l'environnement, la faune et la flore.	154
Figure 38. Schéma représentant la couche limite	155

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte

Comme le souligne l'Organisation mondiale de la santé (OMS) dans ses lignes directrices sur la qualité de l'air publiées en 2021, la gestion des tempêtes de sable et de poussière est devenue une priorité croissante au sein de la communauté mondiale (WHO 2021, p152). Ces tempêtes de sable et de poussière sont des phénomènes météorologiques fréquents dans les régions arides et semi-arides. Ils surviennent en général lorsque des vents forts soulèvent dans l'atmosphère, du fait d'orages ou de dépressions, de grandes quantités de sable et de poussière. Ils impactent non seulement les régions sources et les régions situées à proximité, mais également des régions plus éloignées dû au transport des brumes de sable sur de longues distances, pouvant atteindre des centaines voire des milliers de kilomètres.

Il existe différents foyers de brumes de sable dans le monde avec des origines différentes. Les déserts situés dans l'hémisphère Nord en sont la source principale, au sein d'une zone géographique s'étendant de l'Afrique du Nord à l'Asie. D'autres sources sont moins actives, notamment en Amérique du Sud, en Afrique du Sud ou en Australie. Les tempêtes de sable et de poussière peuvent également survenir sur des terres agricoles dénudées, comme cela a pu être observé aux États-Unis en 2022 (OMM 2023), ou encore des lacs asséchés.

Fréquents aux Antilles et en Guyane, ces phénomènes naturels de brumes de sable peuvent également survenir en France métropolitaine, et entraînent une pollution de l'air qui se manifestent notamment par un ciel jaune/orangé et des dépôts de particules. Lors de ces phénomènes, une augmentation des concentrations en particules, et plus particulièrement de la fraction PM₁₀* (voir Annexe 3. Glossaire), est observée (Madininair 2021).

Dans le contexte actuel où le changement climatique pourrait être un facteur potentiel de l'augmentation des émissions de brumes de sable et de la fréquence des épisodes associés, il apparaît nécessaire d'actualiser les connaissances concernant de tels épisodes de pollution de l'air ambiant et de leurs effets sanitaires.

1.2 Objet de la saisine

Dans ce contexte, et comme indiqué dans le courrier de saisine (Annexe 1), il est demandé à l'Anses de :

1. « Documenter la composition des tempêtes de sable et de poussière et plus particulièrement celles touchant la France, et les comparer à la composition des particules habituellement présentes dans l'air ambiant de ces territoires.
2. Caractériser l'impact des tempêtes de sable et de poussière sur les concentrations en particules dans l'air extérieur en France et notamment en métropole d'une part, et aux Antilles-Guyane d'autre part, et le comparer à l'impact de la pollution atmosphérique en dehors des périodes de tempêtes des sables. En fonction des données disponibles, cette caractérisation pourra être élargie à d'autres polluants jugés pertinents.
3. Réaliser une revue bibliographique des effets sur la santé humaine liés à l'exposition à la pollution de l'air ambiant résultant des tempêtes de sable et de poussière, et

l'identification des personnes sensibles. Dans un esprit One Health, il est également demandé de préciser succinctement les effets connus de ces tempêtes sur l'environnement, la flore (notamment concernant le développement des algues sargasses) et la faune.

4. Formuler des recommandations en précisant, le cas échéant, les actions de gestion pouvant être mises en œuvre (au niveau local ou national et en particulier les recommandations aux populations) ainsi que les seuils de gestion apparaissant adaptés. Il est à noter qu'il existe déjà des seuils de gestion pour les particules PM₁₀ (pouvant notamment être constituées de sable et de poussières) dans le dispositif national, permettant de déclencher, le cas échéant, des mesures d'urgence : l'articulation des propositions avec ce dispositif pourrait être utilement explicitée. »

Au regard des échanges ayant eu lieu lors de la réunion du Comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » du 13 novembre 2023, la question 2 portant sur la caractérisation de l'impact des tempêtes de sable et de poussière a été précisée et scindée en deux demandes distinctes :

- Caractériser l'impact des brumes de sable sur les concentrations en particules dans l'air extérieur en France (en métropole et aux Antilles-Guyane) ;
- Comparer les effets sanitaires de la pollution particulaire due aux brumes de sable à ceux de la pollution particulaire en dehors de ces épisodes de brumes de sable (en analysant la relation concentration-risque).

En fonction des données disponibles, cette caractérisation de l'impact des brumes de sable (sur les concentrations en particules et les effets sanitaires) pourra être élargie à d'autres polluants jugés pertinents au cours de l'expertise.

Concernant le point 4 relatif à la formulation des recommandations, l'Anses propose d'effectuer, le cas échéant, une mise en perspective des seuils d'information / recommandation et d'alerte proposés par les autorités publiques pour les particules de l'air ambiant – PM₁₀ – avec les données de la littérature épidémiologique et toxicologique relatives aux brumes de sable, notamment en termes de composition et granulométrie.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine.

Pour répondre aux questions posées, huit experts rapporteurs ont été mandatés par l'Agence pour participer à la recherche et à l'analyse critique des données recueillies ainsi qu'à la rédaction du rapport d'expertise. Ils ont été missionnés sur un axe de travail selon leurs compétences : composition ; effets sur la santé humaine ; effets sur l'environnement, la faune et la flore. Trois agents de l'Anses, en charge de la coordination scientifique de cette expertise, ont également contribué à ces travaux.

Les travaux d'expertise des rapporteurs ont été soumis régulièrement au CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens », tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre juin 2024 et avril 2025. Le rapport produit par les experts rapporteurs tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) ».

1.4 Méthodologie mise en œuvre

1.4.1 Méthodologie générale

Pour répondre aux questions de l'expertise, la première étape a été l'identification des rapports institutionnels sur le sujet des brumes de sable : les publications d'organismes nationaux (Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA)...) et internationaux (Organisation mondiale de la santé (OMS – WHO en anglais), Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE – UNEP en anglais), Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD – UNCCD en anglais)...).

Ensuite, une revue de la littérature scientifique a été réalisée afin de compléter les données relatives à la composition et aux effets sanitaires des brumes de sable issues des rapports institutionnels. Des consultations d'organismes français ont permis de compléter les données françaises.

1.4.2 Revue de la littérature

Suite à la première phase, plusieurs revues de la littérature scientifique ont été réalisées. La construction de l'équation de recherche était scindée en deux blocs de mots clés :

- Un bloc commun à toutes les équations de recherche concernant la qualification / définition des brumes de sable ;
- Un bloc spécifique à la question traitée.

Chaque équation de recherche a été formulée avec l'appui des experts rapporteurs et du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens ». Selon les données disponibles, les revues de la littérature ont été menées sur des périodes de temps différentes, soit pour identifier des revues ou des articles originaux (détails en Annexe 2). Chaque équation de recherche a fait l'objet d'une veille jusqu'en fin avril 2025.

▪ Composition et impacts sur les concentrations en particules

Aucun rapport institutionnel n'a été identifié pour cette question de l'expertise.

Les mots clés ont été recherchés sur titre uniquement, sans limite de date, dans les bases de données Scopus et PubMed. Les publications ont été identifiées puis sélectionnées sur titre et résumé par un relecteur, avec consultation de trois autres en cas d'indécision.

Les critères d'inclusion pour la phase de sélection étaient les suivants :

- Zone géographique : inclusion des études concernant les brumes de sable originaires d'Afrique du Nord ;
- Études de la composition s'appuyant sur des prélèvements de brumes de sable.

Une analyse critique des publications sélectionnées a été réalisée en utilisant une grille de lecture. Cette grille de lecture était adaptée au contexte de l'expertise avec des critères

spécifiques : stratégie d'échantillonnage, données métrologiques, techniques d'analyse, liens d'intérêt potentiels des auteurs...

Les raisons d'exclusion lors de la phase d'éligibilité étaient les suivantes :

- Source des brumes de sable qui n'est pas clairement établie (par exemple au Moyen-Orient, les sources sont souvent sahariennes et locales) ;
- Pas d'informations sur la stratégie d'échantillonnage et/ou d'analyse.

Les quatre relecteurs se sont partagés la lecture intégrale des articles et les grilles de lecture complétées ont été mises en commun afin de valider ou non l'inclusion des publications.

▪ Effets sur la santé humaine

La publication de OMS sur les lignes directrices relatives à la qualité de l'air a été identifiée comme pertinente et de qualité pour répondre à cette question de l'expertise (WHO 2021). En effet, dans le cadre de cette publication, trois revues de la littérature avaient été réalisées (A. Tobías *et al.* 2019; Querol *et al.* 2019; Fussell et Kelly 2021). Elles ont été évaluées de bonne qualité et répondant à la question de l'expertise.

De ce fait, et en raison du nombre de publications existantes sur le sujet, l'équation de recherche appliquée dans le cadre de cette expertise avait pour objectif l'identification de revues (systématiques, narratives, méta-analyses...) publiées depuis 2017 dans les bases de données Scopus et PubMed. Cette date a été choisie pour actualiser les données des revues de la littérature pertinentes les plus récentes identifiées (A. Tobías *et al.* 2019).

Les publications ont été identifiées puis sélectionnées sur titre et résumé par un relecteur, avec consultation de quatre autres en cas d'indécision. Les critères d'inclusion étaient les suivants : tout type de revue analysant les effets sur la santé humaine des brumes de sable originaires d'Afrique du Nord (exclusivement sur cette région ou non).

Les étapes d'éligibilité et d'inclusion ont été réalisées sur texte intégral en double aveugle. Les désaccords ont été levés lors d'échanges entre les deux relecteurs avec l'appui d'un troisième relecteur. Une analyse de la qualité des revues a été réalisée à l'aide de différentes grilles d'analyse selon la nature de la revue concernée. Les grilles AMSTAR 2, MOOSE et SANRA ont été adaptées aux besoins de l'expertise (Shea *et al.* 2017; Stroup *et al.* 2000; Baethge, Goldbeck-Wood, et Mertens 2019).

Les données permettant de répondre à la question de l'impact sanitaire des brumes de sable étant insuffisante, une seconde équation de recherche a été appliquée. Elle était identique à la première mais concernait les articles originaux publiés depuis 2019. L'objectif était de compléter les données obtenues lors de la première recherche. Pour la période antérieure à 2019, les études individuelles pertinentes pour cette question ont été recherchées parmi celles incluses pour l'Afrique dans l'étude de portée de Lwin *et al.* (2023) qui avait été identifiée grâce à la première requête.

▪ Effets sur l'environnement, la faune et la flore

Deux rapports institutionnels pertinents ont été identifiés pour répondre à cette question de l'expertise : un rapport du PNUE concernant l'impact des tempêtes de sable et de poussière sur les océans et un rapport de la CNULCD (UNEP 2020; UNCCD 2022).

Une équation de recherche a été appliquée dans les bases de données Scopus, CABI et PubMed pour identifier les revues publiées depuis 2017 (afin d'harmoniser avec la partie concernant les effets sanitaires). La même équation de recherche a été utilisée pour identifier

les articles originaux publiés depuis 2024 afin de compléter les revues pertinentes les plus récentes identifiées en premier lieu. Les étapes de tri et de sélection ont été réalisées par un relecteur sur titre et résumé. Pour être sélectionnées, les publications devaient concerner les brumes de sable originaires d'Afrique du Nord et les effets sur l'environnement et/ou la faune et/ou la flore. Les étapes d'éligibilité et d'inclusion ont été réalisées par un relecteur sur texte intégral. Si besoin, un autre relecteur pouvait être consulté.

1.4.3 Consultations

Le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA), la fédération Atmo France et l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR) ont été contactés afin d'obtenir davantage d'informations sur la composition et l'impact sur les concentrations en particules des brumes de sable.

1.5 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

2 Préambule sur les particules issues du phénomène naturel de brumes de sable

2.1 Définitions et terminologies existantes

Les tempêtes de sable et de poussière sont un phénomène météorologique défini comme « un ensemble de particules de poussière ou de sable puissamment soulevées du sol par un vent fort et turbulent, jusqu'à de grandes hauteurs » par l'Organisation météorologique mondiale (OMM 2017). Il n'existe pas de distinction stricte entre les tempêtes de sable et les tempêtes de poussière, étant donné qu'ils désignent un ensemble de particules concernées par le phénomène.

Toutefois, cette terminologie est parfois utilisée pour caractériser différents phénomènes météorologiques liés à la remise en suspension de particules de sable ou de poussière qui ne correspondent pas à sa définition stricte. En effet, différents phénomènes météorologiques peuvent être liés à la mise en suspension de particules de sable ou de poussière (Tableau 1).

Tableau 1. Classification des phénomènes météorologiques

Phénomène météorologique	Définition
Tourbillon de poussière ou de sable (en anglais <i>dust whirl</i> , <i>sand whirl</i> ou <i>dust devil</i>)	Ensemble de particules de poussière ou de sable, accompagnées parfois de petits débris, soulevées du sol sous forme d'une colonne tourbillonnante de hauteur variable, à l'axe sensiblement vertical de faible diamètre.
Tempête de poussière ou de sable (en anglais <i>dust storm</i> ou <i>sandstorm</i>)	Ensemble de particules de poussière ou de sable puissamment soulevées du sol par un vent fort et turbulent, jusqu'à de grandes hauteurs.
Chasse-poussière ou chasse-sable (en anglais <i>drifting or blowing dust</i> or <i>sand</i>)	Ensemble de particules de poussière ou de sable soulevées du sol à des hauteurs faibles ou modérées, sur le lieu d'observation ou dans son voisinage, par un vent suffisamment fort et turbulent. Peuvent être basses (la visibilité à 1,80 m du sol n'est pas sensiblement réduite) ou élevées (la visibilité à 1,80 m du sol est sensiblement réduite).
Brumes de sable (en anglais <i>dust haze</i>)	Suspension dans l'atmosphère de poussières ou de petites particules de sable, qui ont été soulevées du sol, antérieurement au moment de l'observation, par une tempête de poussière ou de sable qui peut s'être produite soit sur le lieu d'observation ou à proximité, soit loin de ce dernier.

Source : (OMM 2017).

Ainsi, alors que les trois premiers phénomènes concernent un ensemble de particules soulevées du sol par le vent, le quatrième phénomène, les brumes de sable, correspond à des particules en suspension ayant été soulevées antérieurement par le vent. En français, de nombreux termes ont été recensés pour faire référence à ce phénomène de brumes de sable : poussières de sable, poussières atmosphériques, poussières désertiques ou encore poussières minérales.

Il est important de noter que ces phénomènes sont également connus sous de nombreux noms locaux selon la région du monde (UNCCD 2023) : harmattan, haboob, sirocco, poussière jaune, poussière asiatique, tempêtes blanches ...

Même si ces phénomènes peuvent avoir pour origine la mise en suspension de particules provenant de différents types de sols (déserts, lacs asséchés, terres agricoles, etc.), ce rapport considère essentiellement les **phénomènes naturels de brumes de sable d'origine désertique**.

2.2 Généralités sur le phénomène naturel de brumes de sable

Les brumes de sable sont un phénomène météorologique mondial et transfrontalier. Chaque année, environ 2 milliards de tonnes de sable et de poussière se retrouvent dans l'atmosphère (CNULCD 2023).

La formation des brumes de sable suit un processus en trois phases : l'entraînement ou l'émission de matériaux de surface (généralement par les tempêtes de sable et de poussière), leur transport dans l'atmosphère et leur dépôt (Figure 1, de droite à gauche). Les tempêtes de sable et de poussière sont formées par des vents forts et turbulents soulevant un ensemble de particules de sable et de poussière du sol, ce qui est qualifié ici d'émission. Ces particules parcourent ensuite des distances pouvant atteindre plusieurs milliers de kilomètres (OMM 2017). Par exemple, Grousset *et al.* (2003) ont documenté un épisode exceptionnel en mars 1990 : des brumes de sable originaires des déserts de Chine ont voyagé 20 000 kilomètres à travers le Pacifique Nord, l'Amérique du Nord puis l'Atlantique Nord, avant d'atteindre les Alpes françaises. Cette distance varie en fonction de la taille des particules et des conditions météorologiques (force et direction des vents, humidité...). Les brumes de sable peuvent ensuite se déposer par gravitation (dépôts secs) et par précipitation avec la pluie (dépôts humides).

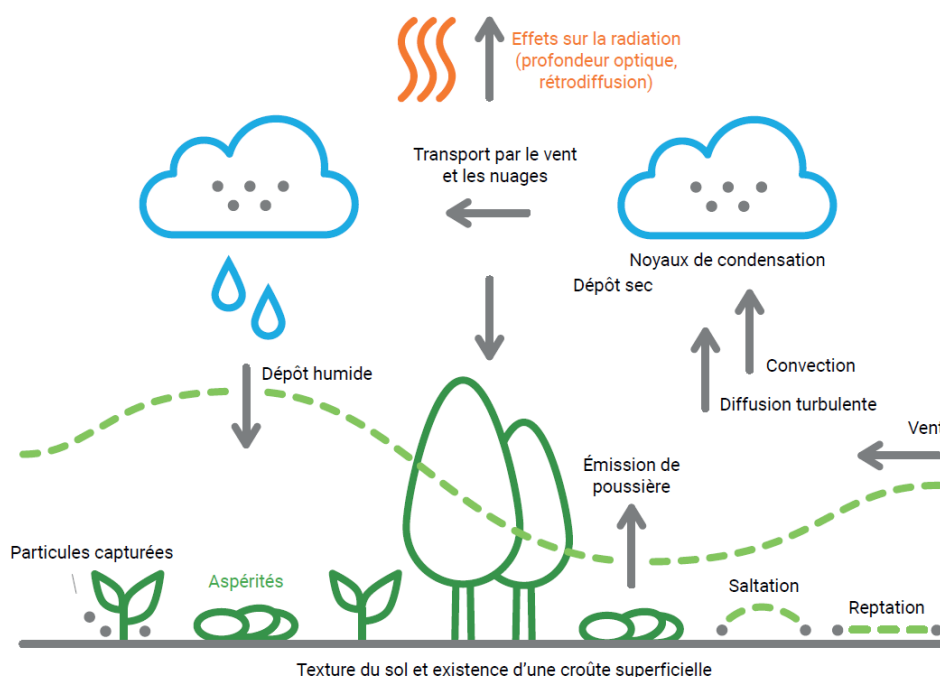


Figure 1. Mécanisme de formation des brumes de sable

Source : (UNCCD 2022), adapté de Lu et Shao, 2001.

Il existe différents foyers sources de brumes de sable dans le monde, pouvant être liés directement à des activités humaines (usage agricole des terres, assèchement des sols, déforestation...) ou non (déserts, lacs asséchés...).

A l'échelle mondiale, les principales sources de brumes de sable se situent dans l'hémisphère Nord : Afrique du Nord (notamment le désert du Sahara), Moyen-Orient, Asie Centrale et du Sud. Des sources moins émissives et de plus petites étendues sont également présentes dans l'hémisphère Sud, notamment en Amérique du Sud, en Afrique australe et en Australie. D'après Ginoux *et al.* (2012), si l'on adopte une valeur de 30 % d'utilisation de la surface des sols comme seuil pour séparer les sources naturelles et anthropiques, 75 % des épisodes de brumes de sable sont dus à des sources naturelles et 25 % à l'activité humaine.

Le transport des brumes de sable suit différentes voies depuis les foyers évoqués ci-dessus (Figure 2).

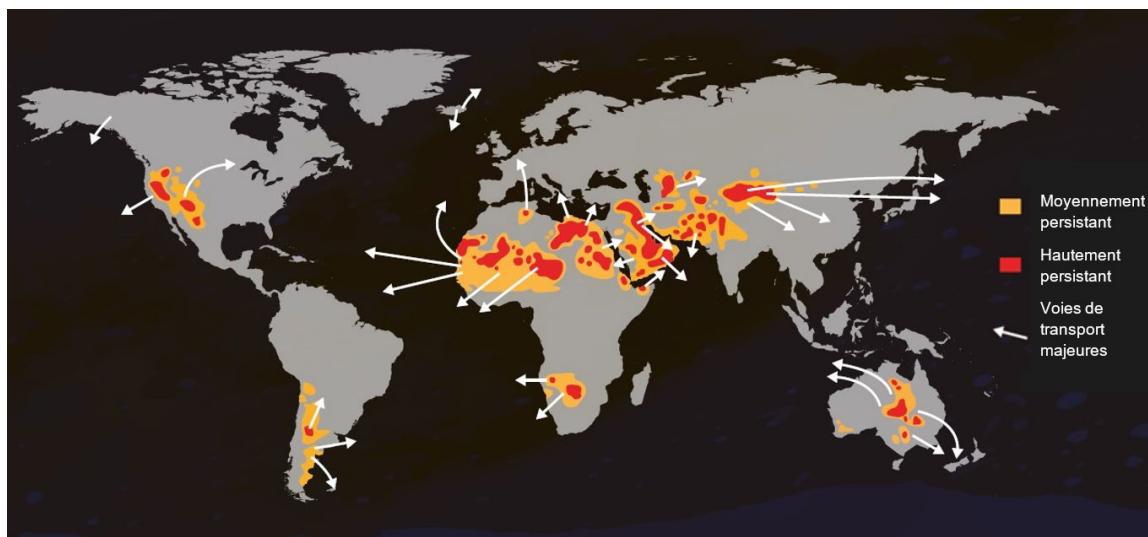


Figure 2. Sources mondiales de brumes de sable et principales voies de transport longue distance

Source : (FAO 2023), adapté de Muhs, D.R., Prospero, J.M. Baddock, M.C. & Gill, T.E. 2014. Identifying sources of aeolian mineral dust: present and past. In: *Mineral dust*, pp. 51-74. Dordrecht, Germany, Springer.

La source naturelle de brumes de sable la plus importante à l'échelle mondiale provient du désert du Sahara. Une fois formées, elles sont principalement transportées dans quatre directions (UNEP, WMO, et UNCCD 2016) :

- Vers le sud-ouest : vers le Golfe de Guinée, la Côte d'Ivoire et le Ghana ;
- Vers l'ouest : au-dessus de l'océan Atlantique Nord vers les îles Canaries, l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud ;
- Vers le nord : au-dessus de la mer Méditerranée vers le sud de l'Europe et même vers la Scandinavie et la Baltique ;
- Vers l'est : au-dessus de la mer Méditerranée jusqu'au Moyen-Orient et jusqu'à l'Himalaya, l'Asie de l'Est et le Japon.

D'après les conclusions du rapport *Global Assessment of Sand and Dust Storms* (UNEP, WMO, et UNCCD 2016), le transport vers l'ouest est le flux le plus important, représentant 30 à 50 % des émissions, avec un transport sur de longues distances. Environ 20 millions de tonnes de sable d'origine saharienne se déposent chaque année dans les Caraïbes (UNEP, WMO, et UNCCD 2016). Le transport transatlantique de ces brumes de sable dure généralement cinq à sept jours. Il est lié aux alizés et est donc plus susceptible de se produire au printemps, en été et au début de l'automne (Copernicus 2022).

Le transport vers l'Europe représente environ 80 à 120 millions de tonnes de brumes de sable par an, déposées principalement avec les précipitations (UNEP, WMO, et UNCCD 2016). Il est plus actif au début du printemps (Copernicus 2022). Concernant la France métropolitaine, deux configurations principales sont observées (Ineris 2025) :

1. « Des panaches qui traversent l'Espagne et franchissent les Pyrénées avec une partie en basse couche qui contourne le massif et qui vont ensuite balayer le territoire avec potentiellement des effets ressentis sur tout le pays ;
2. Des panaches qui arrivent par la Méditerranée et vont parcourir le territoire plus ou moins profondément selon l'intensité des vents. Ces masses d'air chargées en poussières désertiques auront alors principalement un effet sur la Corse ou plus largement sur les régions du littoral méditerranéen. »

Comme indiqué dans le bulletin de l'OMM sur les poussières atmosphériques (OMM 2023), les tempêtes de sable et de poussière ont des impacts variés sur la société, les écosystèmes, le temps et le climat. Par exemple, elles peuvent avoir divers impacts sur l'environnement, la faune et la flore (§ 5) : dynamiques atmosphériques, formation des nuages, impact sur les écosystèmes marins, accélération de l'aridification, fertilisation des sols...

Le changement climatique pourrait être un facteur potentiel de l'augmentation des émissions à l'origine des brumes de sable, en particulier du fait de la désertification et de l'apparition d'événements éoliens plus extrêmes. Cependant, des effets inverses, comme une augmentation des précipitations dans des régions telles que l'Afrique de l'Est ou l'Asie de l'Est, sont également possibles (UNEP, WMO, et UNCCD 2016).

Peu de modèles numériques ou de projections prennent en compte les interactions entre les tempêtes de sable et de poussière et les changements climatiques. Les travaux de Maki *et al.* (2022) étudient les émissions mondiales à l'origine de brumes de sable dans le cadre de trois scénarios (SSP1, SSP2, SSP3) de réchauffement climatique sur une période allant de 2091 à 2100, par rapport à une période de référence (2015-2024), basés sur des trajectoires socio-économiques partagées¹ (SSP) (Figure 3). Les auteurs s'intéressent au mois de mars, période où les effets du changement climatique sont les plus prononcés.

¹ Les trajectoires socio-économiques partagées, en anglais *shared socioeconomic pathways* (SSP), sont cinq scénarios d'évolution socio-économiques mondiales. Ils permettent de prendre en compte, entre autre, le produit intérieur brut (PIB), la population, l'urbanisation, le développement technologique, etc. Les SSP ont notamment été utilisés dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC sur le réchauffement climatique (IPCC 2021). Pour plus d'informations : <https://carbhone4.com/fr/publication-scenarios-ssp-adaptation>.

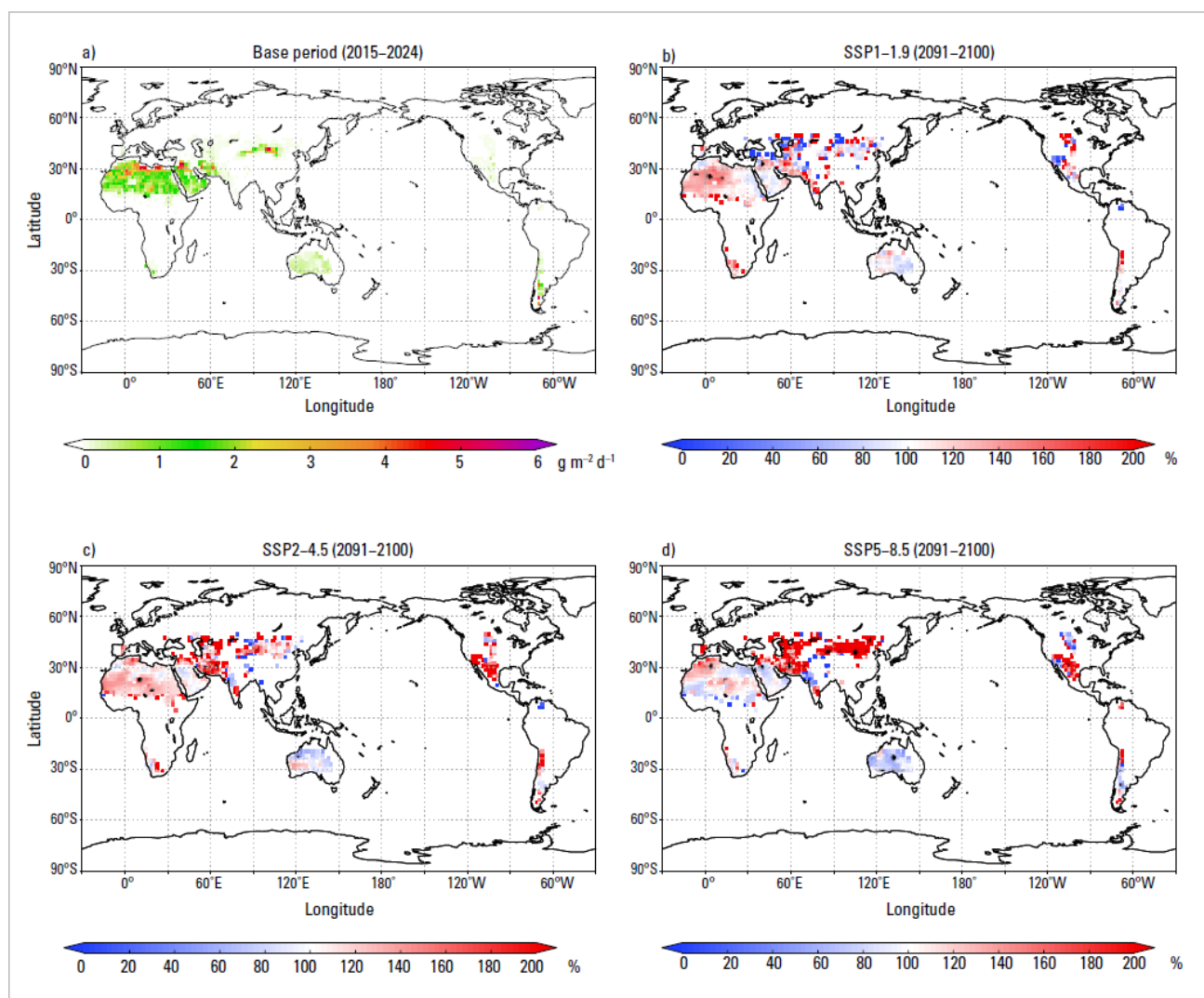


Figure 3. Emissions moyennes de sable et de poussière dans le monde en mars selon différents scénarios climatiques, d'après le modèle du système Terre de l'Institut de recherche météorologique

a) Émissions moyennes pendant la période de référence (2015-2024) pour toutes les expériences (25 membres). b)-d) Rapport entre les valeurs de la période de référence (2015-2024) et les émissions moyennes futures (2091-2100) dans les scénarios. b) SSP1-1.9, c) SSP2-4.5 et d) SSP5-8.5. La moyenne de cinq membres de l'ensemble est indiquée pour chaque scénario. Les teintes bleues indiquent une baisse des émissions par rapport à la période de référence, les teintes rouges une hausse des émissions par rapport à la période de référence. Les zones ombrées indiquent les régions statistiquement significatives ($p < 0,05$ dans le test t).

Source : (OMM 2023), adapté de Maki *et al.* 2022.

L'écart entre la période de référence (2015-2024) et la période future (2091-2100) montre une hausse très importante des émissions à l'origine de brumes de sable en provenance des déserts de Gobi et du Taklamakan, de l'Asie orientale à l'Asie centrale, quel que soit le scénario de réchauffement climatique. Cela pourrait être dû à la diminution de la couverture neigeuse dans la région qui engendrerait une augmentation des surfaces émettrices de brumes de sable. En partie car il n'est pas concerné par ce phénomène à cause de la faible couverture neigeuse de la région, ces effets pourraient être moins marqués dans le Sahara qu'en Asie (OMM 2023).

Néanmoins, des changements dans les schémas de circulation atmosphérique pourraient impacter la saisonnalité des épisodes de brumes de sable, en augmentant l'intensité et la fréquence d'épisodes hivernaux originaires du Sahara, jusqu'alors largement minoritaires (Copernicus 2024). Tout en reconnaissant une forte variabilité, une étude récente menée sur le bassin ouest de la Méditerranée montre une nette augmentation des concentrations de particules liée aux phénomènes de brumes de sable et de leur altitude maximale de transport au cours des hivers 2020-2022 par rapport aux années précédentes (2003-2019) (Cuevas-Agulló *et al.* 2024).

Plus globalement, dans son rapport de 2021, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) conclut qu'en raison du peu de données disponibles, le rôle des aérosols provenant des tempêtes de sable et de poussière dans les événements climatiques soudains, qui se produiront au cours du siècle prochain, n'est pas certain. Les émissions de sable et de poussière étant sensibles à la variabilité du climat (par exemple, par le biais de changements dans l'étendue des terres arides), le GIEC émet l'hypothèse que la rétroaction climat-poussière pourrait être une boucle de rétroaction² importante dans le système climatique (IPCC 2021).

2.3 Contexte réglementaire

Dans un contexte français, et plus largement des pays membres de l'Union européenne (UE), les brumes de sable sont concernées par la réglementation relative à la qualité de l'air. Elles ne font pas l'objet d'une réglementation spécifique mais sont prises en compte dans la réglementation relative à la surveillance de la qualité de l'air (Articles R 221-1 à R221-3 du code de l'environnement), notamment via la surveillance des particules (PM*, voir Annexe 3. Glossaire)³.

La directive (UE) 2024/2881 du 23 octobre 2024 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe⁴, publiée le 20 novembre 2024, fixe de nouvelles normes et seuils réglementaires de qualité de l'air à respecter en 2030. Elle permet la refonte des directives 2004/107/CE du 15 décembre 2004 et 2008/50/CE du 21 mai 2008 actuellement en vigueur et vise à « améliorer encore la qualité de l'air et à aligner plus étroitement les normes de l'Union en la matière sur les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) » (Directive (UE) 2024/2881).

En effet, le choix des valeurs réglementaires à l'horizon 2030 s'appuie sur les dernières lignes directrices proposées par l'OMS dans son rapport de 2021 (WHO 2021) et plus précisément sur les niveaux intermédiaires proposés. Les valeurs guides et niveaux intermédiaires proposés par l'OMS ne sont pas juridiquement contraignantes mais constituent un outil fondé

² « Les boucles de rétroaction climatique se produisent lorsqu'un changement climatique déclenche d'autres changements, dans une réaction en chaîne qui se renforce au fil du temps. » Source : <https://climatepromise.undp.org/fr/news-and-stories/le-dictionnaire-du-climat-un-guide-pratique-sur-le-changement-climatique>

³ Plus précisément, les conventions PM₁₀ et PM_{2,5} désignent des particules de taille suffisamment petite pour traverser une tête de prélèvement sélective de fraction granulométrique, avec une efficacité de coupure de 50 % pour un diamètre aérodynamique de 10 µm ou 2,5 µm. De ce fait, si PM₁₀ et PM_{2,5} incluent une grande partie de particules de tailles inférieures à 10 µm ou à 2,5 µm, elles incluent également de particules de tailles supérieures à 10 µm ou 2,5 µm en faible proportion.

⁴ (Directive (UE) 2024/2881 du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2024 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe (refonte) 2024)

sur des données scientifiques afin de protéger les populations des effets nocifs de la pollution atmosphérique.

Les États membres de l'Union européenne ont jusqu'au 11 décembre 2026 pour transposer cette directive dans leur droit national et les directives 2004/107/CE et 2008/50/CE sont abrogées avec effet au 12 décembre 2026. Même si les brumes de sable ne font pas l'objet de procédures ou de seuils ou normes réglementaires de qualité de l'air spécifiques, leur contribution aux concentrations en particules dans l'air ambiant est un enjeu majeur pour le respect de la réglementation (concernant concentrations moyennes journalières ou annuelles). En effet, la contribution de sources naturelles dans le nombre de dépassements de la valeur limite exprimée en moyenne journalière en PM₁₀ ne doit pas être considéré comme un dépassement au sens des directives européennes si les États membres peuvent en prouver leur imputabilité. De ce fait, la contribution des brumes de sable aux concentrations en PM₁₀ a été démontrée plusieurs fois, que ce soit en France métropolitaine ou en Martinique, par le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA) (Létinois, Meleux, et Favez 2021; Létinois 2022; Létinois *et al.* 2024) d'après une méthodologie recommandée par la Commission européenne (European Commission 2011).

De plus, la France est actuellement visée par deux procédures contentieuses au niveau européen et une procédure contentieuse au niveau national⁵. Dans les deux cas, cela est dû au non-respect des seuils ou normes réglementaires de qualité de l'air pour la protection de la santé définis par la directive 2008/50/CE, notamment pour le dioxyde d'azote (NO₂) et les PM₁₀ pour certaines zones du territoire français.

⁵ Plus d'informations dans le Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2023 (2024), p54-55.
URL :

3 Pollution de l'air liée aux brumes de sable

3.1 Composition des particules de brumes de sable

La composition des brumes de sable est variable et dépend de deux facteurs majeurs : la zone géographique d'origine et la voie de transport empruntée. En effet, comme évoqué en préambule (§ 2), ce phénomène est engendré par la remise en suspension de particules puis leur transport sur de plus ou moins longues distances.

La France métropolitaine, les Antilles et la Guyane sont presque exclusivement affectées par des phénomènes naturels de brumes de sable originaires d'Afrique du Nord. Un épisode de transport intra-européen en provenance des terres agricoles d'Ukraine vers l'Europe de l'Ouest a été documenté en 2007 mais demeure une exception (Bessagnet *et al.* 2008; Birmili *et al.* 2008).

L'Afrique du Nord n'est pas une zone homogène et certaines régions sont plus émettrices de particules de sable et de poussières à l'origine de brumes de sable que d'autres. Elle est communément scindée en « *potential (or preferential) sources areas* » (PSAs) dans la littérature, que l'on pourrait traduire en « zones sources potentielles », afin de permettre une définition plus fine des foyers de brumes de sable. Une revue de (Scheuvers *et al.* 2013) propose une cartographie des 6 zones sources d'Afrique du Nord régulièrement mentionnée dans d'autres études (Figure 4) :

- PSA 1 : Tunisie et nord de l'Algérie, y compris la « zone des chotts⁶ » ;
- PSA 2 : contreforts de l'Atlas (PSA 2a) et région côtière occidentale (PSA 2b ; Sahara occidental, Mauritanie occidentale) ;
- PSA 3 : sud de l'Algérie et nord du Mali ;
- PSA 4 : Libye centrale ;
- PSA 5 : Tchad occidental, y compris la dépression du Bodélé ;
- PSA 6 : sud de l'Égypte, nord du Soudan.

⁶ En Afrique du Nord, terre salée qui entoure une dépression de terrain renfermant ou ayant renfermé un lac salé.

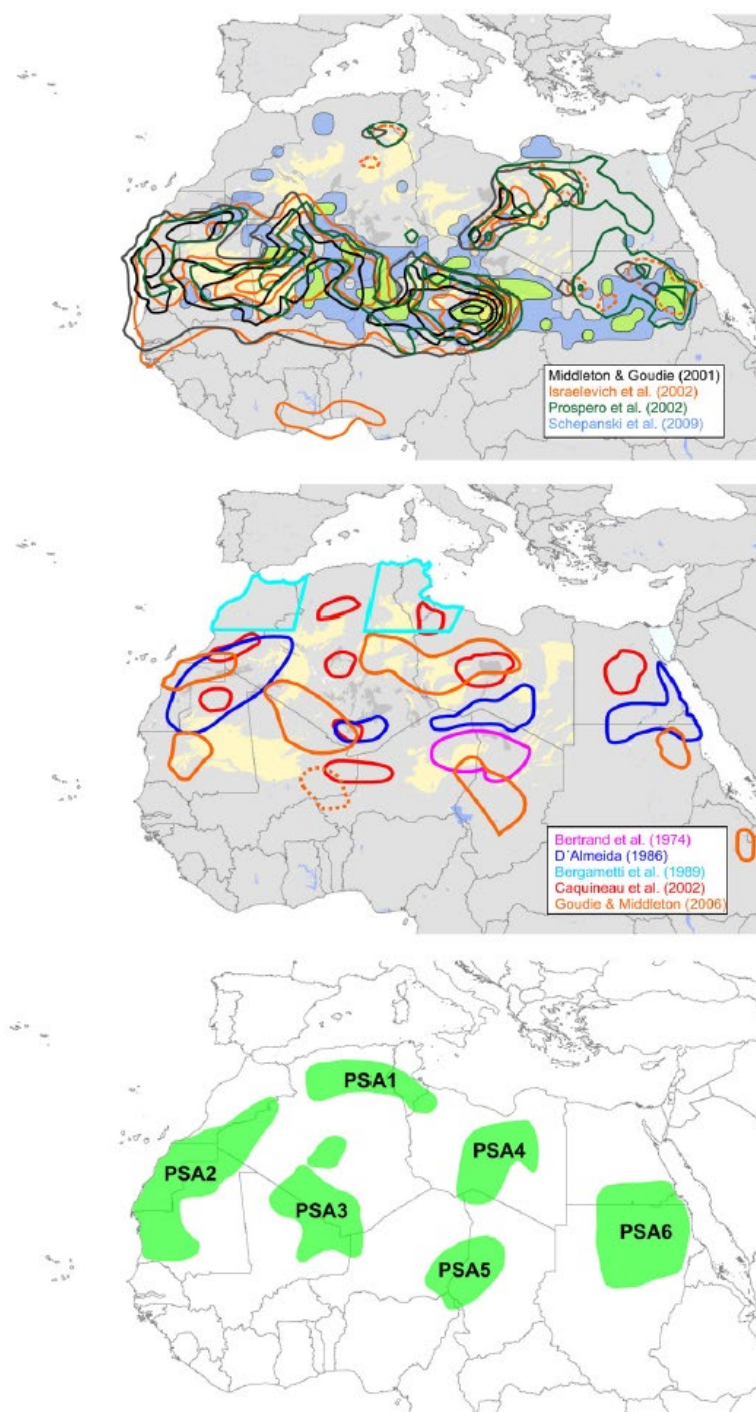


Figure 4. Carte de l'Afrique du Nord

Cartes de l'Afrique du Nord a) avec les principales zones à l'origine de brumes de sable basées sur l'indice TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) (d'après Middleton et Goudie, 2001 ; Israelevich *et al*, 2002 ; Prospero *et al*, 2002) et l'indice infrarouge MSG SEVIRI (fond bleu et vert ; d'après Schepanski *et al*, 2009), b) avec d'autres tentatives de délimitation des zones sources potentielles et c) avec les principales zones sources potentielles proposées ici, de PSA1 à PSA6 (dessinées à la main). Les cartes d'arrière-plan a et b sont produites avec l'outil HWSO (FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2009). Schéma de couleurs : jaune pour les dunes de sable, gris foncé pour les roches, bleu pour les masses d'eau, gris pour les unités de sol restantes.

Source : (Scheuven *et al*. 2013), p 172.

Ces différentes zones sont plus ou moins à l'origine de brumes de sable, suivent des voies de transport différentes et ont des compositions variables.

Une étude de Gross *et al.* (2016) a analysé huit échantillons de sols représentant les différentes PSAs définies par Scheuven *et al.* (2013). En accord avec les autres études, l'analyse géochimique a montré une variabilité locale et régionale entre les sols sahariens et les brumes de sable provenant de différentes régions sources. Les concentrations de fer et de potassium varient entre les PSAs mais également en leur sein. Les mesures indiquent une variation régionale des concentrations de phosphore présentes dans le sol saharien, contrairement aux études précédentes (Scheuven *et al.* 2013).

Afin de documenter la composition des brumes de sable touchant la France métropolitaine, les Antilles et la Guyane françaises, il convient de s'intéresser aux régions affectées par les mêmes zones sources d'Afrique du Nord. Ainsi, les brumes de sable transportées en Europe, aux Caraïbes (voire sur la côte Est des Etats-Unis), en Afrique du Nord (dont les îles situées sur la côte Ouest) et parfois au Moyen-Orient (selon la provenance des brumes) sont considérées.

3.1.1 Composition chimique

A l'issue de la revue de la littérature décrite dans la partie 1.5.2, quarante-huit (48) études ayant pour objectif de caractériser la composition chimique des brumes de sable ont été incluses. Toutefois, leur comparaison peut comprendre certaines limites méthodologiques :

- Les types de prélèvements (dépôts secs, dépôts humides, aérosols...) et les techniques d'échantillonnage (par exemple prélèvements d'aérosols au niveau du sol ou à bord d'un aéronef) peuvent varier ;
- Les techniques d'analyse peuvent varier (diffraction des rayons X (XRD), spectroscopie infrarouge (IR), microscopie électronique...) et ont des sensibilités différentes ;
- La caractérisation de la composition n'est pas exhaustive et des éléments différents peuvent être recherchés selon les études ;
- La présentation des résultats peut être réalisée sous forme élémentaire ou minéralogique.

Le tableau périodique des éléments chimiques est disponible en Annexe 4 afin d'identifier les éléments mentionnés.

Le tableau suivant présente les différents minéraux identifiés dans les études et leur forme élémentaire (Tableau 2) :

Tableau 2. Forme élémentaire des minéraux

Minéraux	Forme élémentaire
Quartz	SiO_2
Illite	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})]$
Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Palygorskite	$(\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Clinochlore	$\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$
Calcite	CaCO_3
Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Halite	NaCl
Hématite	Fe_2O_3

En raison de la variabilité de la composition des brumes de sable mentionnée ci-dessus, les résultats sont présentés par zone géographique. Les territoires nord-africains et les îles situées à l'Ouest de l'Afrique du Nord (Iles Canaries, Cap-Vert...) ont été traités séparément afin de distinguer les situations continentales et insulaires.

3.1.1.1 Afrique du Nord (continentale)

- Points clés :

Plusieurs études constatent que, plus les particules sont éloignées de la source, moins la fraction grossière est représentée (A. Rocha-Lima *et al.* 2018; Asubiojo *et al.* 1993). Les éléments d'origine crustale semblent majoritairement présents dans les particules grossières alors que les éléments d'origine anthropique le sont davantage dans les particules fines (Asubiojo *et al.* 1993).

On observe une variabilité régionale, mais également locale, dans la composition des sols sahariens. Cette même variabilité est présente dans la composition des brumes de sable, selon leur zone géographique d'origine (Gross *et al.* 2016). En effet, la provenance des brumes de sable influence directement leur composition (Skonieczny *et al.* 2011).

Par exemple, A. Rocha-Lima *et al.* (2018) confirme les conclusions d'autres études indiquant que le rapport Ca/Al diminue d'Ouest en Est dans le Sahara. Différents rapports entre les éléments majoritairement dans les brumes de sable sont utilisés pour identifier leur source (illite/kaolinite ; chlorite/kaolinite ; Ca/Al ; Fe/Al ; K/Al...) (Formenti, Rajot, *et al.* 2011; Scheuven et al. 2013).

De plus, les particules de brumes de sable prélevées au Nigeria présentent des caractéristiques particulières, dépendantes de l'activité anthropique locale (Aweda, Falaiye, et Oyewole 2021). Par exemple, des métaux lourds et légers ont été retrouvés dans les particules de brumes au Nigeria (Asubiojo *et al.* 1993).

- Algérie, Mauritanie :

Lors de la campagne « FENNEC – *The Saharan Climate System* » conduite en 2011 par un consortium d'universités en France, au Royaume-Uni et aux Etats-Unis, deux stations de mesures automatiques des aérosols ont été déployées : une au sud de l'Algérie et une en Mauritanie à la frontière avec le Sahara Occidental. Cent-cinquante échantillons choisis aléatoirement ont été sélectionnés pour analyse par spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie (EDXRF) (A. Rocha-Lima *et al.* 2018). Cette analyse conclut à des différences notables entre la composition élémentaire moyenne des brumes de sable observées en Algérie et en Mauritanie (Figure 5).

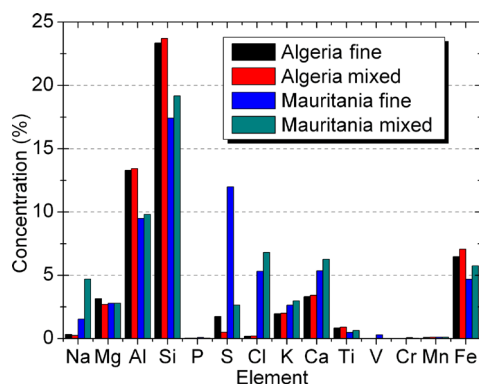


Figure 5. Concentration massique moyenne en pourcentage de la masse totale des particules d'aérosol obtenues pour chaque élément pour les modes fins et mixtes (fins + grossiers) des brumes de sable sahariennes d'Algérie et de Mauritanie par analyse EDXRF

Source : (A. Rocha-Lima *et al.* 2018)

Une concentration plus élevée en sodium (Na) et en chlore (Cl) suggère une « influence marine » en Mauritanie. De plus, le rapport de certains composants chimiques clés, tels que Ca/Al et $((Ca + Mg)/Al)$, s'est avéré plus élevé pour le site de Mauritanie comparativement au site d'Algérie. Ces résultats concordent avec d'autres études ayant lié la localisation des zones sources à la composition des brumes de sable, et qui ont également observé que les rapports Ca/Al diminuaient d'Ouest en Est dans le Sahara (Formenti, Rajot, *et al.* 2011; Scheuven et al. 2013). En plus du sodium et du chlore, des éléments traces comme le vanadium (V), le chrome (Cr), le phosphore (P) et le soufre (S) sont observés en concentration plus élevée dans la fraction fine des particules en Mauritanie. D'après les auteurs, cela indique une contribution significative des sources anthropiques à proximité du site de prélèvement. L'analyse de la distribution granulométrique des particules de brumes de sable, réalisée sur environ 2 000 particules, montre également des différences entre les deux sites. Une fraction considérablement plus grande de particules inférieures à $1\ \mu m$ de diamètre est observée en Mauritanie par rapport celles collectées en Algérie. L'Algérie est plus proche que la Mauritanie des principales sources de brumes de sable, ce qui soutient l'hypothèse que, plus les particules s'éloignent de la source, moins la fraction grossière* ($PM_{2,5-10}$ voir Annexe 3. Glossaire) est représentée.

- Niger :

Lors de la période d'observation hivernale de la campagne « *African Monsoon Multidisciplinary Analysis project* » (AMMA-SOP0/DABEX) menée en janvier 2006, quatre prélèvements d'aérosols ont été réalisés à bord d'un avion de recherche au Niger dans la couche de brumes de sable (Chou *et al.* 2008). La composition élémentaire des différents échantillons est globalement homogène. Seuls deux types d'aérosols sont rencontrés, les particules minérales

et les aérosols d'origine anthropique – probablement issus de la combustion de biomasse. Les particules ont été classées en huit catégories : minérale argileuse (illite, kaolinite, feldspath), minérale cristalline (quartz), riches en calcium, en fer, en titane, particules avec un ratio de calcium et de soufre équivalent (Ca-S), en potassium - soufre (K-S) et particules de suie.

Dans la fraction fine* (PM_{2,5} voir Annexe 3. Glossaire), les aérosols étaient composés de particules minérales et d'aérosols de combustion dans des proportions plutôt constantes (85 % (± 3) et 15 % (± 3) respectivement).

La Figure 6 présente la composition élémentaire moyenne en nombre (pourcentage) dans les particules submicroniques (< 1 µm) et supermicroniques (> 1 µm) (Figure 6).

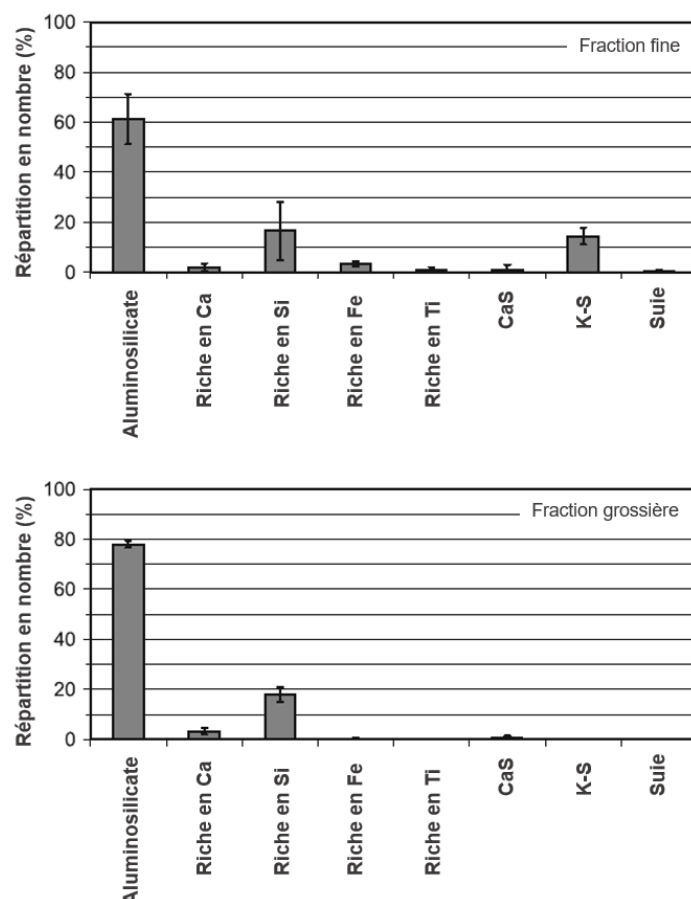


Figure 6. Composition élémentaire moyenne répartie par nombre (pourcentage) obtenue pour les échantillons de l'AMMA SOP0 B160N3, B161N3, B161N5 et B165N7 : (en haut) fraction fine (particules submicroniques) ; (en bas) fraction grossière (particules supermicroniques)

Source : (Chou *et al.* 2008)

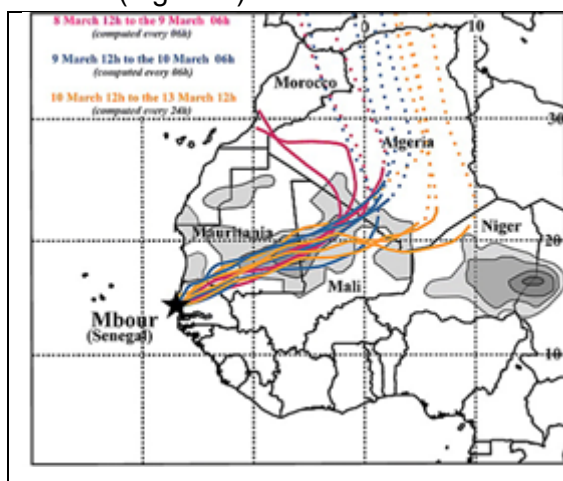
Les particules minérales étaient composées d'aluminosilicates (61 % (± 10) en nombre), dont 57 % (± 8) de l'illite et kaolinite, et 4 % (± 3) d'autres argiles phyllosilicates. Les particules riches en silicium (Si) représentaient 17 % (± 12), la variabilité étant due à un pourcentage élevé sur un échantillon et un pourcentage faible sur un autre. Les particules riches en fer (Fe) représentaient 4 % (± 1), les particules riches en calcium (Ca) 2 % (± 2), les particules riches en titane (Ti) 1 % (± 1) et les particules avec un *ratio* calcium-soufre équivalent (Ca-S) 1 % (± 2).

La fraction supermicronique ne comprenait que des particules minérales. La composition des particules de cette fraction était remarquablement uniforme d'un échantillon à l'autre. En moyenne sur les différents échantillons, les aluminosilicates représentaient 78 % (± 1) en nombre, avec 74 % d'illite et de kaolinite et 4 % d'autres argiles phyllosilicates. Les particules riches en Si représentait 18 % (± 3), les particules riches en Ca 3 % (± 1). Des particules de Ca-S ont été trouvées sur deux des échantillons et représentaient 1 % du nombre de particules.

Même si les résultats suggèrent que les particules de brumes de sable ont des propriétés remarquablement uniformes, notamment en termes de composition élémentaire et de forme, il convient de noter que ces résultats ne sont potentiellement pas comparables avec des prélèvements réalisés à une distance plus proche du sol.

- Sénégal :

Lors de cette même campagne de terrain « *African Monsoon Multidisciplinary Analysis project* » (AMMA-SOP0/DABEX), une autre étude a été réalisée de février à mai 2006 à Mbour au Sénégal dans le but de caractériser la signature terrigène des brumes de sable (Skonieczny *et al.* 2011). L'analyse des échantillons de dépôts de brumes a été réalisée autour de l'épisode du 7 au 13 mars 2006, considéré comme un épisode typique de la saison de la mousson d'hiver. L'analyse des échantillons lors de cet épisode démontre des changements dans la composition des particules entre le début (7 mars) et la fin (13 mars). Deux phases distinctes ont été identifiées, avec des changements dans les caractéristiques des particules de brumes de sable. L'abondance relative du minéral argileux smectite a augmenté d'environ 34 % à 63 % au cours de ces sept jours. Le rapport entre l'illite et la kaolinite (I/K) a également connu un changement important, atteignant 0,9 par rapport à une fourchette de fond de 0,2 - 0,5 pour le reste de la période d'échantillonnage. Ce ratio I/K a diminué de 0,9 à 0,4 pendant l'épisode du 7 au 13 mars. Ces changements dans la composition minéralogique des brumes se sont accompagnés d'une modification marquée de la composition isotopique du Sr. Une diminution marquée du ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a été observée entre la première et la deuxième phase. Les analyses d'images satellites ont permis de relier ces différentes signatures à deux régions sources (Figure 7).



Les trajectoires de masses d'air tridimensionnelles ont été calculées pour se terminer à environ 400 m AGL au-dessus de la station Mbour pendant la période d'échantillonnage du 7 au 13 mars. La durée des trajectoires varie de 3 jours au début de la série chronologique à 6 jours vers la fin (les durées ont été adaptées pour que les trajectoires atteignent les bordures du continent). Les latitudes des masses d'air supérieures à 1500 m (lignes pointillées) sont distinguées des latitudes inférieures (lignes pleines). Le calcul a été effectué à l'aide du modèle HYSPLIT (RR Draxler et GD Rolph, HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model, 2011, accès via le site web <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> ; G. D. Rolph, Real-time Environmental Applications and Display system (READY) Website, <http://ready.arl.noaa.gov>). La carte d'arrière-plan montre les valeurs moyennes annuelles de l'*Aerosol Index* (AI) 15 à partir des données TOMS (1980-1993, 1997-2000) (adapté de Goudie et Middleton, 2001).
Source : (Skonieczny *et al.* 2011)

Figure 7. Rétro-trajectoires de l'épisode de brumes de sable du 7 au 13 mars 2006 à Mbour (Sénégal)

Ces deux régions se situent dans la zone identifiée comme la source principale du panache

hivernal et printanier proéminent au-dessus de l'Atlantique tropical et englobant la Mauritanie, le Mali et le sud de l'Algérie, ainsi que certaines zones adjacentes (Goudie et Middleton 2001). Ainsi, le changement de provenance des brumes de sable a modifié la minéralogie des minéraux argileux et les compositions isotopiques. Concernant la distribution granulométrique pendant cet épisode, la comparaison de la fraction granulométrique $< 30 \mu\text{m}$ et des dépôts totaux ($0 - 73 \mu\text{m}$) a confirmé que la majeure partie des particules déposées dans cette zone sont de diamètre $< 30 \mu\text{m}$.

- Nigeria :

Une autre étude (Aweda, Falaiye, et Oyewole 2021), réalisée entre novembre 2015 et mars 2016 au Nigeria, s'est également appuyée sur des échantillons de dépôts issus de phénomènes de brumes de sable. L'objectif était de caractériser la composition des brumes de sable au Nigeria à partir de 10 points d'échantillonnage, situés en diagonale entre le Sud-Ouest et le Nord-Est du pays. Elle conclut que de nombreux minéraux argileux et cristallins sont présents dans les brumes de sable, dont parmi eux le quartz, représenté chimiquement par le dioxyde de silicium (ou silice, SiO_2), qui est le plus détecté. Parmi les minéraux argileux, la présence de kaolinite, d'illite et de montmorillonite est observée dans tous les échantillons. Les brumes de sable prélevées au Nigeria présentent des caractéristiques particulières. En effet, des alcools et composés hydroxyles sont présents dans tous les échantillons avec des différences entre les sites de prélèvement selon les activités locales. Différents métaux ont également été trouvés dans les échantillons, notamment K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo, As, Zr, Pb, V, Sr, Cr et Ce.

Cette même équipe a publié une nouvelle étude deux ans plus tard s'intéressant plus spécifiquement à la concentration en métaux lourds dans les brumes de sable au Nigeria (Aweda, Falaiye, et Samson 2023). Les prélèvements de dépôts secs ont été réalisés de novembre 2017 à mars 2018 et étaient au nombre de 5 pour chacune des 6 stations. Hormis celles implantées plus au Nord-Est, les stations étaient généralement situées aux mêmes endroits que dans l'étude de 2021 (Aweda, Falaiye, et Oyewole 2021). Pour analyser la composition chimique des particules, une moyenne des cinq prélèvements de chaque station a été réalisée. Dix-huit éléments ont été considérés : Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Rb, Sr et Zr. Les métaux lourds Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, et Zr et légers Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Rb, St, et Sr ont été trouvés dans les échantillons. Comme attendu, le Si était majoritaire dans tous les échantillons. Le Ca et le Fe étaient en concentration constante et élevée, ce qui peut s'expliquer par les activités humaines, comme les forges, la présence d'abattoirs et de décharges à ciel ouvert dans tout le pays, alors que Na, Mg, P, S, Ce, Zn et Zr étaient en concentration faible. La concentration en magnésium (Mn) est similaire dans toutes les stations et aucune différence significative apparaît concernant les concentrations en sodium (Na). Les autres métaux présentent des différences significatives entre les 6 stations avec des corrélations significatives entre certains métaux. Les concentrations en métaux lourds varient selon les sites (Figure 8).

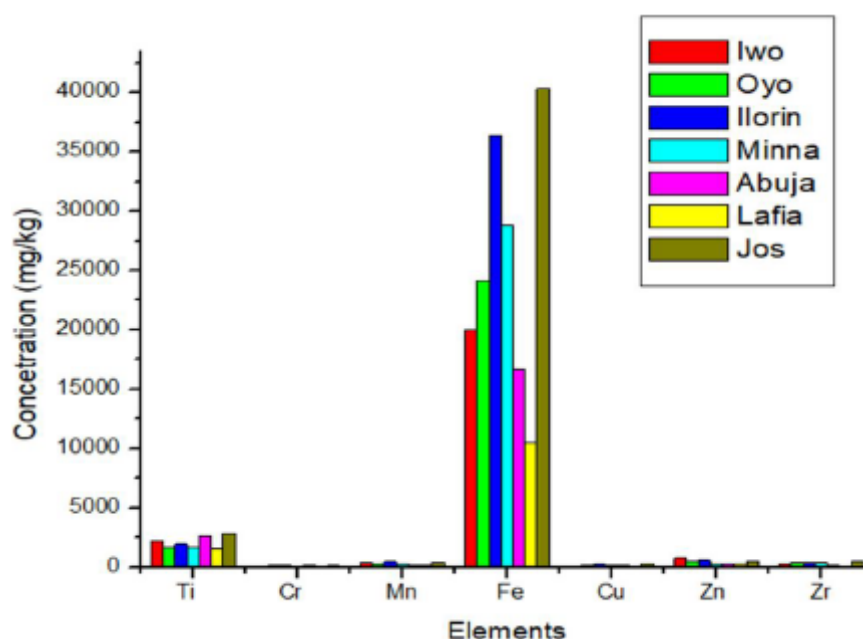


Figure 8. Concentration élémentaire pour chaque site

Source : (Aweda, Falaiye, et Samson 2023)

Les auteurs constatent que les différences de composition des brumes entre les sites peuvent être attribuées aux activités anthropiques locales.

Une étude plus ancienne s'était déjà intéressée à certaines de ces substances dans les particules aéroportées de brumes de sable au Nigeria (Asubiojo *et al.* 1993). Deux sites d'échantillonnage avaient été mis en place : un au Nord (ville de Kano) et un au Sud (ville d'Ife). Quatre prélèvements avaient été réalisés en janvier 1989 sur une période allant de 6 à 16 heures selon la densité des brumes. Les auteurs ont constaté que les particules grossières étaient présentes à Kano, ville proche de la source des brumes de sable, et que les particules plus fines étaient plus importantes à Ife, ville plus éloignée de la source. La composition en éléments originaires de la croûte terrestre était similaire entre les deux points de prélèvements, ce qui soutient l'hypothèse d'une origine commune. Un facteur d'enrichissement élevé pour les éléments d'origine anthropique (Br, Cl, Cu, Pb, S, Zn) était constaté. Les éléments d'origine crustale (relatifs à la croûte terrestre) étaient majoritairement présents dans la fraction grossière alors que les éléments d'origine anthropique étaient davantage présents dans la fraction fine.

3.1.1.2 Afrique du Nord (îles)

▪ Points clés :

Les brumes de sable sont majoritairement composées d'éléments issus de la croûte terrestre, qui dominent les particules grossières* (voir Annexe 3. Glossaire) (Alastuey *et al.* 2005; S. Rodríguez *et al.* 2011).

Des aérosols secondaires sont également formés par l'interaction des éléments minéraux et des éléments anthropiques (notamment soufre et azote). Ces aérosols secondaires, comme les éléments anthropiques, sont davantage présents dans les particules

submicroniques ($<1\ \mu\text{m}$) (Alastuey *et al.* 2005; Kandler *et al.* 2007; Kandler, Lieke, *et al.* 2011).

Une étude conclut que les brumes de sable peuvent également être mélangées aux polluants anthropiques provenant des industries nord-africaines (S. Rodríguez *et al.* 2011).

Une étude réalisée en 2002 (Alastuey *et al.* 2005) a caractérisé les $\text{PM}_{2,5}$ et les particules totales en suspension (en anglais : *total suspended particles* (TSP*)) voir Annexe 3. Glossaire) collectées sur deux sites aux Îles Canaries pendant un épisode de brumes de sable. Le premier site d'échantillonnage se situait à l'Observatoire d'Izaña (IZO) au niveau de la troposphère libre et le second à Santa Cruz de Tenerife (SCO) au niveau de la couche limite marine (*marine boundary layer*, MBL* ; voir Annexe 3. Glossaire). Pendant une intrusion de brumes de sable, la hauteur de la MBL* est réduite, ce qui favorise le dépôt de particules grossières par des flux descendants. Les niveaux d'éléments crustaux, typiquement associés aux particules désertiques, tels que Al, Si, Fe, K et Ti, étaient très élevés sur les deux sites au moment de l'épisode. Toutefois, ils étaient plus élevés à IZO (troposphère libre) par rapport à SCO (MBL) d'un facteur 1,2 - 2 dans les TSP et d'un facteur 10 dans les $\text{PM}_{2,5}$. La plupart des éléments traces analysés (Mn, Zn, Ni, Li, Sr, Ba, Cr) ont montré une origine clairement liée aux particules désertiques à IZO. Une contribution anthropique supplémentaire, locale ou externe, est déduite pour certains éléments traces à SCO, tels que As, Co, Cu, Ni, Sn, V, et Zn, étant donné leur concentration plus élevée mesurée et leur accumulation dans la fraction $\text{PM}_{2,5}$ à SCO.

La majorité des particules de brumes de sable collectées à IZO étaient constituées de quartz, de minéraux argileux (illite, palygorskite, kaolinite et clinocllore) et de calcite, avec une quantité mineure de gypse. Les particules d'argile pouvaient être regroupées en deux sous-groupes : (a) de grands cristaux d'argile (généralement $410\ \text{nm}$) et plats, et (b) de petits agrégats de micro-cristaux (environ $1\ \mu\text{m}$) de minéraux argileux. Les analyses n'ont pas montré de différences de composition entre ces deux types de particules d'argile, toutes deux étant constituées de Si et d'Al avec des proportions mineures de Fe, K et Mg. L'analyse par diffraction des rayons X (XRD) a également révélé la présence d'halite (NaCl lié à l'aérosol marin) et une concentration relativement plus élevée de gypse à SCO. Deux hypothèses peuvent expliquer la teneur plus élevée en gypse à Santa Cruz de Tenerife : une origine différente des masses d'air affectant IZO et SCO ou une réaction entre le dioxyde de soufre (SO_2), émis localement, et les particules de carbonate de calcium. Les analyses réalisées à SCO ont permis d'identifier à la fois des particules naturelles de gypse, caractérisées par une taille moyenne à grosse et une morphologie stratifiée, mais aussi des cristaux de gypse secondaires, de taille plus petite ($1 - 2\ \mu\text{m}$), présentant une morphologie hexagonale bien cristallisée.

Les auteurs ont déduit que du Ca secondaire grossier avait été formé par la réaction de SO_2 (ou H_2SO_4) d'origine locale ou externe avec les particules de brumes de sable à SCO. Les niveaux élevés de composés secondaires, liés aux épisodes de brumes de sable sahariennes, n'ont pas été signalés par d'autres études menées dans les régions méditerranéennes. Les auteurs concluent que l'impact de l'épisode de brumes de sable dans la couche limite marine se traduit non seulement par une augmentation des éléments liés à la croûte terrestre par des processus de dépôt, mais aussi par une augmentation des aérosols secondaires par l'interaction de l'aérosol minéral avec des composés de soufre et d'azote d'origine anthropique. Les auteurs soulignent néanmoins qu'il n'est pas exclu que la formation de sulfates et de

nitrate soit un artefact d'échantillonnage dû à la réaction des polluants gazeux avec les particules déjà collectées sur le filtre.

Ainsi, lors des épisodes de brumes de sable, les concentrations en particules peuvent augmenter en raison d'un apport en éléments crustaux, mais également en raison de l'interaction de ces particules transportées avec des précurseurs gazeux, entraînant l'augmentation des concentrations des aérosols particulaires secondaires.

Une autre étude réalisée aux Îles Canaries de 2002 à 2008 a analysé la composition chimique des particules de brumes de sable (TSP, PM₁₀, PM_{2,5}) situées dans la troposphère libre à l'*Izaña Global Atmospheric Watch* (GAW) de Tenerife (S. Rodríguez *et al.* 2011). Les auteurs se sont intéressés plus précisément à l'influence des activités anthropiques sur la composition des particules provenant des brumes de sable en se concentrant sur le nitrate, l'ammonium et le sulfate. L'analyse de la distribution granulométrique a montré que la plupart des éléments crustaux se trouvaient dans les fractions grossières* (PM_{2,5-10}) et super-grossières (PM₁₀). Par exemple, seulement 16 % des éléments principaux (Al, Fe, K, Ca) et des éléments traces (La, Ti, P, V, Mn, Sr, Co et Cr) se trouvaient dans la fraction fine* (PM_{2,5}), contre 77 % pour l'ammonium et environ la moitié pour le sulfate (53 %). La distribution de taille et les caractéristiques du sulfate et du nitrate suggéraient qu'un mélange d'aérosols à la fois externe (sulfate d'ammonium dans la fraction fine et éléments crustaux dans la fraction grossière) et interne (éléments crustaux enrobés de sulfate dans la fraction grossière) pourrait se produire dans le panache de brumes de sable.

Différentes zones d'Afrique du Nord sont identifiées comme sources d'émission des précurseurs gazeux des composés étudiés (SO_x, NO_x et NH₃). De nombreuses zones industrielles sont situées au Maroc, en Algérie (Nord et Est) et en Tunisie : raffineries de pétrole, champs d'extraction de pétrole, centrales à charbon, centrales électriques, industries liées aux engrais avec la production d'acide sulfurique, acide phosphorique, phosphate d'ammonium et phosphate de diammonium... De plus, ces pays disposent de mines de phosphate, en particulier le Maroc qui est le deuxième producteur mondial. Cette industrie entraîne des émissions de précurseurs gazeux d'aérosols, tels que l'ammoniac (NH₃), les oxydes de soufre (SO_x/SO₂), les composés chlorés inorganiques (par exemple HCl et KCl), et des émissions de particules minérales primaires (par exemple le sulfate de calcium et le phosphate). Les rapports élevés de P/Al et Cl/Al sur le passage des brumes de sable au Maroc indiquent un enrichissement en phosphore et en chlorure des particules de brumes dans la région, ainsi que des concentrations élevées en sulfate d'ammonium. Les raisons pourraient être, en plus de l'activité humaine, la présence d'anciens lacs et lagunes asséchés.

En conclusion, les particules de brumes de sable d'origine saharienne pourraient être mélangées à des polluants particulaires provenant d'industries présentes au Maroc, en Algérie et en Tunisie. Ces activités contribueraient significativement au mélange de ces particules désertiques avec des polluants particulaires tels que le nitrate, le sulfate et l'ammonium.

Une troisième étude, également menée à l'observatoire d'Izaña à Tenerife (Kandler *et al.* 2007), a été réalisée sur trente-neuf échantillons prélevés au cours de deux épisodes de brumes de sable : le premier du 13 au 23 juillet 2005 et le second du 6 au 8 août 2005. Les particules minérales dominaient dans tous les échantillons, avec une composition moyenne en volume de 64 % de silicates, 14 % de sulfates, 6 % de quartz, 5 % de particules riches en calcium, 1 % d'hématite, 1 % de suie et 9 % d'autres matières carbonées. La composition des brumes semblait homogène et les différences de composition entre les deux épisodes étaient

faibles. La Figure 9 présente l'abondance relative des différentes classes de particules en nombre en fonction de la taille, moyennée pour les deux épisodes de brumes de sable. Au-dessus de 1 μm , l'aérosol est dominé par les particules minérales. De 1 μm à 100 nm de diamètre, la fraction relative de particules minérales diminue de plus de 90 % à environ 40 %. Plus la taille des particules diminue, plus la contribution des sulfates et des matières carbonées (*carbonaceous*) est importante. Toutefois, les auteurs précisent que les particules de diamètre inférieur à 250 nm présentent une grande incertitude en raison du plus petit nombre de particules observées et du faible signal de rayons X obtenu à partir de ces dernières.

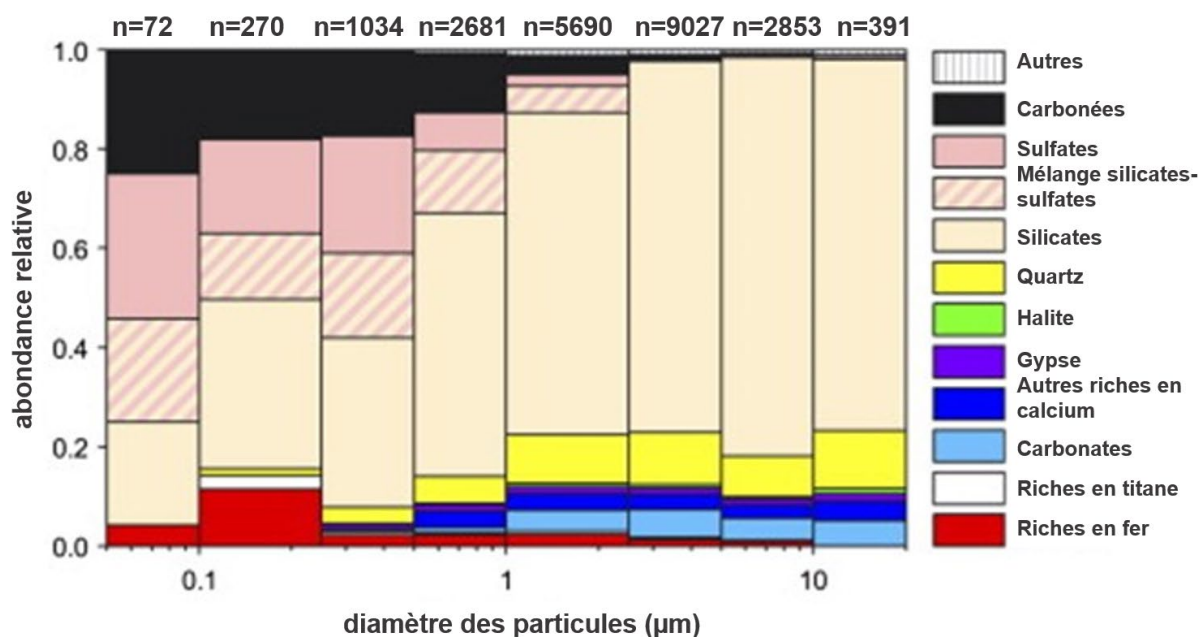


Figure 9. Abondance relative des différents groupes de particules, en fonction de la taille, pour les deux épisodes de brumes de sable.

Le nombre total de particules (n) analysées dans chaque groupe de taille est également indiqué.

Source : (Kandler *et al.* 2007)

D'après les analyses, il apparaît que la plupart des particules minérales présentent un revêtement de sulfates. Ce revêtement aurait une épaisseur moyenne de 60 nm sur les noyaux de silicate (avec une incertitude de facteur 2 – 3). L'origine la plus probable serait l'absorption de gaz précurseurs de sulfates sur des surfaces non réactives en l'absence d'eau.

Les auteurs concluent que la composition des particules provenant des deux épisodes de brumes de sable étudiés est assez similaire aux précédents épisodes survenus dans la même région, au Cap-Vert et dans le sud-ouest de l'Europe. De plus, les fortes teneurs en calcium des aérosols permettent d'identifier les principales régions sources dans le nord et le centre de l'Algérie, ainsi qu'au Maroc.

Des études similaires ont été menées au Cap-Vert, notamment au cours du *Saharan Mineral Dust Experiment* (SAMUM) en janvier et février 2008 à Praia (Kandler, Lieke, *et al.* 2011; Kandler, Schütz, *et al.* 2011). Trois importants épisodes de brumes de sable ont été identifiés et ont été qualifiés de « *dust situation* » (DU1, DU2, DU3), chacun séparés par une période de transition (T) avec une influence locale, marine et de brumes de sable. Les périodes précédant DU1 et suivant DU3 ont été qualifiées de « *maritime situation* » (MAR1, MAR2) pour définir

l'absence de sources particulières d'émission, et non la composition de l'aérosol lui-même. Le découpage temporel peut être représenté comme suit : MAR1 / DU1 du 17 au 20 janvier / T / DU2 du 24 au 26 janvier / T / DU3 du 28 au 2 février / MAR2. Il convient de noter que DU2 et DU3 ont des caractéristiques similaires. La caractérisation de la composition montre des différences entre les périodes de brumes de sable (DU1, DU2, DU3) et les périodes hors brumes de sable (MAR1, MAR2). La figure suivante montre la composition moyenne en volume des aérosols pour ces deux périodes (Figure 10).

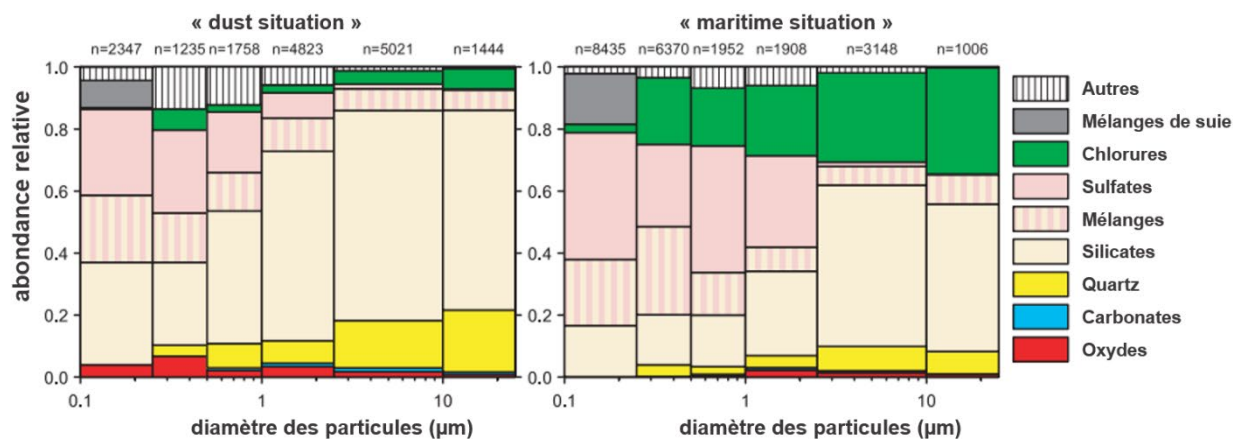


Figure 10. Composition moyenne en volume des aérosols à Praia, déterminée en fonction de la taille, Cap-Vert, 2008.

Au-dessus du diagramme, le nombre de particules analysées dans chaque taille de classe est indiqué. Source : (Kandler, Lieke, *et al.* 2011)

Les silicates étaient les particules les plus abondantes dans la fraction supermicronique ($>1 \mu\text{m}$). Ils contribuaient à 30-50 % pendant les épisodes de brumes de sable contre 15-30 % pendant les périodes d'influence maritime. Une petite quantité de particules de quartz était toujours présente dans un rapport à peu près constant avec la quantité de silicates. Cependant, pendant les épisodes de brumes, une tendance à des concentrations de quartz plus élevées dans les granulométries (taille de particules) $>2,5 \mu\text{m}$ et $0,5 - 1 \mu\text{m}$ (et dans une moindre mesure dans la granulométrie de $1 - 2,5 \mu\text{m}$), était observée. Concernant les particules submicroniques ($<1 \mu\text{m}$), une présence significative de sulfates était toujours observée. Toutefois, pendant les situations à influence maritime, de nombreuses particules d'un diamètre compris entre 1 et $2,5 \mu\text{m}$ étaient des sulfates. Une des différences majeures concerne le chlorure de sodium : moins de 10 % pour les particules supermicroniques ($>1 \mu\text{m}$) pendant les épisodes de brumes de sable contre 30 % hors épisodes. Une différence était également observée entre les deux périodes concernant les particules enrichies en fer (oxydes). Elles apparaissaient en proportions plus importantes pour les particules submicroniques ($<1 \mu\text{m}$) lors d'épisodes de brumes de sable, alors qu'aucune différence entre les périodes n'était observée pour les particules supermicroniques ($>1 \mu\text{m}$).

Ainsi, la composition chimique des aérosols serait fortement dépendante de leur taille. Les auteurs identifient trois groupes :

- Les particules d'un diamètre inférieur à 500 nm qui se composent principalement de sulfate et de particules minérales (dans cette étude les silicates et le quartz) pendant les brumes de sable ;

- Les particules d'un diamètre compris entre 500 nm et 2,5 µm qui correspondent à une plage de transition avec une abondance croissante de particules minérales vers les particules plus grosses ;
- Au-delà de 2,5 µm, l'aérosol* est dominé par les particules minérales.

Les situations maritimes présentaient une plus grande variabilité de composition que les périodes de brumes de sable (DU). Cependant, à l'exception de quelques mesures, il y avait toujours une grande contribution de particules minérales dans l'aérosol même pendant les périodes sans influence désertique.

3.1.1.3 Europe

▪ Points clés :

Les études sur la composition chimique des brumes de sable identifiées en Europe concernent majoritairement l'Europe du Sud (Grèce, Italie, Espagne), qui est également la zone géographique la plus touchée par ce phénomène.

Pendant les épisodes de brumes de sable, des concentrations plus importantes en éléments crustaux sont observées (Si, Fe, Al, Ca) (Gini *et al.* 2022; Vanderstraeten *et al.* 2008; Remoundaki *et al.* 2011; Kopanakis *et al.* 2018).

Les voies de transport des brumes de sable influencent leur composition. Pour l'Europe, la voie de transport la plus commune traverse la mer Méditerranée, ce qui se traduit, par exemple, par des niveaux plus élevés de chlore ou de sodium les jours de brumes de sable en raison de l'apport de sels marins (Gini *et al.* 2022; Vasilatou *et al.* 2017).

Plusieurs études suggèrent un enrichissement en aérosols secondaires pendant les épisodes de brumes de sable (Conte *et al.* 2020; Vasilatou *et al.* 2017; Vanderstraeten *et al.* 2008).

Des différences de distributions granulométriques massiques des particules ont été observées selon la source des brumes. De plus, les épisodes de brumes de sable sont associés à des conditions atmosphériques qui favorisent l'accumulation de polluants (hauteur plus faible de la couche limite atmosphérique) (Gini *et al.* 2022).

Les épisodes de brumes de sable ont également un effet sur le pH des eaux de pluie en les rendant moins acides (Oduber *et al.* 2020). De plus, certaines études constatent des différences entre les espèces chimiques étudiées concernant leur contribution relative aux dépôts secs et humides (Kopanakis *et al.* 2018; Morales-Baquero, Pulido-Villena, et Reche 2013).

Trois des études identifiées se sont intéressées à la composition des brumes de sable touchant la Grèce à partir d'échantillons d'aérosols (Gini *et al.* 2022; Remoundaki *et al.* 2011; Vasilatou *et al.* 2017).

La première étude s'appuie sur 40 échantillons d'aérosols* collectés sur 24 heures en 2010, 2015 et 2017 à Demokritos, une ville proche d'Athènes (Gini *et al.* 2022). Deux zones sources principales de brumes de sable ont été identifiées : l'une en Algérie-Tunisie (c'est-à-dire l'ouest de l'Afrique du Nord, nommée wSD) et l'autre en Libye-Égypte (c'est-à-dire le centre et l'est de l'Afrique du Nord, nommée eSD). Des différences de distributions granulométriques massiques des particules ont été observées selon la source des brumes. En effet, les

événements wSD étaient associés au transport de particules plus grosses ; diamètre égal à 5,6 μm pour les événements wSD contre 3,1 μm pour les événements eSD. Les concentrations en particules submicroniques (PM_{10} voir Annexe 3. Glossaire) étaient également plus élevées pendant les épisodes wSD par rapport aux eSD. Lors des épisodes de brumes de sable, non seulement une augmentation des concentrations massiques de PM_{10} a été identifiée, mais également des $\text{PM}_{2,5}$. De plus, les auteurs ont analysé la distribution granulométrique massique d'éléments traces par rapport celle des particules collectées les jours avec et sans brumes de sable. Les résultats sont représentés sur la Figure 11 ci-dessous.

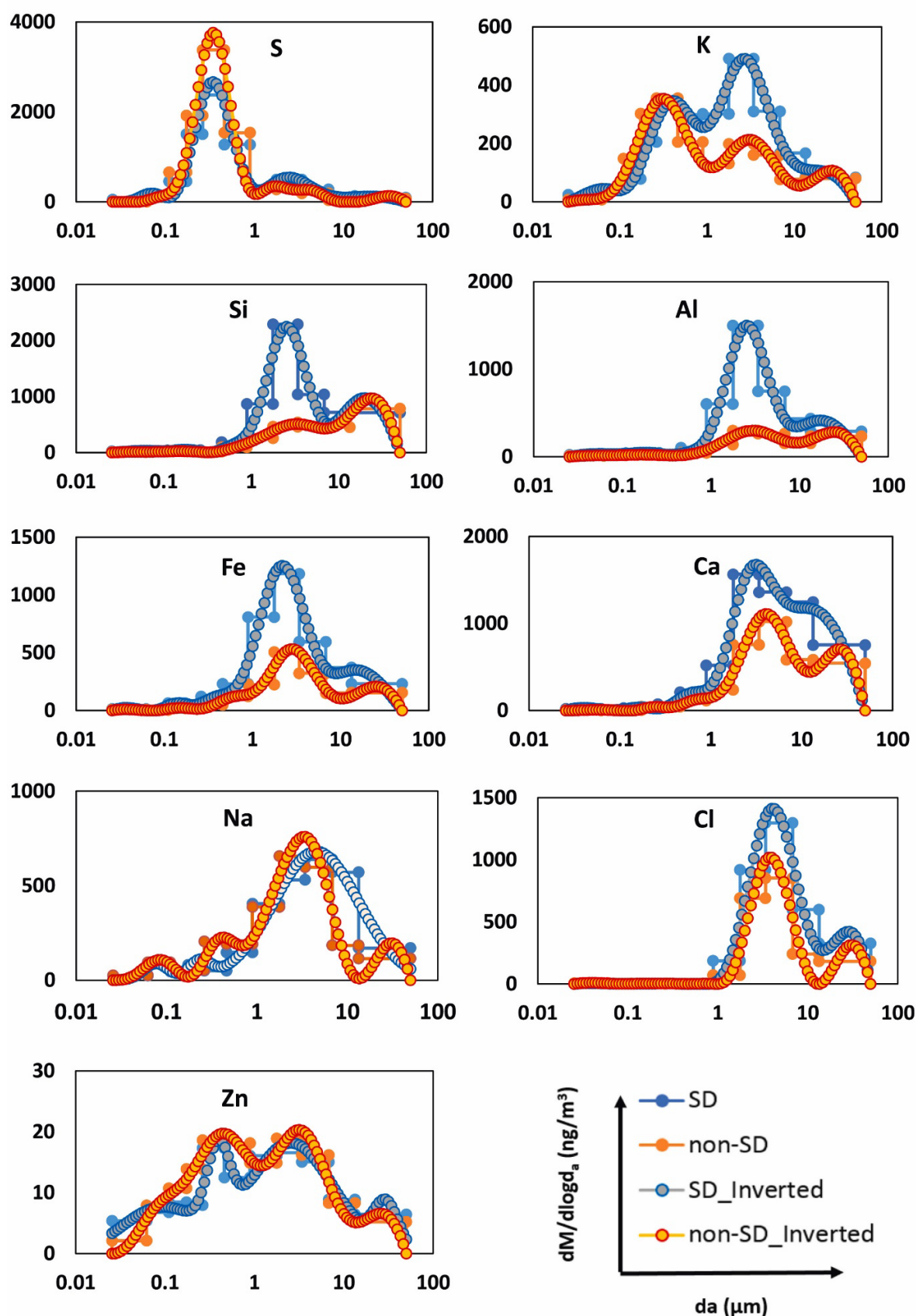


Figure 11. Distribution granulométrique massique des éléments traces pendant les épisodes de brumes de sable (SD) et hors épisodes de brumes de sable (non-SD).

Inverted = distribution reconstruite à partir des points de mesure.

Source : (Gini *et al.* 2022)

Les éléments crustaux (Si, Fe, Al, Ca) présentent les concentrations les plus importantes par rapport aux autres éléments. Si, Fe et Al présentent une distribution granulométrique équivalente, que ce soit pendant ou hors épisodes de brumes de sable. Toutefois, un pic plus important pour les particules de taille comprise entre 1 µm et 10 µm (2,6 µm) a été observé pendant les jours de brumes de sable, ce qui indique que les PM₁₀ sont principalement d'origine locale. Le soufre élémentaire est principalement attendu dans la fraction fine* (PM_{2,5}) et comme provenant des émissions anthropiques, ce qui se traduit ici par un pourcentage de la masse totale (plus de 80 %) similaire entre les jours avec et sans intrusions de brumes. Le soufre (S) présent dans la fraction grossière* (PM_{2,5-10}) est quant à lui légèrement plus représenté pendant les brumes de sable (19 % de la concentration massique totale de soufre jours de brumes, 10 % hors brumes). Il peut provenir des aérosols marins ou être formé par des réactions entre le SO₂ et les particules de sol. De la même façon, le potassium (K) peut être soit anthropique (combustion de biomasse) soit naturel (remise en suspension du sol). Cela se traduit par sa distribution granulométrique, avec une masse plus importante dans la fraction grossière les jours de brumes de sable. Le sodium (Na) est lié à la fois au sel marin et à la remise en suspension du sol. Sa distribution granulométrique tend davantage vers la fraction grossière les jours de brumes de sable. Le chlore n'est, quant à lui, pas lié à la nature géologique du sol et a une distribution granulométrique similaire dans les deux cas. Toutefois, ses niveaux de concentration sont plus élevés les jours de brumes, ce qui peut s'expliquer par les voies de transport des particules qui arrivent le plus souvent par le sud en traversant la mer Méditerranée, transportant ainsi du sel marin. Le zinc (Zn) est considéré d'origine anthropique (trafic routier) et généralement sous forme de particules fines. Dans la présente étude, outre les particules fines liées au trafic, des concentrations massiques accrues de particules grossières contenant du Zn ont également été observées. Les auteurs identifient deux hypothèses : les particules proviennent localement des routes ou proviennent d'un mélange des brumes de sable avec des émissions anthropiques des régions industrielles (par exemple d'Afrique du Nord).

En plus de l'analyse de ces éléments traces, les auteurs soulignent que la hauteur de la couche limite atmosphérique (en anglais *boundary layer heights*, BLH*; voir Annexe 3. Glossaire) moyenne est inférieure d'environ 30 % les jours de brumes de sable (476 ± 263 m) par rapport aux jours hors brumes de sable (679 ± 286 m). Les auteurs rappellent que la BLH est un paramètre météorologique important car elle définit le volume d'air disponible dans lequel les polluants ambiants sont distribués. De mauvaises conditions de dispersion entraînent une concentration accrue de polluants atmosphériques. Ils constatent que les concentrations en PM₁ et monoxyde de carbone (CO, principalement d'origine anthropique) ont tendance à augmenter à mesure que la BLH* diminue. A l'inverse, avec l'augmentation de la BLH*, une tendance à la baisse des concentrations en PM₁₀ a été observée. En conclusion, les épisodes de brumes de sable seraient associés à des conditions atmosphériques qui favoriseraient l'accumulation de polluants.

L'étude de Vasilatou *et al.* (2017) s'appuie également sur des échantillons (n=51) réalisés à Demokritos, au nord-est d'Athènes, afin d'étudier les concentrations atmosphériques d'éléments majeurs et traces dans les PM_{2,5}. Les auteurs comparent les jours avec et sans brumes de sable pendant la première moitié de l'année 2008. Les concentrations de la plupart des métaux, à l'exception de As, Cr, Cu, Mg et Zn seraient influencés par les intrusions de brumes de sable. L'impact le plus élevé se traduit par une augmentation statistiquement significative (p=0,05) de Fe et V les jours de brumes (facteur 2,6 à 2,7). D'autres composants de la croûte terrestre (tels que Ca, Mn) affichent une augmentation plus faible (facteur 1,4 à

1,6). Concernant le Ca, les auteurs soulignent que l'analyse de la variabilité du rapport Ca/Fe indique une source locale importante. Cela peut provenir d'un sol local riche en calcite ou de matériaux de construction urbains riches en Ca. En plus des éléments crustaux, l'étude conclut à une augmentation non significative de Cd, Ni et Pb les jours de brumes de sable. Concernant les ions, seul le Na⁺ est significativement plus élevé les jours d'intrusions de brumes de sable. Cela traduit une nouvelle fois une voie de transport des particules arrivant le plus souvent du sud en traversant la mer Méditerranée, et donc du sel marin. Plus globalement, les jours de brumes de sable, les concentrations de PM_{2,5} augmentent de 14 % par rapport aux jours sans brumes de sable. Les auteurs suggèrent un enrichissement des particules en sulfates secondaires. En effet, les composants anthropiques ne diminuent pas pendant les jours d'épisodes et le sulfate augmente même légèrement.

Remoundaki *et al.* (2011) s'est intéressé aux PM₁₀ pendant un épisode de brumes de sable ayant eu lieu à Athènes (site urbain) fin mars 2009. Lors de cet épisode, les rétro-trajectoires ont démontré que les masses d'air provenaient du Sahara occidental au début de l'épisode puis du nord de l'Algérie à la fin. La composition élémentaire a été déterminée pour 12 éléments : Si, Al, Fe, K, Ca, Mg, Ti, S, Ni, Cu, Zn et Mn. Les éléments d'origine crustale (Al, Si, Fe, Ca, Ti, K, Mg) présentaient des concentrations élevées et une variabilité temporelle identique. Le silicium (Si) et le calcium (Ca) étaient les éléments d'origine crustale les plus abondants. Pendant l'épisode étudié, le pourcentage de particules minérales dans les PM₁₀ a augmenté significativement, jusqu'à atteindre 79 %. Les auteurs notent également que les sulfates ont contribué de manière significative aux PM₁₀.

L'étude de Conte *et al.* (2020) menée à Lecce, au sud-est de l'Italie, s'est spécifiquement intéressée aux effets des brumes de sable sur la teneur en carbone. Pour cela, les auteurs ont analysé 56 événements entre 2013 et 2018. Les auteurs comparent les teneurs en carbone pendant et hors épisodes de brumes de sable pendant les saisons froides et chaudes. Ils concluent que les épisodes de brumes de sable n'influenceraient pas les concentrations en carbone élémentaire (*elemental carbon*, EC) et carbone suie (*equivalent black carbon*, eBC) dans les PM_{2,5} et PM₁₀. Toutefois, les PM₁₀ seraient enrichies en carbone organique d'origine secondaire pendant les épisodes de brumes, ce qui suggère que ces derniers contribueraient à la formation d'aérosols organiques d'origine secondaire dans la fraction grossière (PM_{2,5-10}).

L'étude menée par Vanderstraeten *et al.* (2008) a été réalisée à Bruxelles (Belgique) et ne concerne donc pas la même zone géographique que les études présentées précédemment. De plus, l'analyse des rétro-trajectoires montre que les brumes de sable ayant été transportées jusqu'à Bruxelles avaient préalablement traversé l'Europe de l'est et l'Europe centrale, ce qui n'est pas la voie de transport la plus commune. Le premier pic de concentrations en PM₁₀ a eu lieu les 24 et 25 mars 2007 et le second pic dans la journée du 29 mars. Toutefois, lors de l'analyse du rapport entre les PM₁₀ et les PM_{2,5}, les auteurs distinguent des différences entre les deux événements malgré des valeurs de PM₁₀ comparables. L'analyse des rapports massiques révèle que, lors du premier pic (24-25 mars), 45 % de la masse des PM₁₀ est constituée de PM_{2,5}, tandis qu'elle est de 86 % lors du second événement (29 mars). Ainsi, alors que le premier pic résulterait clairement de l'épisode de brumes de sable, le second résulterait de la formation d'aérosols secondaires. Pendant l'épisode de brumes de sable, les principaux éléments identifiés étaient Si, Fe, S et Al. Les échantillons contenant également du Ca, Mg et Ti. Du Sn, Cu, Na et Pb étaient rares.

L'étude de Kopanakis *et al.* (2018) a été menée en Crète. Le nombre de prélèvements est plus faible que pour les autres études présentées (5 échantillons au total aux printemps 2004, 2005, 2006 et 2009) et mélange à la fois des dépôts secs et humides (pluies). L'analyse de la composition élémentaire a montré que les brumes de sable contiennent du Si, Al, Ca, Fe, Mg, K et Na en quantité importante et d'autres éléments, tels que Cu, Zn, B, Mn, Ni, Cr, V et Ba, au niveau de traces. Les rapports entre les principaux éléments et le Si ont été calculés (Figure 12). Le Si a été pris comme référence car il est présent en quantité relativement constante dans la croûte terrestre et est peu affecté par les activités humaines.

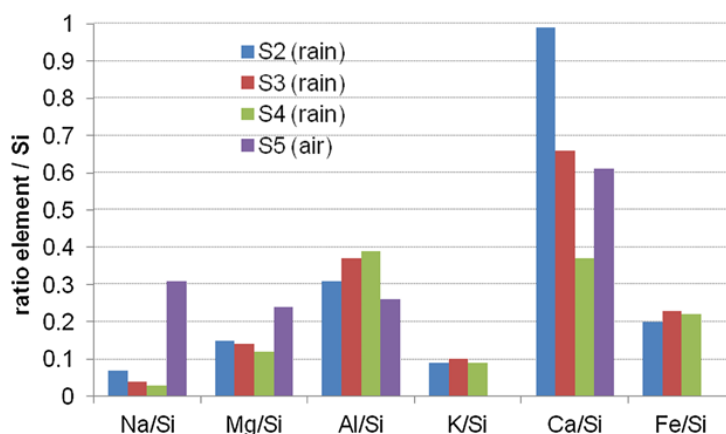


Figure 12. Rapports de concentration élément/Si (pour les éléments : Na, Mg, Al, K, Ca et Fe) des échantillons de brumes de sable collectés (secs et humides) à la station d'Akrotiri, en Crète

Source : (Kopanakis *et al.* 2018)

Dans les prélèvements secs, certains des éléments principaux (K, Fe) et d'éléments traces (Mn, Sr, Hg, U) sont absents. De plus, certains minéraux ou espèces chimiques peuvent se dissoudre dans l'eau, et donc ne pas être détectés dans les prélèvements humides. Les auteurs constatent une différence notable entre les concentrations des éléments principaux dans les échantillons secs (dépôts d'aérosols) et humides (pluies) : 5,6 %, 7,2 %, 7,8 %, 14,2 % et 54,3 % plus élevés dans les dépôts humides pour Al, Ca, Si, Mg et Na respectivement, et avec une différence moyenne de 17,8 %.

L'étude menée par Oduber *et al.* (2020), réalisée à León, au nord-ouest de l'Espagne, a exploité des échantillons d'aérosols et de pluies collectés toutes les 24 heures entre mai 2016 et mai 2017. Concernant les brumes de sable, les auteurs se sont plus particulièrement intéressés à l'événement du 12 au 14 février 2017, qui a coïncidé avec un événement de précipitations. L'eau de pluie a été collectée une fois par jour (échantillon P1 correspondant au 11 février puis P2 au 12, P3 au 13, P4 au 14). L'échantillon de pluie collecté le 11 février (P1) montre une composition chimique avec des valeurs élevées de NH_4^+ , SO_4^{2-} et NO_3^- . Ainsi, cette composition pourrait représenter la pollution anthropique locale. Le 12 février, les brumes de sable atteignaient le nord de l'Espagne, provoquant une augmentation des concentrations atmosphériques de PM_{10} et de Ca, Si, Al, Ti, Mg et Fe et affectant la composition chimique de l'eau de pluie : augmentation des concentrations de Ca^{2+} (> 800 %), Mg^{2+} (71 %), Cl^- (62 %) et SO_4^{2-} (33 %). L'échantillon d'eau de pluie collectée entre le 13 février après-midi (P3) et le 14 matin (P4) montre une diminution des concentrations en éléments crustaux et une augmentation des concentrations en éléments marins (Na^+ et Cl^-) par rapport aux jours

précédents. L'explication la plus probable est un changement de trajectoire des masses d'air (atlantique au lieu d'africaine). L'échantillon de pluie du 12 février (P2) avait la valeur de pH la plus élevée de l'événement (pH 7), principalement dû à la concentration élevée en Ca^{2+} . En effet, l'apport d'éléments crustaux contribue à neutraliser, autrement dit rendre moins acides, les eaux de pluie. Toutefois, même si le transport d'aérosols affecte la composition de l'eau de pluie, les auteurs soulignent que la quantité, l'intensité et le volume emporté par la pluie sont également des facteurs à prendre en compte lors de l'étude de l'interaction précipitations-polluants atmosphériques.

Dans une étude réalisée dans la Sierra Nevada (sud de l'Espagne), Morales-Baquero, Pulido-Villena, et Reche (2013) ont comparé 109 semaines d'échantillonnages secs et humides selon la présence (semaines pluvieuses) ou l'absence (semaines sèches) de pluie et la survenue ou non d'épisodes de brumes de sable (décembre 2000 à décembre 2002). Des différences marquées ont été observées concernant la contribution relative des dépôts secs et humides aux apports totaux pour les différentes espèces chimiques étudiées. Les dépôts secs étaient la principale voie d'apport de particules, de phosphore total, de phosphore réactif soluble, Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ , tandis que Na^+ , l'azote total, NO_3^- et SO_4^{2-} étaient prédominants dans les dépôts humides. Au cours des semaines sèches (absence complète de pluie), l'effet de l'intrusion de brumes de sable est mis en évidence par l'augmentation statistiquement significative de la plupart des espèces chimiques déposées (Tableau 3).

Tableau 3. Quantités moyennes (\pm erreur standard) des espèces chimiques collectées au cours des semaines sèches (absence totale de pluie) et des semaines pluvieuses (présence de pluie) de décembre 2000 à décembre 2002

	Dry weeks			Rainy weeks					
	Dry deposition			Dry deposition			Wet deposition		
	Saharan intrusions	No intrusions	<i>p</i>	Saharan intrusions	No intrusions	<i>p</i>	Saharan intrusions	No intrusions	<i>p</i>
PM	36.7 ± 26.2	22.5 ± 15.6	<0.025	19.5 ± 19.5	15.5 ± 12.5	>0.1	15.6 ± 21.5	12.1 ± 16.2	>0.1
TP	1.4 ± 0.7	1.0 ± 0.9	<0.005	1.0 ± 0.6	0.7 ± 0.6	>0.1	0.8 ± 0.6	1.5 ± 2.2	>0.1
SRP	0.5 ± 0.4	0.4 ± 0.5	<0.1	0.3 ± 0.4	0.3 ± 0.3	>0.1	0.2 ± 0.2	0.2 ± 0.3	>0.1
TN	50.5 ± 25.3	38.3 ± 20.1	<0.005	64.9 ± 77.7	48.2 ± 54.1	>0.1	117.2 ± 108.4	146.6 ± 124.6	>0.1
NO_3^- -N	13.3 ± 10.3	8.8 ± 6.0	>0.1	10.2 ± 10.3	8.3 ± 7.4	>0.1	36.0 ± 26.9	40.0 ± 33.4	>0.1
SiO_2 -Si	2.8 ± 1.8	2.4 ± 1.7	>0.1	2.0 ± 1.2	1.9 ± 1.3	>0.1	3.9 ± 4.0	5.5 ± 6.4	>0.1
Ca^{2+}	96.7 ± 42.9	55.6 ± 27.6	<0.025	67.3 ± 33.0	52.2 ± 30.3	>0.1	98.4 ± 101.3	76.0 ± 51.1	>0.1
nss Ca^{2+}	95.5 ± 42.7	54.6 ± 27.5	<0.025	66.1 ± 32.7	50.7 ± 30.1	>0.1	96.6 ± 100.7	72.6 ± 49.7	>0.1
Na^+	52.9 ± 23.8	45.6 ± 22.8	>0.1	58.7 ± 46.1	69.9 ± 84.1	>0.1	83.4 ± 64.4	153.4 ± 135.0	<0.1
Mg^{2+}	15.5 ± 17.9	7.0 ± 6.5	<0.01	10.5 ± 10.0	7.3 ± 5.6	>0.1	15.7 ± 14.2	17.6 ± 15.6	>0.1
nss Mg^{2+}	9.3 ± 18.4	2.6 ± 6.3	<0.025	4.4 ± 8.0	2.5 ± 4.6	>0.1	6.2 ± 9.9	4.7 ± 7.5	>0.1
K^+	16.9 ± 30.8	13.8 ± 29.1	<0.1	13.0 ± 21.5	9.2 ± 12.1	>0.1	22.2 ± 71.4	12.5 ± 12.5	>0.1
nss K^+	15.8 ± 31.0	12.8 ± 29.1	<0.05	11.8 ± 20.9	7.8 ± 11.8	>0.1	20.4 ± 70.8	9.3 ± 10.3	>0.1
Cl^-	36.0 ± 42.0	17.4 ± 16.2	<0.01	27.4 ± 36.7	27.9 ± 59.4	>0.1	28.6 ± 24.1	87.2 ± 124.6	>0.1
SO_4^{2-} -S	10.2 ± 8.9	9.4 ± 15.0	>0.1	9.5 ± 13.1	5.7 ± 5.6	>0.1	18.5 ± 18.4	28.7 ± 24.2	>0.1
nss SO_4^{2-} -S	7.2 ± 8.5	7.0 ± 14.4	>0.1	6.5 ± 13.0	3.0 ± 4.5	>0.1	14.7 ± 18.1	21.2 ± 22.5	>0.1

p montre les valeurs de probabilité d'après le test de Kolmogorov-Smirnov pour les différences moyennes.

Les dépôts secs peuvent être collectés dans les deux types de semaines sous l'influence de brumes de sable sahariennes ou non. Les dépôts humides ne peuvent être collectés que pendant les semaines pluvieuses, sous l'influence ou non de brumes de sable. Les différences significatives ($p < 0,05$) et presque significatives ($p < 0,1$) sont en gras. Les unités sont les $\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ sauf pour les PM en $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Source : (Morales-Baquero, Pulido-Villena, et Reche 2013)

Au cours des semaines pluvieuses, l'effet des brumes de sable sur le dépôt sec n'était statistiquement significatif pour aucune des espèces chimiques analysées. Cela peut être interprété comme l'effet du lessivage atmosphérique par la pluie, qui réduit la disponibilité des aérosols pour la chute sèche suivante. Par exemple, le dépôt total de particules (sec + humide) au cours des semaines pluvieuses ou sèches était similaire, en présence de brumes de sable ou non. Ces résultats soulignent que le dépôt total de particules était similaire indépendamment de la présence de pluie, et que l'effet du lessivage par la pluie ne laisse que moins de particules (et d'ions solubles associés) pour le dépôt sec suivant.

3.1.1.4 Caraïbes et côte est des Etats-Unis

▪ Points clés :

L'analyse des brumes de sable nord-africaines transportées vers les Caraïbes démontre que les compositions présentant des différences importantes entre les régions sources sont relativement homogénéisées au cours du transport (Bozlaker *et al.* 2018).

Les changements de composition semblent se produire proche des régions sources (Bozlaker *et al.* 2018). En effet, le transport sur de longues distances aboutit à un mélange à grande échelle des particules et donc une homogénéisation de la composition (Trapp, Millero, et Prospero 2010; E. A. Reid *et al.* 2003).

Les territoires situés à l'Ouest de l'océan Atlantique sont également impactés par les brumes de sable en provenance d'Afrique du Nord. Ces particules sont transportées au-dessus de l'océan par les alizés, ce qui représente environ 7 jours de transport pour atteindre les Caraïbes, affectant leurs caractéristiques physico-chimiques. Aucune étude n'a été identifiée dans les départements, régions et collectivités d'outre-mer français (DROM-COM). Toutefois, certaines ont été réalisées dans les Caraïbes ou au sud-est des Etats-Unis, notamment à Miami en Floride. L'été (juin-juillet) est la saison où les épisodes de brumes de sable sont les plus intenses et les plus fréquents dans ces zones géographiques, bien que les concentrations maximales à Miami (Etats-Unis) soient généralement environ deux fois plus faibles qu'à la Barbade (Caraïbes) (Trapp, Millero, et Prospero 2010).

Concernant les Caraïbes, une étude a été menée à la Barbade au cours des étés 2013 et 2014 sur les particules totales en suspension (en anglais : *total suspended particles* (TSP*) voir Annexe 3. Glossaire) non solubles (Bozlaker *et al.* 2018). La Barbade se situe à l'extrémité orientale de la mer des Caraïbes, ce qui permet d'obtenir des échantillons d'aérosols qui ne sont normalement pas affectés par les sources continentales situées à l'Est. L'analyse des rétro-trajectoires et des émissions nord-africaines suggèrent que le Sahara occidental, le Maroc, la Mauritanie, l'Algérie et la Libye sont les principales régions sources de brumes de sable de la Barbade avec des contributions moindres du Mali, du Niger et du Tchad (Formenti, Rajot, *et al.* 2011). Bien que des différences aient été observées parmi les concentrations de particules sahariennes au cours des étés 2013 et 2014, les abondances élémentaires dans les échantillons se situaient dans un intervalle relativement étroit, ce qui suggère que les aérosols provenaient de régions sources similaires. Comme attendu, les traceurs d'aérosols minéraux (Si, Al, Fe, Ti) et marins (Na, Mg, Ca, K) étaient les éléments les plus abondants dans les particules de brumes de sable. Les aérosols de la Barbade étaient significativement appauvris en Ti et Si et les rapports de concentration des éléments crustaux typiques (Ti/Al, Si/Al, Ca/Al, Ti/Fe, Si/Fe et Ca/Fe) étaient très différents de ceux de la plupart des régions

sources hypothétiques. Ce constat traduit des changements de compositions survenus pendant le transport et une élimination du Si et du Ti par des mécanismes de dépôt atmosphérique. De plus, peu de différences sont observées entre les aérosols des sites côtiers d'Afrique de l'Ouest et ceux de la Barbade, ce qui suggère que les changements se produisent relativement proches des régions sources. Si l'on utilise le V comme marqueur d'émission du transport maritime, les émissions des navires semblent avoir un impact négligeable sur la composition élémentaire des aérosols de la Barbade. Concernant le Pb, l'enrichissement des aérosols provient très probablement des émissions industrielles en provenance d'Afrique ou d'Europe, transportées par les masses d'air vers les Caraïbes. Toutefois, les auteurs notent que les rapports élémentaires varient sur une plage beaucoup plus large dans les régions sources que ceux mesurés après le transport des particules. Ainsi, les différences de composition apparemment importantes entre les régions sources sont relativement homogénéisées lorsque les particules soulevées et mélangées en Afrique du Nord sont ensuite transportées sur de longues distances.

Néanmoins, les auteurs notent que la plupart des données disponibles sur les caractéristiques des sources africaines sont basées sur des échantillons de sols ou de dépôts, ce qui pourrait biaiser la comparaison avec les aérosols transportés sur de longues distances en fonction des fractions granulométriques prises en compte.

Une autre étude réalisée au cours des étés 2003 et 2004 a analysé la variabilité de la composition élémentaire de particules totales en suspension (TSP*) collectés dans 197 échantillons à la Barbade et à Miami (Floride, Etats-Unis) (Trapp, Millero, et Prospero 2010). Dans cette étude, l'Al n'a pas été utilisé comme référence en raison d'une tendance à une plus grande variabilité avec une taille d'échantillon plus grande. Le Mn a donc été utilisé. Les analyses concluent que les échantillons étaient relativement uniformes. L'homogénéité de la composition des brumes suggère qu'une fraction majeure provient soit de régions ayant une composition similaire, soit de plusieurs sources différentes suivies d'un mélange pendant le transport. Les enrichissements les plus élevés et la plus grande variabilité ont été mesurés pour des éléments connus pour avoir des sources anthropiques majeures (As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, V et Zn). Ces conclusions contrastent avec les résultats d'études réalisées sur des sites plus proches des sources, où les caractéristiques des zones sources peuvent avoir une influence directe. Lors du transport longue distance ayant lieu pendant les mois d'été, les émissions proviennent généralement de vastes zones, sont soulevées à des altitudes élevées (6 à 8 kilomètres) et transportée sur un large front de 10 à 15° de latitude. Ainsi, les auteurs suggèrent que ces processus aboutissent à un mélange à grande échelle dans lequel la signature d'une source spécifique est largement homogénéisée et ne peut être identifiée individuellement. En conclusion, les résultats suggèrent que l'observation d'une concentration élémentaire uniforme devrait être représentative d'une grande zone de l'Atlantique tropical, du moins pendant les mois d'été où les intrusions de brumes de sable sahariennes sont les plus importantes.

Lors de la *Puerto Rico Dust Experiment* (PRIDE), campagne conjointe entre l'*Office of Naval Research* (ONR) et la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), des prélèvements de particules de brumes de sable sahariennes ont été réalisés sur la côte est de l'île de Porto-Rico entre le 28 juin et le 24 juillet 2000 (E. A. Reid *et al.* 2003). Les prélèvements ont été réalisés à différentes altitudes, allant de la surface (10 m, sur le toit d'un bâtiment) à 5 000 mètres (à bord d'un aéronef, de 1 000 m à 5 000 m). A bord d'un aéronef, dans la

couche d'air saharienne (*saharan air layer*, SAL), soit au-dessus de l'inversion des alizés, ils étaient principalement exempts d'influence marine et composés presque exclusivement de brumes de sable. Dans la couche limite marine (*marine boundary layer*, MBL* ; voir Annexe 3. Glossaire), à une altitude inférieure à 1 000 mètres, les particules étaient une combinaison de brumes et de sels marins. De plus, il est important de noter que pendant cet épisode, Porto Rico était proche du centre du panache de brumes. Le silicium (Si) a été choisi comme traceur principal des brumes de sable afin de limiter les incertitudes analytiques liées aux éléments légers tels que l'aluminium (Al). La spéciation élémentaire de particules individuelles et la mesure de la taille a été effectuée sur 60 500 particules. Le diamètre modal moyen estimé de la surface est d'environ 5 µm, avec un rapport d'aspect moyen de 1,9. Globalement, les particules étaient présentes sous forme d'agrégat (environ 50 % de toutes les particules, 70 % des particules de diamètre >3 µm). Les minéraux argileux plus gros étaient généralement porteurs de particules plus petites. Comme cela a été documenté dans d'autres articles concernant la campagne PRIDE, la distribution granulométrique des particules mesurées était relativement stable pendant la campagne et ne variait généralement pas avec l'altitude, sauf dans un cas observé (Maring 2001; J. S. Reid, Jonsson, et al. 2003; J. S. Reid, Kinney, et al. 2003). Les particules appartenaient généralement à trois grandes catégories :

- Plus de 70 % de la masse des particules de brumes de sable est attribuée aux silicates stratifiés (minéraux argileux alumino-silicatés ou feldspaths). Les espèces dominantes sont l'illite, la kaolinite et la montmorillonite.
- Les silicates contenant de moins grandes quantités d'aluminium (comme le silicium amorphe et le quartz) constituent le deuxième groupe le plus important (environ 20 %).
- Les particules restantes non composées de silicium semblent être des carbonates, des sulfates, des sels et d'autres oligo-éléments.

En conclusion, les brumes de sable seraient principalement composées d'aluminosilicates et de silicates amorphes, le reste étant constitué de traces de gypse, de carbonates de calcium et d'autres espèces.

Entre le 25 juin et le 3 juillet 2000, les régions sources étaient situées à la lisière du Sahel, dans la zone de la frontière entre le Mali, le Niger et l'Algérie, s'étendant vers le nord en Algérie (région de lacs salés saisonniers). Les régions sources semblaient se déplacer du sud du Sahara central au Sahara occidental au cours de l'étude. Toutefois, à l'exception de l'épisode du 5 juillet 2000, pendant lequel un changement dans les données morphologiques et les minéraux non aluminosilicates est observé, la composition des brumes de sable était remarquablement stable. La composition chimique anormale de l'événement du 5 juillet 2000 serait due à des sources plus orientales qu'ultérieurement. Malgré cela, les rapports entre le Si et l'Al sont demeurés assez constants tout au long de l'étude. Les auteurs émettent donc l'hypothèse d'une homogénéisation lors du transport longue distance.

En raison de la présence abondante de sel marin, le sodium ou le chlorure associés aux brumes de sable sahariennes n'étaient pas détectables. Néanmoins, comme attendu, le sodium et le chlorure sont fortement corrélés, et le sel marin était une espèce indépendante des brumes de sable. Aucune corrélation n'a été trouvée entre le sel et toute espèce apparentée aux particules de brumes de sable ou au soufre.

3.1.1.5 Moyen-Orient

Les études identifiées réalisées au Moyen-Orient n'ont pas été incluses. En effet, dans cette zone géographique, les sources de brumes de sable sont multiples. Elles peuvent être sahariennes mais également locales. De ce fait, elles n'apparaissent pas représentatives des

brumes de sable transportées en France métropolitaine, aux Antilles ou en Guyane, dont ce rapport fait l'objet.

3.1.2 Composition microbiologique

Les brumes de sable sont également composées d'agents biologiques. Ces derniers sont omniprésents dans l'environnement naturel et peuvent provenir d'individus humains, d'animaux, de plantes, ou de matériaux. Les particules aéroportées contenant des cellules ou des micro-organismes vivants ou morts appelés agents biologiques (virus, bactéries, moisissures et protozoaires), de substances ou de sous-produits provenant de ces cellules/organismes (par exemple : toxines, endotoxines, mycotoxines, protéines allergènes, pollen, enzymes...) sont qualifiées de bioaérosols (IRSST 2015).

Concernant les bactéries et les champignons aéroportés, il convient de souligner qu'il existe deux types de méthodes pour les quantifier et/ou les identifier :

- Les méthodes culture-dépendante (CD) : Ces méthodes permettent uniquement le comptage et l'identification des micro-organismes vivants capable de croître sur une gélose nutritive. Ces méthodes sous-estiment grandement le nombre réel de micro-organismes car il est reconnu que 90 à 99 % des micro-organismes environnementaux ne sont pas cultivables (Amann, Ludwig, et Schleifer 1995; DeLong et Pace 2001). Cependant, ces méthodes permettent de s'assurer de la viabilité des agents biologiques et donc de leur potentiel infectieux.
- Les méthodes non culture-dépendante (NCD) : Elles permettent le comptage de tous les micro-organismes (vivants ou morts ou non cultivables). Les méthodes NCD de comptage par microscopie ne permettent pas l'identification des espèces ou genres alors que les méthodes moléculaires (quantification de séquences d'ADN) permettent d'avoir une estimation des quantités et de la diversité des micro-organismes. Il est à noter que les analyses métagénomiques ne permettent généralement pas d'identifier les micro-organismes au niveau de l'espèce, mais donnent des résultats relatifs des proportions de classes / familles bactériennes ou fongiques. Ces méthodes sont plus pertinentes que les méthodes CD lorsque l'on s'intéresse aux propriétés allergéniques ou toxiques des micro-organismes qui conservent leurs propriétés même lorsqu'ils ne sont plus viables.

Le choix de la méthode dépend de l'objectif de l'étude. Les résultats obtenus avec ces deux méthodes peuvent fortement varier car la première méthode ne mesure / n'identifie que les micro-organismes cultivables alors que la seconde quantifie / identifie tous les micro-organismes présents dans l'échantillon analysé. Ainsi, les résultats obtenus avec chacune de ces méthodes ne sont pas comparables entre eux.

3.1.2.1 Impact des brumes de sable sur la viabilité et les concentrations de bactéries et champignons dans l'air et autres substrats

▪ Points clés :

Les neuf études retenues montrent que la viabilité de certains micro-organismes (bactéries et/ou champignons) peut être préservée lors de leur transport du continent africain vers l'Europe (6 études) et l'Amérique (3 études). Une augmentation des concentrations de ces micro-organismes est aussi systématiquement observée durant les épisodes de brumes de sable.

Les micro-organismes viables identifiés sont principalement d'importance environnementale (sol, eau, plantes) résistants aux UV et potentiellement aptes à coloniser les écosystèmes récepteurs. Aucun micro-organisme d'importance médicale (pathogène strict) n'a été

identifié. Certaines études (Griffin *et al.* 2001; 2003; 2007; Navarro, Del Moral, De Pablos, *et al.* 2024) mentionnent la présence de quelques pathogènes opportunistes (potentiellement infectieux chez les personnes immunodéprimées). Toutefois, ce sont des micro-organismes naturellement présents dans les pays recevant ces particules de brumes de sable. A noter aussi que la présence de ces pathogènes opportunistes ne permet pas d'évaluer un quelconque risque sanitaire puisque les voies de transmission ainsi que les doses infectieuses ne sont pas documentées.

L'étude menée en Israël (Grishkan, Schlesinger, et Mamane 2012) montre que les spores de champignons sont retrouvées plutôt dans les fractions granulométriques de petites tailles (1,1 - 3,3 μm). Toutefois, une autre étude menée aux Îles Canaries (Navarro, Del Moral, De Pablos, *et al.* 2024) montre que les bactéries se retrouvent plutôt dans les fractions de taille grossière (> 10 μm).

La majorité des études identifiées portaient sur la présence de bactéries* et/ou champignons microscopiques* (voir Annexe 3. Glossaire) dans les brumes de sable sahariennes après leur transport.

Parmi ces études concernant les bactéries et/ou champignons, la plupart ont utilisé des méthodes de culture permettant de juger la viabilité des micro-organismes associés aux épisodes de brumes de sable.

La première étude (Griffin *et al.* 2001), menée aux Etats-Unis sur 5 prélèvements d'air réalisés en 2000 aux Îles Vierges, a observé entre 2 et 3 fois plus de bactéries et de champignons cultivables lors d'épisodes de brumes de sable en provenance d'Afrique en comparaison à des périodes sans brumes de sable. Le comptage des bactéries et virus par microscopie a montré les mêmes tendances (augmentation d'un facteur de log). Les colonies de bactéries et champignons ont été identifiées par séquençage et les résultats ont montré que ce sont principalement des micro-organismes environnementaux (marin, sol et plantes) dont certains pathogènes de plantes comestibles. Les auteurs ont émis l'hypothèse que la présence de panaches de brumes de sable à haute altitude atténue le rayonnement ultraviolet (UV), ce qui permettrait aux micro-organismes situés à plus basse altitude de survivre durant les 5 à 7 jours de transport transatlantique. Les micro-organismes peuvent aussi se fixer aux autres particules (crevasses et fissures), ce qui peut également les protéger des UV.

La même équipe de recherche (Griffin *et al.* 2003) a élargi cette première étude en incluant 26 autres prélèvements réalisés entre 2000 et 2001 aux Caraïbes et 17 prélèvements réalisés sur un bateau de croisière navigant au nord de Cuba, de la République Dominicaine et de Porto Rico. Parmi ces 43 échantillons, 15 ont été effectués durant des épisodes de brumes de sable alors que les autres l'ont été en dehors d'épisodes. Les résultats des cultures de bactéries et champignons confirment que lors d'épisodes de brumes de sable, il y a une augmentation (x 8) de bactéries et champignons cultivables. La plupart d'entre eux sont des micro-organismes environnementaux, quelques pathogènes opportunistes pour l'humain et des pathogènes reconnus pour des insectes et des végétaux.

Finalement, cette équipe de recherche a utilisé la même méthodologie en Turquie (Griffin *et al.* 2007) et a à nouveau montré une augmentation des concentrations de bactéries et champignons cultivables lors d'épisodes de brumes de sable. Toutefois, il convient de noter que le mode de conservation des échantillons avant l'analyse microbiologique de cette étude n'est pas précisé et pourrait influencer les résultats.

Une autre étude menée en Israël (Grishkan, Schlesinger, et Mamane 2012; 2017) a porté sur les champignons cultivables de l'air durant des épisodes de brumes de sable comparativement

aux jours sans épisode de brumes de sable. Les résultats des cultures sur des prélèvements par impaction des poussières (impacteur en cascade Andersen à 6 étages), suivies par une identification moléculaire des colonies, ont permis d'isoler 202 espèces de champignons. Parmi elles, 132 étaient des espèces associées aux sols et 70 des espèces associées aux plantes. Une augmentation significative de la diversité (nombre d'espèces) et des concentrations a été observée les jours de brumes de sable (7 prélèvements) par rapport aux jours sans brumes de sable (7 prélèvements réalisés pendant les jours précédant ou suivant un épisode). A noter que les plus grandes quantités de champignons cultivables ont été isolées à partir des plus petites tailles de particules collectées par l'impacteur (diamètre aérodynamique : 1,1 μm à 2,2 μm et 2,1 à 3,3 μm).

Au centre de l'Italie, (Federici *et al.* 2018) se sont intéressés à la viabilité, l'activité métabolique et la résistance aux UV des bactéries présentes dans l'air lors de deux épisodes de brumes de sable en réalisant des cultures à différentes températures (4, 25 et 50 °C) et en mesurant leurs activités enzymatiques ainsi que leur résistance aux UV. Les auteurs ont estimé le nombre de UFC (unité formant colonie) transportés lors des intrusions de brumes de sable sahariennes. Ces valeurs variaient en fonction des températures de croissance et des épisodes de brumes de sable de 214 à 719 UFC/m³ d'air, ce qui est plus élevé que les valeurs moyennes rencontrées dans l'air des endroits sans activités humaines. De plus, tous les isolats ont montré au moins une activité enzymatique (lipase ou amylase ou estérase ou protéase) et pratiquement tous les clones testés (11/12) ont résisté à une exposition aux UV pendant une minute.

Certaines études se sont appuyées sur d'autres matrices de prélèvement.

Deux études récentes menées par la même équipe de recherche dans la ville de Grenade (Espagne) et aux Îles Canaries montrent la viabilité d'espèces bactériennes dans les brumes de sable. La première étude menée à Grenade (Navarro, Del Moral, Weber, *et al.* 2024) a collecté huit échantillons de pluie « rouge » pendant des épisodes de brumes de sable sur trois années (2017, 2021 et 2022). La composition de la communauté procaryote déterminée par séquençage de l'amplicon 16S était similaire à celle trouvée dans les intrusions de brumes de sable, démontrant le lien entre les épisodes de pluie rouge et les intrusions de brumes de sable africaines en ce qui concerne la composition microbienne. Les cultures de ces échantillons ont abouti à la croissance de 44 micro-organismes (45 % de Gram positif et 43 % de Gram négatif), 23 % des *Bacillus sp* étaient sporulés et 64 % de toutes les bactéries étaient pigmentées. La plupart de ces micro-organismes provenaient du sol. Les auteurs ont mentionné que la présence de bactéries sporulées et/ou pigmentées explique la résistance à la chaleur, à la dessiccation et aux UV durant le transport. Des analyses au microscope électronique ont montré la présence de nanobactéries. La seconde étude se basant sur trois échantillons de poussières sédimentées, pendant trois épisodes différents de brumes de sable aux Îles Canaries (Navarro, Del Moral, De Pablos, *et al.* 2024), a également montré la viabilité d'une vingtaine d'espèces bactériennes. Une identification moléculaire de ces dernières a montré la présence de potentiels pathogènes végétaux (avec des effets positifs ou négatifs selon les micro-organismes) et animaux. Des pathogènes opportunistes humains ont également été identifiés. Les bactéries étaient plus nombreuses dans les fractions de taille > 10 μm que dans les fractions de taille plus petite, ce qui pourrait s'expliquer par leur origine et la faible distance par rapport au sol. Des photos de microscopie électronique ont montré que les bactéries (colonies et/ou biofilm) sont situées sur la surface des particules minérales.

Chuvochina *et al.* 2011 ont tenté de cultiver les micro-organismes présents sur le glacier du Mont-Blanc en France (4250 m d'altitude) en analysant des échantillons de dépôts de brumes de sable sur la neige. Ils ont mis en évidence la viabilité de trois espèces de bactéries capables de résister aux rayons UV. Bien que les données concernant cet environnement soient encore limitées, ces espèces ont un potentiel de colonisation de neige car elles sont capables de résister à un rayonnement accru, à la dessiccation, et de tolérer les basses températures.

Une autre étude (Peter *et al.* 2014) s'appuyant sur des prélèvements de pluie au bord des lacs de montagne des Alpes autrichiennes, a également montré que certains taxons avaient le potentiel d'établir des populations viables dans les lacs récepteurs d'eau de pluies après des épisodes de brumes de sable. Cela pourrait être une source importante pour la rare biosphère bactérienne d'eau douce. Cependant, des études conçues pour aborder le rôle concurrent de la communauté bactérienne naturelle établie doivent être menées afin d'affirmer la colonisation positive par les bactéries aéroportées.

3.1.2.2 Impact des brumes de sable sur la diversité bactérienne et fongique

- Points clés :

Parmi les 5 études retenues portant sur les aérosols, 3 montrent des effets significatifs des brumes de sable sur l'augmentation de la diversité des communautés bactériennes (2 études) et fongiques (1 étude) locales. Au contraire, deux autres études ne montrent que des effets limités des brumes de sable sur la diversité des communautés bactériennes et fongiques. Une de ces études met en évidence la grande variation des diversités des communautés de micro-organismes en fonction des saisons.

La présence de pathogènes durant les épisodes de brumes de sable est mentionnée dans 3 études. Cependant, aucune preuve que ces pathogènes ont été amenés par les intrusions sahariennes n'a été donnée car tous ces pathogènes sont ubiquitaires.

L'étude portant sur les micro-organismes présents dans les pluies « rouges » montre également que les brumes de sable ont pour effet une augmentation de la diversité des communautés bactériennes et fongiques dans ces eaux de pluie.

Plusieurs études ont étudié l'effet des épisodes de brumes de sable sur la diversité des communautés bactériennes et fongiques de l'air. Une étude a regardé uniquement les communautés fongiques (Grishkan, Schlesinger, et Mamane 2012), deux études ont observé uniquement les communautés bactériennes (Erkorkmaz, Gat, et Rudich 2023; Federici *et al.* 2018) alors que deux autres études ont traité à la fois des communautés bactériennes et fongiques (Andrés Núñez, Moreno, et García 2024; Das *et al.* 2023). Une étude (Navarro, Del Moral, Weber, *et al.* 2024) a quant à elle étudié la diversité microbienne dans les échantillons de pluies.

L'étude menée sur les communautés fongiques à Haïfa en Israël (Grishkan, Schlesinger, et Mamane 2012), en plus de montrer une augmentation des champignons cultivables (voir § 3.1.2.1) a aussi montré que la diversité (richesse) des communautés fongiques était significativement plus élevée dans les échantillons prélevés lors de brumes de sable (16 à 47 espèces différentes) que durant les jours sans brumes de sable (6 à 16 espèces différentes). De plus, les groupes phylogénétiques (clusters) identifiés lors d'épisodes de brumes de sable montraient peu de similarité avec ceux obtenus en dehors des épisodes.

Concernant l'influence des intrusions sahariennes sur les communautés bactériennes, l'étude menée au centre de l'Italie (Federici *et al.* 2018) a montré que les épisodes de brumes de sable en provenance du Sahara étaient associés à une augmentation de l'abondance et de la diversité des communautés bactériennes en comparaison aux périodes sans brumes de sable où un vent du nord-ouest était présent (Figure 13).

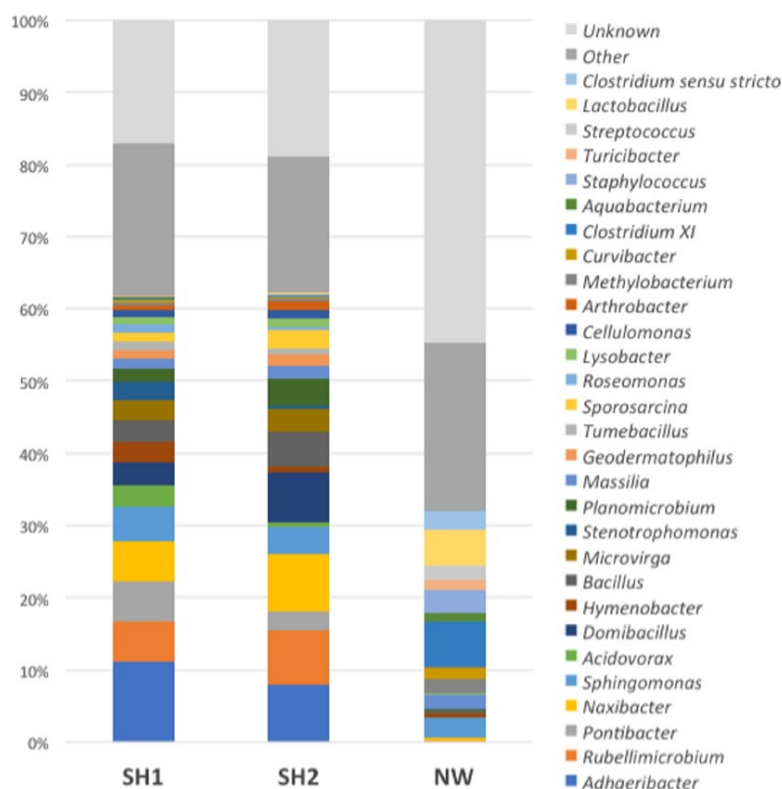


Figure 13. Genres les plus abondants (>1%) dans les échantillons SH1, SH2 et NW.

SH1 : prélèvement du 29/11/2014 à 18h au 30/11/2014 à 12h, provenance des vents : Tunisie – Libye.

SH2 : prélèvement du 30/11/2014 à 12h au 1/12/2014 à 6h, provenance des vents : Tunisie – Libye.

NW : prélèvement du 12/12/2014, provenance des vents : Nord-Ouest de l'Europe.

Source : (Federici *et al.* 2018)

Ces communautés bactériennes observées dans les brumes de sable étaient en partie composées d'espèces typiques des régions désertiques.

L'étude menée en Israël a, quant à elle, constaté que la composition des communautés bactériennes dans l'air variait selon l'origine de la masse d'air et la taille des particules (Erkorkmaz, Gaţ, et Rudich 2023). L'abondance bactérienne, la diversité et la richesse en espèces étaient plus élevées dans les masses d'air sous influence terrestre (Sud-Ouest et Est) que dans les masses d'air sous influence marine (Nord-Ouest). De même, elles étaient plus élevées dans la fraction de particules de taille comprise entre 3 à 10 µm que dans la fraction de taille 0,49 à 1,5 µm. Cela suggère que les bactéries en suspension dans l'air étaient principalement associées aux particules de brumes de sable ou transportées sous forme d'agrégats cellulaires. Lors des comparaisons entre les masses d'air du Sud-Ouest (Sahara) et de l'Est (Irak, Syrie et péninsule arabe), la diversité des communautés bactériennes était significativement plus grande dans les masses d'air en provenance de l'Est que dans celles du Sud-Ouest. Les auteurs mentionnent dans leurs conclusions que de l'ARN (acide

ribonucléique) de potentielles bactéries dangereuses pour l'Homme, l'animal et les végétaux était présent dans leurs échantillons sans toutefois développer davantage cette affirmation.

La première étude portant sur les communautés bactériennes et fongiques a été réalisée au Texas (Das *et al.* 2023). Les résultats de cette dernière ont apporté des preuves limitées suggérant que l'incursion de brumes de sable sahariennes à Houston n'a pas considérablement modifié la diversité des communautés fongiques et bactériennes aéroportées locales. Sur les 2 193 OTU (*operating taxonomic units*) identifiés dans cette étude, seuls 17 ont montré une augmentation significative de leur abondance à mesure que les brumes de sable pénétraient à Houston. Chacun de ces 17 taxons est cosmopolite, et plusieurs taxons avaient été détectés en faibles concentrations dans des échantillons collectés avant que les brumes de sable ne soient présentes. Les résultats suggèrent également que les concentrations de particules sahariennes sont un facteur important pour prédire la diversité fongique et bactérienne. Les auteurs mentionnent que cet effet est plus probablement associé aux interactions des brumes de sable sur la dynamique locale plutôt qu'à la simple migration transcontinentale du biote. A noter que la présence de multiples espèces bactériennes/fongiques opportunistes pathogènes pour les humains, les plantes ou les animaux a été mise en évidence.

La seconde étude ayant traité l'influence des brumes de sable sur la diversité bactérienne et fongique a été menée au centre de l'Espagne durant quatre épisodes différents (Andrés Núñez, Moreno, et García 2024). Les résultats montrent que la composition des communautés de bactéries et champignons dans l'air présente une saisonnalité marquée. Pendant les épisodes d'incursions de brumes de sable, les abondances relatives des espèces prédominantes lors des journées sans brumes de sable n'ont pas été altérées. Néanmoins, des taxons bactériens et fongiques spécifiques associés à ces incursions ont été identifiés. Au total, 7 342 ASV (variants de séquences dont 5 426 bactériens et 1 016 fongiques) n'ont été retrouvés que durant les jours avec épisode de brumes. La composition et l'abondance de ces taxons étaient également liées à la période de l'année. Des agents pathogènes végétaux et animaux ont été identifiés avant et tout au long des jours influencés par les brumes de sable, dont certains n'ont été détectés que pendant ces événements. Au total, 40 pathogènes (de végétaux et d'animaux) ont été détectés dans les échantillons, dont 37 présents les jours de brumes de sable. Leur abondance était relativement faible avec une augmentation en été pour les bactéries (maximum 2,1 %) et en hiver pour les champignons (maximum 3,8 %). Une analyse détaillée des pathogènes présents dans tous les échantillons collectés les jours de brumes de sable mais absents les autres jours précédents ces événements met en évidence 9 espèces qui pourraient être associées aux épisodes de brumes de sable. Cependant, étant donné que ces 9 pathogènes avaient été identifiés à d'autres moments (autre saison), les auteurs concluent qu'aucune corrélation ne pouvait être faite entre les brumes de sable et la présence de ces pathogènes.

Finalement, l'étude de (Navarro, Del Moral, Weber, *et al.* 2024), en plus de regarder la viabilité des micro-organismes issus de pluies « rouges », a également étudié la diversité des communautés bactériennes et fongiques de ces eaux de pluie en Espagne. Les résultats montrent que la composition de la communauté de micro-organismes (bactéries et champignons) était similaire à celle trouvée dans les brumes de sable sahariennes, démontrant le lien entre les épisodes de pluie rouge et les épisodes d'intrusion de sables africains. En particulier, la forte abondance (18 %) dans les échantillons de *Bacillota*, qui est une caractéristique que l'on retrouve souvent dans les brumes de sable africaines, confirme ce lien. De manière générale, ces résultats montrent une plus grande diversité que celle observée précédemment dans le sud de l'Espagne (Sánchez De La Campa *et al.* 2013).

3.1.2.3 Impact des brumes de sable sur les autres agents biologiques : endotoxines, virus et pollens

- Points clés :

Il a été constaté que les endotoxines contribuent à la cytotoxicité⁷ et aux réponses inflammatoires provoquées par l'exposition urbaine aux PM₁₀ de brumes de sable, suggérant un effet synergique des endotoxines locales avec celles provenant des brumes de sable (M. G. Ortiz-Martínez *et al.* 2015).

Aucune association statistique significative n'a pu être mise en évidence entre la fréquence de détection de virus entériques (entérovirus et rotavirus) et la présence de brumes de sable africaines (Gonzalez-Martin *et al.* 2018).

Une association entre des pics de pollens et des intrusions de brumes de sable africaines a été observée dans le centre de l'Espagne mais pas dans la région de la côte sud-est (Rojo *et al.* 2021).

- Endotoxines :

Une étude menée à Porto Rico a porté sur le potentiel toxique et pro-inflammatoire des endotoxines présentes dans l'air d'une région urbaine et d'une région rurale en comparant les jours avec et sans épisodes de brumes de sable (M. G. Ortiz-Martínez *et al.* 2015). Des tests *in vitro* de toxicité d'extraits organiques des particules PM₁₀ ont été menés sur des cultures de cellules. Les endotoxines avaient préalablement été mesurées dans ces extraits provenant de particules présentes pendant et en dehors des épisodes de brumes de sable. Une concentration plus élevée d'endotoxines dans les PM₁₀ a été mesurée en région urbaine pendant les jours de brumes de sable (168 UE/mg) par rapport aux jours sans épisodes de brumes de sable (116 UE/mg). La concentration d'endotoxines dans les échantillons prélevés en dehors des épisodes est comparable pour les sites urbains et ruraux. Toutefois, la concentration est plus élevée en zone urbaine qu'en zone rurale lors des jours de brumes.

- Virus :

Une étude menée à Tenerife a identifié, par des méthodes moléculaires, la présence de virus entériques (entérovirus et rotavirus) dans des échantillons d'air prélevés à différentes périodes (2009, 2013, 2020 et 2021) (Gonzalez-Martin *et al.* 2018). Les associations potentielles entre la présence de virus, les intrusions de brumes de sable et d'autres paramètres climatiques ont été analysés. Les entérovirus et rotavirus ont été détectés respectivement dans 15,4 % (20/130) et 36,9 % (48/130) des échantillons.

- Pollens :

Les objectifs de l'étude menée en Espagne étaient d'analyser les apparitions simultanées de pics de pollens dans l'air et les intrusions de brumes de sable saharo-sahéliennes dans les régions centrales et sud du pays (Rojo *et al.* 2021). Les résultats ont montré qu'une augmentation des concentrations de pollens en suspension dans l'air lors des épisodes de brumes était observée dans les zones ibériques intérieures, mais pas dans les zones côtières

⁷ « Capacité d'une substance ou d'une cellule spécialisée à détruire les cellules de l'organisme. » (Larousse, URL <https://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/cytotoxicit%C3%A9/185249>)

du sud-est, où les concentrations de pollen étaient plutôt en diminution coïncidant avec les vents dominants d'est venant de la mer. Les concentrations totales de pollen et des types de pollens spécifiques tels que *Olea*, *Poaceae* et *Quercus* ont montré une augmentation dans la péninsule ibérique centrale lors d'épisodes de brumes de sable lorsque deux phénomènes météorologiques concouraient :

1. Des vents dominants provenant de vastes zones, sources principales de végétaux pollinisés par le vent, sur une distance moyenne ou courte (principalement de l'ouest et du sud-ouest) ;
2. Des conditions météorologiques optimales favorisant la libération et la dispersion du pollen dans l'atmosphère (principalement des températures élevées et par conséquent une faible humidité dans les zones centrales).

Les deux conditions se produisent souvent pendant les intrusions de brumes saharosahéliennes dans les régions du centre du pays. Les pics polliniques maximaux sont donc plus susceptibles de se produire pendant des épisodes de brumes de sable dans la péninsule ibérique centrale (> 70 % de l'année).

3.1.3 Composition en radionucléides

- Points clés :

La concentration en ^{137}Cs est liée à la concentration en PM_{10} (Masson *et al.* 2010; Achilleos *et al.* 2014a)

Les particules urbaines locales peuvent être plus radioactives en termes de radioactivité α et β que les particules de brumes de sable (Achilleos *et al.* 2014b).

Le niveau de radioactivité artificielle mesuré lors des épisodes de brumes de sable ne présente pas de risque pour la santé humaine. Il est à considérer comme un traceur : il est mesuré mais n'implique pas un risque sanitaire par inhalation (Masson *et al.* 2010; Xu-Yang *et al.* 2025).

Les niveaux de radioactivité des poussières en suspension dans l'air⁸ en France métropolitaine sont surveillés et documentés depuis le début des années 1960. En effet, l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR, anciennement Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - IRSN), est chargée du suivi de l'évolution des niveaux de radioactivité dans l'air en France métropolitaine par le biais du réseau Opera-Air (Observatoire Permanent de la Radioactivité de l'Atmosphère)⁹. Les stations de prélèvement des aérosols de cet observatoire permettent ainsi de détecter et caractériser en routine les concentrations en radionucléides à des niveaux très faibles (traces). Ainsi, les radionucléides naturels (^7Be , ^{210}Pb , ^{22}Na , ^{228}Ac , ^{40}K , ^{234}Th) ou artificiels (^{137}Cs , ^{131}I , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{54}Mn , ^{106}Ru) sont suivis en permanence.

Les radionucléides peuvent exister naturellement (ex : radon) ou être produits artificiellement. La radioactivité artificielle a deux origines : les essais nucléaires atmosphériques ou les accidents nucléaires majeurs (ex : Tchernobyl). Les essais nucléaires atmosphériques qualifient les explosions de bombes atomiques à des fins expérimentales¹⁰. Même si la plupart de ces essais ont eu lieu dans l'hémisphère Nord, la répartition des sites de tir et le nombre d'essais pratiqués entre 1945 et 1980 ont marqué l'ensemble du globe avec une grande variété de radionucléides (Figure 14), dont seuls subsistent encore aujourd'hui ceux dont la période radioactive est longue.

⁸ Appelées « aérosols ».

⁹ Pour plus d'informations sur le réseau Opera-Air : <https://www.irsn.fr/recherche/reseau-opera-air>

¹⁰ <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/environnement/essais-nucleaires-atmospheriques>

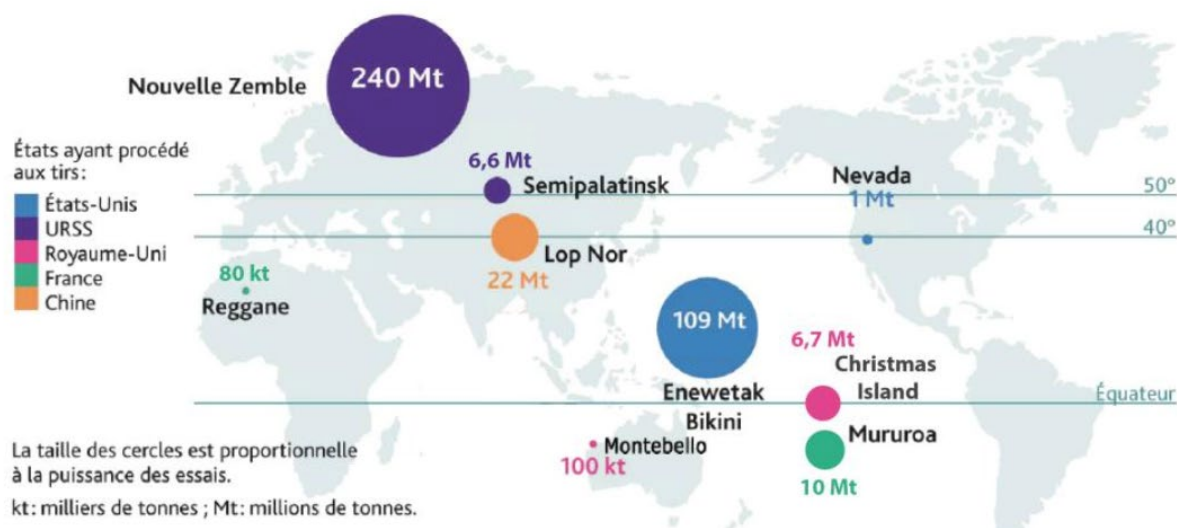


Figure 14. Carte de localisation des principaux sites d'essais nucléaires atmosphériques entre 1945 et 1980

Source : ASNR fiche information 2, p2 https://www.irsn.fr/sites/default/files/2024-05/IRSN_serie_fiches_tirs_08-2015_v2.pdf

Les retombées des radionucléides peuvent être classées en trois catégories¹¹ :

- Retombées locales : quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres autour du site de tir. Elles concernent les débris les plus lourds déposés par gravité.
- Retombées « troposphériques » : ont lieu jusqu'à 30 jours après le tir et peuvent être transportées sur des milliers de kilomètres. En raison des délais de transport relativement courts, elles contiennent la majeure partie des radionucléides, y compris ceux à vie courte (^{131}I , ^{140}Ba , ^{103}Ru , etc.).
- Retombées « stratosphériques » : ont lieu entre 2 et 12 mois après le tir dans les régions polaires et 8 à 24 mois dans les régions équatoriales. En raison des délais de transport, elles ne contiennent donc que les radionucléides à vie longue (^{137}Cs , ^{90}Sr , etc.).

En raison de la localisation des sites de tir, les retombées radioactives sont plus importantes dans la zone située entre le 40° et le 50° degré de latitude nord (Figure 15). Avec une étendue de près de 9 millions de km², le Sahara est situé entre 20° et 33° de latitude Nord et, à ce titre, dans la bande latitudinale ayant reçu entre 8 et 15 % des retombées globales liées à l'ensemble des essais nucléaires.

¹¹ https://www.irsn.fr/sites/default/files/2024-05/IRSN_serie_fiches_tirs_08-2015_v2.pdf



Figure 15. Répartition mondiale des retombées de strontium-90 en fonction de la latitude

Source : ASNR, fiche information 4, p5 https://www.irsn.fr/sites/default/files/2024-05/IRSN_serie_fiches_tirs_08-2015_v2.pdf

De ce fait, les brumes de sable sahariennes étant l'expression d'une mise en suspension de fines particules de sol, la question de la radioactivité associée à ces dernières se pose¹². En France, le ^{137}Cs est utilisé comme traceur de la radioactivité des brumes de sable en raison de sa longue durée de vie (demi-vie de 30,2 ans¹³) et de sa facilité à être mesuré. D'autres radionucléides disposant d'une longue durée de vie sont associés aux essais nucléaires mais sont beaucoup plus difficiles à mesurer à l'état de traces, ce qui ne permet pour le moment pas leur suivi en routine (^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{14}C ...).

L'étude menée par Masson *et al.* (2010) s'est intéressée aux niveaux d'activité de divers radionucléides artificiels (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{241}Am , isotopes de l'uranium, du thorium et du plutonium) lors de l'épisode de brumes de sable de février 2004 ; le plus intense recensé à ce jour dans l'hexagone. Les échantillons (dépôts, pluies et aérosols) ont été prélevés à 5 endroits dans le sud-est de la France. Lors de la présence de brumes de sable, une nette augmentation du niveau de ^{137}Cs est observée, ce qui avait également été noté antérieurement par Pham *et al.* 2003 lors d'un épisode de brumes de sable à Monaco. Le dépôt de radionucléides pendant l'événement du 20 au 25 février 2004 était ainsi équivalent à la quantité cumulée sur 10 mois dans des conditions hors brumes de sable. Toutefois, quel que soit le site d'échantillonnage, les auteurs ont démontré que les niveaux d'activité des radionucléides dépendaient à la fois de l'augmentation de la concentration atmosphérique en particules désertiques et de l'activité spécifique de ces particules. En effet, une relation a été établie entre les niveaux de ^{137}Cs dans l'air et les PM_{10} . Malgré cela, les auteurs constatent que la concentration en radionucléides observée n'est pas nocive pour la santé humaine. Ils concluent également que des

¹²<https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/environnement/episodes-sables-sahariens-sur-france#:~:text=Depuis%20le%2019%20juin%202024,de%20poussi%C3%A8res%20de%20couleur%20ocre.>

¹³ La période radioactive (ou demi-vie) est le temps nécessaire pour que la moitié des atomes se désintègrent naturellement. C'est une propriété intrinsèque à l'élément radioactif considéré. <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/dialogue-pedagogie/periode-radioactive#:~:text=Par%20exemple%2C%20le%20c%C3%A9sium%20137,se%20d%C3%A9sint%C3%A8gre%20%C3%A0%20son%20tour.>

informations supplémentaires sont nécessaires pour comprendre si un processus d'enrichissement en radionucléides intervient au cours du transport (par ségrégation granulométrique et/ou minéralogique).

De plus, aucune source spécifique de ces radionucléides artificiels n'a pu être mise en évidence. En effet, les particules de sol dans les régions sources subissent quotidiennement des mélanges. Selon les auteurs, il serait donc très peu probable de trouver aujourd'hui une contribution des essais français réalisés au Sahara au début des années 1960, parmi les retombées globales de l'ensemble des essais nucléaires réalisés dans l'atmosphère.

Une campagne de science participative récente (Xu-Yang *et al.* 2025) s'est également intéressée à la contribution des essais nucléaires atmosphériques français à la radioactivité liée aux brumes de sable. Elle s'intéressait à l'épisode particulièrement intense ayant débuté le 15 mars 2022. Cent-dix échantillons de dépôts ont été prélevés dans six pays d'Europe occidentale (principalement en Espagne et en France) par de nombreux citoyens, à des latitudes comprises entre 37° et 51°N. Finalement, 53 échantillons se sont révélés scientifiquement représentatifs. Ils ont permis d'examiner le transport potentiel d'isotopes radioactifs : le ^{137}Cs (demi-vie de 30,2 ans), le plutonium-239 (^{239}Pu , demi-vie de 24 110 ans) et le plutonium-240 (^{240}Pu , demi-vie de 6 563 ans).

Les signatures minéralogiques et géochimiques combinées à des observations satellitaires et des calculs de rétro-trajectoires attribuent cet épisode de brumes de sable à trois zones sources potentielles (*potential sources areas*, PSAs) sahariennes : le sud de l'Algérie, le nord du Mali et l'ouest de la Libye. L'une des sources les plus actives, en particulier le 15 mars, était la région de Reganne, où les quatre premiers essais nucléaires atmosphériques français ont été menés au Centre Saharien d'Expérimentations Militaires (CSEM) au début des années 1960 (voir Figure 14).

Le rapport $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ était comparable à celui relevé lors de l'épisode de 2004 évoqué précédemment (Masson *et al.* 2010). Les rapports entre ces signatures isotopiques du plutonium se situent dans la gamme de valeurs caractéristiques des retombées globales de la radioactivité artificielle et sont différents de ceux attribués aux essais nucléaires français menés dans le sud de l'Algérie.

L'activité en ^{137}Cs était cohérente avec les valeurs relevées dans les Pyrénées en 2021 (Dumont *et al.* 2023). Toutefois, elle demeurait inférieure à celle de l'épisode de 2004 (Masson *et al.* 2010). Cette différence peut être attribuée à des différences dans la distribution granulométrique des particules ayant eu un impact sur les dépôts et la sédimentation gravitationnelle. Néanmoins, les auteurs soulignent que l'exposition à cette radioactivité artificielle ne présente pas de risque pour la santé humaine. En effet, la teneur des brumes de sable en ^{137}Cs demeure par exemple bien inférieure à la valeur seuil autorisée par l'Union européenne (UE) dans les produits alimentaires (par exemple 1000 Bq kg⁻¹ pour les céréales, les légumes, les fruits, la viande, le lait et les produits laitiers et 400 Bq kg⁻¹ pour les aliments pour nourrissons) (Official Journal of the European Union 2016). De plus, les auteurs ont calculé que le risque lié à l'exposition par inhalation au ^{137}Cs lors d'un épisode intense de brumes de sable, les valeurs demeureraient 8 à 10 fois inférieures aux niveaux autorisés par l'UE.

Les niveaux de radioactivité artificielle peuvent également être mis en parallèle avec les niveaux de radioactivité naturelle. Une étude récente menée à Chypre a comparé, pour les jours avec et sans épisodes de brumes de sable, les données de radioactivité α globale

(période 2017-2020) et β globale (période 2008-2020) des échantillons de particules totales en suspension (TSP*) pour deux stations urbaines de Limassol et Nicosie, ainsi que les données sur les radionucléides ^{137}Cs et ^{40}K (2008-2020) de la station de surveillance semi-industrielle de Nicosie (Achilleos *et al.* 2014a).

Les niveaux de radioactivité α et β globales et de radioactivité ^{137}Cs et ^{40}K étaient significativement plus élevés les jours d'épisodes de brumes de sable par rapport aux jours sans. Ces niveaux de radioactivité étaient plus élevés lorsque les brumes provenaient du Moyen-Orient, par rapport à celle provenant du Sahara. Toutefois, même si les niveaux de radioactivité absolus étaient plus élevés pendant les brumes de sable, l'activité relative à la concentration en PM_{10} était plus élevée les jours sans influence des brumes de sable. Les particules urbaines locales peuvent présenter des niveaux de radioactivité α et β plus élevés que les particules transportées depuis les déserts. L'hypothèse mise en avant par les auteurs est le mélange de ces particules urbaines avec des descendants du radon (gaz radioactif provenant de la croûte terrestre). Seul le rapport $^{137}\text{Cs}/\text{PM}_{10}$ a augmenté de manière significative pendant les épisodes intenses de brumes de sable.

3.1.4 Autres déserts

Comme évoqué précédemment, la composition des brumes de sable dépend de différents facteurs, dont sa zone géographique d'origine. Ainsi, même si la teneur en quartz reste majoritaire quelle que soit la région du monde, sa proportion et celle des autres minéraux peut varier (Figure 16).

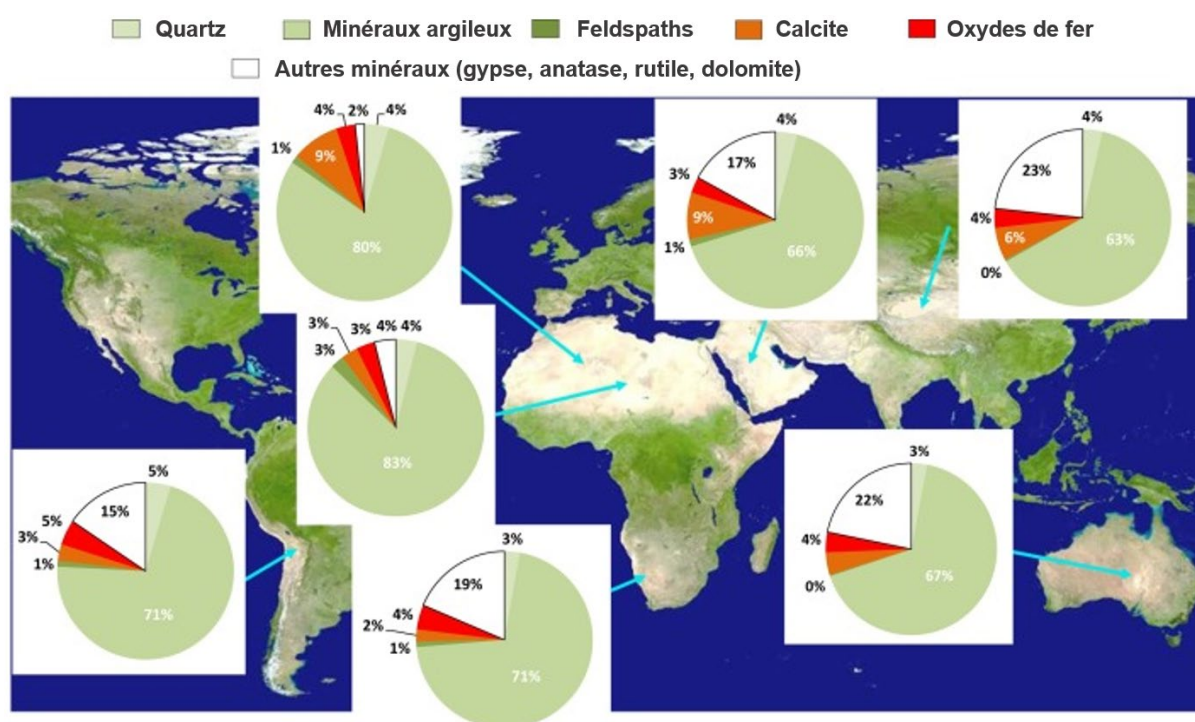


Figure 16. Minéralogie des brumes de sable selon les régions du monde. Teneur en différents groupes minéraux, en % massique.

Source : Querol *et al.* (2019)

Les déserts de Chine et de Mongolie sont la deuxième source de brumes de sable à l'échelle mondiale. D'après l'étude de Formenti, Schütz, *et al.* (2011), c'est également une région avec

une composition hétérogène des sols. Comme pour l'Afrique du Nord, différentes zones sources potentielles (*potential sources areas*, PSA) ont été mise en évidence dans la littérature. Pour chacune de ces PSAs, les ratios entre les minéraux principaux (illite/kaolinite ; chlorite/kaolinite...) sont variables.

De même, la composition des brumes de sable originaires de déserts asiatiques est également influencée par des facteurs propres à la situation locale : conditions météorologiques, voie de transport, pollution anthropique à proximité...

3.2 Influence des brumes de sable sur les concentrations en particules dans l'air ambiant

Le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA) et l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) ont mené différents travaux dans le but d'estimer la contribution des brumes de sable sahariennes aux dépassements des valeurs limites PM_{10} . En effet, comme évoqué en préambule (§ 2), le nombre de dépassements de la valeur limite relative à la valeur moyenne journalière en PM_{10} issus de phénomènes naturels ne doit pas être considéré comme un dépassement au sens des directives européennes si les États membres peuvent en prouver leur imputabilité.

3.2.1 Influence sur les concentrations en PM_{10}

Comme indiqué dans le § 2.3, la gestion des épisodes de brumes de sable par les pouvoirs publics s'inscrit dans la gestion des épisodes de pollution aux PM_{10} .

Deux valeurs limites sont définies par la réglementation européenne et désignent :

- Une valeur exprimée en moyenne journalière à ne pas dépasser plus d'un nombre de jours par an ;
- Une valeur exprimée en moyenne annuelle à ne pas dépasser.

Suite à la publication de la dernière directive européenne¹⁴, les valeurs limites devant être respectées au plus tard le 11 décembre 2026 restent à $50 \mu g/m^3$ à ne pas dépasser 35 fois par an et $40 \mu g/m^3$, respectivement et celles devant être respectées à l'horizon 2030 sont de $45 \mu g/m^3$ à ne pas dépasser 18 fois par an et $20 \mu g/m^3$, respectivement. Une autre nouveauté est la proposition de seuil d'information pour les particules ($90 \mu g/m^3$ en moyenne sur 24h pour les PM_{10}).

Dans la réglementation française, des seuils d'information et de recommandation ($50 \mu g/m^3$ en moyenne sur 24 h) et d'alerte ($80 \mu g/m^3$ en moyenne sur 24 h) sont définis pour les PM_{10} dans le code de l'environnement depuis 2010¹⁵ (Article R221-1). Un dépassement de ces seuils déclenche des procédures préfectorales de gestion des épisodes de pollution de l'air ambiant (informations, recommandations sanitaires, mesures réglementaires de réduction des émissions) telle que définie par arrêté ministériel¹⁶.

3.2.1.1 Etudes menées en Martinique

Dans la synthèse des principaux résultats du programme CARA¹⁷ sur la période 2008-2020 (Favez 2022), l'influence des brumes de sable originaires du Sahara sur les concentrations en PM_{10} aux Antilles est analysée. L'analyse des données de la station de surveillance « trafic » de Renéville (Fort-de-France, Martinique) permet de conclure que les brumes de sable représentent environ la moitié des PM_{10} lorsque les concentrations journalières sont

¹⁴ (Directive (UE) 2024/2881 du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2024 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe (refonte) 2024)

¹⁵ décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air

¹⁶ (Arrêté du 7 avril 2016 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant 2016; Arrêté du 26 août 2016 modifiant l'arrêté du 7 avril 2016 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant 2016)

¹⁷ Le programme CARA, pour « caractérisation chimique des particules » est coordonné depuis 2008 par le LCSQA/Ineris. Il a pour objectif l'amélioration des connaissances au niveau national sur la nature et l'origine des particules en suspension dans l'air ambiant (PM) en milieu urbain. Pour plus d'informations : <https://www.lcsqa.org/fr/le-dispositif-cara>.

supérieures à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lors des pics journaliers les plus élevés (supérieurs à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), cette contribution relative peut atteindre plus de 70 %.

En 2021 et 2022, le LCSQA a publié deux notes techniques (Létinois, Meleux, et Favez 2021; Létinois 2022) appliquant la méthodologie recommandée par la Commission européenne (European Commission 2011) pour déterminer la contribution des brumes de sable sahariennes aux dépassements des valeurs limites réglementaires en Martinique au cours des années 2016 – 2018 et 2021. Cette méthodologie comporte trois étapes :

1. Estimation des concentrations de fond régionales en PM_{10} (concentrations attendues en l'absence de brumes de sable) : calcul de la moyenne ou de la médiane glissante (15 jours avant et 15 jours après le jour concerné) des moyennes journalières en excluant les jours concernés par un épisode de brumes de sable ;
2. Identification des périodes concernées par des épisodes de brumes de sable : réanalyse globale des données COPERNICUS combinant des données de modèles avec des observations *in situ* et satellitaires. Des analyses de composition des particules peuvent être réalisées afin d'identifier des traceurs de brumes de sable ;
3. Traitement statistique : les contributions naturelles représentent la différence entre les concentrations mesurées le jour de l'épisode de brumes de sable par rapport à la concentration de fond attendue.

Cette méthode permet de soustraire les contributions naturelles aux concentrations totales mesurées par les stations de surveillance. Par exemple, la Figure 17 montre les moyennes journalières mesurées et corrigées (en retirant l'apport des brumes de sable) sur le site de Renéville pour l'année 2021. La différence entre les deux permet d'estimer les contributions naturelles.

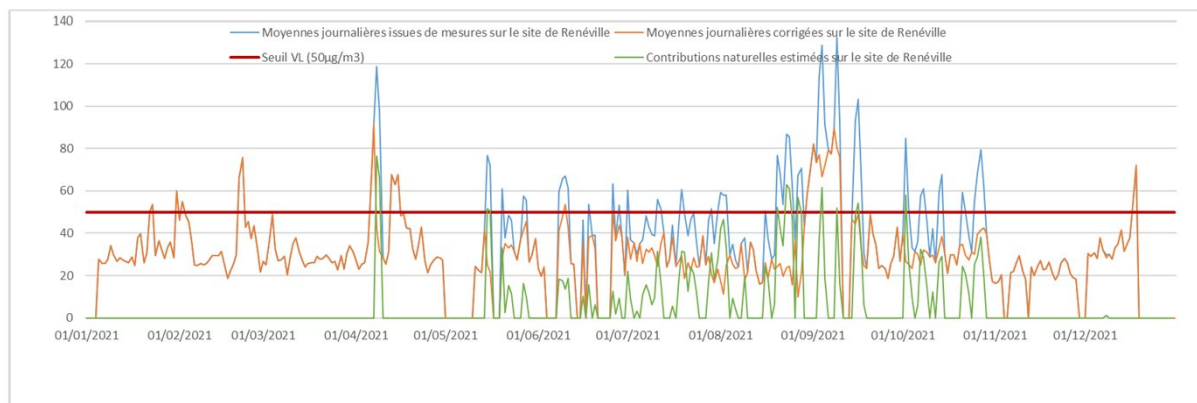


Figure 17. Evolution des moyennes journalières mesurées et corrigées sur le site de Renéville en 2021

Source : (Létinois 2022)

Les résultats de ces deux études permettent de décrire l'évolution des concentrations en PM_{10} en lien avec les intrusions de brumes de sable en Martinique. De plus, ces épisodes contribuent à la majorité des jours en dépassement de la valeur limite journalière.

Dans un rapport de 2021, Madinair présente les concentrations en PM₁₀ en parallèle à la proportion des différentes familles de composés chimiques pour différentes stations de mesures en 2018 (Figure 18).

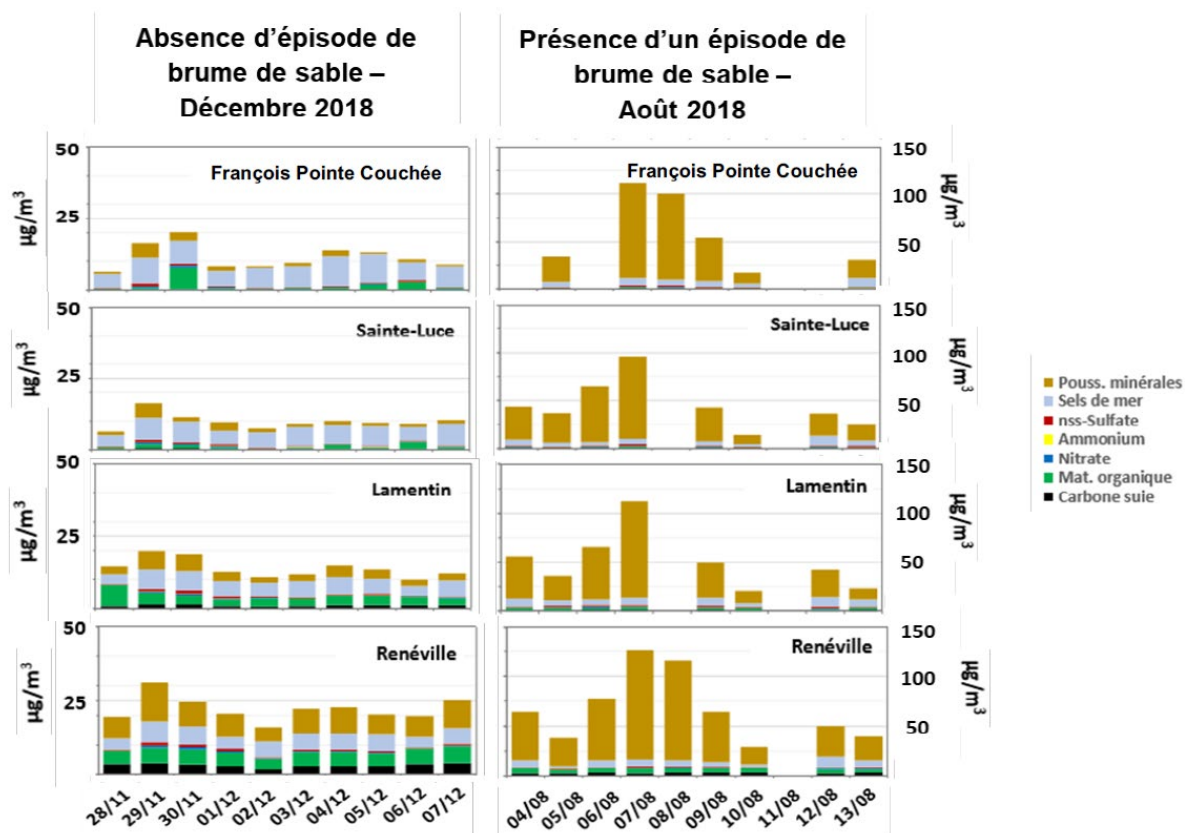


Figure 18. Concentrations journalières des espèces chimiques majeures des PM₁₀ du 28/11 au 07/12 2018 (absence de brumes de sable) et du 04/08 au 13/08 2018 (fort épisode de brumes de sable)

Les stations de François Pointe Couchée et de Sainte-Luce sont loin des sources anthropiques. Les stations de Lamentin et de Renéeville sont sous influence anthropique.

Source : (Madinair 2021) issu de (Favez et Alleman 2020)

Les auteurs constatent que les concentrations en particules minérales (particules désertiques et terrigènes) sont plus importantes dans la station de Renéeville, probablement en raison de la remise en suspension par le trafic routier dense.

3.2.1.2 Etudes menées en France métropolitaine

Ce même travail a été réalisé pour le site de Marseille Rabatau (Marseille) sur l'année 2022 avec des objectifs et méthode similaires (Létinois *et al.* 2024). La Figure 19 présente les résultats de l'analyse, avec les moyennes journalières mesurées, corrigées et les contributions naturelles estimées.

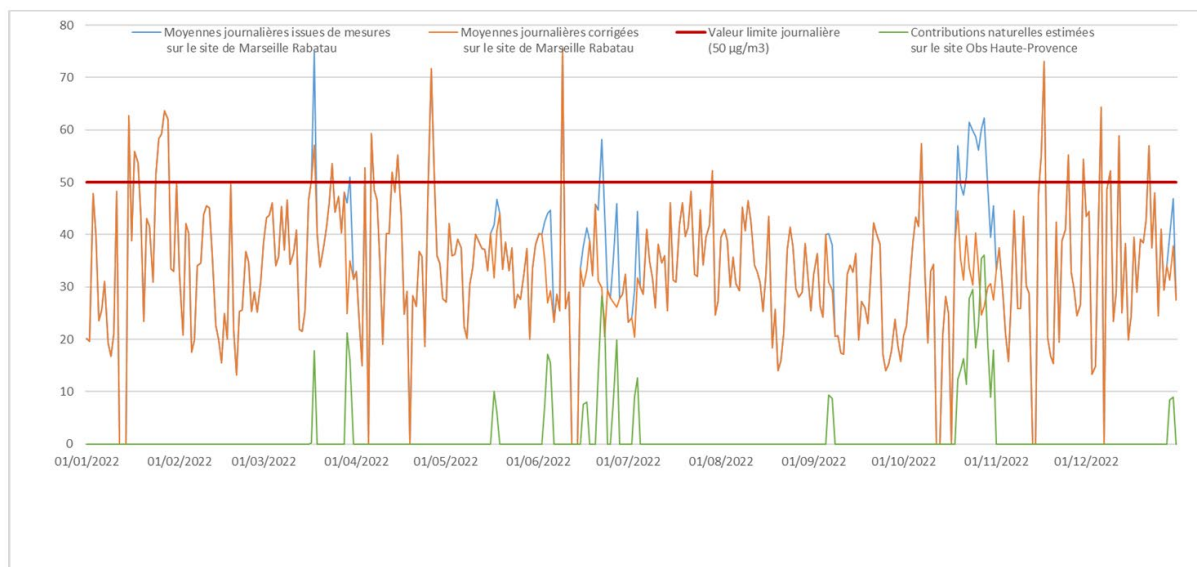


Figure 19. Evolution des moyennes journalières mesurées et ajustées sur le site de Marseille Rabatau en 2022

Source : (Létinois *et al.* 2024)

Finalement, en 2022 sur le site de Marseille Rabatau, les brumes de sable avaient contribué aux dépassements de la valeur limite journalière PM_{10} pour 11 jours sur les 38 initiaux.

3.2.2 Influence sur les concentrations en particules fines et ultrafines

Aucune étude sur l'impact des brumes de sable sur les concentrations en particules autres que les PM_{10} n'a été identifiée pour les zones géographiques d'intérêt (France métropolitaine, Antilles, Guyane).

L'impact des brumes de sable sur les concentrations pour d'autres fractions granulométriques comme $PM_{2,5}$, PM_1 est peu documenté en raison d'un manque de capacité analytique et d'une grande variabilité de ces fractions granulométriques.

4 Effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé humaine

4.1 Méthodologies appliquées dans les études épidémiologiques identifiées

L'intérêt porté aux effets sanitaires des brumes de sable a augmenté au cours des deux dernières décennies. Toutefois, même si le nombre d'études réalisées est croissant, les résultats obtenus dépendent des modalités d'identification des intrusions de brumes de sable, des indicateurs d'exposition et sanitaires ainsi que des méthodes utilisées pour analyser l'impact sanitaire.

- Identification des épisodes de brumes de sable

Les études les plus anciennes ont utilisé des mesures assez simples d'identification des épisodes de brumes de sable, telle que la distance de visibilité (1 km, 7 km, 10 km) ou des seuils de concentration de particules au-delà desquels il est considéré que les niveaux observés sont liés à la présence particules désertiques.

Les études plus récentes font appel à plusieurs types d'outils et de méthodes pour identifier ces intrusions : images satellites, cartes d'aérosols, modélisations météorologiques, modélisation des rétro-trajectoires des masses d'air, techniques de télédétection utilisant des lasers (LiDAR). Elles permettent davantage de précision sur le phénomène observé (intensité, origine des masses d'air, résolution spatiale...).

- Indicateurs d'exposition aux brumes de sable

Le plus souvent, l'exposition aux brumes de sable est représentée par une variable binaire valant 1 pour les jours avec intrusion de particules désertiques et 0 pour les autres jours, quelle que soit la méthode d'identification de ces épisodes.

Certaines études ont utilisé une variable continue pour distinguer la fraction désertique (apportée par les brumes de sable) de la fraction non désertique des particules. Les études européennes se fondent sur une méthode de référence décrite par Escudero *et al.* (2007) et reprise par la Commission européenne dans des lignes directrices de 2011 (European Commission 2011) (pour plus de détails voir § 3.2) (Aurelio Tobías et Stafoggia 2020).

D'autres études, asiatiques notamment, ont également utilisé les données LiDAR qui permettent de différencier les particules d'origine désertiques, dont la forme n'est pas sphérique contrairement aux autres particules, et de caractériser l'intensité de l'épisode.

- Indicateurs sanitaires

Les données de mortalité et d'hospitalisation sont majoritairement issues de bases de données médico-administratives (BDMA) nationales ou européennes. Les décès ou les hospitalisations sont codés à l'aide de la classification internationale des maladies 9^{ème} révision (CIM9) ou 10^{ème} révision (CIM10) permettant la standardisation de ce type de données. Cela permet de construire plus simplement des indicateurs semblables à ceux d'études précédentes, tout en

permettant une meilleure comparabilité des résultats. Les principaux indicateurs analysés figurent dans le Tableau 4.

Toutefois certaines études, notamment en Afrique, où il n'existe pas de BDMA, utilisent des données de décès ou d'hospitalisation locales ou des données issues d'enquêtes transversales de surveillance de la population.

Les données de passage aux urgences, quand elles ne sont pas enregistrées dans une BDMA, sont recueillies directement au niveau des services des urgences de la zone d'étude, ce qui nécessite un temps de recueil plus long et un coût plus élevé.

Enfin, les données de consultations concernant des symptômes ou des mesures de la fonction pulmonaire sont recueillies par des études *ad hoc*, en utilisant des données issues d'enquêtes transversales de surveillance populationnelle ou dans le cadre de cohortes de patients.

Tableau 4 : Définition des indicateurs sanitaires selon les codes CIM-9 et CIM-10

Mortalité ou hospitalisations	CIM9	CIM10
Toutes causes hors accidentelle (nommée naturelle)	001-799	A00-R99
Causes cardiovasculaires	390-459	I00-I99
Causes cardiaques	390-429	I00-I52
Causes cérébrovasculaires	430-438	I60_I69
Insuffisance cardiaque	428	I50
Cardiopathies ischémiques	410-414	I20-I25 (24)
Causes respiratoires	460-519	J00-J99
Broncho pneumopathie chronique obstructive (BPCO)	491	J40-J44 sauf J42
Asthme	493	J45-J46

- Modélisation de l'impact sanitaire des brumes de sable

Les études utilisant des données issues de BDMA analysent la relation entre un indicateur sanitaire et un indicateur d'exposition à l'aide de modèles de régression de type « *time-series* » ou « *case-crossover* » dans lequel la variable d'intérêt est le jour. Ces modèles sont ajustés sur des facteurs temporels et météorologiques.

Les études utilisant des données de cohorte ou d'enquêtes analysent cette relation principalement à l'aide de modèles de régression logistique ou de tests permettant de comparer les données selon la présence ou l'absence de brumes de sable.

Le plus souvent, la présence de brumes de sable est identifiée par une variable binaire qui est introduite dans le modèle comme facteur de risque, ou facteur de confusion, ou facteur modificateur de l'impact sanitaire des particules. Lorsqu'elle est utilisée en tant que modificateur de l'impact sanitaire des particules, les brumes de sable sont supposées être à l'origine d'une variation de la composition chimique des particules locales influençant ainsi leur impact sanitaire (Aurelio Tobías et Stafoggia 2020). Néanmoins, les particules étant

constituées, les jours de brumes de sable, d'un mélange de sources désertiques et de sources non désertiques, il reste difficile d'attribuer précisément des effets sanitaires à l'une ou l'autre de ces sources avec cette méthode. Pour contourner ce problème, certaines études ont choisi de distinguer les effets des fractions fines ($PM_{2,5}$) et grossières ($PM_{2,5-10}$, PM_{10}) en considérant que les brumes de sable impactent davantage les particules de taille $>2,5 \mu m$.

Une autre approche consiste à modéliser les brumes de sable sous forme d'une variable continue, permettant ainsi de distinguer les effets des sources désertiques et non désertiques des particules. En intégrant simultanément ces deux expositions dans un modèle de régression appliqué aux événements sanitaires, il devient possible d'évaluer leurs contributions respectives. Les expositions étant exprimées sous forme de concentrations quantitatives, elles peuvent être modélisées à l'aide de fonctions non linéaires flexibles, offrant ainsi une meilleure estimation des relations concentration-réponse (Aurelio Tobías et Stafoggia 2020). Deux types de modèles sont généralement utilisés : un modèle à deux sources et un modèle à trois sources.

Le modèle à deux sources quantifie séparément les contributions des particules désertiques et non désertiques afin d'évaluer leurs effets respectifs sur la santé. Le modèle à trois sources a été développé pour tenir compte des observations suggérant qu'une diminution de la hauteur de la couche limite atmosphérique (CLA) (voir Annexe 3. Glossaire) lors des épisodes de brumes de sable favorise l'accumulation des polluants locaux (non désertique), en plus de l'apport désertique. Cette situation pourrait modifier l'impact sanitaire des particules non désertiques en fonction de la présence ou de l'absence de brumes de sable. Dans ce cas, l'événement brumes de sable joue un double rôle : d'une part, il influe sur les concentrations de particules désertiques, et d'autre part, il module l'association entre les particules non désertiques et la mortalité (Aurelio Tobías et Stafoggia 2020).

Bien que ces modèles soient pertinents, il est nécessaire de rappeler que les méthodes actuelles de quantification des événements de brumes de sable ne sont pas exemptes d'erreurs de mesure. De plus, dans les régions caractérisées par des concentrations extrêmement élevées de particules provenant de sources locales, la plupart des effets néfastes sur la santé pourraient se produire les jours où il n'y a pas de brumes de sable, et la contribution supplémentaire des particules désertiques aux effets de santé serait négligeable (Aurelio Tobías et Stafoggia 2020).

4.2 Revue bibliographique des effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé humaine

Dans un premier temps, la revue de la littérature réalisée sur les effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé a permis d'identifier une quarantaine d'articles portant spécifiquement sur les brumes de sable en provenance d'Afrique du Nord. Ces études concernent plus particulièrement différents pays du sud de l'Europe, les Îles Canaries et les Caraïbes. La plupart des études ont mené des analyses à l'échelle d'une ville en tenant compte de disponibilité des données pour le choix de la ville, deux études ont réalisé une analyse à l'échelle d'une région ou d'une île, deux études ont été réalisées à l'échelle d'un pays, et une étude multicentrique a inclus 13 villes du sud de l'Europe.

Dans un second temps, les résultats obtenus ont été mis en perspective avec les résultats de revues et de méta-analyses intégrant des études conduites à l'échelle mondiale : Europe, Asie, Moyen-Orient, Amérique ou Australie.

4.2.1 Etudes épidémiologiques

Le détail des études épidémiologiques incluses ayant considéré la mortalité (toutes causes non accidentelles, cardiovasculaire et respiratoire) et les hospitalisations et passages aux urgences (pour causes cardiovasculaires et respiratoires) est disponible en Annexe 5.

4.2.1.1 Etudes sur la mortalité

4.2.1.1.1 Mortalité totale non accidentelle

- Points clés :

Les différentes études analysées sont en faveur d'une légère augmentation des décès pour causes naturelles (mortalité toutes causes non accidentelles) en lien avec les PM₁₀ lors des épisodes de brumes de sable, mais cet effet est généralement similaire à celui observé les jours sans brumes de sable. Les résultats concernant les autres fractions granulométriques sont difficiles à interpréter, notamment sur l'exposition aux PM_{2,5-10}, en raison du peu de données disponibles.

- PM₁₀

Onze études ont analysé l'impact des brumes de sable sur la mortalité naturelle en utilisant une variable binaire (jour avec et sans brumes de sable) en facteur de risque ou en interaction avec les PM₁₀, pour évaluer si l'impact sanitaire est significativement plus élevé lors des épisodes de brumes de sable.

A Rome, les résultats obtenus par Mallone *et al.* (2011) montrent, pour une augmentation d'un écart interquartile (IQR) de près de 20 µg/m³ des concentrations de PM₁₀, une augmentation de la mortalité naturelle de 3,20 % [IC95 : -0,04% - 6,55%] les jours avec brumes de sable, du même ordre de grandeur que lors des jours sans brumes de sable (3,01% ([IC95 : 1,29% - 4,75%])), pour un lag¹⁸ 0-2 et chez les personnes âgées de plus de 35 ans. Des résultats similaires ont été publiés pour la ville de Madrid. Une augmentation de 10 µg/m³ de PM₁₀ au lag 1 était significativement associée à une hausse de la mortalité totale, aussi bien les jours avec brumes de sable que sans, avec un ER de décès de 1,70 % [IC 95 % : 0,79 % - 2,62 %] et 1,21 % [IC 95 % : 0,67 % - 1,97 %], respectivement (Díaz, Tobías, et Linares 2012). Bien que l'ER soit plus élevé lors des jours avec brumes de sable, suggérant une possible modulation de l'effet, l'interaction avec les jours sans brumes de sable n'était pas statistiquement significative (p>0,37). Enfin, Stafoggia *et al.* (2016) ont réalisé une analyse de sensibilité avec cette méthode, et les résultats étaient proches de ceux décrits précédemment avec un ER de décès de 0,74 % pour les jours avec brumes de sable, et de 0,48 % pour les jours sans brumes de sable, et une absence d'effet modificateur de la relation PM₁₀-mortalité. Cette étude a également modélisé le risque en fonction des niveaux de PM₁₀ jusqu'à 100 µg/m³ et a pu observer une relation linéaire lors des épisodes de brumes de sable alors que la relation pour les jours sans brumes de sable diminue à partir de 100 µg/m³. Des résultats similaires à ces études ont été publiés par Tobías et Stafoggia (2020) à Rome, et Díaz *et al.* (2017) à Madrid (Figure 20).

¹⁸ Lag : décalage temporel entre une exposition à un facteur de risque et l'apparition de ses effets sur la santé (en jours généralement).

Dans l'étude de Jiménez *et al.* (2010), une approche méthodologique différente des précédentes est appliquée. Un modèle de régression linéaire pas à pas, incluant tous les facteurs de confusion et les trois fractions PM_{10} , $PM_{2,5-10}$ et $PM_{2,5}$, et aux lags d'exposition les plus pertinents, est mis en œuvre séparément pour les jours avec brumes de sables et pour les jours sans brumes de sable. Seuls les résultats significatifs ressortant du modèle sont présentés. Une association statistiquement significative a été observée lors des jours avec brumes de sable, avec un ER de décès de 2,7 % [IC 95 % : 1,4 % - 4,1 %] pour une augmentation de $10 \mu g/m^3$ de PM_{10} au lag 3 pour les personnes âgées de plus de 75 ans. Les autres fractions granulométriques ne sont pas retenues dans le modèle.

Cependant, d'autres études menées en Emilie-Romagne (Italie) (Zauli Sajani *et al.* 2011) et à Athènes (Grèce) (Samoli *et al.* 2011) n'ont pas trouvé d'association significative entre la mortalité naturelle et les concentrations de PM_{10} les jours avec brumes de sable. Cependant, un excès de décès était observé les jours sans brumes de sable. Samoli *et al.* (2011) suggèrent qu'à Athènes, les particules d'origine locale, en particulier celles provenant du trafic routier, seraient plus toxiques que celles transportées sur de longues distances, telles que les particules issues des brumes de sable. Deux autres études, de Neophytou *et al.* (2013), à Nicosie (Chypre) et de Augusto *et al.* (2020) au Portugal, n'ont trouvé aucune association entre les niveaux de PM_{10} et la mortalité toutes causes pour les jours avec et sans brumes de sable. L'étude d'Augusto *et al.* (2020) a été menée dans des conditions particulières puisque la période d'étude était courte (octobre 2017) et marquée par d'importants incendies. La présence de fumées liées à ces incendies a pu modifier la relation avec les brumes de sable (Augusto *et al.* 2020).

Enfin, l'étude de Pandolfi *et al.* (2014) a utilisé une approche différente des autres. Elle a analysé un paramètre atmosphérique, la hauteur de la couche limite atmosphérique (CLA) (voir Annexe 3. Glossaire) et son association avec la mortalité journalière et les brumes de sable. Le risque de décès diminue de 1,05 % lorsque la hauteur de la CLA de la veille augmente d'un IQR, car la dilution est plus importante et l'air est moins toxique. Lors des épisodes de brumes de sable, la hauteur de la couche limite atmosphérique diminue progressivement avec l'augmentation de l'intensité de l'épisode, augmentant ainsi la toxicité du mélange liée à une accumulation progressive de polluants anthropiques. De plus, à mesure que la hauteur de la CLA se réduisait, le risque de mortalité associé à la même concentration de PM augmentait en raison de l'accumulation observée de polluants.

Les risques relatifs (RR) des études ayant considéré l'exposition aux brumes de sable en tant que variable binaire et comme modificateur d'effet dans la relation entre les PM_{10} et la mortalité toutes causes ont été représentés dans la Figure 20. Un décalage d'un jour (lag 1 (ie. le plus fréquemment utilisé)) entre la survenue des brumes de sable et l'apparition de l'effet de santé a été choisi. **Les résultats des études sont contrastés et ne permettent pas de conclure à un impact significatif des brumes de sable sur la relation PM_{10} -mortalité toutes causes.**

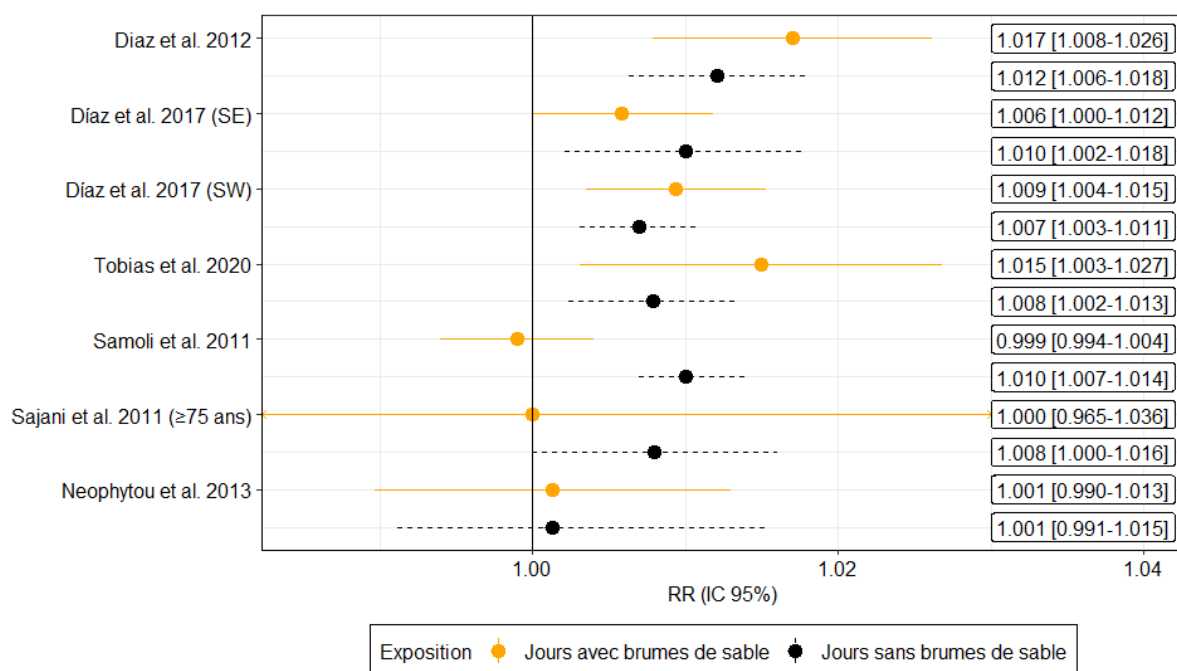


Figure 20 : Risques relatifs de la mortalité toutes causes pour une exposition à un incrément de 10 µg/m³ de PM₁₀ les jours avec ou sans brumes de sable au lag (1). Variable binaire d'exposition aux brumes de sable considérée en tant que modificateur de l'impact sanitaire des PM₁₀.

Trois études ont considéré les brumes de sables en tant que variable continue dans un modèle à 2 ou 3 sources (Stafoggia *et al.* 2016; Renzi *et al.* 2018; Aurelio Tobías et Stafoggia 2020).

Deux d'entre-elles ont analysé l'impact sanitaire d'une augmentation de 10 µg/m³ des concentrations du jour et de la veille (lag 0-1) de PM₁₀ désertiques et PM₁₀ non désertiques (Figure 21). L'étude de Stafoggia *et al.* (2016) menée dans 13 villes du sud de l'Europe, trouve ER de décès toutes causes naturelles de 0,65 % ([IC95 % : 0,24 % - 1,06 %]) pour les PM₁₀ désertiques qui n'est pas statistiquement différent de celui estimé pour une même variation des concentrations de PM₁₀ non désertiques (0,55 % [IC95 % : 0,24 % - 0,87 %]). En Sicile, Renzi *et al.* (2018) a également montré une augmentation du même risque de décès (2,48 % [IC95 % : 2,07 % - 2,89 %]) plus élevée pour les PM₁₀ désertiques mais non différente de celle obtenue pour les PM₁₀ non désertiques (2,14 % [IC95 % : 1,53 % - 2,75 %]). Les auteurs ont également étudié l'impact d'une exposition cumulée des 5 jours précédents et du jour (lag 0-5) qui montre un impact des PM₁₀ désertiques significativement plus élevé que celui des PM₁₀ non désertiques, ce qui suggère un effet dans la durée des épisodes de brumes de sable.

Aurelio Tobías et Stafoggia (2020) ont étudié l'impact de l'exposition aux PM₁₀ (désertiques/non désertiques) dans un modèle à 2 sources et à 3 sources, à Rome, avec un lag compris entre 0 et 5 jours. Dans le modèle à 2 sources, les PM₁₀ désertiques montraient une association avec la mortalité uniquement au lag 0 de 1,2 % [IC 95 % : 0,0 % - 2,3 %] pour une augmentation de 10 µg/m³ de PM₁₀, ce qui était presque deux fois plus important que les PM₁₀ non désertiques avec un ER de 0,5 % [IC 95 % : 0,0 % - 1,0 %]. En revanche, les PM₁₀ non désertiques présentaient des effets estimés avec des décalages plus importants, jusqu'au quatrième jour après l'exposition, et des estimations ponctuelles plus proches de celles obtenues pour les PM₁₀ totales. Dans le modèle à 3 sources, les jours avec brumes de sable,

des ER plus élevés ont été mesurés pour les PM₁₀ non désertiques par rapport aux PM désertiques pour tous les lags. De plus, pour une augmentation de 10 µg/m³ des PM₁₀ non désertiques pour la mortalité toutes causes, l'ER était plus important les jours avec brumes de sable que sans brumes de sable pour tous les lags étudiés.

Les RR des études ayant considéré l'exposition aux brumes de sable en tant que variable continue aux lag 0-1, 0 ou 1, dans un modèle à 2 sources ont été représentés dans la Figure 21. **Les résultats des études ne permettent pas de conclure à un impact significativement plus important des PM₁₀ d'origine désertique sur la mortalité toutes causes par rapport aux PM₁₀ d'origine non désertique.**

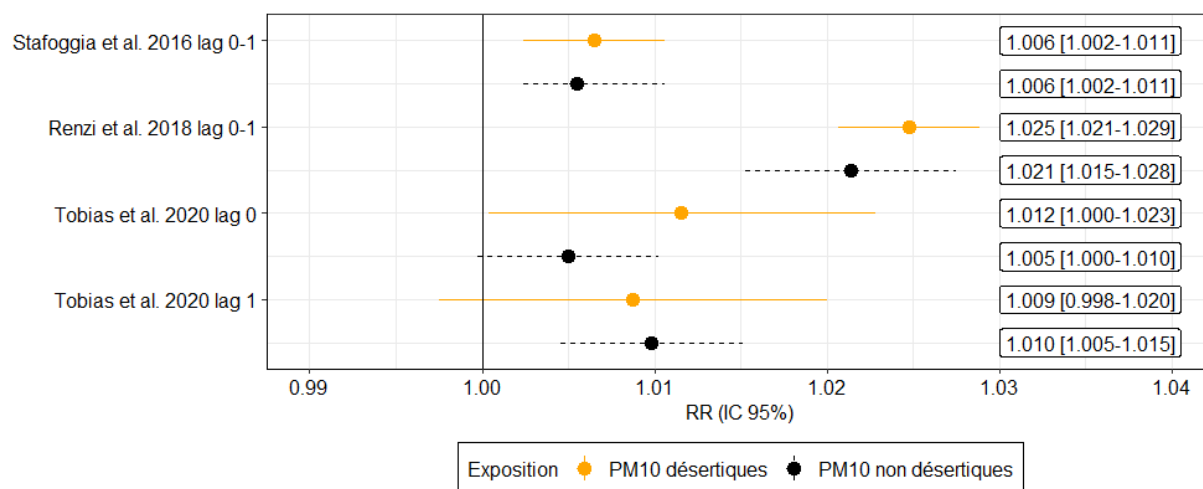


Figure 21 : Risques relatifs de la mortalité toutes causes pour une exposition à un incrément de 10 µg/m³ de PM₁₀ désertiques ou locales au lag 0-1, 0 ou 1. Variable continue d'exposition aux brumes de sable utilisée dans un modèle à 2 sources (PM₁₀ désertiques/PM₁₀ non désertiques).

• PM_{2,5} et PM_{2,5-10}

Si la plupart des études ont analysé les liens entre mortalité totale et PM₁₀, seulement 4 études ont analysé les liens avec les PM_{2,5} et les PM_{2,5-10}.

A Madrid, aucune association entre les PM_{2,5} et les PM_{2,5-10} et la mortalité totale n'a été observée pour les jours impactés par les brumes de sable Jiménez *et al.* (2010). Au contraire, pour une augmentation de 10 µg/m³ de PM_{2,5-10}, Tobías *et al.* (2011) trouvent un *odds ratio* (OR) significativement plus élevé les jours impactés par les particules sahariennes (1,028 [IC95 % : 1,001 - 1,058]) par rapport aux jours non impactés (1,006 [IC95 % : 0,989 - 1,024]). De plus, les intrusions de brumes de sable modifiaient la relation PM_{2,5-10} – mortalité naturelle, qui n'était plus significative lors des jours sans brumes de sable (*p-value* de l'interaction = 0,0165). Cette différence n'était pas constatée avec les PM_{2,5}. A Barcelone (Espagne), les épisodes de brumes de sable sahariennes étaient associés à une augmentation de la mortalité journalière (Perez *et al.* 2008). L'effet d'une exposition à court terme à une augmentation de 10 µg/m³ de PM_{2,5-10} sur la mortalité naturelle était significativement plus élevé lors des jours avec brumes de sable, avec un ER de 8,4 % [IC95 % : 1,5 % - 15,8 %], contre 1,4 % [IC95 % : -0,8 % - 3,4 %] lors des jours sans brumes de sable modifiant la relation PM_{2,5-10} – mortalité

naturelle. En revanche, pour les $PM_{2,5}$, l'effet sur la mortalité ne différerait pas entre les jours avec et sans intrusions sahariennes.

L'étude de Mallone *et al.* (2011) menée à Rome (Italie) ne montre aucune modification de l'effet des $PM_{2,5}$ sur la mortalité pendant les épisodes de brumes de sable. Concernant les $PM_{2,5-10}$, cette étude montre une augmentation significative des décès les jours sans brumes de sable.

4.2.1.1.2 Mortalité liée aux pathologies cardiovasculaires et cardiaques

- Points clés :

Les études identifiées sont en faveur d'une augmentation des effets sanitaires des PM_{10} et des $PM_{2,5-10}$ en termes de mortalité cardiovasculaire et cardiaque lors des épisodes de brumes de sable. Toutefois, concernant les $PM_{2,5}$, les résultats sont plutôt en faveur d'une absence d'effet sur la mortalité cardiovasculaire et cardiaque lors des épisodes de brumes de sable.

- PM_{10}

La majorité des études portant sur la mortalité cardiovasculaire montrent un effet significatif des PM_{10} les jours de brumes de sable mais sans différences significatives avec les jours sans brumes de sable.

Sept études ont analysé l'impact des brumes de sable sur la mortalité cardiovasculaire en utilisant une variable binaire (jour avec et sans brumes de sable) en interaction avec les PM_{10} pour évaluer si l'impact sanitaire est significativement renforcé lors des épisodes de brumes de sable.

A Madrid, trois études mettent en évidence un impact plus fort des PM_{10} sur la mortalité cardiovasculaire en présence de brumes de sable (Mallone *et al.* 2011; Díaz, Tobías, et Linares 2012; Jiménez *et al.* 2010). Il semble exister une modulation de l'impact cardiovasculaire des PM_{10} lors des épisodes de brumes de sable. Ainsi dans l'étude de Mallone *et al.* (2011), pour une augmentation de l'écart interquartile (IQR) de près de $20 \mu g/m^3$ de PM_{10} , les auteurs trouvent un ER de décès cardiovasculaires de 5,91 % [IC95 % : 1,02 % - 11,03 %] lors des brumes de sable, nettement plus élevé que celui estimé pour les jours sans brumes de sable (1,82 % [IC95 % : -0,61 % - 4,32 %]). L'impact des niveaux de PM_{10} est encore plus élevé pour la mortalité cardiaque (ER = 9,55 %) avec un effet modificateur significatif. Pour Díaz, Tobías, et Linares (2012), l'effet des PM_{10} sur la mortalité cardiovasculaire est du même ordre de grandeur les jours avec et sans brumes de sable. L'augmentation de l'ER est toutefois plus élevée au printemps et en été pour les jours avec brumes de sable que pour les jours sans brumes de sable. Enfin, Jiménez *et al.* (2010) ont mesuré une association statistiquement significative avec la variable PM_{10} pour la mortalité cardiovasculaire uniquement les jours de brumes de sable, avec un ER de 4 % [IC 95 % : 1,7 % - 6,3 %] pour une augmentation de $10 \mu g/m^3$ au lag 3 pour les personnes âgées de plus de 75 ans.

Des résultats similaires ont été obtenus dans l'étude de Neophytou *et al.* (2013) qui trouve un ER significatif de 2,43 % [IC95 % : 0,53 % - 4,37 %] lors des brumes de sable, nettement plus élevé que celui concernant les jours sans brumes de sable (0,19 % [IC95 % : -2,12 % - 2,53 %]) au lag 0. C'est d'ailleurs le seul résultat significatif de cette étude sur la ville de Nicosie à Chypre.

D'autres études montrent une absence d'effet des PM₁₀ sur la mortalité cardiovasculaire ou cardiorespiratoire lors des épisodes de brumes de sable (Zauli Sajani *et al.* 2011; Augusto *et al.* 2020). Enfin, Samoli *et al.* (2011) ont mesuré des effets plus importants sur la mortalité cardiovasculaire les jours sans brumes de sable.

Les RR des études ayant considéré l'exposition aux brumes de sable en tant que variable binaire et comme modificateur d'effet dans la relation entre les PM₁₀ et la mortalité cardiovasculaire ont été représentés dans la Figure 22. Un décalage d'un jour (lag 1 (ie. le plus fréquemment utilisé)) entre la survenue des brumes de sable et l'apparition de l'effet de santé a été choisi. **Les résultats des études sont contrastés et ne permettent pas de conclure à un impact significatif des brumes de sable sur la relation PM₁₀ – mortalité cardiovasculaire.**

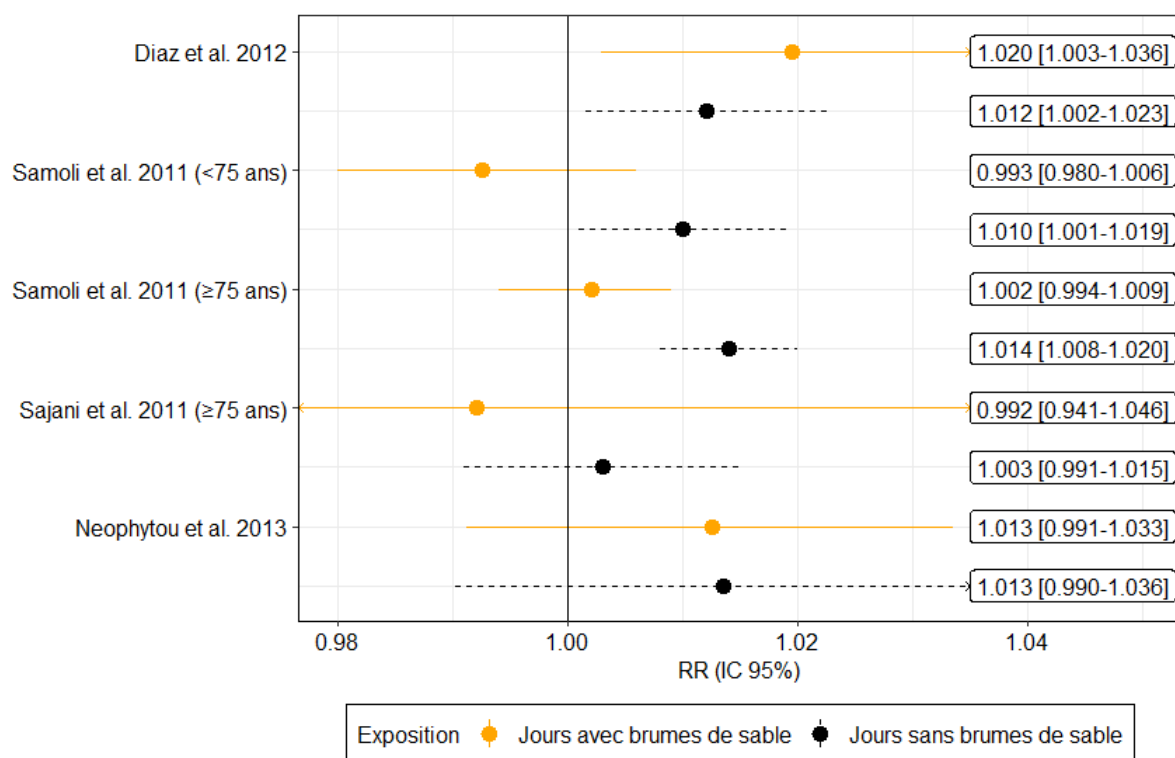


Figure 22 : Risques relatifs de la mortalité cardiovasculaire pour une exposition à un incrément de 10 µg/m³ de PM₁₀ les jours avec ou sans brumes de sable au lag (1). Variable binaire d'exposition aux brumes de sable considérée en tant que modificateur de l'impact sanitaire des PM₁₀.

Trois études ont considéré les brumes de sables en tant que variable continue dans un modèle à 2 ou 3 sources (Perez, Tobias, Querol, *et al.* 2012; Stafoggia *et al.* 2016; Renzi *et al.* 2018).

Deux d'entre-elles ont analysé la relation à court terme entre la mortalité cardiovasculaire et l'exposition aux niveaux de PM₁₀ désertiques et non désertiques, au lag 0-5, dans un modèle à 2 sources et ont obtenu des ER plus importants pour les PM₁₀ désertiques.

Pour une augmentation de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ des PM désertiques et non désertiques, Stafoggia *et al.* (2016) trouve un ER de mortalité cardiovasculaire significatif de 1,10 % [IC95 % : 0,16 % - 2,06 %] lors des brumes de sable, alors que pour les jours sans brumes de sable cette association est positive mais non significative (0,49 % [IC95 % : -0,31 % - 1,29 %]). L'impact des niveaux de PM₁₀ désertiques en termes de mortalité cardiovasculaire est deux fois plus élevé que pour les particules non désertiques. Cette étude a également analysé les brumes de sables en tant que facteur de risque seul et ne trouve pas d'impact significatif sur la mortalité cardiovasculaire.

Des résultats comparables ont été rapportés en Sicile par Renzi *et al.* (2018) avec la même méthodologie. Une association positive a également été mise en évidence entre les PM₁₀ d'origine désertique et non désertique et la mortalité cardiovasculaire au lag 0-5. Dans cette étude, des différences plus marquées entre les deux sources de PM₁₀ sont mesurées pour un lag plus important. En effet, pour un lag 0-5 et pour une augmentation de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ des PM₁₀, l'ER estimé était de 4,54 % [IC95 % : 3,82 % - 5,26 %] pour les PM₁₀ désertiques et de 2,38 % [IC95 % : 1,35 % - 3,43 %] pour les PM₁₀ non désertiques.

La dernière étude a étudié l'impact de l'exposition aux PM₁₀ (désertiques/non désertiques) dans un modèle à 3 sources, à Rome, avec un lag compris entre 0 et 3 jours (Perez, Tobías, Querol, *et al.* 2012). **Les jours de brumes de sable, des ER plus élevés ont été mesurés pour les PM₁₀ non désertiques par rapport aux PM₁₀ désertiques pour tous les lags. De plus, pour une augmentation de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ des PM₁₀ non désertiques, l'ER de mortalité cardiovasculaire était supérieur les jours avec brumes de sable par rapport aux jours sans brumes de sable.**

- PM_{2,5} et PM_{2,5-10}

Seulement trois études ont étudié l'impact des brumes de sables sur la relation entre les PM_{2,5} et les PM_{2,5-10} sur la mortalité cardiovasculaire et les résultats sont discordants (Perez, Tobías, Querol, *et al.* 2012; Mallone *et al.* 2011; Jiménez *et al.* 2010).

Pour Jiménez *et al.* (2010), l'association entre les PM_{2,5} et la mortalité cardiovasculaire n'est présente que pour les jours sans brumes de sable et aucune association avec les PM_{2,5-10} n'est mesurée. Dans l'étude de Mallone *et al.* (2011), l'impact des concentrations de PM_{2,5} n'est pas significative et l'association est négative pour la mortalité cardiovasculaire lors des jours avec brumes de sable. L'impact des concentrations en PM_{2,5-10} sur la mortalité cardiovasculaire et cardiaque lors des brumes de sable est plus élevé que pour les PM₁₀ et la présence de brumes de sable modifie clairement la relation avec cette fraction granulométrique.

Dans l'étude de Perez *et al.* (2012), les fractions granulométriques étudiées étaient les PM₁, les PM_{1-2,5} et les PM_{2,5-10}. Aucun excès de risque significatif n'a été mesuré pour les PM₁ que ce soit les jours de brumes de sable ou sans brumes. En revanche, l'association entre la mortalité cardiovasculaire et les PM_{1-2,5} est significative les jours de brumes de sable et plus élevée que les jours sans brumes de sable. Enfin, pour les PM_{2,5-10}, cette association est significative les jours de brumes de sable et sans brumes et les résultats sont en faveur d'un effet modificateur (p pour l'interaction=0,1111)

4.2.1.1.3 Mortalité liée aux pathologies cérébrovasculaires

- Points clés :

Seulement trois études se sont intéressées à l'impact des brumes de sable sur la mortalité cérébrovasculaire (Perez, Tobías, Pey, *et al.* 2012; Mallone *et al.* 2011; Díaz, Tobías, et Linares 2012). Même si deux études montrent une association positive entre les PM_{2,5-10} et la mortalité cérébrovasculaire (Perez, Tobías, Pey, *et al.* 2012; Mallone *et al.* 2011), aucune différence significative entre les jours avec et sans brumes de sable n'a pas pu être démontrée.

Deux études réalisées en Espagne n'ont pas conclu à un impact significatif des brumes de sable sur la mortalité cérébrovasculaire. A Madrid, aucune association significative n'a été observée entre les PM₁₀ et la mortalité cérébrovasculaire, que ce soit en présence de brumes de sable ou non (Díaz, Tobías, et Linares 2012). L'étude menée à Barcelone s'intéressait à différentes fractions granulométriques (PM₁, PM_{1-2,5}, PM_{2,5-10}) (Perez, Tobías, Pey, *et al.* 2012). Pour une augmentation de l'IQR de 11 µg/m³ des PM_{2,5-10}, l'OR était à la limite de la significativité (p<0,1) les jours sans épisodes de brumes de sable (1,039 [IC95 % : 0,993 - 1,087]). Toutefois, aucune modification de l'effet de ces fractions granulométriques sur la mortalité cérébrovasculaire pendant un épisode de brumes de sable n'a pu être mise en évidence.

Une étude menée à Rome (Italie) s'est également intéressée au lien entre les brumes de sable et la mortalité cérébrovasculaire selon différentes fractions granulométriques (PM_{2,5}, PM_{2,5-10}, PM₁₀) (Mallone *et al.* 2011). Les résultats obtenus montrent un ER significatif de 5,41 % (IC95 % : 1,74 - 9,22) pour une augmentation de l'IQR de 10,8 µg/m³ des concentrations en PM_{2,5-10}. Pour cette même augmentation de l'IQR de 10,8 µg/m³ des PM_{2,5-10}, les auteurs mettent en évidence un ER de 7,03 % [IC95 % : 1,22 - 13,18] pendant les épisodes de brumes de sable et un ER de 4,58 % [IC95 % : 1,50 - 6,69] hors épisode de brumes de sable. Ainsi, même si l'ER est légèrement supérieur lors des intrusions de brumes de sable, la différence entre les ER n'est pas significative et les intervalles de confiance se recoupent.

4.2.1.1.4 Mortalité liée aux pathologies respiratoires

- Points clés :

Les différentes études ne permettent pas de conclure sur l'augmentation des décès pour causes respiratoires en lien avec les PM₁₀ lors des épisodes de brumes de sable en raison de résultats contrastés. Sur les 8 études disponibles, 3 ont montré une association plus importante entre la mortalité respiratoire et les PM₁₀ les jours sans brumes de sable et 2 ont montré une association plus importante entre la mortalité respiratoire et les PM₁₀ non désertiques par rapport aux PM₁₀ désertiques.

- PM₁₀

Six études ont analysé l'impact des brumes de sable sur la mortalité respiratoire en utilisant une variable binaire (jour avec et sans brumes de sable) en interaction avec les PM₁₀ pour évaluer si l'impact sanitaire est significativement renforcé lors des épisodes de brumes de sable (Figure 23).

A Madrid, deux études ont trouvé des ER significatifs de la mortalité respiratoire pour une exposition aux PM₁₀ les jours d'intrusions de brumes de sable sahariennes (Díaz, Tobías, et Linares 2012; Jiménez *et al.* 2010). L'étude de Díaz, Tobías, et Linares (2012) a trouvé, pour une augmentation de 10 µg/m³ des PM₁₀, une augmentation des décès pour causes respiratoires (3,48 % [IC95 % : 1,22 – 5,79]) plus élevée lors des intrusions brumes de sable sahariennes que pour les autres jours (2,50 % [IC95 % : 1,05 - 3.93]) mais sans modification de la relation avec les PM₁₀.

En Emilie Romagne (Italie), Zauli Sajani *et al.* (2011) ont montré un effet des brumes de sable sur la mortalité respiratoire des 75 ans et plus qui augmente de 22 % (IC95 % : 4,0 % - 43,1 %) lors des épisodes, cet impact étant encore plus élevé (39 %) en période estivale. Toutefois, la présence de brumes de sable ne modifie pas la relation entre les particules et la mortalité respiratoire. Les auteurs précisent que les personnes âgées sont plus sensibles aux effets de la pollution et la présence de brumes de sables pourrait augmenter leur sensibilité aux polluants.

Tout comme pour la mortalité toutes causes et cardiovasculaire, l'étude de Samoli *et al.* (2011) a mesuré des ER de mortalité respiratoire plus important les jours sans brumes de sable chez les personnes âgées de plus de 75 ans. Un résultat similaire a été mesuré dans l'étude de Mallone *et al.* (2011) pour des personnes âgées de plus de 35 ans. Enfin, l'étude de Neophytou *et al.* (2013) n'a trouvé aucune association entre une augmentation de 10 µg/m³ de PM₁₀ et la mortalité respiratoire.

Les RR des études ayant considéré l'exposition aux brumes de sable en tant que variable binaire et comme modificateur d'effet dans la relation entre les PM₁₀ et la mortalité respiratoire ont été représentés dans la Figure 23. Un décalage d'un jour (lag 1 (ie. le plus fréquemment utilisé)) entre la survenue des brumes de sable et l'apparition de l'effet de santé a été choisi.

Les résultats des études sont contrastés et ne permettent pas de conclure à un impact significatif des brumes de sable sur la relation PM₁₀ – mortalité respiratoire.

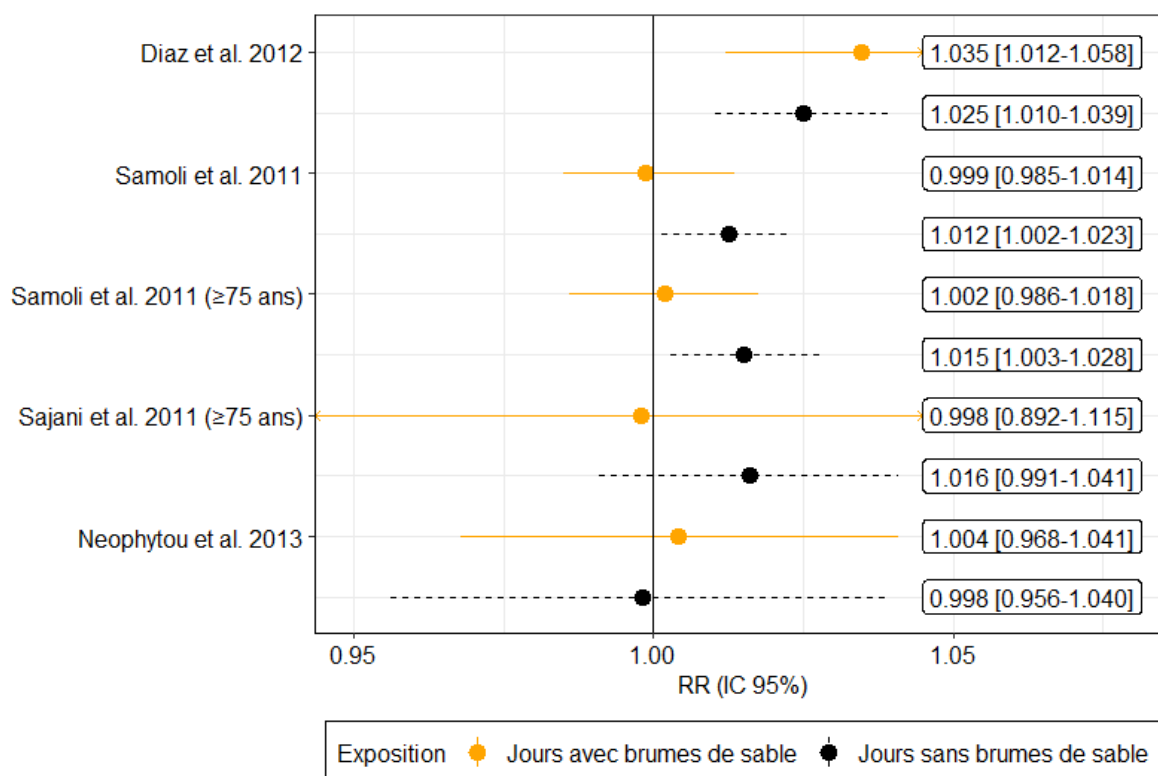


Figure 23 : Risques relatifs de la mortalité respiratoire pour une exposition à un incrément de 10 µg/m³ de PM₁₀ les jours avec ou sans brumes de sable au lag (1). Variable binaire d'exposition aux brumes de sable considérée en tant que modificateur de l'impact sanitaire des PM₁₀.

Deux études ont analysé la relation à court terme entre la mortalité respiratoire et l'exposition aux niveaux de PM₁₀ désertiques et non désertiques, au lag 0-5, dans un modèle à 2 sources et ont obtenu des ER plus importants pour les PM₁₀ non désertiques. L'étude de Stafoggia *et al.* (2016) menée dans 13 villes du sud de l'Europe, a mesuré un ER de mortalité respiratoire lié à une augmentation de 10 µg/m³ des concentrations de PM₁₀ non désertiques (2,46 % [IC95 % : 0,96 % - 3,98 %]) significatif alors que l'ER mesuré pour les PM₁₀ désertiques ne l'est pas (1,28 % [IC95 % : -0,42 % - 3,01 %]). Des résultats comparables ont été rapportés en Sicile par Renzi *et al.* (2018) avec la même méthodologie. En effet, pour une augmentation de 10 µg/m³ des PM₁₀, l'ER estimé était de 8,15 % [IC 95% : 6,82 % - 9,5 %] pour les PM₁₀ non désertiques et de 6,29 % [IC95 % : 5,39 % - 7,2 %] pour les PM₁₀ désertiques.

- PM_{2,5} et PM_{2,5-10}

Jiménez *et al.* (2010) observent une association entre la mortalité respiratoire et les PM_{2,5} uniquement les jours sans brumes de sable. Par contre, dans l'étude de Mallone *et al.* (2011), un ER de mortalité respiratoire en lien avec les PM_{2,5-10} de 19,43 % [IC95 % : 0,34 % - 42,15 %] les jours de brumes de sable est constaté, avec une tendance à un renforcement de l'effet de cette fraction, même si l'interaction n'est pas significative. C'est également le cas pour les PM_{2,5}. A l'inverse, l'étude de Perez, Tobías, Querol, *et al.* (2012) à Barcelone, trouve un ER de décès pour cause respiratoire significatif et plus fort les jours sans brumes de sable

pour la fraction $PM_{2,5-10}$ et trouve un ER non significatif les jours avec brumes de sable. Concernant les $PM_{1-2,5}$, ce sont les jours de brumes de sable que l'ER est significatif ($p < 0,1$) et plus important que celui des jours sans brumes de sable. Enfin, pour les PM_1 , il n'y a pas d'association significative avec la mortalité respiratoire que ce soit les jours avec ou sans brumes de sable.

4.2.1.2 Hospitalisations et passages aux urgences

4.2.1.2.1 Pathologies cardiovasculaires

- Points clés :

Les études identifiées sont peu nombreuses et ne permettent pas de conclure sur l'impact des brumes de sable sur les admissions pour pathologies cardiovasculaires en raison de la discordance des résultats.

Sept études se sont intéressées à l'impact des brumes de sable sur les hospitalisations pour des pathologies cardiovasculaires.

Deux études ont mesuré des excès de risque positifs mais non significatifs sur les hospitalisations pour causes cardiovasculaires les jours de brumes de sable, en lien avec les PM_{10} (0,32% [IC 95 % : -0,24 % - 1,06 %] ; et 10,4 % [IC 95 % : -4,7 % - 27,9 %]) (Stafoggia *et al.* 2016; N. Middleton *et al.* 2008). Pour ces études, cet effet n'est pas significativement différent entre les jours avec et sans brumes de sable, et la présence des brumes de sable ne modifie pas le lien entre les PM_{10} et les hospitalisations cardiovasculaires. Alessandrini *et al.* (2013) a analysé les hospitalisations pour les pathologies cardiaques en excluant les admissions pour causes vasculaires. Cette étude retrouve également un excès de risque non significatif en lien avec les PM_{10} et les $PM_{2,5}$ lors des épisodes de brumes de sable. Par contre, il existe une association significative en lien avec les $PM_{2,5-10}$ au lag 0-1 (4,03 % [IC 95 % : 0,26 % - 7,94 %]) sans effet modificateur, qui est renforcée pour une exposition cumulée du jour et des 5 jours précédents (10,89 % [IC 95 % : 3,47 % - 18,84 %]) modifiant la relation avec les $PM_{2,5-10}$ (interaction p 0,005) (Alessandrini *et al.* 2013).

Enfin, d'autres études n'ont pas trouvé d'association entre ces indicateurs et une exposition aux brumes de sable. En Sicile, les admissions pour causes cardiovasculaires dans les 4 principales villes sont associées uniquement aux niveaux de PM_{10} non désertiques (Renzi *et al.* 2017). A Madrid, les hospitalisations toutes causes et cardiovasculaires sont associées aux niveaux de $PM_{2,5}$ seulement les jours non impactés par les intrusions de particules sahariennes (Reyes *et al.* 2013). Aux Îles Canaries, une étude concernant les admissions pour ischémie cardiaque et une autre concernant les admissions pour le syndrome coronarien aigu n'ont pas trouvé d'association avec une exposition aux brumes de sable (Domínguez-Rodríguez *et al.* 2020; Domínguez-Rodríguez, Rodríguez, *et al.* 2021).

4.2.1.2.2 Pathologies cérébrovasculaires

Une étude menée à Rome (Italie) porte sur l'association entre les $PM_{2,5}$, $PM_{2,5-10}$ et PM_{10} et les hospitalisations journalières pour causes cérébrovasculaires (Alessandrini *et al.* 2013). Les résultats ont montré une association positive et statistiquement significative entre les PM_{10} et les hospitalisations pour maladies cérébrovasculaires (ER de 2,64 % [IC95 % : 0,06 - 5,29] pour une augmentation de l'IQR de 19,8 $\mu g/m^3$ des PM_{10}) sur toute la période. De plus, les brumes de sable semblent accroître l'effet des PM_{10} sur les maladies cérébrovasculaires (pour

une augmentation de l'IQR de 19,8 µg/m³ : ER de 5,04 % [IC95 % : 0,39 - 9,91] les jours de brumes de sable versus 0,90 % [IC95 % : -2,34 - 4,25] hors jours de brumes). Cette différence n'est pas significative (*p-value* de l'interaction=0,143). Cet impact est immédiat et ne semble pas se prolonger dans le temps. Si aucune modification de l'effet des PM_{2,5} et PM_{2,5-10} sur les hospitalisations pour maladies cérébrovasculaires n'a pu être mise en évidence lors des jours de brumes de sable, une exposition cumulée du jour et des 5 jours précédents modifie la relation avec les PM_{2,5-10} (interaction *p* 0,005) avec un excès de risque d'hospitalisations les jours de brumes de sable à 10,88 % [IC 95 % : 1,19 % - 21,50 %] versus -4,62 % [IC 95 % : -10,49 % - 1,64 %] les jours sans.

4.2.1.2.3 Pathologies respiratoires

- Points clés :

Les différentes études analysées sont en faveur d'un impact des épisodes de brumes de sable sur les hospitalisations et passages aux urgences pour pathologies respiratoires. En revanche, il n'est pas possible de conclure sur une modification de la relation entre les particules et les pathologies respiratoires induite par les brumes de sable.

- Pathologies respiratoires toutes causes

Sept études se sont intéressées à l'association des niveaux de particules avec les hospitalisations pour des pathologies respiratoires lors des épisodes de brumes de sable.

Trois d'entre elles ont retrouvé des excès de risque positifs mais non significatifs sur les hospitalisations pour causes respiratoires après une exposition du jour et de la veille aux PM₁₀ lors des épisodes de brumes de sable (Stafoggia *et al.* 2016; Alessandrini *et al.* 2013; N. Middleton *et al.* 2008).

D'autres études ont retrouvé une association significative entre les hospitalisations respiratoires et les PM₁₀. En Sicile, une exposition du jour et de la veille aux PM₁₀ a entraîné un excès de risque d'hospitalisations les jours de brumes de sable (0,54 % [IC 95 % : 0,08 % - 1,01 %]) mais non différent des jours sans brumes de sable 0,19 % [IC 95 % : -0,16 % - 0,54 %] (Renzi *et al.* 2017).

A Athènes, la présence de brumes de sable considérée comme seul facteur de risque a un effet propre entraînant une augmentation de 47,1 % des passages aux urgences pour causes respiratoires. L'impact des brumes de sable sur la morbidité respiratoire était robuste à l'ajustement aux PM₁₀ qui modifiait peu cette relation (Trianti *et al.* 2017) mais les résultats obtenus pour les jours avec et sans brumes de sables n'étaient pas rapportés.

Au Portugal, dans la région la plus impactée par les intrusions de brumes de sable sahariennes et après ajustement sur les PM₁₀, une augmentation significative de 12,6 % des admissions pour pathologies respiratoires a été observée lors des épisodes de brumes de sable (Silva *et al.* 2021).

A Madrid, Reyes *et al.* (2013) conclut à un impact des PM₁₀ et des PM_{2,5-10} désertiques sur les hospitalisations respiratoires mais avec un effet différé de 5 jours par rapport à l'exposition pour les PM_{2,5-10} (7,8 % [IC 95 % : 3,2 % - 11,9 %]) et de 7 jours pour l'exposition aux PM₁₀ (3,0 % [IC 95 % : 0,2 % - 5,7 %]). Les jours sans brumes de sable, les hospitalisations respiratoires étaient plutôt liées aux PM_{2,5}, avec un effet différé.

A Rome, si l'association entre PM₁₀ et hospitalisations respiratoires n'est pas significative les jours avec et sans brumes de sables, un effet accru des PM_{2,5-10} sur les pathologies

respiratoires est observé lors des jours de brumes de sable (14,62 % [IC 95 % : 5,34 % - 24,72 %], lag 0-5) avec une modification de la relation (interaction $p=0,006$) (Alessandrini et al. 2013).

Une étude récente a concerné les deux principales îles Canaries et les résultats sont différents pour chacune des îles (López-Villarrubia *et al.* 2021). A Tenerife, l'effet propre des brumes de sable était de 7,9 % le jour même et de 22,6 % en cumulé sur 6 jours. Cette relation est renforcée lors des épisodes de longue durée (> 5 jours), d'intensité moyenne à forte et lorsque les brumes de sable sont transportées à faible altitude. Les hospitalisations respiratoires sont significativement augmentées après exposition aux PM₁₀ (0,85 % [IC 95 % : 0,06 % - 1,65 %]) et aux PM_{2,5} (2,03 % [IC 95 % : 0,42 % - 3,66 %]) lors des jours de brumes de sable mais sans effet modificateur sur la relation. A la Grande Canarie, l'effet propre des brumes de sable n'était pas significatif et l'impact des brumes de sable sur les hospitalisations respiratoires était significatif pour une exposition aux PM_{2,5} (1,62 % [IC 95 % : 0,15 % - 3,11 %]).

Enfin, deux études ont analysé les hospitalisations respiratoires chez les enfants avec des résultats contradictoires. L'étude de Stafoggia *et al.* (2016) trouve un impact significatif des PM₁₀ d'origine désertique sur les hospitalisations pour pathologies respiratoires chez les enfants de moins de 15 ans (2,47 % [IC 95 % : 3,2 % - 11,9 %]), mais similaire à celui des PM₁₀ non désertiques. A l'inverse, Alessandrini *et al.* (2013), met en évidence une tendance à la diminution de ces hospitalisations en lien avec les PM₁₀ les jours de brumes de sable.

- Bronchite chronique obstructive

L'impact des brumes de sable semble un peu plus élevé pour les hospitalisations et les passages aux urgences pour exacerbation de bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) que pour les pathologies respiratoires toutes causes. La présence de brumes de sable a un effet propre entraînant une augmentation de 53 % des admissions en urgence pour BPCO à Tenerife. Après ajustement sur les particules, cet effet propre est un peu diminué et l'association avec les PM₁₀ (2,7 % [IC 95 % : 1,24 % - 3,72 %]), les PM_{2,5} (3,67 % [IC 95 % : 0,89 % - 6,52 %]) et les PM_{2,5-10} (3,94 % [IC 95 % : 1,84 % - 6,19 %]) est significative lors des brumes de sable mais sans effet modificateur (López-Villarrubia *et al.* 2021). Des résultats similaires sont observés pour l'île de Grande Canarie dans cette étude. Par contre, une autre étude concernant cette île ne retrouve pas d'augmentation d'admissions de BPCO les jours avec brumes de sable par rapport aux jours sans brumes de sable (Menéndez *et al.* 2017).

A Athènes, la présence de brumes de sable considérée comme seul facteur de risque a un effet propre plus élevé que pour les pathologies respiratoires augmentant de 57,1 % les passages aux urgences pour BPCO. Cet effet persistait après ajustement sur les PM₁₀ qui modifiait peu cette relation mais les résultats obtenus pour les jours avec et sans brumes de sables n'étaient pas rapportés (Trianti *et al.* 2017).

Une étude en Crète a estimé que les jours avec des intrusions de brumes de sable très intenses semblaient être reliés à une augmentation des hospitalisations pour exacerbations de BPCO (Lorentzou *et al.* 2019).

Une étude menée à Miami a cherché à évaluer l'impact des brumes de sable et des PM_{2,5} sur la survenue d'exacerbation de BPCO en utilisant les données d'une cohorte prospective de patients souffrant de cette pathologie (Gutierrez *et al.* 2020). La survenue de deux ou plusieurs exacerbations de BPCO est associée significativement à l'intensité des épisodes de brumes de sable (OR 4,95 [IC95 % : 1,83 - 13,45]) ainsi qu'aux niveaux de PM_{2,5} (OR 1,12 [IC95 % : 1,06 - 1,19]), pour une exposition du jour et de la veille. L'exposition des 15 jours précédents la consultation pour exacerbation montre un impact cumulé des brumes de sable persistant plusieurs jours. Les épisodes de brumes de sable observés à Miami augmentent la

concentration de $PM_{2,5}$ et le risque d'exacerbation chez les patients présentant des décompensations de BPCO récurrentes.

- Asthme

Trois études se sont intéressées à l'impact des brumes de sable sur les hospitalisations et passages aux urgences pour crises d'asthme chez les adultes ou tous âges confondus et les résultats sont plutôt en faveur d'une absence d'impact des brumes de sables sur les admissions ou les consultations pour asthme dans cette population.

Aux îles Canaries, López-Villarrubia *et al.* (2021) n'a pas retrouvé d'effet propre des épisodes de brumes de sable sur les admissions aux urgences pour asthme sur l'île de Tenerife et l'impact des différentes fractions de particules était plus élevé les jours sans brumes de sable. C'est le cas également pour l'île de Grande Canarie, même si une exposition cumulée sur 6 jours aux brumes de sable entraîne une augmentation de 33,4 % des visites pour asthme à la limite de la significativité. Par contre, une autre étude concernant cette île ne retrouve pas d'augmentation d'admissions pour asthme entre les jours avec et sans brumes de sable (Menéndez *et al.* 2017).

Dans les Caraïbes sur l'île de Grenade, une simple étude de corrélation entre les consultations pour asthme et différentes variables environnementales a retrouvé une corrélation significative mais faible avec les brumes de sable ($R^2 = 0,036$). Les passages aux urgences pour asthme sont également corrélés aux pluies et à l'humidité et inversement corrélés à la pression moyenne au niveau de la mer (Akpınar-Elci *et al.* 2015).

Cinq études se sont intéressées à l'impact des brumes de sable sur les hospitalisations et passages aux urgences pour asthme chez les enfants et **les résultats sont plutôt en faveur d'un impact des brumes de sables et des particules entraînant des crises d'asthme le jour même de l'exposition.**

Deux études ont été réalisées en Europe. La première à Athènes, où une augmentation de $10 \mu g/m^3$ de PM_{10} entraîne une augmentation significative des hospitalisations pour asthme chez les enfants de moins de 15 ans pendant les épisodes de brumes de sable. Cet ER était de 4,12 % [IC95 % : 0,11 % - 8,30 %] contre 2,06 % [IC95 % : -1,01 % - 5,21 %] les jours sans brumes de sable (Samoli *et al.* 2011). Néanmoins, l'interaction entre les brumes de sable et les concentrations de PM_{10} n'était pas statistiquement significative ($p = 0,410$). Par contre, la deuxième étude menée à Rome n'a pas retrouvé d'association significative des particules avec les hospitalisations pour asthme pour les jours avec et sans brumes de sable (Alessandrini *et al.* 2013).

Trois études ont été menées aux Caraïbes avec des méthodes d'analyses différentes. En Guadeloupe, les fractions PM_{10} et $PM_{2,5-10}$ des particules sahariennes ont augmenté le risque de visite aux urgences pour les enfants asthmatiques pendant la période (Cadelis, Tourres, et Molinie 2014). Pour une augmentation de $10 \mu g/m^3$ des concentrations de PM_{10} , l'ER était de 9,1 % [IC95 % : 7,1 % - 11,1 %] les jours avec brumes de sable et de 1,1 % [IC95 % : -5,9 % - 4,6 %] les jours sans brumes de sable. Pour les $PM_{2,5-10}$, l'ER était respectivement de 4,5 % [IC95 % : 2,5 % - 6,5 %] et de 1,6 % [IC95 % : -1,1 % - 3,4 %]. La deuxième étude (Prospero *et al.* 2008) a analysé les consultations aux urgences pour asthme des enfants de moins de 18 ans venant de toute l'île de la Barbade d'une part, et pour des enfants vivant en zone rurale d'autre part, en comparant le nombre de visites durant les épisodes de brumes de sable à celui d'une période contrôle avant et après les épisodes. Cette étude n'a pas mis en évidence une augmentation significative des passages aux urgences lors des épisodes de brumes de sable mais les auteurs pensent qu'il faudrait utiliser une méthode plus appropriée à l'analyse des séries chronologiques pour pouvoir vraiment conclure. Pour la dernière étude, le taux

d'admission journalier pour asthme augmente de 7,8 % à 9,8 % lorsque la visibilité diminue de 16 km à 7 km au mois de juin (Gyan *et al.* 2005).

4.2.1.2.4 Données concernant les symptômes et la fonction pulmonaire

Seulement deux études se sont intéressées à l'impact des brumes de sables sur des symptômes ou la fonction pulmonaire.

Saers *et al.* (2021) a mené une étude sur des militaires suédois ayant été affectés 6 mois à Tombouctou au Mali dans un environnement désertique. La survenue d'épisodes de brumes de sable provenant du Sahara lors de leur mission a été recueillie par questionnaire. L'exposition à une tempête de sable dans le désert a été associée à la présence d'une obstruction bronchique objectivée par une diminution du volume expiratoire maximal seconde (VEMS), mais pas à une augmentation des symptômes respiratoires ou de l'inflammation mesurée par la fraction exhalée d'oxyde d'azote. L'exposition aux brumes de sable semble donc contribuer au développement de maladies respiratoires chez les personnes exposées aux particules désertiques.

Aux Îles Canaries, Domínguez-Rodríguez *et al.* (2020) a étudié l'impact des particules provenant du Sahara sur l'inflammation des voies respiratoires de patients souffrant de coronaropathies. Les marqueurs TGF- β 1 et l'hydroxyproline présents dans les expectorations étaient fortement associés à l'inhalation de PM₁₀ provenant de particules de brumes de sable. L'exposition à des niveaux élevés de PM₁₀ lors des épisodes de brumes de sable est associée à une inflammation intense de la muqueuse bronchique chez ces patients déjà fragilisés.

4.2.1.3 Autres effets de santé

4.2.1.3.1 Effets sur la périnatalité

Cinq études se sont intéressées à l'impact des brumes de sable sur la santé périnatale. En Guyane (Nacher *et al.* 2024), en Guadeloupe (Jean-François Viel *et al.* 2019; Jean-François Viel *et al.* 2020) et en Espagne (Moreira *et al.* 2020), des associations entre les accouchements prématurés, un faible poids à la naissance et un retard de croissance intra-utérin ont été mesurés en lien avec les épisodes de brumes de sable. En revanche, Dadvand *et al.* (2011) n'ont pas identifié d'impact des brumes de sable sur les complications ou les issues de grossesse à Barcelone mais ont seulement observé une légère augmentation de la durée de la grossesse (+0,5 jours).

4.2.1.3.2 Effets sur la santé mentale

Ruiz-Páez *et al.* (2024) ont étudié l'impact des jours d'intrusions de brumes de sable sahariennes sur les admissions à l'hôpital pour des troubles mentaux et comportementaux dans différentes villes d'Espagne mais n'ont pas identifié d'associations significatives.

4.2.1.3.3 Maladies infectieuses

- Méningite :

En Afrique, dans la région du Sahel, l'apparition simultanée des épidémies de méningite et des résurgences saisonnières de maladies endémiques lors de périodes sèches et poussiéreuses suggérait une corrélation entre ces événements (Molesworth *et al.* 2003; Besancenot, Boko, et Oke 1997; Greenwood *et al.* 1984; Aurelio Tobías, Caylà, *et al.* 2011). Deux études plus récentes ont montré des associations positives entre la profondeur optique des aérosols, qui est un proxy de la concentration en PM₁₀, et l'incidence de la méningite au

Niger et au Sénégal (García-Pando *et al.* 2014; Diokhane *et al.* 2016). En revanche, Woringer *et al.* (2018) n'ont pas pu établir de lien entre la méningite épidémique au Burkina Faso et la profondeur optique des aérosols.

Un délai de 1 à 2 semaines a été mesuré dans plusieurs études entre les pics de concentrations en particules de brumes de sable et l'augmentation des cas de méningite (Martiny et Chiapello 2013; L. Agier *et al.* 2013; Deroubaix *et al.* 2013). Ce décalage est compatible avec l'hypothèse biologiquement plausible selon laquelle les particules de brumes de sable et l'air sec favorisent l'invasion bactérienne dans la circulation sanguine en endommageant la barrière muqueuse de l'hôte ou en inhibant les défenses immunitaires des muqueuses (Moore *et al.* 1992; Lydiane Agier *et al.* 2017; Jusot *et al.* 2017), avec une période d'incubation de <14 jours (Stephens, Greenwood, et Brandtzaeg 2007). Cependant, Mueller (2019) souligne qu'aucun mécanisme confirmé n'explique de manière définitive l'effet nocif d'une faible humidité de l'air et d'une charge élevée en aérosols sur la muqueuse nasopharyngée.

En 2011, Aurelio Tobías, Caylà, *et al.* (2011) ont souligné l'absence d'étude sur l'incidence de la méningite en lien avec les épisodes de brumes de sable sahariennes dans un pays méditerranéen où ces intrusions sont fréquentes. Pour combler cette lacune, ils ont mené une première étude à Barcelone afin d'évaluer l'effet de ces intrusions de particules sur le risque de méningite à méningocoques (B et C), en utilisant un modèle de séries temporelles. L'analyse, menée avec un décalage allant jusqu'à un mois, a révélé que le risque maximal de méningite était observé 28 jours après un épisode de brumes de sable sahariennes (OR : 1,392 [IC95 % : 1,152 - 1,681]). Une autre étude avait mesuré une période de latence similaire (1 mois), où une faible humidité et une intensité croissante de l'Harmattan pendant une épidémie au Nigeria a été corrélée avec une augmentation des admissions à l'hôpital pour méningite à méningocoques un mois plus tard (Greenwood *et al.* 1984). Cependant, les mécanismes sous-jacents de cette association restent difficiles à identifier étant donné que les durées avant l'apparition des symptômes sont plus importantes que la durée d'incubation de la méningite. Il est peu probable que cette relation soit directe. Enfin, il est important de noter que les épidémies de méningite en Afrique ont principalement été causées par le méningocoque du sérogroupe A, alors que l'étude menée à Barcelone n'a identifié que des cas isolés liés aux sérogroupe B et C (Aurelio Tobías, Caylà, *et al.* 2011).

Yarber *et al.* (2023) ont montré que la saison des épidémies de méningite au Sénégal commence en février, environ 2 mois après le début de la saison des épisodes de brumes de sable, et atteint son pic en avril, en corrélation avec une augmentation de la vitesse des vents du nord-est et des concentrations de particules. De plus, cette étude souligne que l'humidité relativement élevée du Sénégal peut ralentir la transmission de l'infection, expliquant une incidence plus faible que dans les pays enclavés.

- Covid-19 :

Des études menées en Colombie (Bolaño-Ortiz *et al.* 2023), au Mexique (Kutralam-Muniasamy *et al.* 2021) et en Europe (Rohrer, Flahault, et Stoffel 2020), ont analysé le lien entre des épisodes de brumes de sable survenues en 2020 et une augmentation des cas de Covid-19 mais n'ont obtenu que quelques corrélations positives entre les deux.

4.2.2 Revues et méta-analyses

En raison du manque d'études sur les zones géographiques d'intérêts, il est pertinent de considérer les résultats des revues de la littérature et des méta-analyses qui ont inclus non seulement les résultats liés aux intrusions de brumes de sables sahariennes mais également celles d'autres déserts. Ces revues incluent les articles précédemment présentés.

Les revues de la littérature et les méta-analyses identifiées ont des conclusions similaires à celles présentées précédemment concernant l'impact sanitaire des brumes de sable originaires d'Afrique du Nord. Des effets sur les différents types de mortalité (toutes causes naturelles, cardiovasculaire et respiratoire) ont été mesurés ainsi que sur les hospitalisations et les passages aux urgences, en particulier pour les pathologies respiratoires (BPCO, asthme). Ils montrent une augmentation des décès lors des épisodes de brumes de sable, et plus particulièrement en lien avec les PM₁₀ et PM_{2,5-10} par rapport aux PM_{2,5}. En ce qui concerne la mortalité respiratoire, les résultats sont discordants et ne permettent pas de conclure.

- Revue de la littérature

En 2019, Kotsyfakis, Zarogiannis, et Patelarou (2019) ont publié une revue de la littérature sur les effets sanitaires des brumes de sable du Sahara portant sur 19 articles. Les auteurs constatent que les concentrations en particules sont associées à une augmentation de la mortalité totale et par causes spécifiques pour les jours avec ou sans brumes de sable. Des résultats similaires sont observés pour les hospitalisations pour causes respiratoires. Les effets des brumes de sable tendent à être plus élevés pour la morbidité cardiovasculaire et respiratoire par rapport aux jours sans brumes de sable. La taille des particules a un impact sur les effets sanitaires observés. Les PM₁₀ et les PM_{2,5-10} semblent avoir plus d'impact que les PM_{2,5}.

La revue de la littérature de Urrutia-Pereira *et al.* (2021) porte sur 19 articles et avait pour objectif d'évaluer l'impact sanitaire des brumes de sable du Sahara touchant l'Amérique du Nord pendant la période hivernale. Peu d'études ont analysé ce phénomène dans cette région du globe et la plupart des études sur l'impact de ces brumes de sable sont réalisées en Europe, aux Antilles et aux Caraïbes. Les auteurs se sont intéressés principalement aux effets sur la santé respiratoire. Quelques études mentionnées ont mis en évidence un impact des brumes de sable sur la mortalité totale et respiratoire, notamment chez les personnes les plus âgées. Ils soulignent l'augmentation des hospitalisations, des consultations et des crises d'asthme en lien avec les épisodes de brumes de sable. C'est également le cas pour les consultations et exacerbation de BPCO, les brumes de sable et leurs composants induisant une inflammation des voies respiratoires.

Aghababaeian *et al.* (2021) rapporte qu'une majorité d'études retrouve une augmentation de la mortalité totale, cardiovasculaire et par cardiopathies ischémique et respiratoire lors des épisodes de brume de sable, mais également que certaines études ne retrouvent pas d'association. Le constat est le même pour les hospitalisations pour causes cardiovasculaires et respiratoire. Par contre, la plupart des études concernant les passages aux urgences ou en centre médical mettent en évidence une association entre les épisodes de brumes de sable et différentes pathologies respiratoires et cardiovasculaires et pour conjonctivites.

Les études portant sur les symptômes et la fonction pulmonaire sont essentiellement réalisées en Asie et font appel à des méthodes d'analyse descriptive, de comparaison ou de corrélation qui, pour la plupart, ne permettent pas d'ajuster les relations sur les facteurs météorologiques

et les polluants. Ces études montrent une augmentation de différents symptômes (respiratoires, ORL, cutanés) lors des jours de brumes de sable. Concernant les études estimant l'impact des brumes de sable sur la fonction pulmonaire, les résultats sont divergents et ne permettent pas de conclure.

Dans l'étude de portée (*scoping review*) réalisée par Lwin *et al.* (2023), la moitié des études identifiées concerne les effets sanitaires des déserts d'Asie, 28 % les déserts africains et 12 % les déserts du Moyen-Orient. Les études concernant les déserts australiens et américains sont peu nombreuses. Les études réalisées en Asie portent préférentiellement sur des symptômes et des atteintes de la fonction respiratoire puis sur les hospitalisations et passages aux urgences et sur la mortalité. Les études réalisées sur les autres déserts concernent majoritairement la mortalité et les admissions hospitalières. Les études les plus fréquentes portent sur les pathologies respiratoires, puis sur les pathologies cardiovasculaires. Lwin *et al.* (2023) rapporte que 84 % des études mettent en évidence des associations significatives entre les brumes de sable et les effets néfastes sur la santé, principalement pour les causes de mortalité et de morbidité respiratoire et cardiovasculaire.

Sadeghimoghaddam *et al.* (2021) a publié une revue de la littérature portant sur 36 articles, dont la moitié sont des études asiatiques. Seulement 6 études concernent le désert du Sahara. Plusieurs études retrouvent un impact des brumes de sable sur les hospitalisations pour causes respiratoires et cardiovasculaires ainsi que sur la mortalité. Toutefois, d'autres études ne retrouvent pas d'impact et les auteurs concluent qu'il reste difficile d'affirmer avec certitude l'impact sanitaire des brumes de sable. Ils recommandent de réaliser davantage d'études concernant le type, la composition et la taille des particules.

- Méta-analyses

Ces trois méta-analyses confirment un effet néfaste des brumes de sable sur la mortalité cardiovasculaire. Deux d'entre-elles ont mesuré un effet significatif sur la mortalité toutes causes. Une seule s'est intéressée à la mortalité respiratoire mais n'a pas mesuré de résultat significatif en lien avec les brumes de sable, ce qui est cohérent avec les résultats précédents concernant les études individuelles.

Domínguez-Rodríguez, Báez-Ferrer, *et al.* (2021) ont réalisé en 2021 une méta-analyse incluant 16 études dont 8 réalisées en Europe, 5 en Asie et 3 au Moyen-Orient. Les études étaient de type « *time series* » (6/16) ou « *case-crossover* » (10/16). Cette étude trouve un ratio de risque significatif de l'exposition aux PM₁₀ lors des jours de brumes de sable comparé aux jours sans sur la mortalité cardiovasculaire (1,018 [IC95 % : 1,008 - 1,027]). Différents lags d'exposition ont été testés, les risques relatifs (RR) significatifs les plus élevés correspondant à une exposition du jour (lag 0) et du jour et de la veille (lag 0-1). Cette étude a également estimé ce ratio de risque sur la mortalité pour ischémie cardiaque – qui est également significatif pour le lag 0-1 (1,003 [IC95 % : 1,001 - 1,006] – et sur la mortalité pour insuffisance cardiaque – qui n'est pas significatif.

Pouri *et al.* (2024) a réalisé une méta-analyse incluant 30 études dont 13 réalisées en Europe, 9 en Asie, 5 au Moyen-Orient, 2 aux Etats Unis et 1 en Australie. La plupart des études étaient de type « *time series* » (17/30) ou « *case-crossover* » (11). Les deux dernières étaient des études transversales.

Le ratio de risque estimant l'impact des jours avec brumes de sable sur la mortalité toutes causes est significatif (1,02 [IC95 % : 1,01-1,02]). Ce ratio de risque a également été estimé pour les différentes fractions granulométriques (PM_{2,5}, PM_{2,5-10} et PM₁₀) et était significatif pour les PM₁₀ (1,02 [IC95 % : 1,01-1,03]) et les PM_{2,5-10} (1,05 [IC95 % : 1,02-1,07]).

Le ratio de risque estimant l'impact des brumes de sable sur la mortalité cardiovasculaire était également significatif (1,03 [IC95 % : 1,01-1,04]). C'était le cas également pour les PM₁₀ (1,02 [IC95 % : 1,01-1,04]) et les PM_{2,5-10} (1,08 [IC95 % : 1,05-1,12]).

Enfin, ce ratio de risque était significatif pour la mortalité respiratoire (1,02 [IC95 % : 1,01-1,02]) et pour les PM₁₀ (1,02 [IC95 % : 1,01-1,02]).

Les personnes âgées de 65 ans et plus présentaient un risque plus élevé de décès pour une exposition aux PM₁₀ et PM_{2,5-10} lors des jours avec brumes de sable.

Aurelio Tobías *et al.* (2025) a inclus 71 études dans sa méta-analyse dont 24 portaient sur les déserts africains, 33 sur les déserts asiatiques, 8 sur les déserts du Moyen-Orient, 3 sur les déserts américains et 3 sur les déserts australiens. Toutes les études incluses étaient de type « *time series* » ou « *case-crossover* », les autres types d'études ayant été exclues lors de la sélection.

Le RR estimant l'impact des jours avec brumes de sable comparé aux jours sans brumes de sable sur la mortalité toutes causes était significatif (1,0121 [IC95 % : 1,0045-1,0199]), ainsi que celui sur la mortalité cardiovasculaire (1,0252 [IC95 % : 1,0100-1,0407]). Ce RR n'était pas significatif pour la mortalité respiratoire (1,0001 [IC95 % : 0,9773-1,0277]).

4.2.3 Etudes toxicologiques

Contrairement à l'abondante littérature décrivant les effets des particules ambiantes, et en particulier des particules liées au trafic routier sur le système cardiorespiratoire, les études concernant les brumes de sable provenant des déserts de nombreuses régions du monde restent marginales. Seules les brumes de sable provenant d'Asie sont davantage documentées. Néanmoins, ces intrusions de brumes de sable contribuent à l'augmentation des concentrations de particules de l'air ambiant, et sont un sujet de préoccupation en matière de santé publique. Une revue narrative publiée en 2021 fait un bilan des études expérimentales menées *in vivo* et *in vitro* après des expositions aux brumes de sable asiatiques. Globalement, il ressort de ces études une implication des brumes de sable dans l'apparition voire l'exacerbation d'une inflammation pouvant conduire à des troubles cardiorespiratoires chez les souris exposées, ainsi que des altérations de la barrière alvéolo-capillaire et la formation de phagosomes. Les brumes de sable asiatiques testées sont, du point de vue granulométrique, assimilables aux PM₁₀ et PM_{2,5}, avec une composition chimique, minérale (feldspath, quartz, silice...) et microbiologique. Certains résultats consignés dans cette revue suggèrent qu'en plus de l'implication des polluants chimiques et des contaminants biologiques, les composants minéralogiques peuvent également contribuer aux troubles respiratoires observés au cours d'un événement de brumes de sable. En comparaison avec les PM_{2,5} urbaines, les réponses inflammatoires observées semblent plus importantes après des expositions à des particules fines riches en éléments microbiens (aérosols de brumes de sable asiatiques *versus* aérosols urbains) (Fussell et Kelly 2021).

Très peu de données expérimentales concernant l'impact sanitaire des brumes de sable originaires du Sahara sont publiées. La majorité des études analysées dans ce rapport ont été menées sur des particules provenant de Porto Rico, région connue pour la récurrence des

épisodes de brumes de sable capables de transporter de très grandes quantités de particules minérales depuis la région du nord-ouest de l'Afrique, du Sahara-Sahel, vers les Caraïbes et le continent américain, et contribuant au transport de particules dans la région sud de l'Europe (Garrison *et al.* 2003)

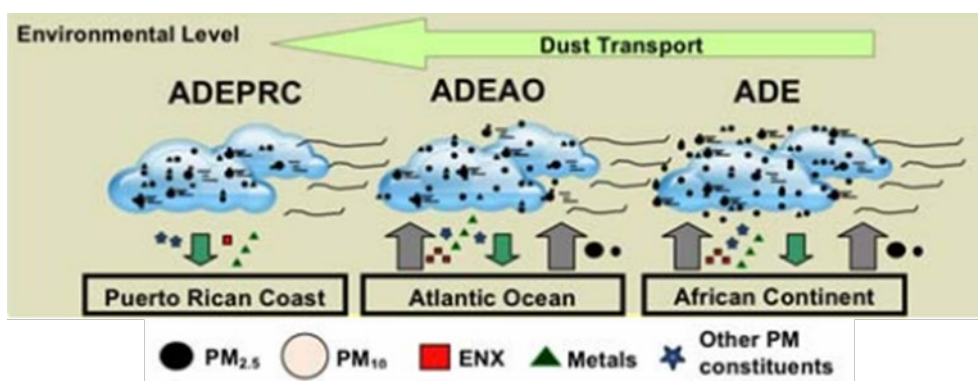
Afin d'améliorer les connaissances sur les effets sanitaires des brumes de sable, une analyse des études expérimentales, à la fois prédictives pour les études menées sur l'animal (études *in vivo*) et mécanistiques (études *in vitro*), est proposée, l'objectif étant d'évaluer les mécanismes d'action toxique pour une meilleure visibilité des risques encourus par la population générale.

Le détail des principaux résultats d'études expérimentales menées *in vitro* sur l'impact des particules de brumes de sable du Sahara sur la réponse biologique est présenté en Annexe 6.

4.2.3.1 Composition chimique, biologique et potentiel oxydant des particules de brumes de sable

Les caractéristiques physico-chimiques des particules de brumes de sable varient selon la géologie des sols, les activités présentes et passées (industries, essais nucléaires, bases militaires, conflits...) et qui pourraient déterminer la présence, plus ou moins importante, de contaminants chimiques et biologiques (voir § 3.1 sur la composition des brumes de sable). Les effets biologiques, et donc leur impact sur la santé, dépendront de ces facteurs.

En plus des particules de taille $>10\ \mu\text{m}$ et $<10\ \mu\text{m}$ l'équipe de Rodriguez-Navarro a trouvé des niveaux élevés de particules submicroniques ($<1\ \mu\text{m}$) dans les particules provenant du Sahara (Rodriguez-Navarro, Di Lorenzo, et Elert 2018). De telles particules constituent un danger potentiel pour la santé, lorsqu'elles contiennent des fibres d'attapulgites (ou palygorskites, argiles alumino-magnésiennes fibreuses) par exemple, riches en fer. Comme développé dans la partie dédiée à la composition (§ 3.1), les phénomènes de brumes de sable transportent sur des milliers de kilomètres des particules de composition complexe, car provenant de différentes régions de natures géologiques variées et suivant différentes voies de transports. Rodríguez-Cotto, Ortiz-Martínez, et Jiménez-Vélez (2015) renforcent cette observation en indiquant que les particules de brumes de sable se chargent en différents polluants chimiques et micro-organismes qui se transforment tout au long de leur transport, modifiant, entre autres, la distribution et des niveaux des PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$, d'endotoxines et d'éléments métalliques. Les variations saisonnières, les changements climatiques et les activités humaines sont autant d'éléments entrant dans la complexité des particules de brumes de sable responsables des effets pour la santé et l'environnement.



The African Dust Event (ADE) crosses the Atlantic Ocean (ADEAO) to reach the Puerto Rican coast (ADEPRC).

Figure 24. Evolution des brumes de sable au cours de leur transport

Source : adapté de Rodríguez-Cotto, Ortiz-Martínez, et Jiménez-Vélez (2015)

La présence des certains éléments métalliques (fer, zinc, nickel, vanadium, manganèse, cadmium, cobalt...) sur les particules participe à un potentiel oxydant intrinsèque à ces dernières, indicateur de leur capacité à induire un stress oxydant cellulaire et à endommager les cellules et les tissus de l'organisme.

Dans le projet SOTOX, l'Ineris a comparé le potentiel oxydant intrinsèque (PO) de différents échantillons particulaires provenant de sources différentes, par l'évaluation de leur capacité à épuiser des antioxydants physiologiques tels que l'ascorbate ou le glutathion lors de la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ROS). Des méthodes acellulaires ont été utilisées comme le test au dithiothréitol (PO^{DTT}) et à l'acide ascorbique (PO^{AA}), ainsi que l'induction de stress oxydant cellulaire sur des cellules alvéolaires humaines (A549) *via* la sonde diacétate de dichlorodihydrofluorescéine (DCF-DA) qui, après clivage par les estérases intracellulaires, sera oxydée par les ROS en un produit fluorescent, et donc quantifiable, et sur des cellules hépatiques (HepG2) *via* la métabolisation des HAP (HAP-like) (Ineris 2023).

Les résultats, présentés sur la Figure 25, donne une valeur relative intrinsèque pour chaque échantillon particulaire testé, en se référant à une valeur ramenée à 1 μg de particules afin de pouvoir comparer la toxicité des particules elles-mêmes. L'amplitude relative est représentée par la taille des bulles avec l'écart-type sur les échantillons testés. La valeur maximale (taille de bulle maximale) est assignée par défaut à 100 %. Les valeurs relatives ne sont comparables entre elles que pour un même test, soulignant la complémentarité des indicateurs et la nécessité d'en étudier plusieurs afin d'avoir une vision globale du potentiel toxique des particules. Concernant les particules sahariennes (encadré rouge), le PO mesuré est très faible quel que soit le test envisagé.

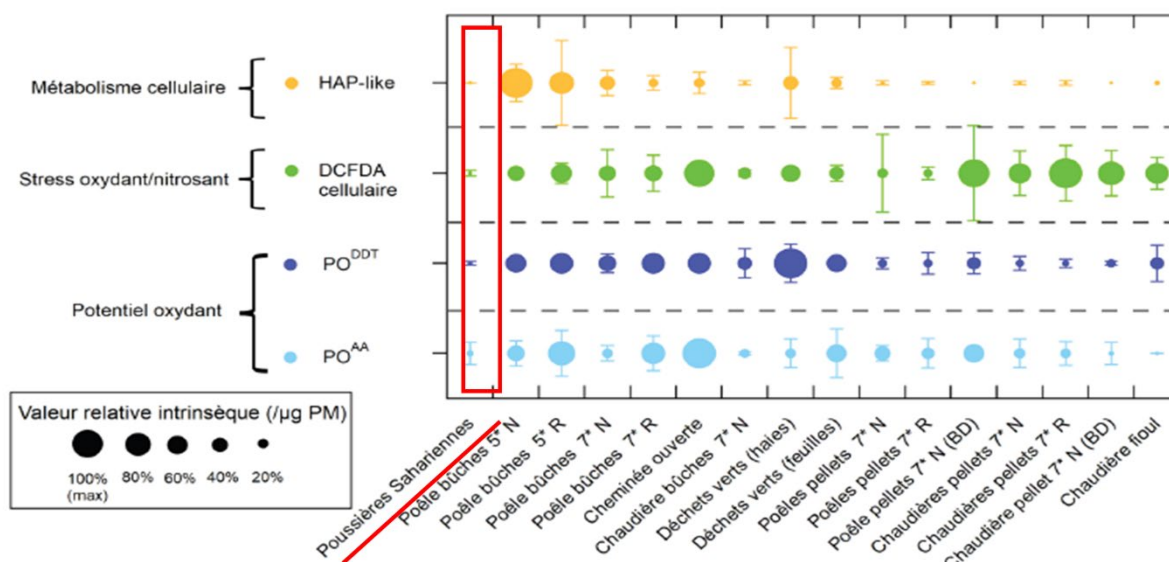


Figure 25. Evaluation comparée, à partir de différents indicateurs, de la toxicité intrinsèque des particules issues de différentes sources d'émission.

Indicateurs de toxicité : PO : potentiel oxydant, AA : acide ascorbique, DTT : dithiothréitol ; DCFDA : diacétate de dichlorodihydrofluorescéine, HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Sources de particules : Poêles/Chaudières 5* ou 7* label Flamme verte, N : allure nominale, R : allure réduite, BD : granulés (pellets) de bois dur (feuillus) par comparaison aux pellets conventionnels (bois tendre, résineux).

Source : (Ineris 2023)

Différentes études menées sur les échantillons de brumes de sable provenant du Sahara confirment ces résultats ; lors d'épisodes de brumes de sable, la concentration en particules (PM_{10} et $PM_{2,5}$) augmente, mais le potentiel oxydant n'est pas exacerbé (Chirizzi *et al.* 2017; Pietrogrande *et al.* 2018; Piacentini *et al.* 2019; Farahani *et al.* 2022). L'équipe de Pietrogrande a comparé le potentiel oxydant (PO) de particules PM_{10} suite à des événements de brumes de sable au cours de deux périodes : Automne - Hiver (AW) et Printemps - Été (SS). L'objectif était de renseigner l'influence de la saisonnalité sur le PO desdites particules. Les auteurs ont observé que les PO obtenus avec les deux tests acellulaires (PO^{DDT} , PO^{AA}) présentent des profils similaires, mais différent avec la saisonnalité. Le PO est plus élevé pour les échantillons AW, par rapport aux échantillons SS, du fait de la présence de plus de métaux liés aux véhicules, et de carbone élémentaire (EC) et organique (OC) associés aux sources de combustion. Les résultats de cette équipe indiquent également que le PO des échantillons SS est corrélé à certaines espèces chimiques liées aux particules de brumes de sable remises en suspension par la circulation automobile et/ou au transport à longue distance de brumes de sable sahariennes (nss- Mg^{2+} , nss- Ca^{2+} , nss- SO_4^{2-} , Cu, Mn, P, Pb, NH_4^+ , oxalate... sans influence de la mer pour certains éléments (nss/ : no sea salt)) (Pietrogrande *et al.* 2018). Les variations de la composition minéralogique des brumes de sable peuvent influencer certaines réponses biologiques comme la réponse inflammatoire. Il a été démontré que les brumes de sable sahariennes contiennent, entre autres, du quartz, de l'albite et du feldspath K (Rodríguez-Navarro, Di Lorenzo, et Elert 2018; Rodríguez-Cotto, Ortiz-Martínez, et Jiménez-Vélez 2015) qui peuvent déclencher la libération de cytokines par les macrophages (Grytting *et al.* 2022).

4.2.3.2 Réponses biologiques

L'évaluation du potentiel d'oxydant (PO) des particules est importante pour tenter de prédire la capacité des particules à générer des espèces réactives de l'oxygène (ROS) et/ou de l'azote (RNS) dans les systèmes biologiques, génération qui sera responsable de l'induction d'un stress oxydant. La génération d'entités radicalaires sera responsable de dommages oxydatifs au niveau membranaire, mitochondriale et de l'ADN, d'un épuisement des enzymes antioxydantes, d'une augmentation de facteurs de transcription contrôlant l'oxydoréduction et déclenchant l'expression de cytokines pro-inflammatoires par exemple. Ce déséquilibre de l'homéostasie cellulaire conduira à un changement d'état des cellules induisant des voies de signalisation associées à une réponse inflammatoire, un dysfonctionnement mitochondrial, une altération de l'ADN (génotoxicité) voire une modification (épigénétique), une mort cellulaire (apoptose, nécrose), etc.

L'équipe de Rodríguez-Cotto a proposé une représentation de cette relation entre les différents constituants des particules de brumes de sable ($PM_{2.5}$, PM_{10} , endotoxines, métaux...) et les réponses cellulaires se mettant en place suite à une exposition (Figure 26) (Rodríguez-Cotto, Ortiz-Martínez, et Jiménez-Vélez 2015).

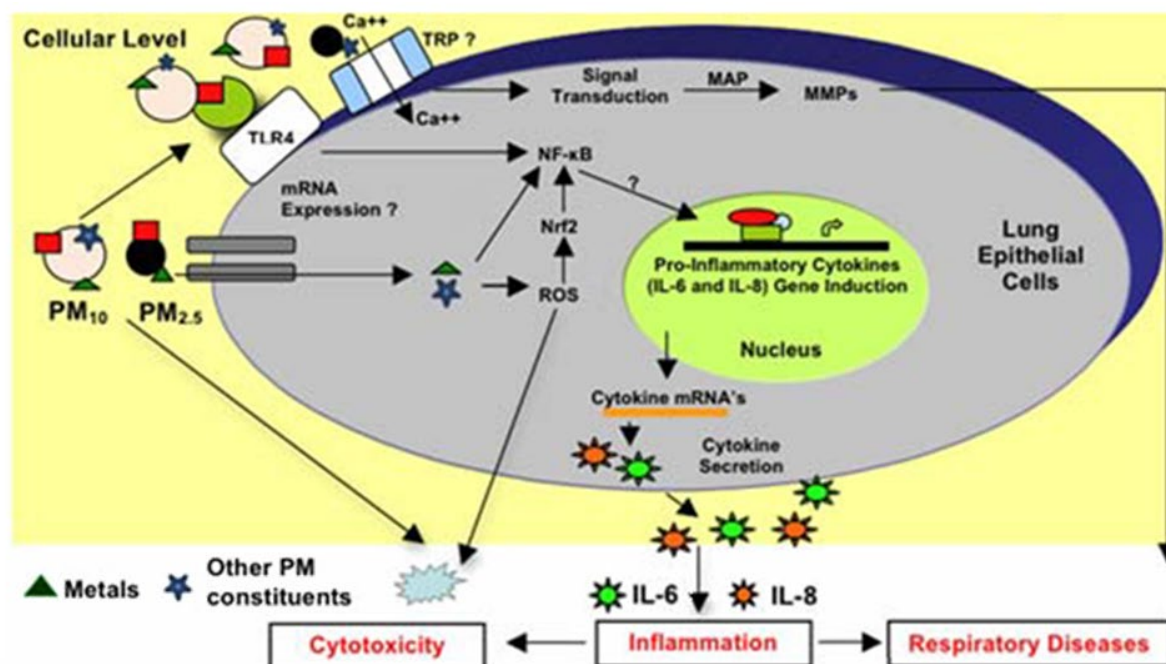


Figure 26. Relation entre les différents constituants des brumes de sable et les réponses biologiques

Source : adapté de Rodríguez-Cotto, Ortiz-Martínez, et Jiménez-Vélez (2015)

L'inflammation et le stress oxydant sont les mécanismes cellulaires et moléculaires les plus décrits dans la littérature pour expliquer les effets toxiques des particules de brumes de sable provenant du Sahara sur le tissu pulmonaire. Les études sont majoritairement menées sur des cellules épithéliales alvéolaires ou bronchiques. Notons que notre recherche bibliographique a fait apparaître un manque de données expérimentales sur des modèles non respiratoires.

L'épithélium bronchique est la première ligne de défense pulmonaire. Il agit comme une barrière physico-chimique contre les agents environnementaux grâce à sa structure cellulaire (épithélium muco-cilié), la production de mucus, les peptides antimicrobiens, les enzymes protectrices, et la réponse immune locale. Il joue ainsi un rôle crucial dans la protection des voies respiratoires contre les agents environnementaux nocifs (Parker et Prince 2011).

Les lésions inflammatoires et les dommages oxydatifs sont des mécanismes communs à toutes types de particules environnementales qui se mettent en place après des expositions et induisent des effets néfastes sur la santé. Ces réponses biologiques ont été décrites pour les particules issues des brumes de sable dans plusieurs études utilisant principalement les modèles cellulaires suivants : cellules épithéliales humaines d'origine alvéolaire A549 (Ardon-Dryer *et al.* 2020; Guascito *et al.* 2023; Bredeck, Busch, *et al.* 2023) ou bronchique BEAS-2B (M. Ortiz-Martínez *et al.* 2010; Rodríguez-Cotto *et al.* 2013; Rodríguez-Cotto, Ortiz-Martínez, et Jiménez-Vélez 2015), monocytes humains THP-1 (Bredeck, Busch, *et al.* 2023; Bredeck, Dos S. Souza, *et al.* 2024). Des modèles de coculture A549/THP1 (cellules cultivées ensemble afin d'étudier les interactions entre elles) sont également utilisés (Bredeck, Dobner, *et al.* 2023; 2024). Une étude a été menée sur des cellules du nasopharynx (Thyagarajan *et al.* 2023). Les cellules sont exposées majoritairement dans des conditions submergées (cellules cultivées et exposées dans un milieu liquide). Dans deux études, les cellules ont été exposées à l'interface air-liquide (ALI) permettant un meilleur contact entre cellules et particules de brumes de sable (la partie apicale des cellules entre en contact avec l'air pollué, la partie basale restant dans le milieu nutritif) (Bredeck, Dobner, *et al.* 2023; 2024). Les expositions à ces particules (PM₁₀ ou PM_{2,5}) de concentrations allant de 5 à 200 µg/mL pour les conditions submergées et de 3 à 200 µg/cm² pour les conditions ALI sont de courtes durées (4h et 24h). Toutes ces conditions expérimentales sont représentées sur la Figure 27 et les résultats sont rassemblés dans un tableau en Annexe 6.

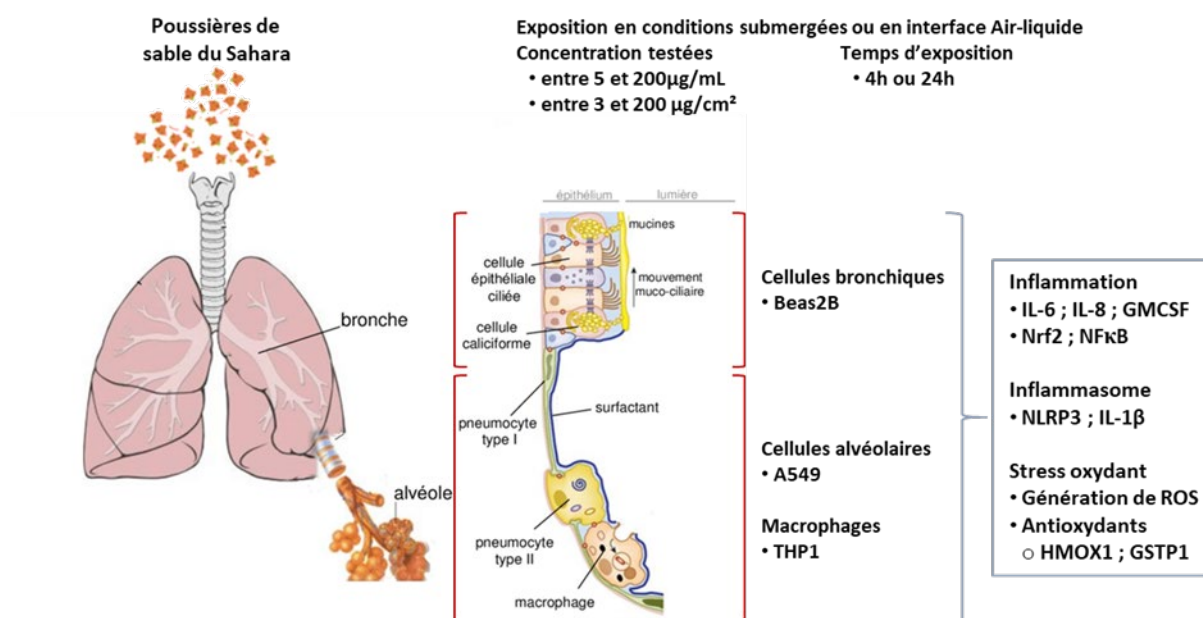


Figure 27. Schématisation des principales conditions expérimentales mises en œuvre pour évaluer la toxicité des particules de brumes de sable

4.2.3.2.1 Etudes menées sur des cellules pulmonaires

Les brumes de sable provenant du Sahara provoquent une réponse inflammatoire et activent les cellules immunitaires. Il ressort des études présentées ci-dessous que la réponse inflammatoire est fortement liée à la présence d'endotoxines sur les particules. Ainsi, Rodríguez-Cotto et ses collaborateurs ont recherché l'impact d'extraits organiques, obtenus à partir de particules de brumes de sable collectées sur deux sites [PM₁₀-AO - PM₁₀-PRC et PM_{2,5}-PRC ; AO pour *Atlantic Ocean*, PRC pour *Puerto Rican Coast*, Figure 24], sur la réponse inflammatoire de cellules épithéliales humaines d'origine bronchique (BEAS-2B) exposées durant 24 heures. Ces auteurs ont montré que la distribution des PM_{2,5} et PM₁₀ ainsi que les teneurs en endotoxines et en certains éléments métalliques étaient fortement modifiées après le transport des particules originaires d'Afrique de l'océan Atlantique (AO) à la côte de portoricaine (PRC). Ils ont ainsi montré que les PM₁₀-AO contenaient environ 5 fois plus d'endotoxines (511 EU/mg) que les PM₁₀-PRC (114 EU/mg) et que les teneurs en endotoxines étaient plus importantes pour les PM₁₀ que pour les PM_{2,5}. Les teneurs en endotoxines, hors événement de brumes de sable sont, pour les PM₁₀, de 155 EU/mg et 111 EU/mg pour respectivement les sites AO et PRC. La réponse inflammatoire semble, dans cette étude, être indépendante des niveaux d'endotoxines. Quelle que soit la provenance des brumes de sable et la taille des particules les composant, une augmentation significative de la sécrétion, mais également de l'expression génique, de l'interleukine 8 (IL-8) est observée lorsque l'on compare les expositions aux particules collectées lors d'épisodes de brumes de sable par rapport à celles collectées hors épisodes de brumes de sable. Après expositions des cellules BEAS-2B aux PM_{2,5} provenant du site PRC, une augmentation de la sécrétion de l'interleukine 6 (IL-6) a également été observée, avec toujours des niveaux supérieurs pour les jours de brumes par rapport aux jours hors brumes. La sécrétion d'IL-8 est dose-dépendante et est plus importante que celle de l'IL-6. Les endotoxines peuvent être responsables de la réponse inflammatoire due à l'activation du récepteur Toll-like-4 (TLR4) et des facteurs de transcription, comme le NF-κB, et à la libération de cytokines pro-inflammatoires (IL-6, IL-8). Dans les études de Rodríguez-Cotto, NF-κB n'est pas activé. Pour vérifier l'impact potentiel des endotoxines sur la sécrétion d'interleukines, les cellules BEAS-2B ont été pré-incubées avec un agent inhibant les endotoxines, le sulfate de polymyxine B (antibiotique polypeptidique cyclique) puis exposées aux particules de brumes de sable. Les auteurs ont observé que l'inhibition des endotoxines conduisait à une diminution significative de la sécrétion de l'IL-6, et *a contrario*, à une augmentation de l'IL-8 (Rodríguez-Cotto *et al.* 2013; Rodríguez-Cotto, Ortiz-Martínez, et Jiménez-Vélez 2015). Ces résultats confirment ceux obtenus par l'équipe de Ortiz-Martínez sur des échantillons similaires (PM₁₀ provenant des brumes de sable sahariennes (AO Atlantic Ocean) (M. Ortiz-Martínez *et al.* 2010).

D'autres essais ont été menés sur des cellules épithéliales humaines d'origine alvéolaire, représentatives des pneumocytes de Type II (cellules A549). L'équipe de Ardon-Dryer *et al.* (2020) a regardé l'impact des brumes de sable du bassin méditerranéen contenant des particules de montmorillonite, minéral composé de silicate d'aluminium et de magnésium hydraté appartenant au groupe des smectites, de la famille des phyllosilicates. Après 24h d'exposition à des concentrations comprises entre 10 et 1000 µg.mL⁻¹ les auteurs ont montré que la viabilité des cellules A549 diminuait. Si de nombreuses études montrent une mort cellulaire par nécrose (relargage de LDH, test au MTT), l'étude de Ardon-Dryer indique qu'au cours des deux premières heures de traitement, les cellules A549 « engloutissent » les particules et que ce mécanisme se poursuit jusqu'à 48h après exposition. L'analyse histologique montre que les cellules mortes ont plus de particules dans leur cytoplasme que les cellules vivantes. Les particules de montmorillonite semblent modifier le cycle cellulaire ;

le nombre de division cellulaire diminue quand la concentration intracellulaire en particules augmente. De plus, la présence de corps apoptotiques (bourgeonnement membranaire et fragmentation de l'ADN) a été observée par des observations histologiques et confirmée par l'augmentation de la protéine c-PARP (Poly(ADP-ribose) polymérase) après exposition des cellules A549 à de faibles concentration en particules (de 25 à 100 $\mu\text{g.mL}^{-1}$). Lors d'expositions à de plus fortes concentrations, la protéine c-PARP diminue au profit de la protéine HMGB1 (*High mobility group box1*), protéine constitutive de la chromatine associée à la nécrose cellulaire. Ainsi, en fonction de la concentration en particules, deux phénomènes de mort cellulaire se mettent en place (Figure 28).

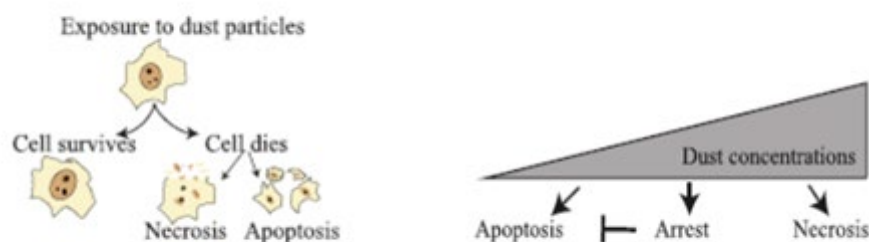


Figure 28. Relation entre la concentration en particules de montmorillonite et la mort cellulaire par apoptose ou nécrose

Source : adapté de Ardon-Dryer *et al.* (2020)

Pour confirmer ce résultat, les auteurs ont évalué le niveau d'expression des gènes de deux marqueurs de l'inflammation, IL-8 et $\text{TNF}\alpha$, par RTqPCR, 12 heures après exposition des cellules A549. L'expression d'IL-8 augmente significativement jusqu'à la concentration en particules de 50 $\mu\text{g.mL}^{-1}$ puis l'expression de ce gène est down-régulée, très certainement en lien avec apoptose. En effet, une surexpression du gène IL-8 peut déclencher certaines voies de signalisation qui régulent l'apoptose comme la voie NF- κB . Le gène $\text{TNF}\alpha$ est quant à lui surexprimé de façon dose-dépendante à partir de la concentration en particules de 50 $\mu\text{g.mL}^{-1}$. En se liant à ses récepteurs (TNFR1 et TNFR2) sur les cellules cibles, $\text{TNF}\alpha$ déclenchera une cascade de signaux menant à la mort cellulaire par nécrose (Ardon-Dryer *et al.* 2020).

L'équipe de Bredeck s'est également intéressée à l'impact des particules de brumes de sable provenant du Sahara après exposition de cellulaires alvéolaires (A549) en conditions submergées (Bredeck, Busch, *et al.* 2023). Les particules (PM_{10}), ont été collectées au Cap-Vert sur une semaine (29 décembre 2016 - 6 janvier 2017). Les appareils de prélèvement ont été installés en haut de l'*Atmospheric Observatory* (30 mètres) afin de réduire l'influence de la côte (sels marins). Les PM_{10} ont été chauffées (*baked*) ou non ($\text{PM}_{10\text{b}}$ et PM_{10} respectivement) afin d'étudier l'influence des endotoxines sur la réponse biologique. Les cellules A549 ont été exposées à des concentrations de PM_{10} allant de 3,13 à 200 $\mu\text{g.cm}^{-2}$ durant 4 h ou 24 h. Les auteurs ont introduit à leur étude une particule de quartz référente, DQ12, afin de tenter de renseigner l'origine chimique des effets toxicologiques observés. Après 24 h d'exposition, la viabilité cellulaire diminue significativement pour les plus fortes concentrations (50 et 200 $\mu\text{g.cm}^{-2}$) quel que soit le statut des PM_{10} (PM_{10} ou $\text{PM}_{10\text{b}}$). Les particules référentes DQ12 n'ont pas révélé de cytotoxicité. Une réponse inflammatoire, évaluée par la production des

interleukines 6 et 8 (IL-6, IL-8), est observée de façon transitoire car elle est augmentée significativement uniquement après 4 h d'exposition à la concentration de 50 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Pour l'IL-8, le niveau de production est supérieur après expositions aux PM₁₀ par rapport aux PM_{10b}, ce qui semble indiquer que les composants microbiens (ENX) peuvent être à l'origine de la réponse pro-inflammatoire après 4 h, supposant une dégradation après 24 h (Sharma *et al.* 2020). Les particules référentes DQ12 conduisent, quant à elles, à une augmentation de la production de l'IL-8 uniquement après 24h d'exposition. Une surexpression de l'hème oxygénase *HMOX1*, marqueur de stress oxydant, a été observée 24h après exposition aux PM₁₀ à la concentration de 50 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, avec une surexpression plus faible après exposition aux PM₁₀ non chauffées par rapport aux PM₁₀ chauffées. Aucune modulation de l'expression de *HMOX1* n'a été observée après exposition aux particules référentes DQ12.

En conduisant à une augmentation de l'expression de cytokines pro-inflammatoires et du marqueur du stress oxydant *HMOX1*, les particules déclenchent deux mécanismes principaux de toxicité dans les cellules épithéliales alvéolaires humaines, différents de ceux provoqués par les particules de quartz.

Les auteurs suggèrent que la réponse pro-inflammatoire observée après exposition aux PM₁₀, chauffées ou non, est indépendante du stress oxydant qui apparaît plus tard.

4.2.3.2.2 Etudes menées sur des cellules immunitaires

L'équipe de Bredeck s'est intéressée à l'impact des particules de brumes de sable provenant du Sahara sur des cellules macrophage-like (THP1, monocytes humains différenciés) exposées dans des conditions submergées. L'impact des particules est identifié par l'évaluation de la réponse inflammatoire et de l'inflammasome NLRP3. L'inflammasome est un complexe multiprotéique intracytoplasmique activé par des stress cellulaires. Il a une part importante dans la réponse immunitaire innée, première ligne de défense pour lutter contre les agressions extérieures. L'inflammasome déclenche des voies de signalisation pro-inflammatoires, comme l'activation de la voie NF- κ B qui permettra la transcription de NLRP3, ainsi que celle d'autres gènes codant pour des cytokines pro-inflammatoires, notamment la pro-IL-1 β puis l'IL-1 β (Figure 29) (Bredeck, Busch, *et al.* 2023; Bredeck, Dobner, *et al.* 2023; 2024; Bredeck, Dos S. Souza, *et al.* 2024).

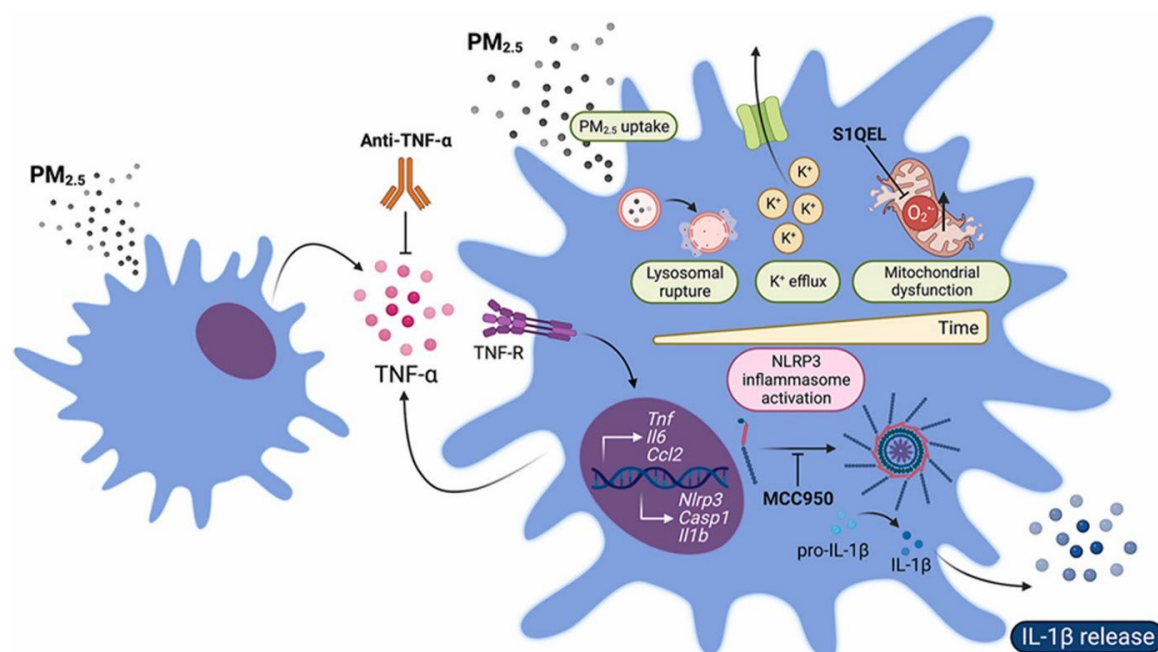


Figure 29. Représentation des voies de signalisation mises en place dans l'inflammasome NLRP3 lors d'expositions aux particules environnementales

Source : Caceres *et al.* (2024)

Afin d'évaluer l'impact des particules de brumes de sable du Sahara sur la réponse inflammatoire médiée par les cellules immunitaires, l'équipe de Bredeck a collecté des particules à l'aide d'appareils de prélèvement installés sur le toit de l'*Atmospheric Observatory* (30 mètres) afin de réduire l'influence de la côte (sels marins) (Bredeck, Busch, *et al.* 2023). Les échantillons particulaires (PM₁₀) ont été chauffés (*baked*) ou non (PM_{10b} et PM₁₀ respectivement) pour évaluer l'impact des endotoxines (ENX) présentes sur les PM. Les auteurs ont étudié plus particulièrement l'inflammasome NLRP3, en utilisant des cellules THP1 transformées, ne pouvant plus activer la voie NF-κB permettant la transcription de NLRP3 (THP1 NLRP3^{-/-}). Vingt-quatre heures après exposition aux PM, les auteurs ont confirmé l'absence de réponse inflammation pour les cellules THP-1 NLRP3^{-/-}. Une augmentation significative de la production d'IL-1β a été observée après exposition des cellules THP1, augmentation plus importante lors d'expositions aux PM₁₀, par rapport aux PM_{10b}, en lien avec la présence d'endotoxines sur les PM₁₀ (et non sur les PM_{10b}). Les particules référentes de quartz, DQ12, conduisent également à une augmentation significative de la production d'IL-1β. La capacité des PM₁₀ non chauffés à induire la libération d'IL-1β est similaire à celle des particules de quartz référentes DQ12 (Bredeck, Busch, *et al.* 2023). Ainsi, les PM₁₀ peuvent déclencher l'inflammasome NLRP3. Ce résultat confirme ceux décrits par He et ses collaborateurs montrant une augmentation des protéines NLRP3 et IL-1β dans des macrophages murins RAW264.7 exposés à des brumes de sable d'Asie (He *et al.* 2010).

Pour compléter l'implication des macrophages dans la réponse inflammatoire suite à des expositions aux brumes de sable du Sahara, Bredeck et ses collaborateurs ont mené une étude sur des particules collectées sur 4 stations au Cap Vert (Santiago, stations 1&2 ; São Vicente, stations 1&2 avec un site rural et un site urbain pour chacune des îles). Les prélèvements ont été effectués lors de deux épisodes de brumes de sable (SD1, du 10 au 13 février 2022 ; SD2, du 17 au 19 février 2022). Une période « référente », en dehors de tout événement de brumes de sable, a été considérée (26-30 janvier 2022). Deux granulométries,

PM₁₀ et PM_{2,5}, ont été considérées, et différentes analyses physicochimiques envisagées (éléments métalliques : Zn, Fe, Mg... ; ions solubles dont certains d'influence maritime : Cl⁻, Na⁺, SO₄²⁻... ; carbone total (TC), élémentaire (EC) et organique (OC) ; endotoxines (uniquement dans PM₁₀) afin d'établir une corrélation entre certaines caractéristiques physicochimiques et biologiques et la réponse inflammatoire. Les cellules THP1 ont été exposées durant 24 h à 5 µg.cm⁻² de particules et la réponse inflammatoire a été évaluée par le dosage de la production des cytokines IL-8, IL-1β et TNFα. En comparaison avec les PM collectés lors de la période de référence, tous les échantillons particulaires étudiés conduisent à une augmentation significative de la réponse inflammatoire, avec une production importante de l'IL-1β (Bredeck, Dos S. Souza, *et al.* 2024). Ces résultats confortent l'implication de l'inflammasome dans la mise en place de l'inflammation (Bredeck, Busch, *et al.* 2023). Les auteurs montrent également que certains métaux de transition, comme le fer (Fe) et le manganèse (Mn), très présents sur les particules de brumes de sable, contribuent à la libération de cytokines inflammatoires en lien avec leur pouvoir oxydant. Cette observation corrobore les conclusions de l'étude de Rodríguez-Cotto et ses collaborateurs, indiquant la relation entre métaux de transition, dont le Fe, et sécrétion de cytokines inflammatoires dans les cellules BEAS-2B après exposition à des extraits organiques de particules de brumes de sable du Sahara (Rodríguez-Cotto *et al.* 2013; Rodríguez-Cotto, Ortiz-Martínez, et Jiménez-Vélez 2015). De façon plus générale, il peut être précisé que les variations de la composition minéralogique peuvent influencer le pouvoir inflammatoire. Les brumes de sable sahariennes contiennent, entre autres, du quartz, de l'albite et du feldspath K (Rodriguez-Navarro, Di Lorenzo, et Elert 2018) responsables du déclenchement de la libération de cytokines par les macrophages THP-1 (Grytting *et al.* 2022). La caractérisation biologique des particules a révélé des teneurs en endotoxines plus importantes sur les PM₁₀ par rapport aux PM_{2,5}, et sur les échantillons collectés pendant la période de référence par rapport à ceux recueillis durant les périodes avec des épisodes de brumes de sable. Une corrélation a été établie entre les niveaux d'endotoxines retrouvés sur les PM₁₀ et le pouvoir inflammatoire évalué par la libération d'IL-1β (Bredeck, Dos S. Souza, *et al.* 2024). Cette relation confirme l'importance des endotoxines comme agents biologiques potentialisant l'inflammation pulmonaire induite par les PM. Le β-glucan microbien a été trouvé dans les brumes de sable du Sahara (M. Ortiz-Martínez *et al.* 2010) et d'Asie (He *et al.* 2010). L'ensemble des résultats obtenus au cours de cette étude, suggère que les brumes de sable transportées sur de longues distances participent à la potentialisation du pouvoir inflammatoire des particules locales, de par les teneurs en métaux de transition (Fe, Mn par exemple) et en endotoxines (Bredeck, Dos S. Souza, *et al.* 2024).

4.2.3.2.3 Etudes menées sur des co-cultures cellules alvéolaires-cellules immunitaires (A549-THP1)

Afin de compléter l'étude de 2023 (Bredeck, Dobner, *et al.* 2023), l'équipe de Bredeck s'est intéressée à l'impact des particules de brumes de sable provenant du Sahara après exposition, à l'interface air-liquide (ALI), de cellules en co-culture (A549-THP1 : cellules alvéolaires, A549 et cellules immunitaires, THP1) (Figure 30). Le protocole expérimental envisagé a deux avantages :

- La co-culture permet d'envisager les interactions entre les cellules et d'obtenir des réponses cellulaires plus physiologiques. Par exemple, la mise en co-culture des cellules A549 avec des cellules macrophages-like favorise la formation de surfactant sur la partie apicale des A549. Ce surfactant peut faciliter l'adsorption des particules et de certains éléments constitutifs des particules sur les cellules épithéliales et/ou les macrophages, et,

dans certaines conditions, permet de diminuer la cytotoxicité et l'activité pro-inflammatoire des macrophages. Enfin, les cytokines libérées par les macrophages peuvent augmenter la réponse cytokinique des cellules épithéliales. Inversement, le contact avec les cellules épithéliales façonne l'activité des macrophages ; les protéines A et C du surfactant atténuent les activations de TLR2, TLR4 et du groupe de différenciation CD14.

- L'exposition ALI permet un contact direct entre la partie apicale des cellules et les polluants rendant les conditions d'exposition plus réalistes.

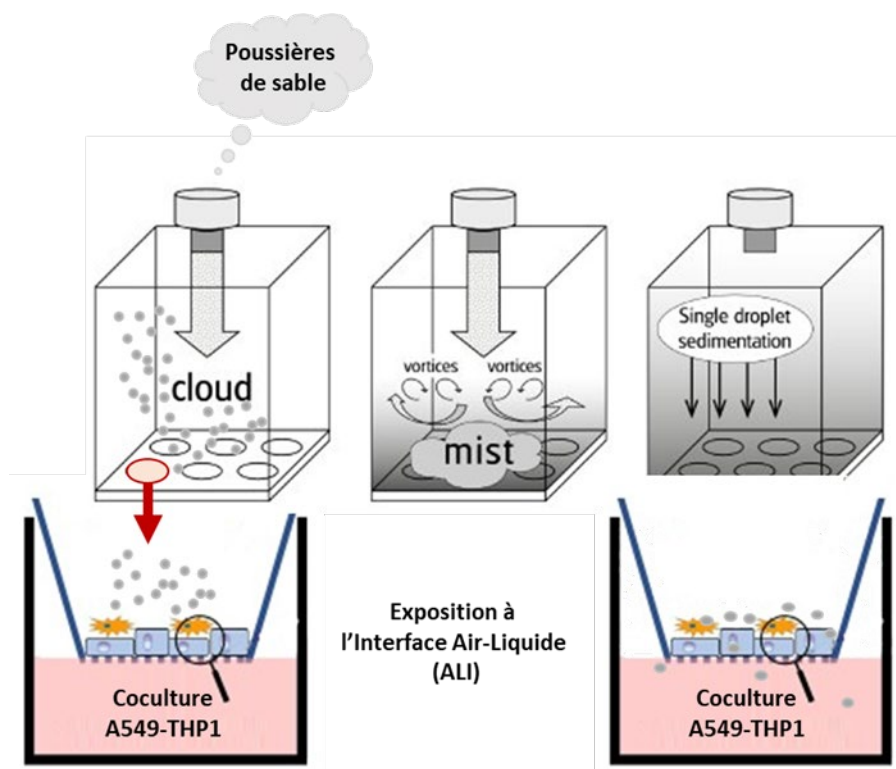


Figure 30. Représentation d'une exposition à l'interface air-liquide (Cloud12®, Vitrocell™ d'une co-culture de cellules humaines : cellules alvéolaires (A549) – cellules immunitaires (THP1)

L'originalité du travail de cette équipe réside également dans les différentes co-cultures envisagées. En effet, afin d'étudier l'implication de la voie Caspase 1 et de NLRP3, les auteurs ont transformé les cellules THP1 afin qu'elles ne puissent pas mettre en place ces voies d'activation (CASP1^{-/-} et NLRP3^{-/-} respectivement). Pour comprendre l'intérêt de ces modèles, il convient de rappeler brièvement la relation entre NLRP3 et la voie de la Caspase 1. Lorsque la cellule va détecter la présence d'agents étrangers (particules, endotoxines par exemple), le complexe multiprotéique de l'inflammasome NLRP3 va s'assembler, aidé de la pro-caspase 1 (Figure 31 : 2,3,4) qui conduira à son tour à l'activation de la caspase 1 et à la sécrétion d'interleukines inflammatoires (IL-1 β et IL-18 par exemple ; Figure 31 : 5) ou à la mort cellulaire (Figure 31 : 6). D'autres voies d'activation des inflammasomes NLRP3 et CASP1 peuvent se mettre en place, comme celles faisant intervenir les cytokines pro-IL-1 β et pro-IL-18 qui se cliveront en IL-1 β et IL-18 matures. L'IL-1 β mature induira alors d'autres cytokines telles que l'IL-6 et l'IL-8 (Jamilloux, Sève, et Henry 2014). Ainsi les co-cultures A549-THP1-CASP1^{-/-} et A549-THP1-NLRP3^{-/-} permettent d'étudier la relation entre l'inflammasome NLRP3 et la voie caspase 1 dans le déclenchement d'une réponse inflammatoire provoquée par une exposition aux particules de brumes de sable (Figure 31).

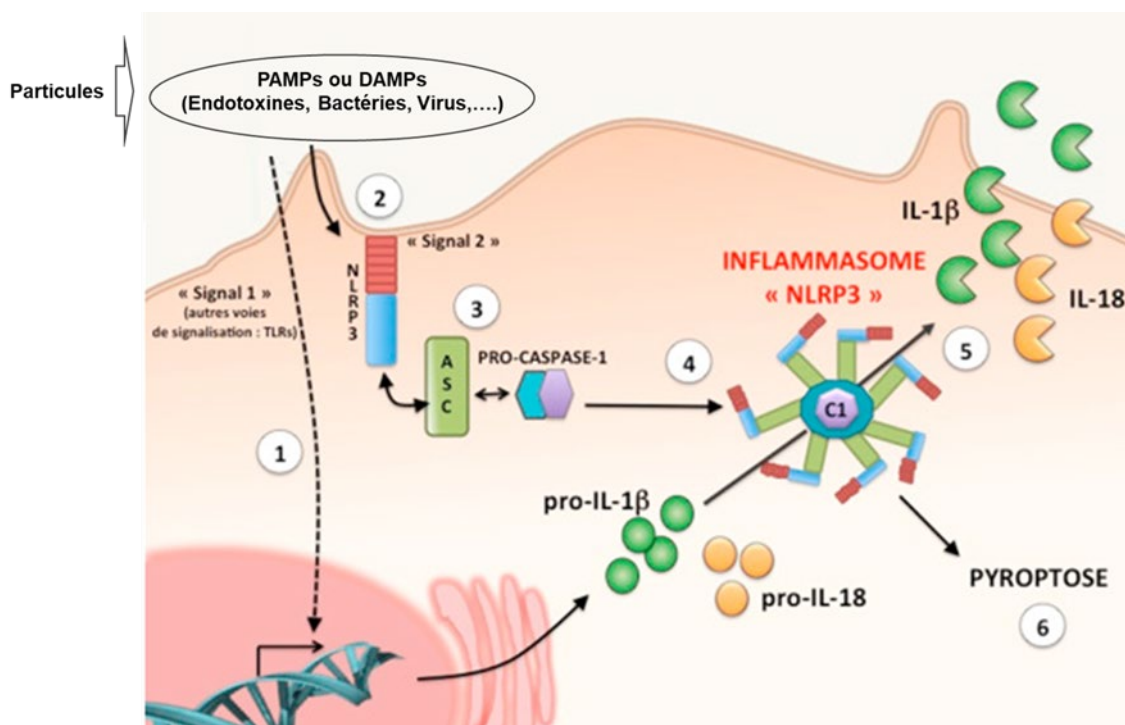


Figure 31. Structure et fonctionnement de l'inflammasome NLRP3

1/ présence de motifs microbiens (*pathogen-associated molecular patterns* [PAMP]) ou de signaux de dangers endogènes (*damage-associated molecular patterns* [DAMP]) entraînant la synthèse de pro-IL-1β (signal 1) ; 2/ activation de NLRP3 (signal 2) ; 3/ interaction avec la protéine adaptatrice ASC (*apoptosis-associated speck-like forming protein containing a CARD*) et de ASC avec la procaspase-1 ; 4/ assemblage de l'inflammasome NLRP3 dans lequel est activée la caspase-1 (C1) ; 5/ clivage des pro-cytokines IL-1β et IL-18 inactives pour obtenir IL-1β et IL-18 matures ; 6/ déclenchement de la mort inflammatoire de la cellule (pyroptose) par C1.

Source : adapté de Jamilloux, Sève, et Henry (2014)

En absence de cytotoxicité et d'induction de stress oxydant, les auteurs ont montré que dans le modèle de co-culture « *wild type* (A549-THP1 non transformés) », les particules de brumes de sable induisent significativement la production et l'expression génique des cytokines IL-1β/IL-1β, IL-6/IL-6, IL-8/IL-8 et TNFα/TNFA. La réponse inflammatoire dans ce modèle est plus importante après exposition aux particules de brumes de sable par rapport aux particules référentes de quartz, DQ12. Les résultats obtenus après exposition des co-cultures CASP1^{-/-} et NLRP3^{-/-} indiquent que l'inflammasome NLRP3-CASP-1 est essentielle pour stimuler la réponse inflammatoire suite à l'exposition aux particules de brumes de sable. En effet, l'exposition aux particules n'a pas déclenché la sécrétion d'IL-1β dans les co-cultures CASP1^{-/-} et NLRP3^{-/-}. L'augmentation de l'expression du gène IL-1β suggère que les particules induisent l'amorçage de l'inflammasome NLRP3-CASP-1. La capacité des brumes de sable à déclencher la voie inflammasome NLRP3-CASP-1 semble être en lien avec leur teneur en composants microbiens, et plus particulièrement en endotoxines. Les auteurs ont en effet montré qu'une exposition à une endotoxine de référence, les LPS (lipopolysaccharides), conduisaient à une augmentation importante de la modulation des cytokines IL-1β/IL-1β, IL-6/IL-6, IL-8/IL-8 et TNFα/TNFA dans le modèle de co-culture *wild type*, et de façon beaucoup moins importante voire nulle dans les modèles de co-cultures CASP1^{-/-} et NLRP3^{-/-}.

La dépendance de la sécrétion d'IL-1 β induite par les particules de brumes de sable sur l'inflammasome NLRP3 -CASP-1 est en accord avec les résultats d'une autre étude de Bredeck menée sur des monocultures de THP-1 *wild type versus* THP1-NLRP3^{-/-} (Bredeck, Busch, *et al.* 2023) Au-delà de la cytokine IL-1 β , une surexpression des gènes *IL-1 β* , *IL-6* et *IL-8* et une régulation négative de l'expression du gène *TNFA* ont été observées après exposition aux particules de brumes de sable des co-cultures CASP1^{-/-} et NLRP3^{-/-}. La production des cytokines IL-6 et IL-8 n'est augmentée que pour le modèle A549-THP1-NLRP3^{-/-}. Ces résultats suggèrent que les particules de brumes de sable peuvent conduire à l'assemblage du complexe « inflammasome NLRP3-CASP-1 » et déclencher la libération d'IL-1 β qui a son tour stimulera la sécrétion des cytokines pro-inflammatoires IL-6, IL-8 et TNF α . Cependant, les auteurs n'ont pas démontré de modulation de la cytokine IL-18 après expositions aux particules de brumes de sable, ni aux lipopolysaccharides (LPS), bien que cette cytokine soit dépendante de l'inflammasome NLRP3 (Bredeck, Dobner, *et al.* 2023).

En 2024, l'équipe de Bredeck, Dobner, *et al.* (2023) a exposé, dans des conditions ALI, un modèle de co-culture A549-THP1 aux particules de brumes de sable et aux particules référentes de quartz, DQ12. Ils ont recherché par séquençage les expressions différentielles de gènes, DEGs, regroupés par fonctions cellulaires comme, « *cytokine activity, cytokine-mediated signaling pathway, immune system, response to cytokine...* ». L'analyse montre une modulation significative de 147 gènes, 91 up-régulés et 56 down-régulés, après 24 h d'exposition des co-cultures aux particules de brumes de sable ; les principaux gènes up-régulés étant impliqués dans la réponse immunitaire et l'inflammation. De plus, cette analyse a révélé que les gènes GM-CSF (*Granulocyte macrophage colony-stimulating factor*) et G-CSF (*Granulocyte colony-stimulating factor*) se retrouvaient dans 61 des 74 ensembles de gènes régulés après expositions aux particules de brumes de sable. En comparaison, les particules de quartz DQ12 n'ont conduit à une expression différentielle significative que pour 55 gènes, 29 régulés à la hausse et 26 à la baisse. Les particules de brumes de sable induisant particulièrement des gènes et des ensembles de gènes liés à l'inflammation, les auteurs ont recherché, sur *microarray*, la production de 105 cytokines après exposition à la plus forte concentration de particules (30 $\mu\text{g.cm}^{-2}$) et ont observé une augmentation significative de la sécrétion de 16 cytokines dont GM-CSF (x 2,3) et G-CSF (x 1,5). Notons que le contrôle positif LPS a entraîné une augmentation d'au moins 1,5 fois de 51 cytokines. Les gènes GM-CSF et G-CSF ayant un rôle prépondérant dans l'aggravation des symptômes d'asthme et d'allergie arrivant après des événements de brumes de sable, les auteurs ont recherché à confirmer leur surexpression par RTqPCR. Ils ont montré que GM-CSF était régulé à la hausse de 7 fois par rapport au contrôle (cellules non exposées) et G-CSF de 9 fois. Dans le même temps, les auteurs ont évalué la sécrétion des deux cytokines GM-CSF et G-CSF par test ELISA (*Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay*). Ils ont observé une augmentation significative (x 2) après exposition aux particules de brumes de sable. Les particules référentes DQ12 ont conduit à une très faible surexpression et sécrétion de GM-CSF/GM-CSF ; aucune incidence sur G-CSF/G-CSF (Bredeck, Dobner, *et al.* 2024). Il est intéressant de noter que Budai, Tózsér, et Benkő (2017) ont montré que GM-CSF peut influencer la signalisation l'inflammasome NLRP3 *via* la voie IL-1 β dans les macrophages, voie de signalisation essentielle dans l'inflammation médiée par les polluants particulaires. L'équipe de Bredeck ayant montré l'induction de GM-CSF (Bredeck, Dobner, *et al.* 2024) et de l'IL-1 β (Bredeck, Dobner, *et al.* 2023) par les particules de brumes de sable, ces résultats soulignent le caractère très impactant desdites particules, s'expliquant, peut-être, par des constituants solubles, tels que des composants microbiens (endotoxines) contenus dans les particules de brumes de sable mais pas sur les particules de quartz DQ12 (Bredeck, Busch, *et al.* 2023)

4.2.3.3 Synthèse

Les brumes de sable peuvent avoir des effets toxiques sur la santé humaine, en particulier sur le système respiratoire. Elles peuvent transporter de nombreux polluants chimiques et biologiques, comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les endotoxines (issues des microorganismes), qui contribuent à leur toxicité. Les études expérimentales menées *in vitro* ont montré un faible potentiel oxydant intrinsèque des particules de brumes de sable, et donc une faible réponse cellulaire au stress oxydant. Pourtant, la présence de certains métaux de transition comme le fer dans la composition des particules de brumes de sable est largement documentée.

Les brumes de sable ont une composition minéralogique très variable, largement conditionnée par le transport, qui peut influencer la réponse inflammatoire qu'elles occasionneront en entrant en contact avec l'organisme humain. Il a été montré que les particules provenant du Sahara contiennent, entre autres, du quartz, de l'albite et du feldspath K contribuant à la libération de cytokines par les macrophages. Parmi les voies de signalisation de l'inflammation, deux sont particulièrement documentées : l'activation de l'inflammasome NLRP3-CASP1 induisant la libération de TNF- α , et la surexpression des gènes *GM-CSF* et du *G-CSF* conduisant à la libération des cytokines GM-CSF et de G-CSF impliquées dans l'aggravation des allergies et de l'asthme après une exposition aux brumes de sable. Au niveau cellulaire, le GM-CSF et le G-CSF attirent et stimulent particulièrement les éosinophiles (Kurihara *et al.* 2023) et les neutrophiles (Kim *et al.* 2020; Ouyang *et al.* 2020) qui libéreront une multitude de médiateurs intervenant dans les symptômes d'allergie.

Enfin, il est retrouvé sur les particules de brumes de sable des agents biologiques comme les endotoxines qui peuvent promouvoir un état inflammatoire des cellules, surtout chez les personnes les plus vulnérables, en activant des voies de signalisation *Toll-like receptors* (TLR). Bien que cette voie soit peu décrite, des études montrent que les endotoxines se trouvant sur les particules de brumes de sable contribuent à la cytotoxicité et l'inflammation observée après exposition. Les endotoxines en se liant à des récepteurs (CD14/TLR4) présents sur les cellules immunitaires comme les monocytes, les macrophages alvéolaires, vont déclencher la sécrétion de cytokines pro-inflammatoires, de l'oxyde nitrique et des eicosanoïdes, et initier une réponse inflammatoire pouvant avoir des implications significatives pour diverses conditions pathologiques.

La teneur en endotoxines doit être prise en compte pour l'évaluation des risques, mais elle doit être complétée par d'autres constituants microbiens autres que les endotoxines tels que les peptidoglycanes ou les lipopeptides qui activent la voie TLR.

Des résultats similaires ont été retrouvés avec des brumes de sable venant d'Asie (Fussell et Kelly 2021).

Ainsi, les brumes de sable désertiques, en interagissant avec d'autres polluants atmosphériques lors de leur transport par exemple, peuvent augmenter la réactivité des particules atmosphériques (PM₁₀, PM_{2,5}) pendant les épisodes de brumes de sable.

5 Effets des particules de brumes de sable sur l'environnement, la faune et la flore

Comme évoqué précédemment (§ 2 et § 3.1), les brumes de sable facilitent le transport de plusieurs types de particules (matières organiques ou inorganiques et microorganismes) sur des distances pouvant dépasser 5 000 km (Wang *et al.* 2017). Les particules des brumes de sable se déposent dans les milieux terrestres et aquatiques, soit par le dépôt sec (par l'action de la gravité et autres phénomènes physiques associés aux écoulements d'air), soit par le dépôt humide (par l'action de la pluie).

La littérature scientifique et les rapports institutionnels identifiés documentent différents effets de ces particules déposées sur la biodiversité, le fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques et sur les grands cycles naturels (par exemple le cycle de l'eau) et biogéochimiques (par exemple le cycle du carbone).

Ainsi, un premier rapport traitant spécifiquement des effets des brumes de sable sur les milieux marins a été réalisé en 2020 par le Programme des Nations unies pour l'environnement (UNEP 2020). Un second rapport a ensuite été publié en 2022 par la Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD 2022). Dans ce rapport, qui propose un guide pour l'évaluation et la gestion des risques posés par les brumes de sable et de poussière, les risques sur l'environnement sont brièvement mentionnés.

Cette partie synthétise les effets connus des particules de brumes de sable sur l'environnement (sols, eaux et air), la faune et la flore. Comme le montre la Figure 32, les effets sur les « écosystèmes marins » sont les plus documentés.

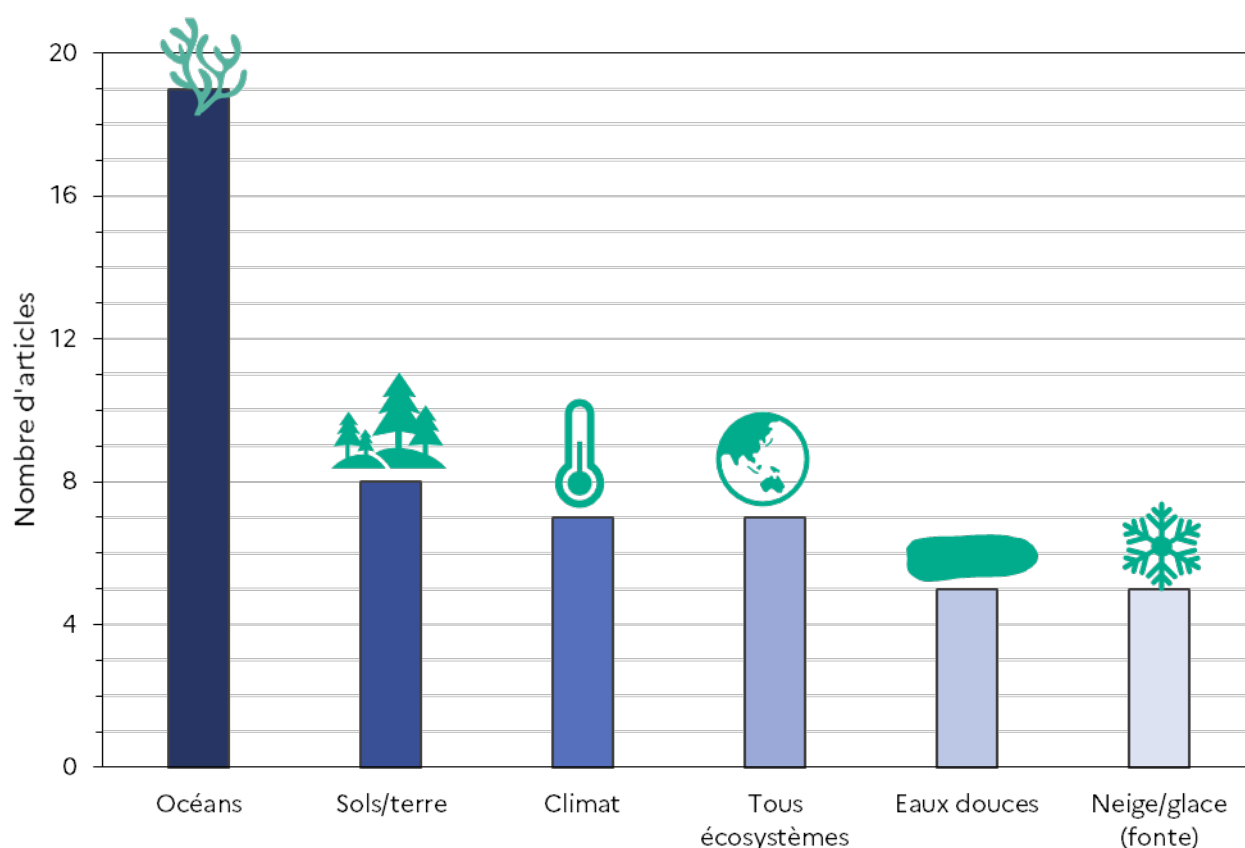


Figure 32. Nombre d'articles inclus dans ce rapport traitant des différents écosystèmes et thématiques environnementales.

Les effets sur les différents écosystèmes seront traités séparément, tout en prenant en compte les effets sur le climat global (rayonnements solaires et les cycles de la pluie, du carbone et du soufre).

5.1 Impacts sur les écosystèmes aquatiques

5.1.1 Ecosystèmes marins

Les océans reçoivent une grande partie des particules transportées par les brumes de sable. En effet, environ 25 % des 2 milliards de tonnes de sable transportées annuellement dans l'atmosphère s'y déposeraient (Shao *et al.* 2011; Jickells *et al.* 2005). Jickells *et al.* estiment que la répartition des dépôts serait la suivante : 47 % dans l'océan Atlantique (qui représente 23,5 % des surfaces océaniques), 25 % dans l'océan Indien (qui représente 19,5 % des surfaces océaniques) et 21 % dans l'océan Pacifique (qui représente 46,6 % des surfaces océaniques). Les dépôts de brumes de sable associés à des flux en provenance du Sahara seraient les plus importants au printemps, et les moins importants en automne selon une étude réalisée dans la zone Est tropicale de l'Atlantique Nord, proche de l'Afrique du Nord (Matzenbacher *et al.* 2024).

Les travaux disponibles montrent que ces particules pourraient avoir des effets sur les cycles biogéochimiques, la productivité primaire, le stockage de carbone et la sédimentation marine. En particulier, les effets sur la productivité des écosystèmes marins ont été largement étudiés.

L'accroissement de cette productivité s'expliquerait notamment par les teneurs élevées en phosphore, azote et fer, qui sont les principaux facteurs limitants de la production primaire dans ces écosystèmes (Gittings *et al.* 2024; Madhusoodhanan *et al.* 2024; Rodríguez-Arias *et al.* 2023; Li et Wang 2024; Saco *et al.* 2021; Yeager et Morris 2024). La moitié du phosphore déposé dans les océans proviendrait de l'Afrique du Nord (Griffin, Kellogg, et Shinn 2001; UNEP 2020). Contrairement à l'azote, le fer et le phosphore ne sont pas immédiatement solubles dans les eaux marines et ils ne sont donc pas biodisponibles pour les producteurs primaires. La solubilité du fer apporté par les brumes du Sahara serait favorisée par l'acidification croissante des océans qui est associée à l'augmentation des concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone (CO₂) en raison des activités humaines (Sergio Rodríguez *et al.* 2021; UNEP 2020).

Ainsi, selon plusieurs études, les substances déposées auraient des effets sur les organismes phytoplanctoniques, les coraux et les macro-algues flottantes (dont les sargasses). Ces effets seraient variables selon les espèces touchées et la composition des brumes de sable.

5.1.1.1 Impact potentiel des brumes sur le phytoplancton et les macroalgues flottantes

Le phytoplancton est composé de microalgues eucaryotes et de bactéries photosynthétiques (cyanobactéries). Il joue un rôle crucial dans les écosystèmes aquatiques en étant à la base des réseaux trophiques pélagiques¹⁹, et donc dans le cycle planétaire du carbone. La concentration océanique en chlorophylle *a* (pigment permettant la photosynthèse) est un indicateur de la biomasse du phytoplancton. Cette biomasse dépend pour partie de la disponibilité en nutriments dans l'eau, disponibilité qui peut s'accroître par les apports associés aux épisodes de brumes de sable. Plus les zones touchées par les dépôts sont pauvres en nutriments, ou limitées par un nutriment, et plus les apports de sable et de poussière pourront potentiellement favoriser la productivité du phytoplancton.

Il a par exemple été observé plusieurs épisodes de prolifération du phytoplancton en lien avec le dépôt de brumes du désert du Sahara dans le nord du Golfe Persique et la mer Méditerranée (Madhusoodhanan *et al.* 2024; Kotta et Kitsiou 2019; Boudriga *et al.* 2024). Le même phénomène est signalé à l'ouest de l'océan Pacifique en lien avec le dépôt de brumes provenant du désert de Gobi (Li et Wang 2024). De petits organismes phytoplanctoniques, entre 2 et 20 µm (nanophytoplanctoniques), réagiraient en à peine quelques heures à ces apports de nutriments (Boudriga *et al.* 2024). De plus, ces apports semblent augmenter la résistance des organismes phytoplanctoniques à des stress environnementaux tels que la température et le pH (González-Olalla, Powell, et Brahney 2024).

Dans plus, il a été également observé que les brumes de sables pourraient conduire à une diminution de la biomasse phytoplanctonique en Méditerranée et dans l'Atlantique (Cabrerizo *et al.* 2022). L'inhibition de la croissance phytoplanctonique pourrait résulter (i) du dépôt, par les brumes de sables, d'éléments traces métalliques, en particulier de cuivre, en concentrations toxiques pour le phytoplancton (Paytan *et al.* 2009) et/ou (ii) d'un impact négatif sur la production primaire des effets synergiques de l'augmentation de l'exposition aux rayons UV du phytoplancton et des concentrations en phosphore suite aux dépôts de brumes de sable (Carrillo *et al.* 2015). Les travaux de Carrillo *et al.* (2024) ont également montré que la combinaison des dépôts de brumes de sable sahariennes et d'un haut niveau de rayons UV pourrait conduire à une altération des flux de carbone entre le phytoplancton et les bactéries hétérotrophes et finalement nuire à la productivité de ces deux communautés. Madhusoodhanan *et al.* (2024) observent également que les apports des brumes de sable

¹⁹ L'ensemble de chaînes alimentaires reliées entre elles au sein des milieux aquatiques de pleine eau

dans le Golfe Arabique modifient la structure des communautés phytoplanctoniques ainsi que les rapports stœchiométriques entre l'azote et le fer.

L'augmentation de la production primaire décrite dans certains travaux peut sembler, en théorie, bénéfique à l'ensemble de l'écosystème, en raison de l'augmentation de la productivité totale de l'écosystème qui en résulte. Cela pourrait par exemple conduire à une augmentation de la biomasse des poissons (UNCCD 2022). Cependant, il a été observé dans certaines conditions, que les apports en nutriments favoriseraient le développement d'espèces qui vont constituer une nuisance pour l'environnement et/ou pour les humains. Par exemple, une étude a montré l'existence d'une corrélation positive entre les concentrations de sable du Sahara et celles des algues sargasses dans les Caraïbes orientales entre 2010 et 2022 (Hernández Ayala et Méndez-Tejeda 2024).

Il est important de préciser que les sargasses flottantes forment un écosystème naturel (nommé mer des Sargasses, dans l'Atlantique Nord), avec une importante biodiversité et productivité (Wang *et al.* 2019). Ces auteurs ont montré une augmentation de la densité et de la distribution spatiale de ces sargasses depuis 2011. Ces modifications, dont l'origine est multifactorielle, induisent des échouages de grandes quantités de sargasses au niveau des littoraux de la mer des Caraïbes, du Golfe du Mexique et de l'Afrique de l'Ouest. Ces échouages, comme celles des macroalgues vertes en Bretagne (Ulves), sont à l'origine de la production d'hydrogène sulfuré et sont néfastes sur la santé humaine et sur plusieurs écosystèmes marins (Pachouri *et al.*, 2025; Rodriguez-Martinez *et al.*, 2025).

Les apports en nutriments par les brumes de sable pourraient également potentiellement conduire à des proliférations d'organismes phytoplanctoniques toxiques comme la microalgue *Karenia brevis* et les cyanobactéries du genre *Trichodesmium* et constituer ainsi un danger pour la santé humaine (UNEP 2020; Rodríguez-Arias *et al.* 2023).

Tous ces processus pourraient donc avoir des effets sur la biodiversité, la productivité et le fonctionnement des zones touchées par les brumes de sable, sans qu'il ne soit possible, d'après les données disponibles, de les décrire avec précision.

5.1.1.2 Impact potentiel des brumes de sable sur les coraux

Les brumes de sable désertiques seraient une source importante de circulation de chaleur, de sel et de nutriments, qui sont des facteurs importants pour la croissance des coraux (UNEP 2020). Par exemple, Amorim *et al.* (2024) ont étudié les effets des épisodes de brumes de sable sur les coraux constructeurs de récifs sous stress thermique. Ils ont observé que les particules déposées comprenaient des métaux importants pour la croissance des coraux, comme le lithium, le magnésium, le fer, le manganèse et le molybdène. Ces métaux augmenteraient l'efficacité de la photosynthèse des coraux (réalisée par des dinoflagellés endosymbiotiques de la famille des Symbiodiniaceae, en particulier le genre *Stylophora*), notamment lorsqu'ils sont exposés à de hautes températures. Les auteurs de cette étude concluent que le mélange de métaux essentiels apporté par les brumes de sable augmenterait la résistance des coraux au blanchissement en lien avec l'augmentation des températures des eaux marines (Amorim *et al.* 2024).

Toutefois, les apports par les brumes de sable pourraient aussi impacter négativement la santé corallienne. Certaines substances qui s'y trouvent semblent être toxiques pour les coraux, et augmenteraient ainsi le risque de mortalité (Wang *et al.* 2017). Selon une étude réalisée dans les Caraïbes, de forts taux de dépôt de brumes de sable seraient associés à des périodes de mortalité corallienne élevée (UNEP 2020). Parmi les mécanismes potentiellement associés à ces mortalités, il a été observé que les brumes de sable peuvent contenir des agents

pathogènes responsables de maladies des coraux comme la peste blanche et l'aspergillose. C'est ainsi que le champignon *Aspergillus sydowii*, responsable de l'aspergillose, a été retrouvé dans des échantillons de brumes de sable sahariennes déposées dans les Caraïbes. Par ailleurs, ce type de dépôt semble également impliqué dans une autre maladie corallienne, la maladie des bandes noires (*black band disease* en anglais) dans les Caraïbes. Le fer apporté par les brumes de sable stimulerait le développement d'un biofilm toxique sur les coraux et la création de microzones anoxiques associées au développement de la maladie (voir par exemple Garrison *et al.* 2003).

Un autre risque associé à ce phénomène de dépôts sur les coraux est l'étouffement ou l'incorporation directe de ces derniers dans leur squelette lors de leur croissance. Bien que certains polypes²⁰ puissent éliminer ces particules, cela se ferait au détriment de leur croissance et leur reproduction (UNEP 2020).

En conclusion, il a été montré que les brumes de sable peuvent avoir des effets positifs sur la productivité de certains écosystèmes marins et la résistance aux stress de certains organismes, en particulier chez les coraux tropicaux. Cependant, dans le même temps, des effets négatifs des dépôts de brumes de sable ont été décrits, à l'exemple d'une productivité excessive de micro ou macroalgues nuisibles, de déséquilibres entre production primaire et respiration bactérienne, ou encore à travers l'apport de substances toxiques ou de microorganismes pathogènes. Les potentiels impacts des brumes de sable sur le climat sont discutés dans la section 5.2.1.

5.1.2 Ecosystèmes d'eaux douces

Les particules des brumes de sable peuvent se déposer directement à la surface des plans d'eau ou être apportées depuis leurs bassins versants par les cours d'eau et le ruissellement. Des études traitant les effets directs des brumes de sable du Sahara sur des lacs de haute altitude ont identifié des effets importants sur ces écosystèmes. Il a été montré que, par exemple, dans certaines conditions de températures, les apports des brumes de sable peuvent avoir un impact important sur les relations entre bactéries hétérotrophes et microorganismes photosynthétiques dans des lacs d'altitude dans la Sierra Nevada en Espagne (Vila Duplá *et al.* 2024). Par ailleurs, Castellano-Hinojosa *et al.* (2024), qui s'intéressent aux sédiments de ces mêmes lacs, ont observé que les dépôts en provenance du Sahara constituent un apport important en nutriments dans ces sédiments, avec un impact sur la composition des communautés de procaryotes²¹ associées à ces sédiments et en conséquence, sur les cycles du carbone et l'azote dans ces lacs.

Les brumes des sables peuvent par ailleurs contenir des quantités importantes de chlorure de sodium (NaCl) associées à des particules qui peuvent se déposer dans les lacs directement sous forme de dépôts secs, ou sous forme dissoute dans la pluie (dépôts humides). La salinité des eaux de surface pourrait donc être affectée par le dépôt des particules des brumes de sable. De plus, du chlorure de sodium a également été détecté dans les eaux douces souterraines après des épisodes de brumes (N. J. Middleton 2017; Rodríguez-Arias *et al.* 2023).

Enfin, la température des eaux de surface des lacs pourrait aussi être impactée par les brumes de sable. Par exemple, il a été observé une augmentation de la température de l'eau dans le

²⁰ Le polype est un individu sessile (organisme vivant attaché à un substrat) formant une colonie corallienne

²¹ Organismes unicellulaires sans noyau : bactéries et archées

lac Kinneret (Israël), en relation avec les apports de brumes de sable sahariennes (Kishcha, Lechinsky, et Starobinets 2023).

5.2 Impacts sur les écosystèmes terrestres

Comme pour les milieux aquatiques, les brumes de sable provenant du Sahara peuvent contribuer à la fertilisation des sols dans différentes régions du monde, notamment dans le nord de l'Europe, le Caucase en Russie, les îles caribéennes, les Andes et certaines forêts tropicales (N. J. Middleton 2017; Opp *et al.* 2021; Rodríguez-Arias *et al.* 2023). Par exemple, il a été estimé que le bassin amazonien recevait chaque année environ 8 millions de tonnes de sable provenant d'Afrique du Nord (Kok *et al.* 2021). Ces apports en nutriments permettraient de lever, dans certains cas, la limitation de la croissance des végétaux par le phosphore ou le fer.

Il a également été montré que les particules déposées pourraient changer la nature des sols, comme cela a été observé dans les îles Canaries et le Mont Cameroun (N. J. Middleton 2017). Comme évoqué précédemment, les brumes de sable peuvent par exemple contenir du NaCl et contribuer ainsi à la salinisation des sols (N. J. Middleton 2017; Rodríguez-Arias *et al.* 2023). Ce phénomène serait particulièrement important dans la zone de la mer Aral et il impacterait négativement la productivité végétale des terres avoisinantes (Rodríguez-Arias *et al.* 2023). Les effets de cette salinisation seraient différents selon les espèces exposées (Najafi Zilaie, Mosleh Arani, et Etesami 2023).

Les brumes de sable pourraient également transporter des métaux lourds, champignons, maladies, protozoaires et bactéries, pouvant avoir des effets toxiques dans les environnements où elles se déposent (Yazdani *et al.* 2024; Soleimani *et al.* 2020; Rodríguez-Arias *et al.* 2023 ; Núñez, Moreno, et García 2024). A titre d'exemple, 23 souches bactériennes cultivables ont été isolées à partir d'échantillons de dépôts de brumes de sable sahariennes aux îles Canaries. Certaines de ces souches sont phylogénétiquement proches de bactéries pathogènes des humains, des végétaux et des animaux (Navarro *et al.* 2024).

D'autres effets négatifs liés aux caractéristiques physiques des particules ont été évoqués par Opp *et al.* (2021) : les particules rugueuses peuvent abraser les végétaux sensibles, et les plus petites particules pourraient bloquer les stomates de certains végétaux et ainsi affecter les échanges gazeux. De plus, ces particules pourraient augmenter la température des feuilles en absorbant plus de chaleur et en limitant l'évapotranspiration²². Elles réduiraient aussi la photosynthèse en bloquant les rayonnements directs à la surface des feuilles, ou pourraient même, à de très fortes concentrations, provoquer un enfouissement des plantes (UNCCD 2022).

En conclusion, les brumes de sable peuvent avoir des effets bénéfiques et délétères sur les sols et les plantes, avec des impacts potentiels sur le rendement de cultures très importantes pour l'alimentation humaine et animale à l'exemple du blé et du riz (UNCCD 2022; N. J. Middleton 2017; Rodríguez-Arias *et al.* 2023).

Bien qu'il y ait peu d'études s'intéressant aux effets des brumes de sable sur les animaux, il a été démontré qu'elles peuvent avoir également un impact négatif sur le bétail en rendant difficile l'accès à la nourriture enfouie, en provoquant des phénomènes de panique et de fuite chez les animaux, ou encore en augmentant le taux de mortalité par la suffocation lors

²² Processus permettant de transférer de la chaleur de la feuille vers l'air ambiant à travers l'évaporation de l'eau, et ainsi réguler sa température

d'épisodes extrêmes (UNCCD 2022). C'est ainsi qu'en Chine, 120 000 et 110 000 animaux auraient perdu la vie durant des épisodes de brumes des sables en 1993 et 1998 respectivement (UNCCD 2022).

5.2.1 Hydrologie et climat

5.2.1.1 Impact sur la fonte de la neige et de la glace

La neige a un albédo²³ élevé, pouvant atteindre une valeur proche de 0,9 (Gardner et Sharp 2010). Cela signifie qu'environ 90 % des rayonnements solaires sont réfléchies à la surface de la neige. Cependant, si des particules se déposent à la surface de la neige (ou de la glace), l'albédo diminue, ce qui provoque une augmentation de l'énergie solaire absorbée par la neige et en conséquence, une fonte de cette dernière. Ce phénomène a été observé dans les Alpes, où la saison de couverture des sols par la neige était réduite de presque 20 % après un important épisode de dépôt de brumes du Sahara en 2015-2016, et de 9 % et 5 % après des épisodes moins importants en 2013-2014 et 2014-2015, respectivement (Di Mauro *et al.* 2019).

Des observations similaires ont été faites ailleurs dans le monde. En Colombie, la réduction de l'albédo associée au dépôt des brumes du Sahara était estimée entre 21 et 39 % pour trois glaciers lors d'une étude réalisée entre 2000-2020 (Bolaño-Ortiz *et al.* 2023), alors qu'en Chine, l'albédo des montagnes Tien Shan, Kunlun et Qilian était réduit de 0,03 à 0,15 après un dépôt de brumes du désert du Taklamakan (Xing *et al.* 2024). Au Canada, la surface glacée du Lac Hazen aurait atteint la température de fonte huit jours plus tôt que les années précédentes suite à un épisode de brumes de sable majeur en 2014 (St Louis *et al.* 2024) et dans le massif de Wasatch (Utah, États-Unis), la fonte de la neige aurait été accélérée d'environ cinq jours suite à un apport de brumes du Great Salt Lake (Skiles *et al.* 2018). Ces modifications dans la dynamique de la fonte des neiges peuvent avoir des répercussions sur l'hydrologie dans ces environnements.

Par ailleurs, après des épisodes de brumes de sable, certains éléments se retrouvent dans la neige à des concentrations jusqu'à 3 700 fois supérieures à celles des périodes sans dépôts. Par exemple, des éléments tels que l'aluminium, le manganèse, le titane, le plomb, le calcium, le cuivre, le fer et le potassium ont été retrouvés dans la neige après un épisode de brumes du Sahara dans les Alpes et dans les Monts Jizera en Pologne (Di Mauro *et al.* 2019; Szuszkiewicz *et al.* 2023). Après la fonte, ces éléments peuvent ruisseler jusqu'aux lacs (notamment de haute altitude) et autres milieux aquatiques, avec des impacts potentiels sur la biodiversité et le fonctionnement de ces écosystèmes (St Louis *et al.* 2024). Ces effets peuvent être variables, en fonction de la concentration et de la toxicité de chacun de ces métaux et de leurs cocktails.

5.2.1.2 Impacts sur les rayonnements

Les aérosols (particules solides, liquides ou en solutions suspendues dans l'air) peuvent engendrer des changements dans le taux d'absorption et de réémission des rayonnements. Ce phénomène a notamment été observé en présence des aérosols des brumes de sable (Filonchyk *et al.* 2024; Adriana Rocha-Lima *et al.* 2018; Rodríguez-Arias *et al.* 2023; UNCCD 2022). Les longues ondes seraient absorbées alors que les ondes courtes seraient plutôt

²³ L'albédo est le pouvoir réfléchissant d'une surface, exprimé en fraction des rayonnements réfléchies variant de 0 (absorption totale/corps noir) à 1 (réflexion totale), donc sans dimension

diffusées (Wang *et al.* 2017). L'effet net global a été estimé comme étant négatif : les aérosols réduiraient la part des rayonnements absorbés par les surfaces, et donc leur température (F. Wang *et al.* 2017; Rodríguez-Arias *et al.* 2023; UNCCD 2022). La réduction de température de surface marine a aussi été observée lors d'un épisode de brumes de sable sur la mer d'Arabie (Budakoti, Singh, et Choudhury 2023). Ce refroidissement pourrait impacter la circulation atmosphérique, avec des impacts potentiels sur le climat et sur les tempêtes tropicales (UNCCD 2022).

5.2.1.3 Effets sur les cycles du carbone et du soufre

Les apports de nutriments par les brumes de sable peuvent augmenter la productivité des organismes photosynthétiques (phytoplanctons), qui absorbent du CO₂ lors de la photosynthèse, et de l'ensemble des organismes, qui émettent du CO₂ lors de la respiration. Le bilan du cycle du carbone (puits ou source de CO₂) va donc dépendre de l'équilibre entre les deux types de processus (photosynthèse versus respiration). Une étude réalisée dans les eaux méditerranéennes a montré qu'un faible apport de brumes de sable conduit à favoriser la fixation du CO₂ alors que des apports élevés vont plutôt se traduire par une émission de CO₂ dans l'atmosphère (UNEP 2020).

Les océans peuvent également agir comme un puits de carbone quand les organismes photosynthétiques, notamment les coccolithophores²⁴, coulent vers les eaux profondes en entraînant le carbone fixé en surface. Les brumes du Sahara peuvent favoriser ce processus de deux manières : 1) les nutriments contenus dans les brumes de sable peuvent augmenter la productivité de ces organismes et donc l'absorption de CO₂, et 2) les éléments minéraux présents dans les brumes de sable peuvent augmenter la masse et la vitesse de chute des particules qui sédimentent vers les eaux profondes (Matzenbacher *et al.* 2024). Ainsi, la capacité de stockage de CO₂ augmenterait durant les épisodes de brumes du Sahara, comme cela a été observé dans l'Atlantique Tropical du Nord (Guerreiro *et al.* 2024).

Le soufre est un nutriment essentiel pour les organismes vivants. Il participe au métabolisme primaire des cellules et à la synthèse de molécules biologiquement actives. Le développement rapide de certains organismes phytoplanctoniques marins conduit à la production de diméthylsulfure (DMS), dont la concentration augmente dans l'atmosphère. Ce composé, avec d'autres gaz soufrés, réduirait le Fe III en Fe II contenus dans les particules de brumes de sable, rendant ce fer plus facilement biodisponible pour le phytoplancton. Ce cycle entraîne une rétroaction positive du couplage mutuel entre le fer et le soufre. De plus, le DMS produit des noyaux de condensation dans la troposphère marine, augmentant l'albédo des nuages de basse-altitude, ayant ainsi un effet rafraîchissant sur l'atmosphère.

5.2.2 Effets sur la pluviométrie

Les aérosols (particules en suspension), notamment ceux amenés par les brumes de sable, peuvent aussi agir comme noyau de condensation de vapeur d'eau. Selon un rapport publié en 1989 sur la formation de nuages en présence d'aérosols (non-spécifique aux brumes de sable), les gouttelettes formées autour d'un noyau d'aérosol auraient une plus faible teneur en eau et un plus petit diamètre, réduisant l'efficacité des précipitations et prolongeant le cycle de vie des nuages, connu comme l'effet « Albrecht » (Albrecht 1989; Wang *et al.* 2017). Toutefois, une autre étude portant sur les tempêtes de sable et de poussière sur la mer d'Aral démontre

²⁴ Algue unicellulaire faisant partie des phytoplanctons, ayant un squelette en carbonate de calcium

que les aérosols contenant une grande quantité de matière soluble, notamment du sel, augmenteraient la taille des gouttelettes, et, en conséquence, l'intensité des précipitations (Rudich, Khersonsky, et Rosenfeld 2002).

Selon l'étude de Wang *et al.* (2024), portant également sur les aérosols des brumes de sable, les deux effets seraient possibles, mais dépendraient du cycle jour/nuit et des différentes couches atmosphériques. Durant le jour, la taille des gouttelettes de pluie, et donc la masse de précipitations seraient réduites par les aérosols des brumes de sable : ils augmenteraient la stabilité atmosphérique en chauffant les couches supérieures et refroidissant les couches inférieures, diminuant ainsi les effets de convection atmosphérique. À l'inverse, la nuit, les précipitations seraient intensifiées par ces aérosols : l'instabilité atmosphérique est augmentée, ainsi que la taille des gouttelettes formées. Ces pluies intenses inverseraient la température des couches de l'atmosphère (refroidissement des couches hautes et réchauffement des couches basses), donnant lieu à plus de convection. Les petites gouttelettes s'élèveraient alors vers de plus hautes altitudes et se transformeraient en glaçon. Selon les auteurs, bien que cette étude porte sur le nord et sud de la Chine, celle-ci serait pertinente pour d'autres parties du monde affectées par les brumes de sable (Wang *et al.* 2024).

6 Conclusions du groupe de travail

▪ Composition des particules de brumes de sable

Les données analysées ne permettent pas de définir une composition chimique ou microbiologique, ni une granulométrie « types » des particules des brumes de sable, en raison :

- d'une part, des limites méthodologiques des études : absence de protocole standardisé de mesure et de caractérisation d'un épisode de brumes de sable (approche multi-outils, dépassement d'un seuil de concentration, modélisation, etc.), différences entre les éléments recherchés et les techniques analytiques,
- d'autre part, de l'influence de nombreux facteurs tels que la zone géographique source des brumes, le transport (altitude, distance, voie de transport...), les conditions météorologiques, la formation d'aérosols secondaires par réactions chimiques entre les éléments composant les brumes de sable et/ou avec les éléments déjà présents dans l'atmosphère, etc.

De manière macroscopique, les brumes de sable sont majoritairement composées des éléments Si, Al, Fe, Ca, Mg, K et Na. Les espèces minéralogiques principales identifiées sont le quartz, l'illite et la kaolinite.

Bien que peu nombreuses, des études sur la composition microbiologique montraient une tendance à l'augmentation générale des bactéries et champignons les jours de brumes de sable. Par conséquent, la viabilité de certains micro-organismes, principalement d'importance environnementale (dont les humains ne sont pas les hôtes principaux), peut être préservée lors du transport des brumes.

Pendant les épisodes de brumes de sable, une augmentation des concentrations en éléments radioactifs, tels que le ^{137}Cs ou le ^{40}K , a été observée, liée à l'augmentation de la concentration des particules dans l'air. Ces radionucléides sont détectés à l'état de traces et ne présentent pas de risque pour la santé humaine. Aucune source spécifique de ces radionucléides n'a pu être mise en évidence parmi les retombées atmosphériques globales de l'ensemble des essais nucléaires ou des accidents nucléaires majeurs.

▪ Influence des brumes de sable sur les concentrations en particules dans l'air ambiant

Les épisodes de brumes de sable contribuent à une augmentation de la concentration en PM_{10} dans l'air ambiant et peuvent représenter plus de la moitié de cette concentration lors d'épisodes intenses.

En raison d'un manque de données, il n'est pas possible de conclure sur l'impact des brumes de sable sur les concentrations des autres fractions granulométriques ($\text{PM}_{2,5}$, PM_1 , PUF).

Lorsque les épisodes de brumes de sable sont associés à certaines conditions atmosphériques telles qu'un abaissement de la hauteur de la couche limite atmosphérique, l'accumulation des polluants locaux est favorisée.

▪ Effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé humaine

En préambule, le CES rappelle que les effets des particules (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$) sur la santé sont reconnus depuis de nombreuses années (Anses 2019 ; 2024). L'exposition à ces particules affecte particulièrement la santé respiratoire, la santé cardiovasculaire et la mortalité toutes

causes (non-accidentelle). La pollution atmosphérique et les matières particulaires contenues dans la pollution atmosphérique sont classées depuis 2013 comme cancérogènes pour l'homme par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC). Les populations sensibles et vulnérables à ces expositions sont les individus présentant des affections chroniques telles que l'asthme, la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO), le diabète, l'insuffisance cardiaque et les pathologies cardiaques ischémiques, ainsi que les enfants, les femmes enceintes et les personnes âgées de plus de 65 ans (Anses 2024b; WHO 2021).

- Études épidémiologiques

Les études épidémiologiques portant sur les effets des brumes de sable réalisées en Europe, aux Caraïbes et en Afrique du Nord étaient peu nombreuses par rapport à celles menées dans d'autres régions du monde, notamment en Asie. Les événements de santé les plus étudiés étaient la mortalité toutes causes non-accidentelle, la mortalité cardiovasculaire et la mortalité respiratoire et les fractions granulométriques les plus étudiées sont les PM₁₀ et les PM_{2,5-10}. Pour tous ces événements de santé et quelle que soit la fraction granulométrique, les résultats disponibles ne permettaient pas de conclure à un effet différent des particules les jours de brumes de sable par rapport à celles des jours sans brumes de sable (Annexe 1).

- Études toxicologiques

Très peu de données toxicologiques étaient disponibles pour les brumes de sable sahariennes et les publications pertinentes portaient essentiellement sur des modèles cellulaires in vitro de l'arbre respiratoire et sur des mécanismes pro-inflammatoires.

Les particules issues des brumes de sable ont révélé un faible potentiel oxydant intrinsèque, suggérant un faible stress oxydant cellulaire (en dépit de la présence de métaux de transition, tels que le fer). Elles peuvent avoir des effets toxiques sur les cellules de l'arbre respiratoire, par exemple en augmentant la réponse pro-inflammatoire, selon leurs compositions chimique (ex : Fe, Al...), minéralogique (ex : quartz, albite et feldspath K) et biologique (ex : endotoxines).

Le corpus de données ne permettait pas de comparer les effets toxicologiques des particules habituellement présentes dans l'air ambiant aux effets des particules de brumes de sable.

- Effets des brumes de sable sur l'environnement, la faune et la flore

Peu de travaux étaient disponibles pour documenter les effets des brumes de sable sur l'environnement, la faune et la flore. La synthèse des effets connus des brumes de sable sur l'environnement est présentée en Figure 2. Cette figure résume les principaux milieux et écosystèmes potentiellement affectés par les brumes de sable, et les phénomènes associés qui ont été documentés. Dans l'air, les aérosols des brumes de sable pourraient disperser les rayonnements solaires et ainsi réduire la température des surfaces. Ils pourraient également agir comme noyau de condensation des gouttelettes de pluie, et donc avoir un effet sur la pluviométrie. Ces particules, composées de matières organiques et inorganiques, se déposent sur les eaux (marines et douces) et les sols, ce qui pourrait favoriser la productivité de ces écosystèmes en levant certaines limites (par exemple par le phosphore et/ou le fer) ou, au contraire, la défavoriser lorsque des contaminants sont apportés en trop grandes quantités (par exemple : certains éléments traces métalliques, du chlorure de sodium ou des pathogènes). Le cycle du carbone pourrait aussi être affecté à travers des changements en

émission (organismes non-photosynthétiques) et absorption (organismes photosynthétiques) du CO₂. Le dépôt de particules des brumes de sable sur la neige ou des lacs gelés en altitude diminue l'albédo de surface, pouvant en accélérer la fonte. Selon le PNUE, il est important de reconnaître les risques, mais aussi les bienfaits des brumes de sable sur les écosystèmes (UNEP 2020).

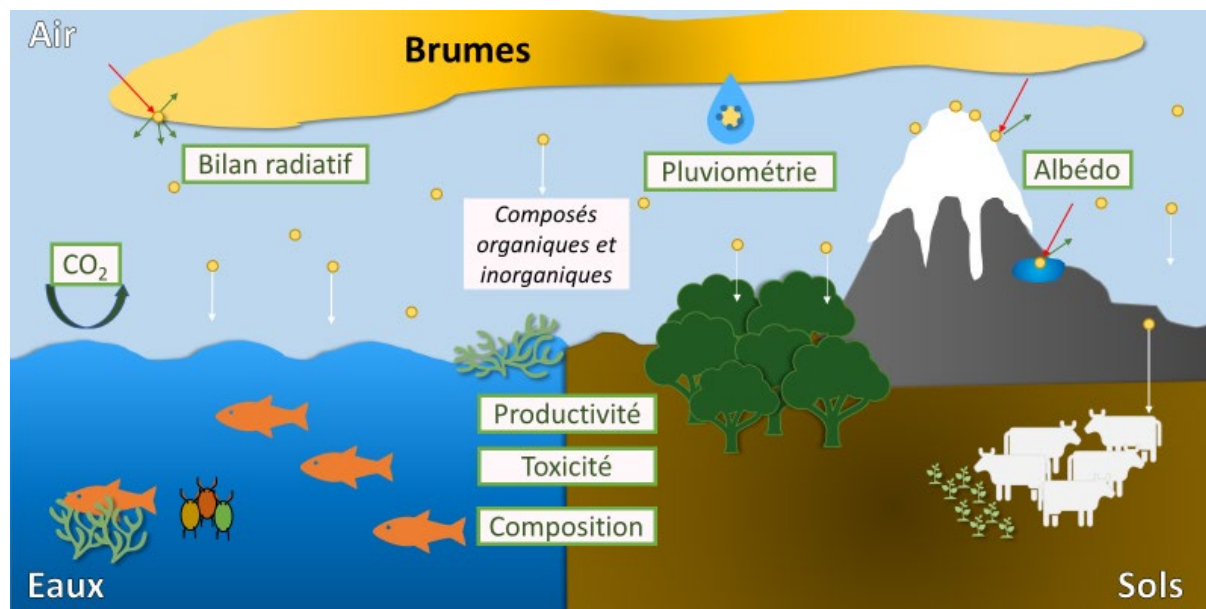


Figure 33. Schéma représentatif des milieux où se déposent les brumes de sable, et les principaux phénomènes impactés par leurs apports.

Les résultats disponibles sur la question spécifique des algues sargasses suggèrent que les brumes de sable favoriseraient leur développement. Toutefois, il existe d'autres facteurs connus facilitant leur prolifération, et les brumes n'expliqueraient donc pas à elles seules ce phénomène. Parmi les études recensées, aucune n'a permis de documenter les conséquences potentielles d'une contamination chimique (contaminants organiques et inorganiques, notamment les métaux lourds) des masses d'eaux par les brumes de sable sur les réseaux trophiques²⁵.

²⁵ Un réseau trophique se réfère à l'ensemble des liens trophiques, et donc à la circulation de biomasse et d'énergie, existant au sein d'un écosystème.

7 Recommandations du groupe de travail

- Gestion des épisodes de brumes de sable

Le CES rappelle l'importance de renforcer les politiques publiques et environnementales d'amélioration de la qualité de l'air afin de mieux protéger la population des effets sanitaires de la pollution atmosphérique. Il rappelle que les modalités actuelles de gestion nationale des pics de pollution intègrent déjà des mesures s'appliquant en cas d'épisodes de brumes de sable, ces dernières étant comptabilisées dans les PM₁₀. Les données actuelles ne permettent pas de proposer des mesures de gestion différentes lors des pics de pollution dus à des épisodes de brumes de sable. Néanmoins, le CES souligne que, même si les brumes de sable sont un phénomène naturel, il est d'autant plus nécessaire de réduire les émissions anthropiques lors de ces épisodes afin de réduire la concentration particulaire totale et donc l'exposition de la population.

Dans ses lignes directrices relatives à la qualité de l'air publiées en 2021, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande des mesures de gestion à court terme sous la forme de recommandations de bonnes pratiques ont été formulées et sont rappelées en Annexe 2 (WHO 2021).

Par ailleurs, le CES alerte sur la prise en compte des pics de pollution aux PM_{2,5} dans les mesures de gestion nationales issues de la nouvelle réglementation européenne relative à l'air ambiant²⁶. En effet, les brumes de sable pourraient participer aux dépassements des futures valeurs réglementaires relatives aux PM_{2,5}.

Le CES souligne également qu'en raison du changement climatique, des modifications dans les schémas de circulation atmosphérique pourraient impacter la saisonnalité des épisodes de brumes de sable, en augmentant l'intensité et la fréquence d'épisodes hivernaux originaires du Sahara (Copernicus 2024).

En raison du manque de données mis en avant dans le cadre de cette expertise, le CES émet des recommandations de recherche.

- Recommandations en matière de recherche

Concernant la caractérisation physico-chimique et microbiologique des brumes de sable, le CES recommande :

- De poursuivre les travaux de recherche en documentant la composition chimique et microbiologique, ainsi que la granulométrie des particules, à la source des brumes de sable comme après leur transport, afin de mieux comprendre les processus pouvant impacter la composition de ces dernières et leur interaction avec les polluants anthropiques de leur zone de dépôt.

Pour l'étude des effets sanitaires des brumes de sable, le CES recommande :

- De mener des études épidémiologiques sur les effets des expositions aux brumes de sable originaires d'Afrique du Nord sur la santé humaine, pour des territoires plus ou moins éloignés de la source des brumes comme l'Europe et les Caraïbes ;

²⁶ (Directive (UE) 2024/2881 du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2024 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe (refonte) 2024)

- D'analyser la toxicité des particules issues des brumes de sable sur des cibles cellulaires autres que celles présentes dans l'appareil respiratoire. Il serait également pertinent d'étudier l'influence de la composition chimique, minéralogique et biologique des particules de brumes de sable, et de leur morphologie, sur différentes voies de signalisation (réponses inflammatoires, inflammasome), en considérant des échantillons prélevés les jours avec et les jours sans brumes de sable.

Pour réaliser ces études, le CES recommande :

- Une harmonisation des méthodes afin d'assurer une comparabilité des résultats :
 - Harmoniser l'évaluation de l'exposition aux brumes de sable en favorisant une approche multi-outils (données de concentration en particules des stations de mesure, modélisation, observations satellitaires...) ;
 - Standardiser les protocoles des études épidémiologiques en favorisant un modèle d'exposition continue, c'est-à-dire qui utilise des niveaux de PM en continu. Les estimations d'association avec les niveaux de PM en continu les jours de brumes devraient être comparés aux estimations des associations avec les niveaux de PM en continu les jours sans brumes. Ce type de modèle est plus précis dans le cas où l'évaluation de l'exposition est de qualité.
- De ne pas s'intéresser uniquement aux PM₁₀, mais également à d'autres fractions granulométriques (de tailles plus petites et plus grandes), qui peuvent avoir une composition différente et donc des effets différents sur la santé humaine ou sur l'environnement.
- D'étudier les facteurs modificateurs de l'effet des brumes de sable sur la santé, notamment les conditions météorologiques.
- D'étudier l'influence des brumes de sable sur les concentrations des polluants déjà présents dans l'air ambiant et leurs possibles interactions.

Concernant les effets sur l'environnement, la faune et la flore, le CES recommande de s'intéresser particulièrement aux sujets suivants :

- Algues sargasses, en étudiant les effets des brumes de sable sur les proliférations d'algues sargasses et la contribution relative, dans ces proliférations, des apports liés aux brumes de sable et de ceux provenant d'autres sources (détergents ménagers ou industriels, agriculture...) ;
- Contaminants chimiques, en étudiant les contaminations chimiques des sols et des masses d'eau par les brumes de sable et leurs conséquences sur les réseaux trophiques ;
- Paramètres environnementaux (par exemple rayonnement UV, température et pH), en étudiant l'influence de ces paramètres sur les réponses des écosystèmes aux apports des brumes de sable ;
- Temporalité des effets des brumes de sable, en améliorant les connaissances sur les délais entre les apports et les effets observés, la durée de ces effets et

leur dynamique à court, moyen ou long terme, afin de mettre en place des mesures de protection ou de restauration adaptées.

Par ailleurs, le CES appuie les recommandations suivantes formulées par le PNUE (UNEP 2020) :

- Etudier les effets indirects des brumes de sable sur la santé humaine, c'est-à-dire les effets des brumes de sable sur l'environnement pouvant ensuite affecter la santé humaine (ex. les algues sargasses et les émissions d'H₂S) ;
- Développer des modèles du cycle des poussières en lien avec les modèles climatiques ;
- Estimer les pertes économiques liées aux perturbations environnementales pour appuyer la prise de décision (ex. les algues sargasses échouées peuvent affecter les économies côtières : tourisme, pêche...).

8 Bibliographie

Abrego, Nerea, Brendan Furneaux, Bess Hardwick, Panu Somervuo, Isabella Palorinne, Carlos A. Aguilar-Trigueros, Nigel R. Andrew, et al. 2024. « Airborne DNA Reveals Predictable Spatial and Seasonal Dynamics of Fungi ». *Nature* 631 (8022): 835-42. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07658-9>.

Achilleos, Souzana, John S. Evans, Panayiotis K. Yiallourous, Savvas Kleanthous, Joel Schwartz, et Petros Koutrakis. 2014a. « PM10 Concentration Levels at an Urban and Background Site in Cyprus: The Impact of Urban Sources and Dust Storms. » *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995) 64 (12): 1352-60. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.923061>.

———. 2014b. « PM10 Concentration Levels at an Urban and Background Site in Cyprus: The Impact of Urban Sources and Dust Storms. » *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995) 64 (12): 1352-60. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.923061>.

Aghababaeian, H., A. Ostadtaghizadeh, A. Ardalani, A. Asgary, M. Akbary, M.S. Yekaninejad, et C. Stephens. 2021. « Global Health Impacts of Dust Storms: A Systematic Review ». *Environmental Health Insights* 15. <https://doi.org/10.1177/11786302211018390>.

Agier, L., A. Deroubaix, N. Martiny, P. Yaka, A. Djibo, et H. Broutin. 2013. « Seasonality of Meningitis in Africa and Climate Forcing: Aerosols Stand Out ». *Journal of The Royal Society Interface* 10 (79): 20120814. <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0814>.

Agier, Lydiane, Nadège Martiny, Oumy Thiongane, Judith E. Mueller, Juliette Paireau, Eleanor R. Watkins, Tom J. Irving, Thibaut Koutangni, et Hélène Broutin. 2017. « Towards Understanding the Epidemiology of Neisseria Meningitidis in the African Meningitis Belt: A Multi-Disciplinary Overview ». *International Journal of Infectious Diseases* 54 (janvier):103-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2016.10.032>.

Akpınar-Elci, Muge, Francis E. Martin, Joshua G. Behr, et Rafael Diaz. 2015. « Saharan Dust, Climate Variability, and Asthma in Grenada, the Caribbean ». *International Journal of Biometeorology* 59 (11): 1667-71. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-0973-2>.

Alastuey, A., X. Querol, S. Castillo, M. Escudero, A. Avila, E. Cuevas, C. Torres, et al. 2005. « Characterisation of TSP and PM2.5 at Izaña and Sta. Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain) during a Saharan Dust Episode (July 2002) ». *Atmospheric Environment* 39 (26): 4715-28. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.018>.

Albrecht, Bruce A. 1989. « Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness ». *Science* 245 (4923): 1227-30. <https://doi.org/10.1126/science.245.4923.1227>.

Alessandrini, Ester Rita, Massimo Stafoggia, Annunziata Faustini, Gian Paolo Gobbi, et Francesco Forastiere. 2013. « Saharan Dust and the Association between Particulate Matter and Daily Hospitalisations in Rome, Italy ». *Occupational and Environmental Medicine* 70 (6): 432-34. <https://doi.org/10.1136/oemed-2012-101182>.

Amann, R I, W Ludwig, et K H Schleifer. 1995. « Phylogenetic Identification and in Situ Detection of Individual Microbial Cells without Cultivation ». *Microbiological Reviews* 59 (1): 143-69. <https://doi.org/10.1128/mr.59.1.143-169.1995>.

Amorim, Katherine, R. Grover, D. Omanović, L. Sauzéat, M. I. Marcus Do Noscimiento, Maoz Fine, et Christine Ferrier-Pagès. 2024. « Desert Dust Improves the Photophysiology of Heat-

- Stressed Corals beyond Iron. » *Scientific Reports* 14 (1): 26509. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77381-y>.
- Anses. 2014. « Etat des connaissances sur l'impact sanitaire lié à l'exposition de la population générale aux pollens présents dans l'air ambiant ». Maisons-Alfort: Anses. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2011sa0151Ra.pdf>.
- . 2016. « Facteurs de risques professionnels éventuellement en lien avec la surmortalité des égoutiers ». Maisons-Alfort: Anses.
- . 2019. « Rapport de l'Anses relatif aux particules de l'air ambiant extérieur : effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie (saisine 2014-SA-0156) ». Maisons-Alfort (France): Anses. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2014SA0156Ra-Sante.pdf>.
- . 2024a. « Expertise en vue de la fixation de valeurs limites d'exposition à des agents chimiques en milieu professionnel. Évaluation des effets sur la santé sur le lieu de travail pour les endotoxines ». Maisons-Alfort: Anses. <https://www.anses.fr/fr/system/files/VSR2012SA0075RA.pdf>.
- . 2024b. « Valeurs toxicologiques de référence. Les particules de l'air ambiant extérieur ». Maisons-Alfort: Anses. https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2019SA0198RA-2_0.pdf.
- Ardon-Dryer, Karin, Caroline Mock, Jose Reyes, et Galit Lahav. 2020. « The Effect of Dust Storm Particles on Single Human Lung Cancer Cells ». *Environmental Research* 181 (février):108891. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108891>.
- Arrêté du 7 avril 2016 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant. 2016. JORF. Vol. 0084. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000032376671/>.
- Arrêté du 26 août 2016 modifiant l'arrêté du 7 avril 2016 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant. 2016. JORF. Vol. 0199. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000033069766>.
- Asubiojo, O.I., I.B. Obioh, E.A. Oluyemi, A.F. Oluwole, N.M. Spyrou, A.S. Farooqi, W. Arshed, et O.A. Akanle. 1993. « Elemental Characterization of Airborne Particulates at Two Nigerian Locations during the Harmattan Season ». *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles* 167 (2): 283-93. <https://doi.org/10.1007/BF02037187>.
- Augusto, Sofia, Nuno Ratola, Patricia Tarín-Carrasco, Pedro Jiménez-Guerrero, Marco Turco, Marta Schuhmacher, Solange Costa, J.P. Teixeira, et Carla Costa. 2020. « Population Exposure to Particulate-Matter and Related Mortality Due to the Portuguese Wildfires in October 2017 Driven by Storm Ophelia ». *Environment International* 144 (novembre):106056. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106056>.
- Aweda, F.O., O.A. Falaiye, et J.A. Oyewole. 2021. « UV/VIS Characterization and FT-IR Analysis of Harmattan Dust across Sub-Sahara Region of Africa ». *Jordan Journal of Physics* 14 (1): 1-17. <https://doi.org/10.47011/14.1.1>.
- Aweda, F.O., O.A. Falaiye, et T.K. Samson. 2023. « Heavy Metal Concentration in Harmattan Dust across Selected Stations in Nigeria ». *Jordan Journal of Physics* 16 (4): 413-22. <https://doi.org/10.47011/16.4.4>.
- Baethge, Christopher, Sandra Goldbeck-Wood, et Stephan Mertens. 2019. « SANRA-a Scale for the Quality Assessment of Narrative Review Articles ». *Research Integrity and Peer Review* 4:5. <https://doi.org/10.1186/s41073-019-0064-8>.

- Bergh, Øivind, Knut Yngve Børsheim, Gunnar Bratbak, et Mikal Heldal. 1989. « High Abundance of Viruses Found in Aquatic Environments ». *Nature* 340 (6233): 467-68. <https://doi.org/10.1038/340467a0>.
- Besancenot, J.P., M. Boko, et P.C. Oke. 1997. « Weather conditions and cerebrospinal meningitis in Benin (gulf of Guinea, West Africa) ». *European Journal of Epidemiology* 13 (7): 807-15. <https://doi.org/10.1023/A:1007365919013>.
- Bessagnet, Bertrand, Laurent Menut, Gilles Aymoz, Hélène Chepfer, et Robert Vautard. 2008. « Modeling Dust Emissions and Transport within Europe: The Ukraine March 2007 Event ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113 (D15). <https://doi.org/10.1029/2007JD009541>.
- Birmili, W., K. Schepanski, A. Ansmann, G. Spindler, I. Tegen, B. Wehner, A. Nowak, et al. 2008. « A Case of Extreme Particulate Matter Concentrations over Central Europe Caused by Dust Emitted over the Southern Ukraine ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 8 (4): 997-1016. <https://doi.org/10.5194/acp-8-997-2008>.
- Bolaño-Ortiz, Tomás R., Viverlys L. Díaz-Gutiérrez, Andrés M. Vélez-Pereira, Eliana L. Vergara-Vásquez, et Yiniva Camargo-Caicedo. 2023. « Snow Albedo Reduction in the Colombian Andes Mountains Due to 2000 to 2020 Saharan Dust Intrusions Events ». *Water* 15 (17): 3150. <https://doi.org/10.3390/w15173150>.
- Boudriga, I., C. Poindron, Y. Khammeri, A.B. Zouari, V. Rossi, M. Thyssen, K. Desboeufs, et M. Bel Hassen. 2024. « Impact of Atmospheric Deposition on the Dynamics of Ultraphytoplanktonic Populations in the Gulf of Gabès during an Intense Dust Event (MERITE-HIPPOCAMPE Campaign) ». *Marine Pollution Bulletin* 200. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116059>.
- Bozlaker, A., J.M. Prospero, J. Price, et S. Chellam. 2018. « Linking Barbados Mineral Dust Aerosols to North African Sources Using Elemental Composition and Radiogenic Sr, Nd, and Pb Isotope Signatures ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123 (2): 1384-1400. <https://doi.org/10.1002/2017JD027505>.
- Bredeck, Gerrit, Mathias Busch, Andrea Rossi, Burkhard Stahlmecke, Khanneh Wadinga Fomba, Hartmut Herrmann, et Roel P.F. Schins. 2023. « Inhalable Saharan Dust Induces Oxidative Stress, NLRP3 Inflammasome Activation, and Inflammatory Cytokine Release ». *Environment International* 172 (février):107732. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107732>.
- Bredeck, Gerrit, Jochen Dobner, Andrea Rossi, et Roel P. F. Schins. 2024. « Saharan Dust Induces the Lung Disease-Related Cytokines Granulocyte-Macrophage Colony-Stimulating Factor and Granulocyte Colony-Stimulating Factor ». *Environment International* 186 (avril):108580. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108580>.
- Bredeck, Gerrit, Jochen Dobner, Burkhard Stahlmecke, Khanneh Wadinga Fomba, Hartmut Herrmann, Andrea Rossi, et Roel P. F. Schins. 2023. « Saharan Dust Induces NLRP3-Dependent Inflammatory Cytokines in an Alveolar Air-Liquid Interface Co-Culture Model ». *Particle and Fibre Toxicology* 20 (1): 39. <https://doi.org/10.1186/s12989-023-00550-w>.
- Bredeck, Gerrit, Eduardo J. Dos S. Souza, Claudia Wigmann, Khanneh Wadinga Fomba, Hartmut Herrmann, et Roel P.F. Schins. 2024. « The Influence of Long-Range Transported Saharan Dust on the Inflammatory Potency of Ambient PM_{2.5} and PM₁₀ ». *Environmental Research* 252 (juillet):119008. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119008>.
- Budai, Marietta Margit, József Tózsér, et Szilvia Benkő. 2017. « Different Dynamics of NLRP3 Inflammasome-Mediated IL-1 β Production in GM-CSF- and M-CSF-Differentiated Human

Macrophages ». *Journal of Leukocyte Biology* 101 (6): 1335-47. <https://doi.org/10.1189/jlb.3A0716-300RR>.

Budakoti, S., C. Singh, et A. Choudhury. 2023. « Transport of a Severe Dust Storm from Middle East to Indian Region and Its Impact on Surrounding Environment ». *International Journal of Environmental Science and Technology* 20 (9): 10345-66. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04520-1>.

Buters, Jeroen T.M., Michel Thibaudon, Matt Smith, Roy Kennedy, Auli Rantio-Lehtimäki, Roberto Albertini, Gerald Reese, et al. 2012. « Release of Bet v 1 from Birch Pollen from 5 European Countries. Results from the HIALINE Study ». *Atmospheric Environment* 55 (août):496-505. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.054>.

Cabrerizo, Marco J., Juan Manuel Medina-Sánchez, Juan Manuel González-Olalla, Daniel Sánchez-Gómez, et Presentación Carrillo. 2022. « Microbial plankton responses to multiple environmental drivers in marine ecosystems with different phosphorus limitation degrees ». *Science of The Total Environment* 816 (avril):151491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151491>.

Caceres, Lourdes, Tijani Abogunloko, Sara Malchow, Fabienne Ehret, Julian Merz, Xiaowei Li, Lucia Sol Mitre, et al. 2024. « Molecular Mechanisms Underlying NLRP3 Inflammasome Activation and IL-1 β Production in Air Pollution Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) - Primed Macrophages ». *Environmental Pollution* 341 (janvier):122997. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122997>.

Cadelis, Gilbert, Rachel Tourres, et Jack Molinie. 2014. « Short-Term Effects of the Particulate Pollutants Contained in Saharan Dust on the Visits of Children to the Emergency Department Due to Asthmatic Conditions in Guadeloupe (French Archipelago of the Caribbean) ». Édité par Aimin Chen. *PLoS ONE* 9 (3): e91136. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091136>.

Carrillo, Presentación, Juan Manuel González-Olalla, Marco J Cabrerizo, Manuel Villar-Argaiz, et Juan Manuel Medina-Sánchez. 2024. « Uneven Response of Phytoplankton-Bacteria Coupling under Saharan Dust Pulse and Ultraviolet Radiation in the South-Western Mediterranean Sea. » *The Science of the Total Environment* 927 (juin):172220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172220>.

Carrillo, Presentación, Juan M. Medina-Sánchez, Guillermo Herrera, Cristina Durán, María Segovia, Dolores Cortés, Soluna Salles, Nathalie Korbee, Félix L. Figueroa, et Jesús M. Mercado. 2015. « Interactive Effect of UVR and Phosphorus on the Coastal Phytoplankton Community of the Western Mediterranean Sea: Unravelling Eco-Physiological Mechanisms ». *PLOS ONE* 10 (11): e0142987. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142987>.

Castellano-Hinojosa, Antonio, Germán Tortosa, Alejandra Fernández-Zambrano, David Correa-Galeote, Eulogio J. Bedmar, et Juan M. Medina-Sánchez. 2024. « Strong Saharan Dust Deposition Events Alter Microbial Diversity and Composition in Sediments of High-Mountain Lakes of Sierra Nevada (Spain). » *Microbial Ecology* 87 (1): 99. <https://doi.org/10.1007/s00248-024-02416-w>.

Chirizzi, Daniela, Daniela Cesari, Maria Rachele Guascito, Adelaide Dinoi, Livia Giotta, Antonio Donateo, et Daniele Contini. 2017. « Influence of Saharan Dust Outbreaks and Carbon Content on Oxidative Potential of Water-Soluble Fractions of PM_{2.5} and PM₁₀ ». *Atmospheric Environment* 163 (août):1-8. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.021>.

Chou, C., P. Formenti, M. Maille, P. Ausset, G. Helas, M. Harrison, et S. Osborne. 2008. « Size Distribution, Shape, and Composition of Mineral Dust Aerosols Collected during the African Monsoon Multidisciplinary Analysis Special Observation Period 0: Dust and Biomass-Burning

Experiment Field Campaign in Niger, January 2006 ». *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 113 (23). <https://doi.org/10.1029/2008JD009897>.

Chuvochina, Maria S., Dominique Marie, Servanne Chevaillier, Jean-Robert Petit, Philippe Normand, Irina A. Alekhina, et Sergey A. Bulat. 2011. « Community Variability of Bacteria in Alpine Snow (Mont Blanc) Containing Saharan Dust Deposition and Their Snow Colonisation Potential ». *Microbes and Environments* 26 (3): 237-47. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME11116>.

CNULCD. 2023. « La fréquence des tempêtes de sable et de poussière augmente dans de nombreuses régions du monde, avertit l'ONU ». Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. 14 novembre 2023. <https://www.unccd.int/fr/news-stories/press-releases/sand-and-dust-storm-frequency-increasing-many-world-regions-un-warns>.

Conte, M., E. Merico, D. Cesari, A. Dinoi, F.M. Grasso, A. Donato, M.R. Guascito, et D. Contini. 2020. « Long-Term Characterisation of African Dust Advection in South-Eastern Italy: Influence on Fine and Coarse Particle Concentrations, Size Distributions, and Carbon Content ». *Atmospheric Research* 233. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104690>.

Copernicus. 2022. « What is desert dust and how does it change atmosphere and the air we breathe? » Copernicus. 10 mai 2022. <https://atmosphere.copernicus.eu/what-saharan-dust-and-how-does-it-change-atmosphere-and-air-we-breathe>.

———. 2024. « Repeated Saharan dust intrusions raise questions about increasing frequency ». Copernicus. 14 février 2024. <https://atmosphere.copernicus.eu/repeated-saharan-dust-intrusions-raise-questions-about-increasing-frequency>.

Cuevas-Agulló, Emilio, David Barriopedro, Rosa Delia García, Silvia Alonso-Pérez, Juan Jesús González-Alemán, Ernest Werner, David Suárez, et al. 2024. « Sharp Increase in Saharan Dust Intrusions over the Western Euro-Mediterranean in February–March 2020–2022 and Associated Atmospheric Circulation ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 24 (7): 4083-4104. <https://doi.org/10.5194/acp-24-4083-2024>.

Dadvand, Payam, Xavier Basagaña, Francesc Figueras, Elmira Amoly, Aurelio Tobias, Audrey De Nazelle, Xavier Querol, Jordi Sunyer, et Mark J. Nieuwenhuijsen. 2011. « Saharan Dust Episodes and Pregnancy ». *Journal of Environmental Monitoring* 13 (11): 3222. <https://doi.org/10.1039/c1em10579e>.

Das, Sourav, Alyvia McEwen, Joseph Prospero, Daniel Spalink, et Shankararaman Chellam. 2023. « Respirable Metals, Bacteria, and Fungi during a Saharan–Sahelian Dust Event in Houston, Texas ». *Environmental Science & Technology* 57 (48): 19942-55. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04158>.

DeLong, E. F., et N. R. Pace. 2001. « Environmental Diversity of Bacteria and Archaea ». *Systematic Biology* 50 (4): 470-78.

Deroubaix, A., N. Martiny, I. Chiapello, et B. Marticorena. 2013. « Suitability of OMI Aerosol Index to Reflect Mineral Dust Surface Conditions: Preliminary Application for Studying the Link with Meningitis Epidemics in the Sahel ». *Remote Sensing of Environment* 133 (juin):116-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.009>.

Di Mauro, Biagio, Roberto Garzonio, Micol Rossini, Gianluca Filippa, Paolo Pogliotti, Marta Galvagno, Umberto Morra di Cella, et al. 2019. « Saharan Dust Events in the European Alps: Role in Snowmelt and Geochemical Characterization ». *The Cryosphere* 13 (4): 1147-65. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1147-2019>.

Díaz, Julio, Cristina Linares, Rocío Carmona, Ana Russo, Cristina Ortiz, Pedro Salvador, et Ricardo Machado Trigo. 2017. « Saharan Dust Intrusions in Spain: Health Impacts and Associated Synoptic Conditions ». *Environmental Research* 156 (juillet):455-67. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.047>.

Díaz, Julio, Aurelio Tobías, et Cristina Linares. 2012. « Saharan Dust and Association between Particulate Matter and Case-Specific Mortality: A Case-Crossover Analysis in Madrid (Spain) ». *Environmental Health* 11 (1): 11. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-11>.

Diokhane, Aminata Mbow, Gregory S. Jenkins, Noel Manga, Mamadou S. Drame, et Boubacar Mbodji. 2016. « Linkages between Observed, Modeled Saharan Dust Loading and Meningitis in Senegal during 2012 and 2013 ». *International Journal of Biometeorology* 60 (4): 557-75. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1051-5>.

Directive (UE) 2024/2881 du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2024 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe (refonte). 2024. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32024L2881>.

Domínguez-Rodríguez, Alberto, Néstor Báez-Ferrer, Pedro Abreu-González, Sergio Rodríguez, Rocío Díaz, Pablo Avanzas, et Daniel Hernández-Vaquero. 2021. « Impact of Desert Dust Events on the Cardiovascular Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. » *Journal of Clinical Medicine* 10 (4). <https://doi.org/10.3390/jcm10040727>.

Domínguez-Rodríguez, Alberto, Sergio Rodríguez, Nestor Baez-Ferrer, Pedro Abreu-Gonzalez, Juan Abreu-Gonzalez, Pablo Avanzas, Manuel Carnero, Cesar Moris, Jessica López-Darias, et Daniel Hernández-Vaquero. 2020. « Impact of Saharan Dust Exposure on Airway Inflammation in Patients with Ischemic Heart Disease ». *Translational Research* 224 (octobre):16-25. <https://doi.org/10.1016/j.trsl.2020.05.011>.

Domínguez-Rodríguez, Alberto, Sergio Rodríguez, Néstor Baez-Ferrer, Pablo Avanzas, Pedro Abreu-González, Jacobo Silva, César Morís, et Daniel Hernández-Vaquero. 2021. « Impact of Saharan Dust on the Incidence of Acute Coronary Syndrome ». *Revista Española de Cardiología (English Edition)* 74 (4): 321-28. <https://doi.org/10.1016/j.rec.2020.02.003>.

Dumont, Marie, Simon Gascoin, Marion Réveillet, Didier Voisin, François Tuzet, Laurent Arnaud, Mylène Bonnefoy, et al. 2023. « Spatial Variability of Saharan Dust Deposition Revealed through a Citizen Science Campaign ». *Earth System Science Data* 15 (7): 3075-94. <https://doi.org/10.5194/essd-15-3075-2023>.

Duquenne, Philippe, Geneviève Marchand, et Caroline Duchaine. 2012. « Measurement of Endotoxins in Bioaerosols at Workplace: A Critical Review of Literature and a Standardization Issue ». *The Annals of Occupational Hygiene*, septembre. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mes051>.

Erkorkmaz, Burak Adnan, Daniella Gat, et Yinon Rudich. 2023. « Aerial Transport of Bacteria by Dust Plumes in the Eastern Mediterranean Revealed by Complementary rRNA/rRNA-Gene Sequencing ». *Communications Earth & Environment* 4 (1): 24. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00679-8>.

Escudero, M., X. Querol, J. Pey, A. Alastuey, N. Pérez, F. Ferreira, S. Alonso, S. Rodríguez, et E. Cuevas. 2007. « A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks ». *Atmospheric Environment* 41 (26): 5516-24. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.04.047>.

European Commission. 2011. « Commission staff working paper. Establishing guidelines for demonstration and subtraction of exceedances attributable to natural sources under the

Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe ». Brussels. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-6771-2011-INIT/en/pdf>.

FAO. 2023. « Sand and Dust Storms. A Guide to Mitigation, Adaptation, Policy and Risk Management Measures in Agriculture ». Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/items/c1a29b82-f16b-4900-a783-0d5983b316ea>.

Farahani, Vahid Jalali, Abdulmalik Altuwayjiri, Milad Pirhadi, Vishal Verma, Ario Alberto Ruprecht, Evangelia Diapouli, Konstantinos Eleftheriadis, et Constantinos Sioutas. 2022. « The Oxidative Potential of Particulate Matter (PM) in Different Regions around the World and Its Relation to Air Pollution Sources ». *Environmental Science: Atmospheres* 2 (5): 1076-86. <https://doi.org/10.1039/D2EA00043A>.

Favez, Olivier. 2022. « Programme CARA : Synthèse des principaux résultats (2008-2020) ». LCSQA / Ineris. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/programme-cara-synthese-des-principaux-resultats-2008-2020>.

Favez, Olivier, et Laurent Alleman. 2020. « Caractérisation chimique et étude de sources des particules en Martinique au cours de l'année 2018 ». LCSQA / Ineris. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/caracterisation-chimique-et-etude-de-sources-des-particules-en-martinique-en-2018>.

Federici, Ermanno, Chiara Petroselli, Elena Montalbani, Chiara Casagrande, Elisa Ceci, Beatrice Moroni, Gianandrea La Porta, et al. 2018. « Airborne Bacteria and Persistent Organic Pollutants Associated with an Intense Saharan Dust Event in the Central Mediterranean ». *Science of The Total Environment* 645 (décembre):401-10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.128>.

Filonchik, M., M.P. Peterson, L. Zhang, et H. Yan. 2024. « An Analysis of Air Pollution Associated with the 2023 Sand and Dust Storms over China: Aerosol Properties and PM10 Variability ». *Geoscience Frontiers* 15 (2). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101762>.

Formenti, P., J. L. Rajot, K. Desboeufs, F. Saïd, N. Grand, S. Chevaillier, et C. Schmechtig. 2011. « Airborne Observations of Mineral Dust over Western Africa in the Summer Monsoon Season: Spatial and Vertical Variability of Physico-Chemical and Optical Properties ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 11 (13): 6387-6410. <https://doi.org/10.5194/acp-11-6387-2011>.

Formenti, P., L. Schütz, Y. Balkanski, K. Desboeufs, M. Ebert, K. Kandler, A. Petzold, D. Scheuven, S. Weinbruch, et D. Zhang. 2011. « Recent Progress in Understanding Physical and Chemical Properties of African and Asian Mineral Dust ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 11 (16): 8231-56. <https://doi.org/10.5194/acp-11-8231-2011>.

Fussell, J.C., et F.J. Kelly. 2021. « Mechanisms Underlying the Health Effects of Desert Sand Dust ». *Environment International* 157. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106790>.

García-Pando, Carlos Pérez, Michelle C. Stanton, Peter J. Diggle, Sylwia Trzaska, Ron L. Miller, Jan P. Perlwitz, José M. Baldasano, et al. 2014. « Soil Dust Aerosols and Wind as Predictors of Seasonal Meningitis Incidence in Niger ». *Environmental Health Perspectives* 122 (7): 679-86. <https://doi.org/10.1289/ehp.1306640>.

Gardner, Alex S., et Martin J. Sharp. 2010. « A Review of Snow and Ice Albedo and the Development of a New Physically Based Broadband Albedo Parameterization ». *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 115 (F1). <https://doi.org/10.1029/2009JF001444>.

- Garrison, Virginia H., Eugene A. Shinn, William T. Foreman, Dale W. Griffin, Charles W. Holmes, Christina A. Kellogg, Michael S. Majewski, Laurie L. Richardson, Kim B. Ritchie, et Garriet W. Smith. 2003. « African and Asian Dust: From Desert Soils to Coral Reefs ». *BioScience* 53 (5): 469-80. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0469:AAADFD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0469:AAADFD]2.0.CO;2).
- Gini, M., M. Manousakas, A. G. Karydas, et K. Eleftheriadis. 2022. « Mass Size Distributions, Composition and Dose Estimates of Particulate Matter in Saharan Dust Outbreaks. » *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)* 298 (avril):118768. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118768>.
- Ginoux, Paul, Joseph M. Prospero, Thomas E. Gill, N. Christina Hsu, et Ming Zhao. 2012. « Global-scale Attribution of Anthropogenic and Natural Dust Sources and Their Emission Rates Based on MODIS Deep Blue Aerosol Products ». *Reviews of Geophysics* 50 (3): 2012RG000388. <https://doi.org/10.1029/2012RG000388>.
- Gittings, John A., Giorgio Dall'Olmo, Weiyi Tang, Joan Llor, Fatma Jebri, Eleni Livanou, Francesco Nencioli, et al. 2024. « An Exceptional Phytoplankton Bloom in the Southeast Madagascar Sea Driven by African Dust Deposition. » *PNAS Nexus* 3 (10): pgae386. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae386>.
- Gonzalez-Martin, Cristina, Nieves M. Coronado-Alvarez, Nuria Teigell-Perez, Raquel Diaz-Solano, Francisco J. Exposito, Juan P. Diaz, Dale W. Griffin, et Basilio Valladares. 2018. « Analysis of the Impact of African Dust Storms on the Presence of Enteric Viruses in the Atmosphere in Tenerife, Spain ». *Aerosol and Air Quality Research* 18 (7): 1863-73. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.11.0463>.
- González-Olalla, Juan Manuel, James A. Powell, et Janice Brahney. 2024. « Dust Storms Increase the Tolerance of Phytoplankton to Thermal and pH Changes. » *Global Change Biology* 30 (1): e17055. <https://doi.org/10.1111/gcb.17055>.
- Goudie, A. S., et N. J. Middleton. 2001. « Saharan dust storms: nature and consequences ». *Earth-Science Reviews* 56 (1): 179-204. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00067-8).
- Greenwood, B.M., A.K. Bradley, I.S. Blakebrough, S. Wali, et H.C. Whittle. 1984. « Meningococcal Disease and Season in Sub-Saharan Africa ». *The Lancet* 323 (8390): 1339-42. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(84\)91830-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(84)91830-0).
- Griffin, Dale W., Virginia H. Garrison, Jay R. Herman, et Eugene A. Shinn. 2001. « African desert dust in the Caribbean atmosphere: Microbiology and public health ». *Aerobiologia* 17 (3): 203-13. <https://doi.org/10.1023/A:1011868218901>.
- Griffin, Dale W., Christina A. Kellogg, Virginia H. Garrison, John T. Lisle, Timothy C. Borden, et Eugene A. Shinn. 2003. « Atmospheric Microbiology in the Northern Caribbean during African Dust Events ». *Aerobiologia* 19 (3/4): 143-57. <https://doi.org/10.1023/B:AERO.0000006530.32845.8d>.
- Griffin, Dale W., Christina A. Kellogg, et Eugene A. Shinn. 2001. « Dust in the Wind: Long Range Transport of Dust in the Atmosphere and Its Implications for Global Public and Ecosystem Health ». *Global Change and Human Health* 2 (1): 20-33. <https://doi.org/10.1023/A:1011910224374>.
- Griffin, Dale W., Nilgün Kubilay, Mustafa Koçak, Mike A. Gray, Timothy C. Borden, et Eugene A. Shinn. 2007. « Airborne Desert Dust and Aeromicrobiology over the Turkish Mediterranean Coastline ». *Atmospheric Environment* 41 (19): 4050-62. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.01.023>.

Grishkan, Isabella, Pnina Schlesinger, et Yaacov Mamane. 2012. « Influence of Dust Storms on Concentration and Content of Fungi in the Atmosphere of Haifa, Israel ». *Aerobiologia* 28 (4): 557-64. <https://doi.org/10.1007/s10453-012-9256-0>.

———. 2017. « The Effect of Dust Storms on the Concentration and Content of Fungi in the Atmosphere of Haifa, Israel ». In *Advances in Environmental Research*, Justin A. Daniels, 22. Nova Science Publishers, Inc. https://www.researchgate.net/publication/324162015_The_effect_of_dust_storms_on_the_concentration_and_content_of_fungi_in_the_atmosphere_of_Haifa_Israel.

Gross, A., D. Palchan, M.D. Krom, et A. Angert. 2016. « Elemental and Isotopic Composition of Surface Soils from Key Saharan Dust Sources ». *Chemical Geology* 442:54-61. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.09.001>.

Grousset, Francis E., Paul Ginoux, Aloys Bory, et Pierre E. Biscaye. 2003. « Case Study of a Chinese Dust Plume Reaching the French Alps ». *Geophysical Research Letters* 30 (6): 2002GL016833. <https://doi.org/10.1029/2002GL016833>.

Grytting, Vegard Sæter, Magne Refsnes, Marit Låg, Eyolf Erichsen, Torkil Sørli Røhr, Brynhild Snilsberg, Richard Aubrey White, et Johan Øvrevik. 2022. « The Importance of Mineralogical Composition for the Cytotoxic and Pro-Inflammatory Effects of Mineral Dust ». *Particle and Fibre Toxicology* 19 (1): 46. <https://doi.org/10.1186/s12989-022-00486-7>.

Guascito, Maria Rachele, Maria Giulia Lionetto, Franco Mazzotta, Marianna Conte, Maria Elena Giordano, Roberto Caricato, Anna Rita De Bartolomeo, et al. 2023. « Characterisation of the Correlations between Oxidative Potential and in Vitro Biological Effects of PM10 at Three Sites in the Central Mediterranean ». *Journal of Hazardous Materials* 448 (avril):130872. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130872>.

Guerreiro, C. V., P. Ziveri, C. Cavaleiro, et J.-B. W. Stuut. 2024. « Coccolith-Calcite Sr/Ca as a Proxy for Transient Export Production Related to Saharan Dust Deposition in the Tropical North Atlantic. » *Scientific Reports* 14 (1): 4295. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54001-3>.

Gutierrez, Miguel Pardinás, Paquita Zuidema, Mehdi Mirsaedi, Michael Campos, et Naresh Kumar. 2020. « Association between African Dust Transport and Acute Exacerbations of COPD in Miami ». *Journal of Clinical Medicine* 9 (8): 2496. <https://doi.org/10.3390/jcm9082496>.

Gyan, K., W. Henry, S. Lacaille, A. Laloo, C. Lamsee-Ebanks, S. McKay, R. M. Antoine, et M. A. Monteil. 2005. « African Dust Clouds Are Associated with Increased Paediatric Asthma Accident and Emergency Admissions on the Caribbean Island of Trinidad ». *International Journal of Biometeorology* 49 (6): 371-76. <https://doi.org/10.1007/s00484-005-0257-3>.

He, Miao, Takamichi Ichinose, Seiichi Yoshida, Masataka Nishikawa, Ikuko Mori, Rie Yanagisawa, Hirohisa Takano, Ken-ichiro Inoue, Guifan Sun, et Takayuki Shibamoto. 2010. « Airborne Asian Sand Dust Enhances Murine Lung Eosinophilia ». *Inhalation Toxicology* 22 (12): 1012-25. <https://doi.org/10.3109/08958378.2010.510151>.

Health Council of the Netherlands. 2010. « Endotoxins. Health-based recommended occupational exposure limit ». The Hague: Health Council of the Netherlands.

Hernández Ayala, J.J., et R. Méndez-Tejeda. 2024. « Analyzing Trends in Saharan Dust Concentration and Its Relation to Sargassum Blooms in the Eastern Caribbean ». *Oceans* 5 (3). <https://doi.org/10.3390/oceans5030036>.

Ineris. 2023. « Résultats préliminaires du projet SOTOX sur la comparaison et compréhension de la toxicité des sources majeures contribuant aux épisodes de pollution aux particules ».

Ineris.

https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/2023_Note_R%C3%A9sultats_pr%C3%A9liminaires_du_projet_SOTOX.pdf.

———. 2025. « Protocole d'analyse des épisodes de pollution pour l'aide à la décision ». Ineris. <https://www.ineris.fr/fr/protocole-analyse-episodes-pollution-aide-decision>.

IPCC. 2021. « Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ». Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

IRSST. 2015. « Bioaérosols et groupes de risque ». Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. 2015. <https://www.irsst.qc.ca/bioaerosol/groupes-risques.aspx>.

Jamilloux, Y., P. Sève, et T. Henry. 2014. « Les inflammasomes et les maladies humaines ». *La Revue de Médecine Interne* 35 (11): 730-41. <https://doi.org/10.1016/j.revmed.2014.04.017>.

Jickells, T. D., Z. S. An, K. K. Andersen, A. R. Baker, G. Bergametti, N. Brooks, J. J. Cao, et al. 2005. « Global Iron Connections Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate ». *Science* 308 (5718): 67-71. <https://doi.org/10.1126/science.1105959>.

Jiménez, E., C. Linares, D. Martínez, et J. Díaz. 2010. « Role of Saharan Dust in the Relationship between Particulate Matter and Short-Term Daily Mortality among the Elderly in Madrid (Spain) ». *Science of The Total Environment* 408 (23): 5729-36. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.049>.

Jusot, Jean-François, Daniel R. Neill, Elaine M. Waters, Mathieu Bangert, Marisol Collins, Laura Bricio Moreno, Katiellou G. Lawan, et al. 2017. « Airborne Dust and High Temperatures Are Risk Factors for Invasive Bacterial Disease ». *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 139 (3): 977-986.e2. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2016.04.062>.

Kandler, K., N. Benker, U. Bundke, E. Cuevas, M. Ebert, P. Knippertz, S. Rodríguez, L. Schütz, et S. Weinbruch. 2007. « Chemical Composition and Complex Refractive Index of Saharan Mineral Dust at Izaña, Tenerife (Spain) Derived by Electron Microscopy ». *Atmospheric Environment* 41 (37): 8058-74. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.06.047>.

Kandler, K., K. Lieke, N. Benker, C. Emmel, M. Küpper, D. Müller-Ebert, M. Ebert, et al. 2011. « Electron microscopy of particles collected at Praia, Cape Verde, during the Saharan Mineral Dust Experiment: particle chemistry, shape, mixing state and complex refractive index ». *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 63 (4): 475-96. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2011.00550.x>.

Kandler, K., L. Schütz, S. Jäckel, K. Lieke, C. Emmel, D. Müller-Ebert, M. Ebert, et al. 2011. « Ground-based off-line aerosol measurements at Praia, Cape Verde, during the Saharan Mineral Dust Experiment: microphysical properties and mineralogy ». *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 63 (4): 459-74. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2011.00546.x>.

Kim, Young-Min, Hyekang Kim, Seungwon Lee, Sora Kim, Jong-Uk Lee, Youngwoo Choi, Han Wook Park, et al. 2020. « Airway G-CSF Identifies Neutrophilic Inflammation and Contributes to Asthma Progression ». *European Respiratory Journal* 55 (2): 1900827. <https://doi.org/10.1183/13993003.00827-2019>.

Kishcha, Pavel, Yury Lechinsky, et Boris Starobinets. 2023. « Impact of a Severe Dust Event on Diurnal Behavior of Surface Water Temperature in Subtropical Lake Kinneret ». *Remote Sensing* 15 (22): 5297. <https://doi.org/10.3390/rs15225297>.

Kok, Jasper F., Adeyemi A. Adebiyi, Samuel Albani, Yves Balkanski, Ramiro Checa-Garcia, Mian Chin, Peter R. Colarco, et al. 2021. « Contribution of the World's Main Dust Source

- Regions to the Global Cycle of Desert Dust ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 21 (10): 8169-93. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021>.
- Kopanakis, I., E. Mammi-Galani, D. Pentari, T. Glytsos, et M. Lazaridis. 2018. « Ambient Particulate Matter Concentration Levels and Their Origin During Dust Event Episodes in the Eastern Mediterranean ». *Aerosol Science and Engineering* 2 (2): 61-73. <https://doi.org/10.1007/s41810-018-0023-7>.
- Kotsyfakis, Michail, Sotirios G. Zarogiannis, et Evridiki Patelarou. 2019. « The Health Impact of Saharan Dust Exposure. » *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 32 (6): 749-60. <https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.01466>.
- Kotta, Dionysia, et Dimitra Kitsiou. 2019. « Exploring Possible Influence of Dust Episodes on Surface Marine Chlorophyll Concentrations ». *Journal of Marine Science and Engineering* 7 (2): 50. <https://doi.org/10.3390/jmse7020050>.
- Kurihara, Momoko, Hiroki Kabata, Misato Irie, et Koichi Fukunaga. 2023. « Current Summary of Clinical Studies on Anti-TSLP Antibody, Tezepelumab, in Asthma ». *Allergology International* 72 (1): 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.alit.2022.11.006>.
- Kutralam-Muniasamy, Gurusamy, Fermín Pérez-Guevara, Ignacio Elizalde Martínez, et Shruti Venkata Chari. 2021. « Particulate Matter Concentrations and Their Association with COVID-19-Related Mortality in Mexico during June 2020 Saharan Dust Event ». *Environmental Science and Pollution Research* 28 (36): 49989-0. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14168-y>.
- Le Robert. s. d. « Bactérie ». Le Robert. Consulté le 9 janvier 2025. <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/bacterie>.
- Létinois, Laurent. 2022. « Estimation de la contribution des poussières sahariennes aux dépassements des valeurs limites PM10 survenus en Martinique en 2021 ». LCSQA / Ineris.
- Létinois, Laurent, Olivier Favez, Frédéric Meleux, et Laurent Alleman. 2024. « Estimation de la contribution des poussières sahariennes aux dépassements des valeurs limites PM10 survenus en 2022 sur le site Marseille Rabatau ». LCSQA / Ineris. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/depassements-des-valeurs-limites-pm10-en-2022-site-de-marseille-rabatau-estimation-de-la>.
- Létinois, Laurent, Frédéric Meleux, et Olivier Favez. 2021. « Estimation de la contribution des poussières sahariennes aux dépassements des valeurs limites de PM10 survenus en Martinique (2016-2018) ». LCSQA / Ineris.
- Li, Y., et W. Wang. 2024. « Long-Range Transport of a Dust Event and Impact on Marine Chlorophyll-a Concentration in April 2023 ». *Remote Sensing* 16 (11). <https://doi.org/10.3390/rs16111883>.
- Liebers, V., M. Raulf-Heimsoth, et T. Brüning. 2008. « Health Effects Due to Endotoxin Inhalation (Review) ». *Archives of Toxicology* 82 (4): 203-10. <https://doi.org/10.1007/s00204-008-0290-1>.
- López-Villarrubia, Elena, Olga Costa Estirado, Carmen Íñiguez Hernández, et Ferran Ballester Díez. 2021. « Do Saharan Dust Days Carry a Risk of Hospitalization From Respiratory Diseases for Citizens of the Canary Islands (Spain)? » *Archivos de Bronconeumología (English Edition)* 57 (7): 464-70. <https://doi.org/10.1016/j.arbr.2020.03.032>.
- Lorentzou, Christina, Giorgos Kouvarakis, Georgios V Kozyrakis, Nikolaos A Kampanis, Irene Trahanatzi, Othon Fraidakis, Nikolaos Tzanakis, Maria Kanakidou, Panagiotis Agouridakis, et George Notas. 2019. « Extreme Desert Dust Storms and COPD Morbidity on the Island of

Crete ». *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease* Volume 14 (août):1763-68. <https://doi.org/10.2147/COPD.S208108>.

Lwin, Kaung Suu, Aurelio Tobias, Paul Lester Chua, Lei Yuan, Ramita Thawonmas, Sophearen Ith, Zin Wai Htay, et al. 2023. « Effects of Desert Dust and Sandstorms on Human Health: A Scoping Review. » *GeoHealth* 7 (3): e2022GH000728. <https://doi.org/10.1029/2022GH000728>.

Madhusoodhanan, R., T. Al-Said, A. Sarkar, L. Fernandes, A. Ahmed, T. Yamamoto, F. Thuslim, et al. 2024. « Aeolian Dust and Hydro-Biological Characteristics: Decoding Dust Storm Impacts on Phytoplankton in the Northern Arabian Gulf ». *Science of the Total Environment* 911. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168583>.

Madininair. 2021. « Etat des lieux des connaissances scientifiques actuelles sur les particules en suspension en Martinique ». https://www.madininair.fr/IMG/pdf/etat_des_lieux_particules_en_suspension_en_martinique.pdf.

Maki, Takashi, Taichu Y. Tanaka, Tsuyoshi Koshiro, Atsushi Shimizu, Tsuyoshi T. Sekiyama, Mizuo Kajino, Yasunori Kurosaki, Toshiya Okuro, et Naga Oshima. 2022. « Changes in Dust Emissions in the Gobi Desert Due to Global Warming Using MRI-ESM2.0 ». *SOLA* 18 (0): 218-24. <https://doi.org/10.2151/sola.2022-035>.

Mallone, Sandra, Massimo Stafoggia, Annunziata Faustini, Gian Paolo Gobbi, Achille Marconi, et Francesco Forastiere. 2011. « Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy ». *Environmental Health Perspectives* 119 (10): 1409-14. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003026>.

Maring, H. D. 2001. « Particle size distribution measurements at Puerto Rico during PRIDE, paper presented at IAMAS 2001 Meeting, International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences ». Innsbruck, Austria, juillet 12.

Martiny, Nadège, et Isabelle Chiapello. 2013. « Assessments for the Impact of Mineral Dust on the Meningitis Incidence in West Africa ». *Atmospheric Environment* 70 (mai):245-53. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.016>.

Masson, O., D. Piga, R. Gurriaran, et D. D'Amico. 2010. « Impact of an Exceptional Saharan Dust Outbreak in France: PM10 and Artificial Radionuclides Concentrations in Air and in Dust Deposit ». *Atmospheric Environment* 44 (20): 2478-86. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.03.004>.

Matzenbacher, B.A., G.-J.A. Brummer, M.A. Prins, et J.-B.W. Stuut. 2024. « High-Resolution Sampling in the Eastern Tropical North Atlantic Reveals Episodic Saharan Dust Deposition: Implications for the Marine Carbon Sink ». *Frontiers in Marine Science* 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1367786>.

Menéndez, Inmaculada, Edward Derbyshire, Teresa Carrillo, Elena Caballero, Johann P. Engelbrecht, Lidia E. Romero, Pablo L. Mayer, Felipe Rodríguez De Castro, et José Mangas. 2017. « Saharan Dust and the Impact on Adult and Elderly Allergic Patients: The Effect of Threshold Values in the Northern Sector of Gran Canaria, Spain ». *International Journal of Environmental Health Research* 27 (2): 144-60. <https://doi.org/10.1080/09603123.2017.1292496>.

Middleton, Nicos, Panayiotis Yiallourous, Savvas Kleanthous, Ourania Kolokotroni, Joel Schwartz, Douglas W Dockery, Phil Demokritou, et Petros Koutrakis. 2008. « A 10-Year Time-Series Analysis of Respiratory and Cardiovascular Morbidity in Nicosia, Cyprus: The Effect of

- Short-Term Changes in Air Pollution and Dust Storms ». *Environmental Health* 7 (1): 39. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-7-39>.
- Middleton, N.J. 2017. « Desert Dust Hazards: A Global Review ». *Aeolian Research* 24:53-63. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>.
- Miguel, Ann G., Philip E. Taylor, James House, M. Michael Glovsky, et Richard C. Flagan. 2006. « Meteorological Influences on Respirable Fragment Release from Chinese Elm Pollen ». *Aerosol Science and Technology* 40 (9): 690-96. <https://doi.org/10.1080/02786820600798869>.
- Molesworth, Anna M., Luis E. Cuevas, Stephen J. Connor, Andrew P. Morse, et Madeleine C. Thomson. 2003. « Environmental Risk and Meningitis Epidemics in Africa ». *Emerging Infectious Diseases* 9 (10): 1287-93. <https://doi.org/10.3201/eid0910.030182>.
- Moore, Patrick S, Brian D Plikaytis, Gail A Bolan, Margaret J Oxtoby, Adamou Yada, Alain Zoubga, Arthur L Reingold, et Claire V Broome. 1992. « Detection of Meningitis Epidemics in Africa: A Population-Based Analysis ». *International Journal of Epidemiology* 21 (1): 155-62. <https://doi.org/10.1093/ije/21.1.155>.
- Morales-Baquero, Rafael, Elvira Pulido-Villena, et Isabel Reche. 2013. « Chemical signature of Saharan dust on dry and wet atmospheric deposition in the south-western Mediterranean region ». *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 65 (1): 18720. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.18720>.
- Moreira, I., C. Linares, F. Follos, G. Sánchez-Martínez, J.M. Vellón, et J. Díaz. 2020. « Short-Term Effects of Saharan Dust Intrusions and Biomass Combustion on Birth Outcomes in Spain ». *Science of The Total Environment* 701 (janvier):134755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134755>.
- Mueller, Judith E. 2019. « Meningococcal Strain Evolution, Dusty Dry Air and Respiratory Tract Infections: An Explosive Relationship ». *EBioMedicine* 42 (avril):34-35. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2019.03.067>.
- Nacher, Mathieu, Malika Leneuve, Celia Basurko, Alphonse Louis, Dominique Dotou, Stephanie Bernard, Kathy Pannechou, et al. 2024. « Desert dust episodes during pregnancy are associated with increased preterm delivery in French Guiana ». *Frontiers in Public Health* 12 (février):1252040. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1252040>.
- Najafi Zilaie, Mahmood, Asghar Mosleh Arani, et Hassan Etesami. 2023. « Evaluation of Air Pollution (Dust) Tolerance Index of Three Desert Species *Seidlitzia Rosmarinus*, *Haloxylon Aphyllum*, and *Nitraria Schoberi* under Salinity Stress ». *Environmental Monitoring and Assessment* 195 (7): 838. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11436-x>.
- Navarro, Azahara, Ana Del Moral, Irene De Pablos, Rafael Delgado, Jesús Párraga, Juan M. Martín-García, et Fernando Martínez-Checa. 2024. « Microorganisms Isolated from Saharan Dust Intrusions in the Canary Islands and Processes of Mineral Atmospherogenesis ». *Applied Sciences* 14 (5): 1862. <https://doi.org/10.3390/app14051862>.
- Navarro, Azahara, Ana Del Moral, Bettina Weber, Jens Weber, Alberto Molinero, Rafael Delgado, Jesús Párraga, et Fernando Martínez-Checa. 2024. « Microbial Composition of Saharan Dust Plumes Deposited as Red Rain in Granada (Southern Spain) ». *Science of The Total Environment* 913 (février):169745. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169745>.
- Navarro, Azahara., Ana. del Moral, I. de Pablos, R. Delgado, J. Párraga, J.M. Martín-García, et F. Martínez-Checa. 2024. « Microorganisms Isolated from Saharan Dust Intrusions in the

Canary Islands and Processes of Mineral Atmospherogenesis ». *Applied Sciences (Switzerland)* 14 (5). <https://doi.org/10.3390/app14051862>.

Neophytou, Andreas M, Panayiotis Yiallourous, Brent A Coull, Savvas Kleanthous, Pavlos Pavlou, Stelios Pashiardis, Douglas W Dockery, Petros Koutrakis, et Francine Laden. 2013. « Particulate Matter Concentrations during Desert Dust Outbreaks and Daily Mortality in Nicosia, Cyprus ». *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 23 (3): 275-80. <https://doi.org/10.1038/jes.2013.10>.

Núñez, A., D.A. Moreno, et A.M. García. 2024. « Saharan Dust Storms Affecting the Center of the Iberian Peninsula: Effect on the Urban Aerobiome ». *Atmospheric Environment* 328. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120522>.

Núñez, Andrés, Diego A. Moreno, et Ana M. García. 2024. « Saharan Dust Storms Affecting the Center of the Iberian Peninsula: Effect on the Urban Aerobiome ». *Atmospheric Environment* 328 (juillet):120522. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120522>.

Oduber, F., A. I. Calvo, A. Castro, C. Blanco-Alegre, C. Alves, J. Barata, T. Nunes, et al. 2020. « Chemical Composition of Rainwater under Two Events of Aerosol Transport: A Saharan Dust Outbreak and Wildfires ». *The Science of the Total Environment* 734 (septembre):139202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139202>.

Official Journal of the European Union. 2016. *Council Regulation (Euratom) 2016/52 of 15 January 2016 Laying down Maximum Permitted Levels of Radioactive Contamination of Food and Feed Following a Nuclear Accident or Any Other Case of Radiological Emergency, and Repealing Regulation (Euratom) No 3954/87 and Commission Regulations (Euratom) No 944/89 and (Euratom) No 770/90*. Vol. 2016/52. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/52/oj/eng>.

OMM. 2017. « Atlas International Des Nuages. Manuel de l'observation Des Nuages et Des Autres Météores (OMM-N° 407) ». Organisation Météorologique Mondiale. Atlas International Des Nuages. 2017. <https://cloudatlas.wmo.int/home.html>.

———. 2023. « Bulletin de l'OMM sur les poussières atmosphériques ». *Organisation météorologique mondiale*, Airborne Dust Bulletins, , n° 7 (septembre), 9.

Opp, C., M. Groll, H. Abbasi, et M.A. Foroushani. 2021. « Causes and Effects of Sand and Dust Storms: What Has Past Research Taught Us? A Survey ». *Journal of Risk and Financial Management* 14 (7). <https://doi.org/10.3390/jrfm14070326>.

Ortiz-Martínez, M., E. Rivera-Ramírez, L. Méndez-Torres, et Braulio D. Jiménez-Vélez. 2010. « Role of chemical and biological constituents of PM₁₀ from Saharan Dust in the exacerbation of asthma in Puerto Rico ». In *Biodiversity Science for Humanity*, ATINER, 101-1018. Athènes.

Ortiz-Martínez, Mario G., Rosa I. Rodríguez-Cotto, Mónica A. Ortiz-Rivera, Cedric W. Pluguez-Turull, et Braulio D. Jiménez-Vélez. 2015. « Linking Endotoxins, African Dust PM₁₀ and Asthma in an Urban and Rural Environment of Puerto Rico ». Édité par Helen C. Steel. *Mediators of Inflammation* 2015 (1): 784212. <https://doi.org/10.1155/2015/784212>.

Ouyang, Wei, Chao Liu, Ying Pan, Yu Han, Liping Yang, Jingyan Xia, et Feng Xu. 2020. « SHP2 Deficiency Promotes *STAPHYLOCOCCUS AUREUS* Pneumonia Following Influenza Infection ». *Cell Proliferation* 53 (1): e12721. <https://doi.org/10.1111/cpr.12721>.

Pandolfi, M., A. Tobias, A. Alastuey, J. Sunyer, J. Schwartz, J. Lorente, J. Pey, et X. Querol. 2014. « Effect of Atmospheric Mixing Layer Depth Variations on Urban Air Quality and Daily Mortality during Saharan Dust Outbreaks ». *Science of The Total Environment* 494-495 (octobre):283-89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.004>.

Parker, Dane, et Alice Prince. 2011. « Innate Immunity in the Respiratory Epithelium ». *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology* 45 (2): 189-201. <https://doi.org/10.1165/rcmb.2011-0011RT>.

Paytan, Adina, Katherine R. M. Mackey, Ying Chen, Ivan D. Lima, Scott C. Doney, Natalie Mahowald, Rochelle Labiosa, et Anton F. Post. 2009. « Toxicity of Atmospheric Aerosols on Marine Phytoplankton ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (12): 4601-5. <https://doi.org/10.1073/pnas.0811486106>.

Perez, Laura, Aurelio Tobías, Jorge Pey, Noemí Pérez, Andrés Alastuey, Jordi Sunyer, et Xavier Querol. 2012. « Effects of Local and Saharan Particles on Cardiovascular Disease Mortality ». *Epidemiology* 23 (5): 768-69. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3182625d0d>.

Perez, Laura, Aurelio Tobias, Xavier Querol, Nino Künzli, Jorge Pey, Andrés Alastuey, Mar Viana, Natalia Valero, Manuel González-Cabré, et Jordi Sunyer. 2008. « Coarse Particles From Saharan Dust and Daily Mortality ». *Epidemiology* 19 (6): 800-807. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e31818131cf>.

Perez, Laura, Aurelio Tobías, Xavier Querol, Jorge Pey, Andrés Alastuey, Julio Díaz, et Jordi Sunyer. 2012. « Saharan Dust, Particulate Matter and Cause-Specific Mortality: A Case–Crossover Study in Barcelona (Spain) ». *Environment International* 48 (novembre):150-55. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.07.001>.

Peter, Hannes, Paul Hörtnagl, Isabel Reche, et Ruben Sommaruga. 2014. « Bacterial Diversity and Composition during Rain Events with and without Saharan Dust Influence Reaching a High Mountain Lake in the Alps ». *Environmental Microbiology Reports* 6 (6): 618-24. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12175>.

Pham, M K, P P Povinec, S H Lee, et B Oregioni. 2003. « Transport atmospherique de particules de l'Afrique du Nord a Monaco ». *Bulletin du Bureau National de Metrologie* 2003-2 (123): 143-49.

Piacentini, Diego, Giuseppina Falasca, Silvia Canepari, et Lorenzo Massimi. 2019. « Potential of PM-Selected Components to Induce Oxidative Stress and Root System Alteration in a Plant Model Organism ». *Environment International* 132 (novembre):105094. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105094>.

Pietrogrande, Maria Chiara, Maria Rita Perrone, Francesco Manarini, Salvatore Romano, Roberto Udisti, et Silvia Becagli. 2018. « PM10 Oxidative Potential at a Central Mediterranean Site: Association with Chemical Composition and Meteorological Parameters ». *Atmospheric Environment* 188 (septembre):97-111. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.06.013>.

Pouri, N., B. Karimi, A. Kolivand, et S.H. Mirhoseini. 2024. « Ambient Dust Pollution with All-Cause, Cardiovascular and Respiratory Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Science of the Total Environment* 912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168945>.

Pozzetto, Bruno, Julie Gagnaire, Philippe Berthelot, Thomas Bourlet, et Sylvie Pillet. 2023. « Les virus dans l'environnement, considérations virologiques et exemples de leur impact en santé humaine ». *Revue Francophone des Laboratoires* 2023 (550): 33-43. [https://doi.org/10.1016/S1773-035X\(23\)00053-9](https://doi.org/10.1016/S1773-035X(23)00053-9).

Prospero, Joseph M., Edmund Blades, Raana Naidu, George Mathison, Haresh Thani, et Marc C. Lavoie. 2008. « Relationship between African Dust Carried in the Atlantic Trade Winds and Surges in Pediatric Asthma Attendances in the Caribbean ». *International Journal of Biometeorology* 52 (8): 823-32. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0176-1>.

- Querol, X., A. Tobías, N. Pérez, A. Karanasiou, F. Amato, M. Stafoggia, C. Pérez García-Pando, et al. 2019. « Monitoring the Impact of Desert Dust Outbreaks for Air Quality for Health Studies ». *Environment International* 130. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.061>.
- Reid, E.A., J.S. Reid, M.M. Meier, M.R. Dunlap, S.S. Cliff, A. Broumas, K. Perry, et H. Maring. 2003. « Characterization of African Dust Transported to Puerto Rico by Individual Particle and Size Segregated Bulk Analysis ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (19): PRD7-1. <https://doi.org/10.1029/2002jd002935>.
- Reid, Jeffrey S., Halflidi H. Jonsson, Hal B. Maring, Alexander Smirnov, Dennis L. Savoie, Steven S. Cliff, Elizabeth A. Reid, et al. 2003. « Comparison of Size and Morphological Measurements of Coarse Mode Dust Particles from Africa ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (D19). <https://doi.org/10.1029/2002JD002485>.
- Reid, Jeffrey S., James E. Kinney, Douglas L. Westphal, Brent N. Holben, Ellsworth J. Welton, Si-Chee Tsay, Daniel P. Eleuterio, et al. 2003. « Analysis of Measurements of Saharan Dust by Airborne and Ground-Based Remote Sensing Methods during the Puerto Rico Dust Experiment (PRIDE) ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (D19). <https://doi.org/10.1029/2002JD002493>.
- Remoundaki, E., A. Bourliva, P. Kokkalis, R. E. Mamouri, A. Papayannis, T. Grigoratos, C. Samara, et M. Tsezos. 2011. « PM10 Composition during an Intense Saharan Dust Transport Event over Athens (Greece) ». *The Science of the Total Environment* 409 (20): 4361-72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.026>.
- Renzi, Matteo, Francesco Forastiere, Roberta Calzolari, Achille Cernigliaro, Giuseppe Madonia, Paola Michelozzi, Marina Davoli, Salvatore Scondotto, et Massimo Stafoggia. 2018. « Short-Term Effects of Desert and Non-Desert PM10 on Mortality in Sicily, Italy ». *Environment International* 120 (novembre):472-79. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.016>.
- Renzi, Matteo, Massimo Stafoggia, Achille Cernigliaro, Roberta Calzolari, Giuseppe Madonia, Salvatore Scondotto, et Francesco Forastiere. 2017. « Effetti sanitari delle sabbie saharienne in Sicilia ». *Epidemiologia & Prevenzione* 41 (1): 46-53. <https://doi.org/10.19191/EP17.1.P046.011>.
- Reyes, María, Julio Díaz, Aurelio Tobias, Juan Carlos Montero, et Cristina Linares. 2013. « Impact of Saharan Dust Particles on Hospital Admissions in Madrid (Spain) ». *International Journal of Environmental Health Research* 24 (1): 63-72. <https://doi.org/10.1080/09603123.2013.782604>.
- Rocha-Lima, A., J. Vanderlei Martins, L.A. Remer, M. Todd, J.H. Marsham, S. Engelstaedter, C.L. Ryder, et al. 2018. « A Detailed Characterization of the Saharan Dust Collected during the Fennec Campaign in 2011: In Situ Ground-Based and Laboratory Measurements ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 18 (2): 1023-43. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1023-2018>.
- Rocha-Lima, Adriana, J. Vanderlei Martins, Lorraine A. Remer, Martin Todd, John H. Marsham, Sebastian Engelstaedter, Claire L. Ryder, et al. 2018. « A Detailed Characterization of the Saharan Dust Collected during the Fennec Campaign in 2011: In Situ Ground-Based and Laboratory Measurements ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 18 (2): 1023-43. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1023-2018>.
- Rodríguez, S., A. Alastuey, S. Alonso-Pérez, X. Querol, E. Cuevas, J. Abreu-Afonso, M. Viana, N. Pérez, M. Pandolfi, et J. De La Rosa. 2011. « Transport of Desert Dust Mixed with North

- African Industrial Pollutants in the Subtropical Saharan Air Layer ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 11 (13): 6663-85. <https://doi.org/10.5194/acp-11-6663-2011>.
- Rodríguez, Sergio, Joseph M. Prospero, Jessica López-Darias, María-Isabel García-Alvarez, Paquita Zuidema, Silvia Nava, Franco Lucarelli, Cassandra J. Gaston, Luis Galindo, et Elisa Sosa. 2021. « Tracking the changes of iron solubility and air pollutants traces as African dust transits the Atlantic in the Saharan dust outbreaks ». *Atmospheric Environment* 246 (février):118092. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118092>.
- Rodríguez-Arias, R. M., J. Rojo, F. Fernández-González, et R. Pérez-Badia. 2023. « Desert Dust Intrusions and Their Incidence on Airborne Biological Content. Review and Case Study in the Iberian Peninsula. » *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)* 316 (Pt 1): 120464. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120464>.
- Rodríguez-Cotto, Rosa I., Mario G. Ortiz-Martínez, et Braulio D. Jiménez-Vélez. 2015. « Organic Extracts from African Dust Storms Stimulate Oxidative Stress and Induce Inflammatory Responses in Human Lung Cells through Nrf2 but Not NF-κB ». *Environmental Toxicology and Pharmacology* 39 (2): 845-56. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.02.015>.
- Rodríguez-Cotto, Rosa I., Mario G. Ortiz-Martínez, Evasomary Rivera-Ramírez, Loyda B. Méndez, Julio C. Dávila, et Braulio D. Jiménez-Vélez. 2013. « African Dust Storms Reaching Puerto Rican Coast Stimulate the Secretion of IL-6 and IL-8 and Cause Cytotoxicity to Human Bronchial Epithelial Cells (BEAS-2B) ». *Health* 05 (10): 14-28. <https://doi.org/10.4236/health.2013.510A2003>.
- Rodriguez-Navarro, Carlos, Fulvio Di Lorenzo, et Kerstin Elert. 2018. « Mineralogy and Physicochemical Features of Saharan Dust Wet Deposited in the Iberian Peninsula during an Extreme Red Rain Event ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 18 (13): 10089-122. <https://doi.org/10.5194/acp-18-10089-2018>.
- Rohrer, Mario, Antoine Flahault, et Markus Stoffel. 2020. « Peaks of Fine Particulate Matter May Modulate the Spreading and Virulence of COVID-19 ». *Earth Systems and Environment* 4 (4): 789-96. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00184-4>.
- Rojo, Jesús, José María Moreno, Jorge Romero-Morte, Beatriz Lara, Belén Elvira-Rendueles, Luis Negral, Federico Fernández-González, Stella Moreno-Grau, et Rosa Pérez-Badia. 2021. « Causes of Increased Pollen Exposure during Saharan-Sahel Dust Intrusions ». *Environmental Pollution* 284 (septembre):117441. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117441>.
- Rudich, Yinon, Olga Khersonsky, et Daniel Rosenfeld. 2002. « Treating Clouds with a Grain of Salt ». *Geophysical Research Letters* 29 (22): 17-1-17-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL016055>.
- Ruiz-Páez, R., J.A. López-Bueno, A. Padrón-Monedero, M.A. Navas, P. Salvador, C. Linares, et J. Díaz. 2024. « Short-Term Effects of Fine Particulate Matter from Biomass Combustion and Saharan Dust Intrusions on Emergency Hospital Admissions Due to Mental and Behavioural Disorders, Anxiety and Depression in Spain ». *Science of The Total Environment* 946 (octobre):174316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174316>.
- Saco, P. M., K. R. McDonough, J. F. Rodriguez, J. Rivera-Zayas, et S. G. Sandi. 2021. « The Role of Soils in the Regulation of Hazards and Extreme Events. » *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 376 (1834): 20200178. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0178>.
- Sadeghimoghaddam, Ali, Hamidreza Khankeh, Mehdi Norozi, Shahrokh Fateh, et Mehrdad Farrokhi. 2021. « Investigating the Effects of Dust Storms on Morbidity and Mortality Due to

- Cardiovascular and Respiratory Diseases: A Systematic Review. » *Journal of Education and Health Promotion* 10 (1): 191. https://doi.org/10.4103/jehp.jehp_1272_20.
- Saers, Johannes, Lena Andersson, Christer Janson, et Josefin Sundh. 2021. « Respiratory Symptoms, Lung Function, and Fraction of Exhaled Nitric Oxide before and after Assignment in a Desert Environment—a Cohort Study ». *Respiratory Medicine* 189 (novembre):106643. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2021.106643>.
- Samoli, Evangelia, Evgenia Kougea, Pavlos Kassomenos, Antonis Analitis, et Klea Katsouyanni. 2011. « Does the Presence of Desert Dust Modify the Effect of PM10 on Mortality in Athens, Greece? » *Science of The Total Environment* 409 (11): 2049-54. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.02.031>.
- Sánchez De La Campa, Ana, Adela García-Salamanca, Jennifer Solano, Jesús De La Rosa, et Juan-Luis Ramos. 2013. « Chemical and Microbiological Characterization of Atmospheric Particulate Matter during an Intense African Dust Event in Southern Spain ». *Environmental Science & Technology* 47 (8): 3630-38. <https://doi.org/10.1021/es3051235>.
- Scheuven, D., L. Schütz, K. Kandler, M. Ebert, et S. Weinbruch. 2013. « Bulk Composition of Northern African Dust and Its Source Sediments - A Compilation ». *Earth-Science Reviews* 116 (1): 170-94. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.005>.
- Shao, Yaping, Karl-Heinz Wyrwoll, Adrian Chappell, Jianping Huang, Zhaohui Lin, Grant H. McTainsh, Masao Mikami, Taichu Y. Tanaka, Xulong Wang, et Soonchang Yoon. 2011. « Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science ». *Aeolian Research* 2 (4): 181-204. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001>.
- Sharma, Lokesh, Jingjing Feng, Clemente J. Britto, et Charles S. Dela Cruz. 2020. « Mechanisms of Epithelial Immunity Evasion by Respiratory Bacterial Pathogens ». *Frontiers in Immunology* 11 (février):91. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.00091>.
- Shea, Beverley J., Barnaby C. Reeves, George Wells, Micere Thuku, Candyce Hamel, Julian Moran, David Moher, et al. 2017. « AMSTAR 2: A Critical Appraisal Tool for Systematic Reviews That Include Randomised or Non-Randomised Studies of Healthcare Interventions, or Both ». *BMJ (Clinical Research Ed.)* 358 (septembre):j4008. <https://doi.org/10.1136/bmj.j4008>.
- Silva, T., M. Fragoso, R. Almendra, J. Vasconcelos, A. Lopes, et A. Faleh. 2021. « North African Dust Intrusions and Increased Risk of Respiratory Diseases in Southern Portugal ». *International Journal of Biometeorology* 65 (10): 1767-80. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02132-x>.
- Skiles, S.M., D.V. Mallia, A.G. Hallar, J.C. Lin, A. Lambert, R. Petersen, et S. Clark. 2018. « Implications of a Shrinking Great Salt Lake for Dust on Snow Deposition in the Wasatch Mountains, UT, as Informed by a Source to Sink Case Study from the 13-14 April 2017 Dust Event ». *Environmental Research Letters* 13 (12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaefd8>.
- Skonieczny, C., A. Bory, V. Bout-Roumazeilles, W. Abouchami, S.J.G. Galer, X. Crosta, J.-B. Stuut, et al. 2011. « The 7-13 March 2006 Major Saharan Outbreak: Multiproxy Characterization of Mineral Dust Deposited on the West African Margin ». *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 116 (18). <https://doi.org/10.1029/2011JD016173>.
- Soleimani, Z., P. Teymouri, A. Darvishi Boloorani, A. Mesdaghinia, N. Middleton, et D.W. Griffin. 2020. « An Overview of Bioaerosol Load and Health Impacts Associated with Dust Storms: A Focus on the Middle East ». *Atmospheric Environment* 223. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117187>.

Speranza, Anna, et Valeria Scoccianti. 2012. « New Insights into an Old Story: Pollen ROS Also Play a Role in Hay Fever ». *Plant Signaling & Behavior* 7 (8): 994-98. <https://doi.org/10.4161/psb.20674>.

St Louis, Vincent L., Kyra A. St Pierre, Craig A. Emmerton, Jessica A. Serbu, Charles H. Talbot, Lisa Szostek, Igor Lehnher, Derek C. G. Muir, et Alison Criscitiello. 2024. « Winter Dust Storms Impact the Physical and Biogeochemical Functioning of a Large High Arctic Lake. » *Environmental Science & Technology* 58 (17): 7415-24. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00705>.

Stafoggia, Massimo, Stefano Zauli-Sajani, Jorge Pey, Evangelia Samoli, Ester Alessandrini, Xavier Basagaña, Achille Cernigliaro, et al. 2016. « Desert Dust Outbreaks in Southern Europe: Contribution to Daily PM10 Concentrations and Short-Term Associations with Mortality and Hospital Admissions ». *Environmental Health Perspectives* 124 (4): 413-19. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409164>.

Stephens, David S, Brian Greenwood, et Petter Brandtzaeg. 2007. « Epidemic Meningitis, Meningococcaemia, and Neisseria Meningitidis ». *The Lancet* 369 (9580): 2196-2210. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61016-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61016-2).

Stroup, D. F., J. A. Berlin, S. C. Morton, I. Olkin, G. D. Williamson, D. Rennie, D. Moher, B. J. Becker, T. A. Sipe, et S. B. Thacker. 2000. « Meta-Analysis of Observational Studies in Epidemiology: A Proposal for Reporting. Meta-Analysis Of Observational Studies in Epidemiology (MOOSE) Group ». *JAMA* 283 (15): 2008-12. <https://doi.org/10.1001/jama.283.15.2008>.

Szuskiewicz, Maria Magdalena, Adam Łukasik, Eduard Petrovský, Hana Grison, Ewa Błńska, Jarosław Lasota, et Marcin Szuskiewicz. 2023. « Magneto-Chemical Characterisation of Saharan Dust Deposited on Snow in Poland. » *Environmental Research* 216 (Pt 2): 114605. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114605>.

Takahashi, Y., M. Sakaguchi, S. Inouye, H. Miyazawa, K. Imaoka, et S. Katagiri. 1991. « Existence of Exine-free Airborne Allergen Particles of Japanese Cedar (*Cryptomeria Japonica*) Pollen ». *Allergy* 46 (8): 588-93. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.1991.tb00628.x>.

Thyagarajan, Anita, Christine M. Rapp, Leah Schneider, Amie Lund, Jeffrey B. Travers, et Ravi P. Sahu. 2023. « Exposure to Diesel Exhaust Particulates and Desert Sand Dust Generates Microvesicle Particles and Platelet-activating Factor Agonists ». *Skin Research and Technology* 29 (4): e13312. <https://doi.org/10.1111/srt.13312>.

Tobías, A., A. Karanasiou, F. Amato, M. Roqué, et X. Querol. 2019. « Health Effects of Desert Dust and Sand Storms: A Systematic Review and Meta-Analysis Protocol ». *BMJ Open* 9 (7). <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2019-029876>.

Tobías, Aurelio, Joan A. Caylà, Jorge Pey, Andres Alastuey, et Xavier Querol. 2011. « Are Saharan Dust Intrusions Increasing the Risk of Meningococcal Meningitis? » *International Journal of Infectious Diseases* 15 (7): e503. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2011.03.008>.

Tobías, Aurelio, Laura Pérez, Julio Díaz, Cristina Linares, Jorge Pey, Andrés Alastruey, et Xavier Querol. 2011. « Short-Term Effects of Particulate Matter on Total Mortality during Saharan Dust Outbreaks: A Case-Crossover Analysis in Madrid (Spain) ». *Science of The Total Environment* 412-413 (décembre):386-89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.10.027>.

Tobías, Aurelio, Xavier Querol, Marta Roqué, Kaung Suu Lwin, Lei Yuan, Sophearen Ith, Htay Zin Wai, et al. 2025. « Short-Term Exposure to Desert Dust and Sandstorms and All-Cause

- and Cause-Specific Mortality and Morbidity: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Environment International* 196 (février):109277. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109277>.
- Tobías, Aurelio, et Massimo Stafoggia. 2020. « Modeling Desert Dust Exposures in Epidemiologic Short-Term Health Effects Studies ». *Epidemiology* 31 (6): 788-95. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000001255>.
- Trapp, J.M., F.J. Millero, et J.M. Prospero. 2010. « Temporal Variability of the Elemental Composition of African Dust Measured in Trade Wind Aerosols at Barbados and Miami ». *Marine Chemistry* 120 (1-4): 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2008.10.004>.
- Trianti, Stavroula-Myrto, Evangelia Samoli, Sophia Rodopoulou, Klea Katsouyanni, Spyros A. Papiris, et Anna Karakatsani. 2017. « Desert Dust Outbreaks and Respiratory Morbidity in Athens, Greece ». *Environmental Health* 16 (1): 72. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0281-x>.
- UNCCD. 2022. « Sand and Dust Storms Compendium. Information and Guidance on Assessing and Addressing the Risks ». Bonn, Germany: United Nations Convention to Combat Desertification. https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-05/1871_Book_SDS_%20Compendium_V1.pdf.
- . 2023. « Sand and Dust Storm Frequency Increasing in Many World Regions, UN Warns ». United Nations Convention to Combat Desertification. 14 novembre 2023. <https://www.unccd.int/news-stories/press-releases/sand-and-dust-storm-frequency-increasing-many-world-regions-un-warns>.
- UNEP. 2020. *Impacts of Sand and Dust Storms on Oceans: A Scientific Environmental Assessment for Policy Makers*. Nairobi, Kenya: United Nations.
- UNEP, WMO, et UNCCD. 2016. « Global Assessment of Sand and Dust Storms ». Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme. <https://www.unccd.int/mn/node/26656>.
- Urrutia-Pereira, Marilyn, Luciana Varanda Rizzo, Patrícia Latour Staffeld, Herberto Jose Chong-Neto, Giovanni Viegi, et Dirceu Solé. 2021. « Dust from the Sahara to the American Continent: Health Impacts. » *Allergologia et Immunopathologia* 49 (4): 187-94. <https://doi.org/10.15586/aei.v49i4.436>.
- Vanderstraeten, P., Y. Lénelle, A. Meurrens, D. Carati, L. Brenig, A. Delcloo, Z. Y. Offer, et E. Zaady. 2008. « Dust storm originate from Sahara covering Western Europe: A case study ». *Atmospheric Environment* 42 (21): 5489-93. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.063>.
- Vasilatou, Vasiliki, Evangelia Diapouli, Dimitrios Abatzoglou, Evangelos B. Bakeas, Michael Scoullou, et Konstantinos Eleftheriadis. 2017. « Characterization of PM(2.5) Chemical Composition at the Demokritos Suburban Station, in Athens Greece. The Influence of Saharan Dust ». *Environmental Science and Pollution Research International* 24 (12): 11836-46. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8684-3>.
- Viel, Jean-Francois, Yoann Mallet, Christina Raghoumandan, Philippe Quénel, Philippe Kadhel, Florence Rouget, et Luc Multigner. 2019. « Impact of Saharan Dust Episodes on Preterm Births in Guadeloupe (French West Indies) ». *Occupational and Environmental Medicine* 76 (5): 336-40. <https://doi.org/10.1136/oemed-2018-105405>.
- Viel, Jean-François, Léah Michineau, Céline Garbin, Christine Monfort, Philippe Kadhel, Luc Multigner, et Florence Rouget. 2020. « Impact of Saharan Dust on Severe Small for Gestational Births in the Caribbean ». *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 102 (6): 1463-65. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.19-0699>.

- Vila Duplá, María, Manuel Villar-Argaiz, Juan Manuel Medina-Sánchez, Juan Manuel González-Olalla, et Presentación Carrillo. 2024. « Constant and Fluctuating High Temperatures Interact with Saharan Dust Leading to Contrasting Effects on Aquatic Microbes over Time. » *The Science of the Total Environment* 951 (novembre):175777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175777>.
- Wang, F., X. Zhao, C. Gerlein-Safdi, Y. Mu, D. Wang, et Q. Lu. 2017. « Global Sources, Emissions, Transport and Deposition of Dust and Sand and Their Effects on the Climate and Environment: A Review ». *Frontiers of Environmental Science and Engineering* 11 (1). <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0904-z>.
- Wang, J., T. Wang, D. Yasheng, X. Wang, Y. Lei, X. Li, Z. Wang, et B. Shi. 2024. « Modulations of Dust Aerosols on Precipitation: Evidence from a Typical Heavy Sandstorm Event ». *Atmospheric Research* 304. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107411>.
- Wang, Mengqiu, Chuanmin Hu, Brian B. Barnes, Gary Mitchum, Brian Lapointe, et Joseph P. Montoya. 2019. « The great Atlantic Sargassum belt ». *Science* 365 (6448): 83-87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>.
- Wang Qingyue, Kurihara Kota, Kiryu Hiroki, Sakamoto Kazuhiko, Miwa Makoto, et Uchiyama Iwao. 2008. « Daily Variation Differences between Airborne Japanese Cedar Pollen and Its Respirable Allergen Particulate Matters during the Most Severe Pollination Seasons ». *Earozoru Kenkyu* 23 (2): 120-26.
- WHO. 2021. *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. World Health Organization. Bonn, Germany: WHO European Centre for Environment and Health.
- Woringer, Maxime, Nadège Martiny, Souleymane Porgo, Brice W. Bicaba, Avner Bar-Hen, et Judith E. Mueller. 2018. « Atmospheric Dust, Early Cases, and Localized Meningitis Epidemics in the African Meningitis Belt: An Analysis Using High Spatial Resolution Data ». *Environmental Health Perspectives* 126 (9): 097002. <https://doi.org/10.1289/EHP2752>.
- Xing, Y., Y. Chen, S. Yan, X. Cao, Y. Zhou, X. Zhang, T. Shi, et al. 2024. « Dust Storms from the Taklamakan Desert Significantly Darken Snow Surface on Surrounding Mountains ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 24 (9): 5199-5219. <https://doi.org/10.5194/acp-24-5199-2024>.
- Xu-Yang, Yangjunjie, Charlotte Skonieczny, Sophie Ayrault, Jean-Sébastien Barbier, Rémi Bizeul, Octave Bryskere, Pierre-Alexis Chaboche, et al. 2025. « Radioactive Contamination Transported to Western Europe with Saharan Dust ». *Science Advances* 11 (5). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr9192>.
- Yarber, Aara'L. Y., Gregory S. Jenkins, Ajit Singh, et Aminata Diokhane. 2023. « Temporal Relationships Between Saharan Dust Proxies, Climate, and Meningitis in Senegal ». *GeoHealth* 7 (2): e2021GH000574. <https://doi.org/10.1029/2021GH000574>.
- Yazdani, M., H. Karimzadeh, H. Azimzadeh, et M. Soleimani. 2024. « Assessment of Environmental and Health Risks of Potentially Toxic Elements Associated with Desert Dust Particles Affected by Industrial Activities in Isfahan Metropolitan ». *Scientific Reports* 14 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74153-6>.
- Yeager, D.E., et V.R. Morris. 2024. « Distinguishing Saharan Dust Plume Sources in the Tropical Atlantic Using Elemental Indicators ». *Atmosphere* 15 (5). <https://doi.org/10.3390/atmos15050554>.

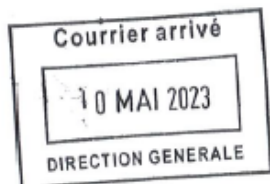
Zauli Sajani, Stefano, Rossella Miglio, Paolo Bonasoni, Paolo Cristofanelli, Angela Marinoni, Claudio Sartini, Carlo Alberto Goldoni, Gianfranco De Girolamo, et Paolo Lauriola. 2011. « Saharan Dust and Daily Mortality in Emilia-Romagna (Italy) ». *Occupational and Environmental Medicine* 68 (6): 446-51. <https://doi.org/10.1136/oem.2010.058156>.

ANNEXES

Annexe 1. Lettre de saisine

**GOVERNEMENT**Liberté
Égalité
Fraternité

2023-SA-0098



Paris, le 02 MAI 2023

Le Directeur général de l'énergie et du climat

Le Directeur général adjoint de la santé

à

Monsieur le Directeur général de
l'Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et
du travail (Anses)
14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort cedex

Objet : Réalisation d'une analyse de la composition et de la toxicité des tempêtes de sable et de poussière

Selon l'organisation météorologique mondiale, les tempêtes de sable et de poussière sont des phénomènes météorologiques fréquents dans les régions arides et semi-arides qui surviennent en général lorsque des vents forts soulèvent dans l'atmosphère, du fait d'orages ou de dépressions, de grandes quantités de sable et de poussière pouvant parcourir des centaines, voire des milliers de kilomètres.

Fréquentes dans les Antilles Françaises et en Guyane, ces tempêtes de sable et de poussière peuvent également survenir en métropole, entraînant des phénomènes de pollution qui se manifestent notamment par un ciel jaune/orangé et des dépôts de poussières.

Composés de particules grossières, correspondant à la mesure de la fraction granulométrique de diamètre aérodynamique médian compris entre 2,5 et 10 micromètres (PM_{2,5-10}), et de composition chimique et biologique spécifiques, ces tempêtes posent question quant à leur effet sur la santé humaine, à court et à long terme.

A ce titre, et dans le cadre de la mise à jour de ses valeurs guides pour l'air ambiant et publié en septembre 2021, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a recommandé des actions de gestion pour d'autres types de particules telles que les particules apportées par les tempêtes de sable et de poussière en raison des préoccupations sanitaires mises en évidence dans la littérature scientifique.

Au regard de ces éléments, il vous est demandé de :

- documenter la composition des tempêtes de sable et de poussière et plus particulièrement celles touchant la France, et les comparer à la composition des particules habituellement présentes dans l'air ambiant de ces territoires ;
- caractériser l'impact des tempêtes de sable et de poussière sur les concentrations en particules dans l'air extérieur en France et notamment en métropole d'une part, et aux Antilles-Guyane d'autre part, et le comparer à l'impact de la pollution atmosphérique en dehors des périodes de tempête des sables. En fonction des données disponibles, cette caractérisation pourra être élargie à d'autres polluants que vous jugerez pertinents.
- réaliser une revue bibliographique des effets sur la santé humaine liés à l'exposition à la pollution de l'air ambiant résultant des tempêtes de sable et de poussière, et l'identification des personnes sensibles. Dans un esprit One Health, il vous est également demandé de préciser succinctement les effets connus de ces tempêtes sur l'environnement, la flore (notamment concernant le développement des algues sargasses) et la faune.

14 avenue Duquesne – 75350 Paris 07 SP
Tél. 01 40 56 60 00 - www.social-sante.gouv.fr

Le traitement de vos données est nécessaire à la gestion de votre demande et entre dans le cadre des missions confiées aux ministères sociaux.
Conformément au règlement général sur la protection des données (RGPD), vous pouvez exercer vos droits à l'adresse dgs-rgpd@sante.gouv.fr ou par voie postale.
Pour en savoir plus : <https://solidarites-sante.gouv.fr/ministere/article/donnees-personnelles-et-cookies>

A l'issue de cette expertise, vous formulerez les recommandations que ce travail appelle de votre part, en précisant – le cas échéant – les actions de gestion pouvant être mises en œuvre (au niveau local ou national et en particulier les recommandations aux populations) ainsi que les seuils de gestion qui vous apparaissent adaptés. Il est à noter qu'il existe déjà des seuils de gestion pour les particules PM₁₀ (pouvant être notamment constituées de sable et de poussières) dans le dispositif national, permettant de déclencher, le cas échéant, des mesures d'urgence : l'articulation de vos propositions avec ce dispositif pourrait être utilement explicitée.

Je vous remercie de bien vouloir me transmettre votre avis dans les meilleurs délais et au plus tard d'ici le 31 décembre 2023.

Le directeur général de l'énergie et du climat



Laurent MICHEL

Le directeur général adjoint de la santé



Grégory EMERY

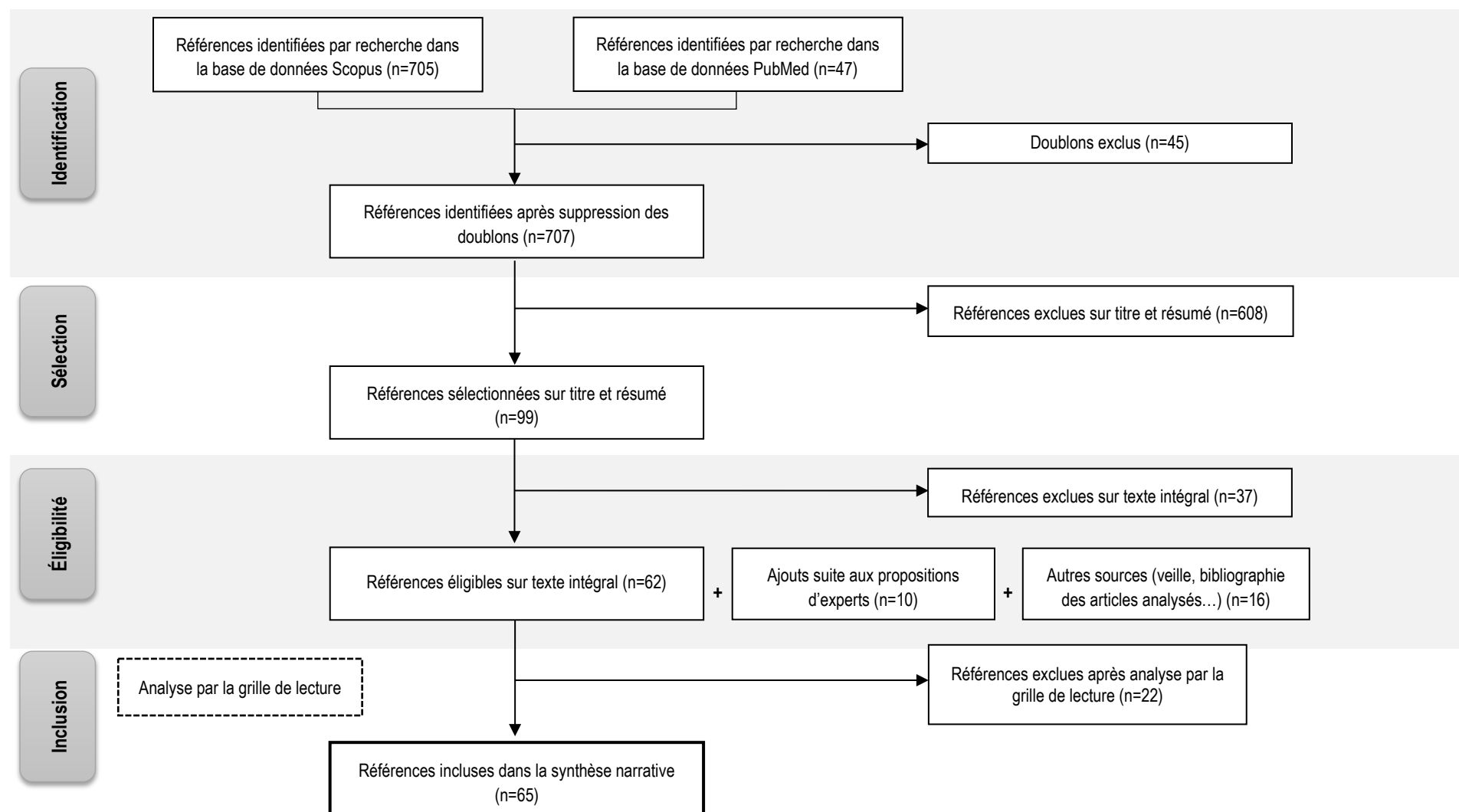
Copie : DGPR, DGAL

Annexe 2. Méthodologie mise en œuvre

- Composition des particules de brumes de sable

Tableau 5. Equation de recherche utilisée pour documenter la composition des particules de brumes de sable

	Bases de données	Type de publications	Limite de date	Bloc 1 commun à toutes les questions (sur titre)	Bloc 2 spécifique à chaque question (sur titre)
Equation de recherche partie « composition »	Scopus, PubMed	Tous	Aucune	desert dust OU sand storms OU sandstorms OU dust episode OU dust outbreaks OU dust events OU dust plumes OU dust storms OU yellow dust OU saharan dust OU calima OU kalima OU harmattan OU african dust OU desert haze OU dust haze OU sand episode OU sand outbreaks OU sand events OU sand plumes OU sand haze OU sandstorm OU sand dust	ET (composition OU characterization OU concentration OU pollutants OU components OU characteristics OU pollens OU endotoxins OU bacteria OU fungi OU virus)



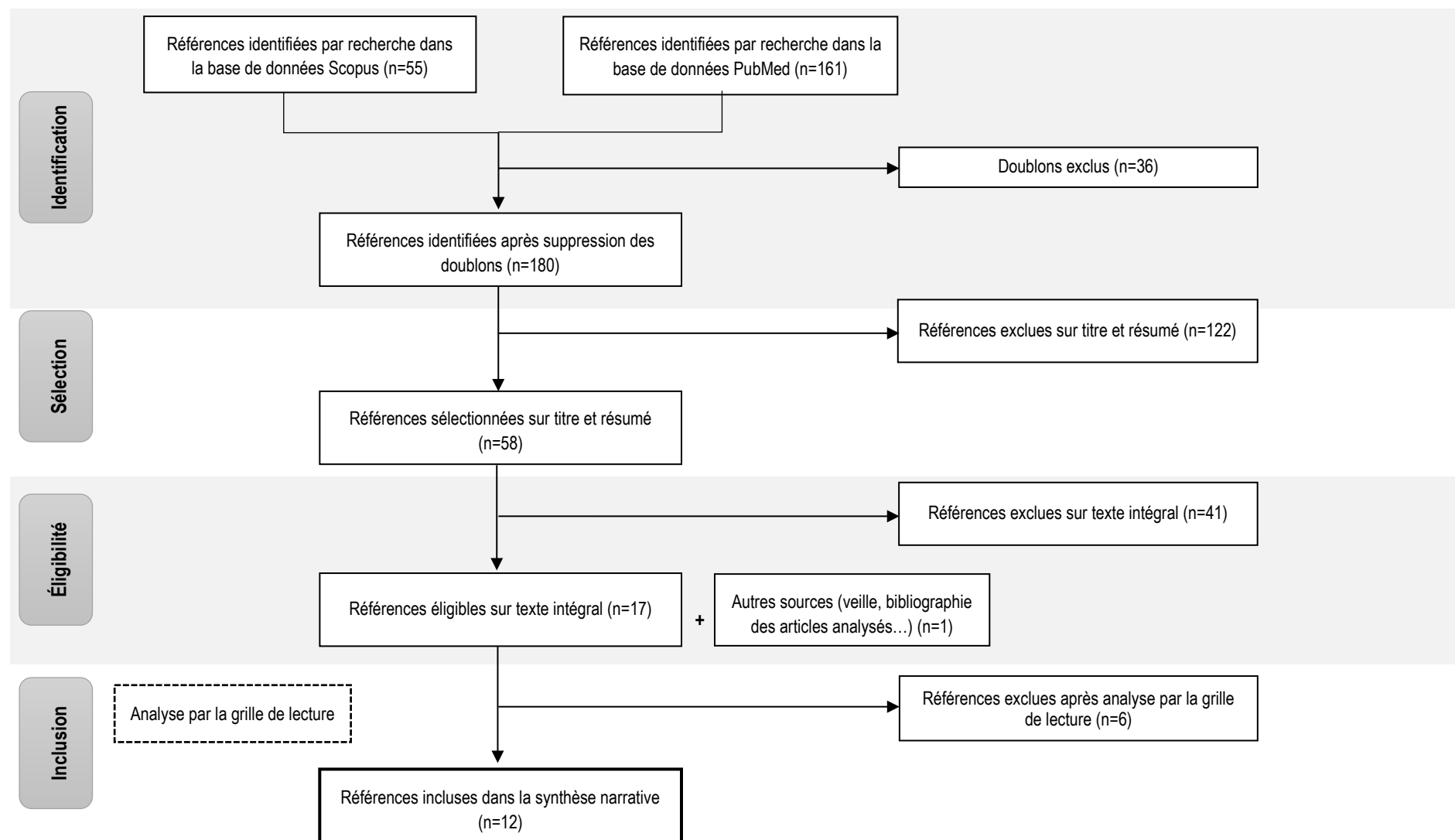
Les critères d'inclusion et d'exclusion lors des phases de sélection et d'éligibilité sont présentés en paragraphe 1.5.

Figure 34. Diagramme de flux correspondant à l'équation de recherche utilisée pour documenter la composition des particules de brumes de sable

- Effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé humaine

Tableau 6. Equation de recherche utilisée pour documenter les effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé humaine

	Bases de données	Type de publications	Limite de date	Bloc 1 commun à toutes les questions (sur titre)	Bloc 2 spécifique à chaque question (sur titre et résumé)
Equation de recherche partie « effets sanitaires »	Scopus, PubMed	Revue	Après 2016	desert dust OU sand storms OU sandstorms OU dust episode OU dust outbreaks OU dust events OU dust plumes OU dust storms OU yellow dust OU saharan dust OU calima OU kalima OU harmattan OU african dust OU desert haze OU dust haze OU sand episode OU sand outbreaks OU sand events OU sand plumes OU sand haze OU sandstorm OU sand dust	<p>ET (health impacts OU health effects OU heart disease OU cardiovascular OU cardiac OU pulmonary function OU asthma OU respiratory OU infectious OU meningitis OU coccidioidomycosis OU oxidative potential OU oxidative stress OU dermatological OU inflammation OU inflammatory OU endocrine OU hematological OU digestive OU accidents OU mental health</p> <p>OU exposure OU mortality OU hospital admissions OU emergency admissions OU emergency room OU hospital clinic OU visits OU calls</p> <p>OU in vitro OU in vivo</p> <p>OU vascular OU lung OU diabetes OU pregnancy OU pregnant OU perinatal OU premature birth OU neurodevelopment outcomes OU dementia OU autism spectrum disorders OU ocular surface OU ocular dryness OU irritant OU irritative OU conjunctivitis OU emergency unit)</p>

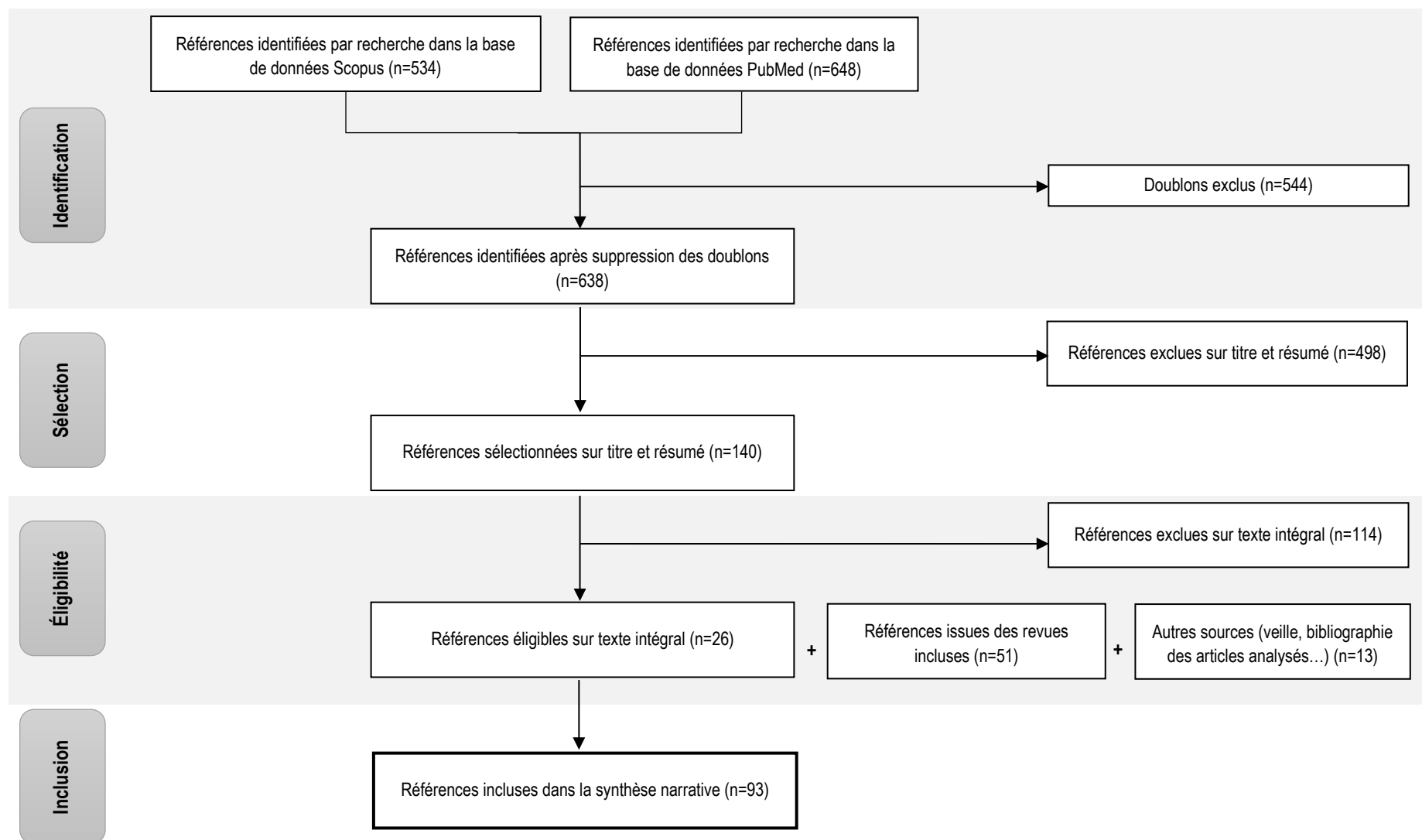


Les critères d'inclusion et d'exclusion lors des phases de sélection et d'éligibilité sont présentés en paragraphe 1.5.

Figure 35. Diagramme de flux correspondant à l'équation de recherche utilisée pour documenter les effets des brumes de sable sur la santé humaine

Tableau 7. Equation de recherche utilisée pour documenter l'impact sanitaire des brumes de sable sur la santé humaine

	Bases de données	Type de publications	Limite de date	Bloc 1 commun à toutes les questions (sur titre)	Bloc 2 spécifique à chaque question (sur titre et résumé)
Equation de recherche partie « impact sanitaire »	Scopus, PubMed	Articles originaux	Après 2019	desert dust OU sand storms OU sandstorms OU dust episode OU dust outbreaks OU dust events OU dust plumes OU dust storms OU yellow dust OU saharan dust OU calima OU kalima OU harmattan OU african dust OU desert haze OU dust haze OU sand episode OU sand outbreaks OU sand events OU sand plumes OU sand haze OU sandstorm OU sand dust	<p>ET (health impacts OU health effects OU heart disease OU cardiovascular OU cardiac OU pulmonary function OU asthma OU respiratory OU infectious OU meningitis OU coccidioidomycosis OU oxidative potential OU oxidative stress OU dermatological OU inflammat* OU endocrine OU hematological OU digestive OU accidents OU mental health</p> <p>OU exposure OU mortality OU hospital admissions OU emergency admissions OU emergency room OU hospital clinic OU visits OU calls</p> <p>OU in vitro OU in vivo</p> <p>OU vascular OU lung OU diabetes OU pregnancy OU pregnant OU perinatal OU premature birth OU neurodevelopment outcomes OU dementia OU autism spectrum disorders OU ocular surface OU ocular dryness OU irritant OU irritative OU conjunctivitis OU emergency unit)</p>



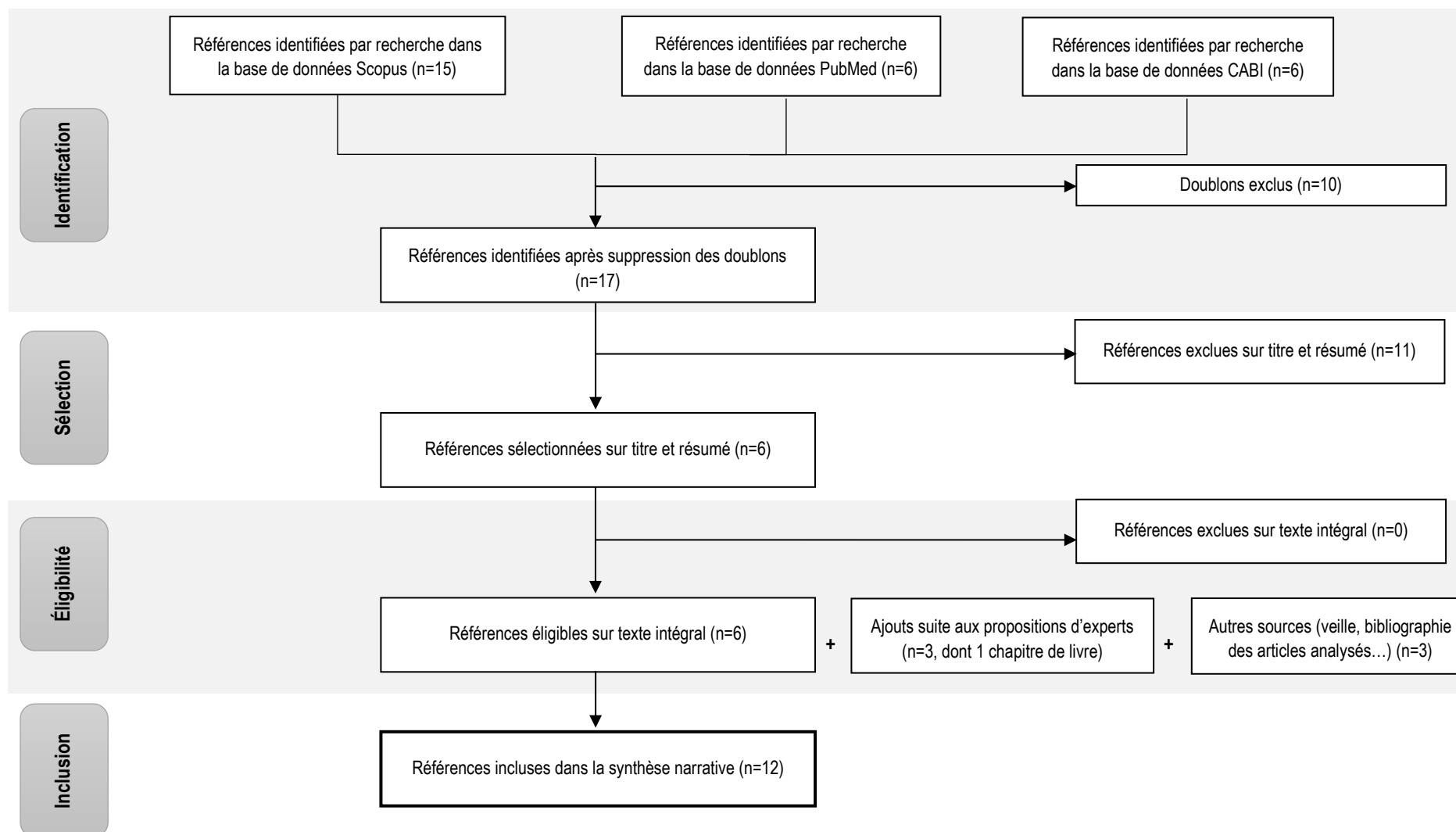
Les critères d'inclusion et d'exclusion lors des phases de sélection et d'éligibilité sont présentés en paragraphe 1.5.

Figure 36. Diagramme de flux correspondant à l'équation de recherche utilisée pour documenter l'impact sanitaire des brumes de sable

- Effets des brumes de sable sur l’environnement, la faune et la flore

Tableau 8. Equation de recherche utilisée pour documenter les effets des particules de brumes de sable sur l’environnement, la faune et la flore

	Bases de données	Type de publications	Limite de date	Bloc 1 commun à toutes les questions (sur titre)	Bloc 2 spécifique à chaque question (sur titre et résumé)
Equation de recherche partie « effets sur l'environnement, la faune et la flore »	Scopus, PubMed, CABI	Revue	Après 2017	desert dust OU sand storms OU sandstorms OU dust episode OU dust outbreaks OU dust events OU dust plumes OU dust storms OU yellow dust OU saharan dust OU calima OU kalima OU harmattan OU african dust OU desert haze OU dust haze OU sand episode OU sand outbreaks OU sand events OU sand plumes OU sand haze OU sandstorm OU sand dust	ET (biodiversity OU ecosystem OU flora OU wildlife OU fauna OU algae OU sargassum OU ocean OU animal OU vegetation OU marine OU coral OU marine OU soil OU water OU plankton OU snow OU lake OU river OU eutrophication OU fungi OU bacteria)
		Articles originaux	Après 2024		



Les critères d'inclusion et d'exclusion lors des phases de sélection et d'éligibilité sont présentés en paragraphe 1.5.

Figure 37. Diagramme de flux correspondant à l'équation de recherche utilisée pour documenter les effets des brumes de sable sur l'environnement, la faune et la flore

Annexe 3. Glossaire

Les termes accompagnés d'un astérisque (*) dans le rapport d'expertise sont définis dans ce glossaire et sont classés par ordre d'apparition dans le texte.

- Pollution aux particules dans l'air ambiant

La surveillance des particules dans l'air ambiant prend communément en considération les fractions particulières appelées PM_{10} et $PM_{2,5}$, qui permettent de caractériser la concentration massique dans l'air exprimée en général en $\mu g.m^{-3}$. Les conventions nommées PM_x pour *Particulate Matter* (matière particulaire en suspension dans l'air) sont définies par la norme NF EN 12341 comme correspondant à la matière particulaire en suspension dans l'air, de taille suffisamment petite pour traverser une tête de prélèvement sélective de fraction granulométrique, avec une efficacité de coupure de 50 % pour un diamètre aérodynamique de $x \mu m$. Ainsi, contrairement à l'idée généralement admise, la fraction PM_x n'est pas uniquement constituée de particules de diamètre inférieur ou égal à $x \mu m$. De part et d'autre de ce diamètre de coupure, les particules sont prélevées avec une efficacité variable représentée par la courbe conventionnelle.

Les PM_{10} ont été définies d'après leur pénétration dans les voies respiratoires, les $PM_{2,5}$ désignent les particules fines et proviennent notamment de processus de combustion et de phénomènes de coagulation entre particules plus petites formées par nucléation, ainsi que de condensation de gaz sur les particules.

D'autres fractions granulométriques sont également rencontrées, mais ne font pas l'objet actuellement de convention spécifique. Il s'agit des particules grossières, d'un diamètre aérodynamique médian compris entre $2,5 \mu m$ et $10 \mu m$, davantage issues de processus mécaniques (remises en suspension, érosions, etc.) dont leur composition est en général très similaire à celle du matériau d'origine. Dans la littérature, les particules submicroniques désignent les particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à $1 \mu m$, parfois notées PM_1 .

Antérieurement, les particules totales en suspension (TSP, *Total Suspended Particles*), désignant l'ensemble des particules en suspension de taille comprise entre $1 \mu m$ et $100 \mu m$, étaient mesurées dans le cadre des réseaux de mesure de la qualité de l'air.

Les particules dites ultrafines, présentant un diamètre inférieur à $100 nm$ ($0,1 \mu m$), résultent notamment de processus de combustion et de nucléation (formation de particules solides ou liquides à partir de précurseurs gazeux, en phase homogène ou hétérogène). Leur durée de vie dans l'air est brève car elles disparaissent en grossissant par coagulation entre elles ou avec des particules plus grosses. Ces particules sont également désignées sous le vocable « nanoparticules », sachant que ce dernier reste néanmoins préférentiellement utilisé, par la communauté scientifique, pour désigner les particules de diamètre inférieur à $100 nm$ issues des nanomatériaux manufacturés.

Les définitions suivantes sont reprises du rapport d'expertise collective de l'Anses relatif aux fractions granulométriques : évaluation des expositions par inhalation d'aérosols (Anses, 2023) :

Aérosols : particules en suspension dans l'air et mélange de gaz (et de vapeur) dans lequel elles sont en suspension. Les particules sont conventionnellement considérées comme en

suspension si leur vitesse limite de chute maximale n'excède pas $0,25 \text{ m.s}^{-1}$. Dans l'air immobile, à la température de 20°C et à la pression atmosphérique normale ($1\,013 \text{ hPa}$), cette vitesse correspond sensiblement à celle atteinte par une sphère de diamètre $100 \mu\text{m}$ et de masse volumique 1000 kg.m^{-3} .

Particules fines : particules provenant notamment de processus de combustion et de phénomènes de coagulation par suite de chocs entre particules plus petites formées par nucléation, ainsi que de condensation de gaz sur les particules.

Particules ultrafines (PUF) : désigne généralement les particules de taille inférieure à $0,1 \mu\text{m}$ (ou 100 nm), également appelées nanoparticules. Elles résultent notamment de processus de combustion et de nucléation (formation de particules solides ou liquides à partir de précurseurs gazeux, en phase homogène ou hétérogène).

Particules grossières : particules issues de processus mécaniques (remises en suspension, érosions, etc.) et leur composition est en général très similaire à celle du matériau d'origine.

PM_x : matière particulaire en suspension dans l'air, de taille suffisamment petite pour traverser une tête de prélèvement sélective de fraction granulométrique, avec une efficacité de coupure de 50 % pour un diamètre aérodynamique de $x \mu\text{m}$ ISO 16000-37 (ISO, 2019)).

- **PM₁₀** : les particules passant dans un orifice d'entrée calibré tel que défini dans la méthode de référence pour l'échantillonnage et la mesure du PM₁₀, norme EN 12341, avec un rendement de séparation de 50 % pour un diamètre aérodynamique de $10 \mu\text{m}$;
- **PM_{2,5}** : les particules passant dans un orifice d'entrée calibré tel que défini dans la méthode de référence pour l'échantillonnage et la mesure du PM_{2,5}, norme EN 14907, avec un rendement de séparation de 50 % pour un diamètre aérodynamique de $2,5 \mu\text{m}$.
- Couche limite (atmosphérique ou marine) :

La couche limite atmosphérique (ou couche limite planétaire) est la partie de l'atmosphère la plus proche du sol. La troposphère libre est localisée au-dessus de la couche limite atmosphérique (environ à 2 km d'altitude le jour) (Figure 38). La troposphère libre est un environnement généralement stable où l'influence de la surface (terrestre ou marine) a lieu sur le temps long, contrairement à la couche limite atmosphérique qui réagit sur le temps court.

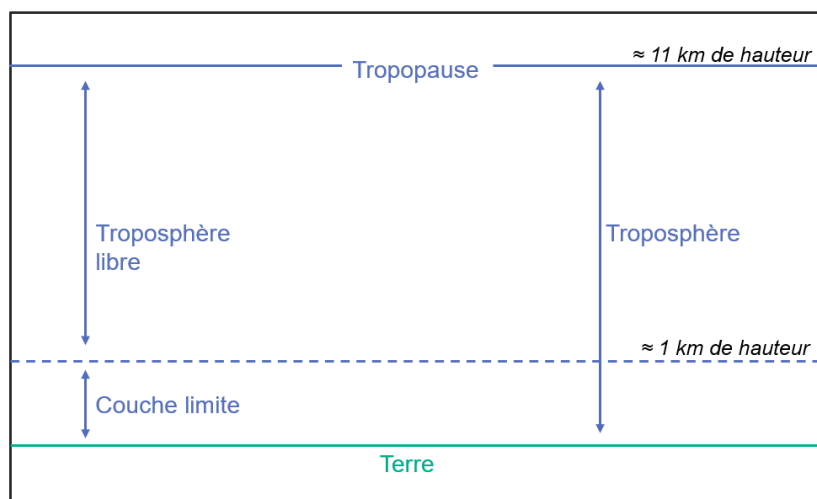


Figure 38. Schéma représentant la couche limite

La couche limite marine est la partie de la couche limite atmosphérique en contact direct avec la surface de l'océan.

La hauteur de la couche limite (en anglais : *boundary layer height (BLH)*) varie selon la température, la nature de la surface, l'intensité du vent, etc. De ce fait, elle est variable selon le moment de la journée.

- Bactéries :

Les bactéries sont des micro-organismes formés d'une seule cellule, sans noyau, à structure très simple, considéré comme ni animal ni végétal (Le Robert, s. d.). La grande majorité des espèces bactériennes mesurent entre 1 et 10 μm de long, avec une moyenne autour de 1 à 2 μm . Les bactéries d'importance médicale sont classées en deux grands groupes : les Gram positif et les Gram négatif selon la constitution de leur paroi (présence ou non de peptidoglycanes) qui leur confère une couleur violette ou rouge à la coloration de Gram. Les bactéries peuvent avoir des propriétés infectieuses, allergéniques ou toxiques. La grande majorité des bactéries existantes ne sont ni infectieuses, i.e. ne peuvent pas se multiplier dans un hôte (humain, animal ou végétal), ni toxiques, i.e. ne produisent pas de toxines, mais peuvent avoir des propriétés allergéniques et/ou irritatives pour le système respiratoire. Les bactéries Gram négatives, même non-viables, sont sources d'endotoxines.

- Champignons microscopiques :

Les champignons microscopiques, aussi appelés moisissures, sont des eucaryotes pluricellulaires omniprésents dans l'air ambiant (spores et/ou fragments d'hyphes). Ils font partie des organismes vivants les plus divers et les plus importants sur le plan écologique. Ils interviennent dans des processus cruciaux dans les écosystèmes terrestres en tant que décomposeurs de tissus morts (saprotrophes), partenaires mutualistes (champignons ectomycorhiziens, éricoïdes, endophytes et lichénisés) et en tant qu'agents pathogènes de presque tous les organismes multicellulaires terrestres. Leurs concentrations dans l'air ambiant évoluent selon les saisons (Abrego *et al.* 2024).

La taille des spores et fragments d'hyphes²⁷ aéroportés ne dépasse généralement pas 10 µm. Il est à noter que dans certaines conditions, certains champignons peuvent produire des mycotoxines dont certaines sont cancérogènes.

- Endotoxines :

Les endotoxines sont des molécules complexes libérées sous forme de particules dans l'air lors de la division cellulaire et de la mort de bactéries, et dans une moindre mesure lors de leur multiplication (Anses 2016; 2024a). Ce sont des composants de la membrane externe de bactéries à Gram négatif (par exemple : *Enterobacteriaceae* ou *Pseudomonadaceae*) et de cyanobactéries (Duquenne, Marchand, et Duchaine 2012; Anses 2016). Ces molécules, composées de protéines, de lipides et de lipopolysaccharides (LPS), jouent un rôle important à la fois dans l'intégrité cellulaire et dans l'interaction de la cellule avec l'environnement extracellulaire (Liebers, Raulf-Heimsoth, et Brüning 2008; Duquenne, Marchand, et Duchaine 2012). La présence d'endotoxines dans l'air ambiant est liée à la présence de bactéries Gram négatives ou de fragments de parois cellulaires de ces bactéries dans les particules de poussières organiques en suspension dans l'air (Health Council of the Netherlands 2010). L'inhalation de grandes quantités (> 250 Unités d'endotoxines / m³) peut entraîner la production de cytokines pro-inflammatoires et peut provoquer de la fièvre et des symptômes de type grippal (*Organic Dust Toxic Syndrom* (ODTS)). Des effets chroniques (déclin des fonctions respiratoires et/ou irritation de la peau et des cavités nasales) sont aussi reportés (Anses 2024a)²⁸.

- Virus :

Les virus sont composés d'une capsid (structure protéique) et du matériel génétique (ADN ou ARN). Cette nucléocapsid peut être soit nue (virus non-enveloppés) soit entourée d'une enveloppe phospholipidique (virus enveloppés).

Ils ne peuvent se reproduire qu'à l'intérieur d'une cellule vivante car ils n'ont pas de métabolisme propre. Leur taille se situe entre 10 et 400 nm.

Les virus sont omniprésents dans les environnements aquatiques naturels où ils représentent l'entité biologique la plus importante. Leur abondance, dominée par les bactériophages, varie généralement entre 10⁷ et 10⁸ particules par mL (Bergh *et al.* 1989).

En raison de la nature protéinique de leur capsid, les virus non-enveloppés sont plus stables dans l'environnement que les virus enveloppés, dans la mesure où les protéines sont beaucoup plus résistantes aux agents physico-chimiques présents dans l'environnement que les phospholipides.

Les virus non-enveloppés font partie, avec les mycobactéries, les oocytes de protozoaires, les spores bactériennes et les prions, des formes de vie les plus stables dans des environnements complexes. Il faut des températures élevées (plus de 60°C) ou des biocides puissants (dérivés

²⁷ Filament constitutif du mycélium des champignons supérieurs et des lichens (dictionnaire Le Robert).

²⁸ Un rapport récent de l'Anses recommande une VLCT-15min de 20 UE/m³ (2 ng/m³) afin de prévenir une diminution de 1 % du VEMS et une VLEP-8h de 20 UE/m³ (2 ng/m³) pour prévenir une diminution de 1 % du VEMS pour une exposition long terme aux endotoxines (Anses 2024a).

chlorés ou halogénés, phénols, aldéhydes, etc.) à des concentrations élevées et appliquées de façon prolongée pour obtenir un effet virucide (Pozzetto *et al.* 2023).

- Pollens :

Le grain de pollen est le gamétophyte mâle et joue ainsi un rôle essentiel dans la reproduction de la majorité des plantes. Selon les espèces, il est transporté soit par les insectes (plantes entomophiles), soit par le vent (plantes anémophiles). Les pollens allergisants anémophiles sont à l'origine de la majorité des pollinoses, parce qu'ils sont émis dans l'atmosphère en plus grandes quantités et entrent naturellement en contact avec les muqueuses respiratoires et oculaires du fait de leur taille plus réduite.

Les allergènes du pollen sont localisés à l'intérieur du grain, principalement dans le cytoplasme. Les grains de pollen contiennent également des composés ayant des effets pro-inflammatoires ou adjuvants à la réaction allergique qui peuvent augmenter l'inflammation des voies aériennes induite par le pollen en relation notamment avec le stress oxydant (Speranza et Scoccianti 2012). Les grains de pollen peuvent être amenés à libérer leur contenu suite à différents événements, notamment le contact avec l'eau et les muqueuses (Anses 2014). La taille des grains de pollen, en milieu tempéré, varie entre 5 µm (pollen de *Myosotis*) et 250 µm (conifères), la taille moyenne d'un grain de pollen anémogame se situant généralement entre 25 et 30 µm (Anses 2014). Les allergènes de pollen peuvent être parfois détectés dans des environnements libres de tout grain de pollen y compris en dehors des périodes de pollinisation (Takahashi *et al.* 1991; Wang Q. *et al.* 2008). Toutefois, ces résultats méritent d'être nuancés car ils pourraient être liés à des conditions atmosphériques et/ou des espèces végétales particulières (Buters *et al.* 2012; Miguel *et al.* 2006).

Annexe 4. Tableau périodique des éléments

GRUPE

IA

1

IIA

1

2

III

IV

V

VI

VII

VIII

IX

X

XI

XII

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

7

1

2

3

4

5

6

Source : <https://www.letudiant.fr/>

Annexe 5. Détails des études épidémiologiques incluses dans la synthèse des effets de l'exposition aux brumes de sable sur la santé humaine

• Etudes sur la mortalité totale

Tableau 9. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité totale les jours de brumes de sable et les jours sans brumes de sable en lien avec les fractions PM₁₀, PM_{2,5-10} et PM_{2,5}

Etude						Principaux résultats									
Auteur	Région	Période	Méthode	Mortalité	Lag	BS	PM ₁₀			PM _{2,5-10}			PM _{2,5}		
							Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur
Perez <i>et al.</i> (2008)	Espagne (Barcelone)	2003-2004	Case-crossover	Naturelle ; ≥ 75 ans	1					☑ (NS)	☑ (S)	S	☑ (S)	☑ (S)	NS
				Naturelle ; <75 ans	1					☑ (NS)	☑ (S)	S	☑ (S)	☑ (NS)	S
Jiménez <i>et al.</i> (2010)	Espagne (Madrid)	2003-2005	GLM stepwise	Naturelle ; ≥ 75 ans	3/2		NA	☑ (S)	NA	NA	NA	NA	☑ (S)	NA	NA
Zauli-Sajani <i>et al.</i> (2010)	Italie (Emilie Romagne)	2002-2006	Case-crossover	Respiratoire ; ≥ 75 ans	1	☑ (NS)	→ (S)	→ (NS)	NS						
				Respiratoire ; ≥ 75 ans ; été	1	☑ (NS)	☑ (S)	☑ (NS)	NS						
Mallone <i>et al.</i> (2011)	Italie (Rome)	2001-2004	Case-crossover	Naturelle	0-2		☑ (S)	☑ (NS)	NS	☑ (S)	☑ (NS)	NS	☑ (NS)	☑ (NS)	NS
Samoli <i>et al.</i> (2011)	Grèce (Athènes)	2001-2006	Times series	Naturelle	1	☑ (S)	☑ (S)	→ (NS)	S (-)						
				Naturelle ; ≥ 75 ans	1	☑ (S)	☑ (S)	→ (NS)	S (-)						
Diaz <i>et al.</i> (2012)	Espagne (Madrid)	2003-2005	Case-crossover	Naturelle	1		☑ (S)	☑ (S)	NS						
				Naturelle ; été	1		☑ (NS)	☑ (S)	S						

Etude						Principaux résultats									
Auteur	Région	Période	Méthode	Mortalité	Lag	BS	PM ₁₀			PM _{2,5-10}			PM _{2,5}		
							Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur
Neophytou <i>et al.</i> (2013)	Chypre (Nicosie)	2004-2007	Times series	Naturelle	0		☒ (NS)	☒ (NS)							
Stafoggia <i>et al.</i> (2016)	Europe du Sud (13 villes)	2011-2010	Times series	Naturelle	0-1	☒ (S)	☒ (S)	☒ (S)	NS						
Diaz <i>et al.</i> (2017)	Espagne (Nord)	2004-2009	GLM backwad stepwise	Naturelle	2		☒ (S)	NS							
	Espagne (Nord-Est)	2004-2009	GLM backwad stepwise	Naturelle	ND		NS	NS							
	Espagne (Nord-Ouest)	2004-2009	GLM backwad stepwise	Naturelle	3		NS	☒ (S)							
	Espagne (Centre)	2004-2009	GLM backwad stepwise	Naturelle	2		NS	☒ (S)							
	Espagne (Sud-Est)	2004-2009	GLM backwad stepwise	Naturelle	1 (jours sans BS)		☒ (S)	→ (S)							
	Espagne (Sud-Ouest)	2004-2009	GLM backwad stepwise	Naturelle			☒ (S)	☒ (S)							
	Espagne (Est)	2004-2009	GLM backwad stepwise	Naturelle			NS	NS							
	îles Canaries (Las Palmas)	2004-2009	GLM backwad stepwise	Naturelle									NS	☒ (S)	
	Îles Baléares	2004-2009	GLM backwad stepwise	Naturelle			NS	NS							
Tobias <i>et al.</i> (2020)	Italie (Rome)	2005-2015	Times series	Naturelle	1	☒ (NS)	☒ (S)	☒ (S)	NS						

NA = non applicable ; NS = non significatif ; S = significatif ; BS = brumes de sable.

Les cases restées vierges indiquent que l'analyse n'a pas été réalisée ou que le résultat n'est pas disponible.

Mortalité naturelle : mortalité toutes causes non accidentelles.

Tableau 10. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité totale en distinguant les PM d'origine désertique et non désertique pour la fraction PM₁₀

Etude						Principaux résultats		
Auteur	Région	Période	Méthode	Mortalité	Lag	PM ₁₀ non désertique	PM ₁₀ désertique	Différence entre PM ₁₀ désertique et non désertique
Stafoggia <i>et al.</i> (2016)	Europe du Sud (13 villes)	2011-2010	Times series	Naturelle	0-1	↗ (S)	↗ (S)	NS
Renzi <i>et al.</i> (2017)	Sicile (4 villes)	2006-2012	Times series	Naturelle	0-1	↗ (NS)	↗ (S)	NS
	Sicile (3 zones)	2006-2012	Times series	Naturelle	0-5		↗ (S)	NA
Renzi <i>et al.</i> (2018)	Sicile	2006-2012	Times series	Naturelle	0-1	↗ (S)	↗ (S)	NS
		2006-2012	Times series	Naturelle	2-5	↗ (S)	↗ (S)	S
		2006-2012	Times series	Naturelle	0-5	↗ (S)	↗ (S)	S
Tobias <i>et al.</i> (2020)	Italie (Rome)	2005-2015	Times series	Naturelle	1	↗ (S)	↗ (NS)	NS

NA = non applicable ; NS = non significatif ; S = significatif.

Les cases restées vierges indiquent que l'analyse n'a pas été réalisée ou que le résultat n'est pas disponible.

Mortalité naturelle : mortalité toutes causes non accidentelles.

Aucun résultat n'a été relevé pour les PM_{2,5-10} et PM_{2,5}.

- Etudes sur la mortalité cardiovasculaire

Tableau 11. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité cardiovasculaire les jours de brumes de sable et les jours sans brumes de sable en lien avec les fractions PM₁₀, PM_{2,5-10} et PM_{2,5}

Etude						Principaux résultats									
Auteur	Région	Période	Méthode	Mortalité	Lag	BS	PM ₁₀			PM _{2,5-10}			PM _{2,5}		
							Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur
Jimenez <i>et al.</i> (2010)	Espagne (Madrid)	2003-2005	GLM stepwise	Cardiovasculaire ; ≥ 75 ans	3/2		NA	☑ (S)	NA	NA	NA	NA	☑ (S)	NA	NA
Zauli-Sajani <i>et al.</i> (2010)	Italie (Emilie Romagne)	2002-2006	Case-crossover	Cardiovasculaire ; ≥ 75 ans	1	☑ (NS)	☑ (NS)	☒ (NS)	NS						
				Respiratoire ; ≥ 75 ans ; été	1	☑ (NS)	☑ (NS)	☒ (NS)	NS						
Mallone <i>et al.</i> (2011)	Italie (Rome)	2001-2004	Case-crossover	Cardiovasculaire	0-2		☑ (NS)	☑ (S)	S	☑ (NS)	☑ (S)	S	☑ (NS)	☒ (NS)	NS
				Cardiaque	0-2		☑ (NS)	☑ (S)	S	☑ (NS)	☑ (S)	S	☑ (NS)	☑ (NS)	NS
				Cérébrovasculaire	0		☑ (NS)	☑ (NS)	NS	☑ (NS)	☑ (S)	NS	☒ (NS)	☒ (NS)	NS
Samoli <i>et al.</i> (2011)	Grèce (Athènes)	2001-2006	Times series	Cardiovasculaire	1		☑ (S)	→ (NS)	S (-)						
				Cardiovasculaire ≥ 75 ans	1	☑ (S)	☑ (S)	☒ (NS)	S (-)						
Perez <i>et al.</i> (2012)	Espagne (Barcelone)	2003-2007	Case-crossover	Cardiovasculaire	1					☑ (S)	☑ (S)	S (+)	☑ (S)	☑ (S)	NS
				Cérébrovasculaire	1					☑ (NS)	☑ (NS)	NS	☑ (NS)	☑ (NS)	NS
Diaz <i>et al.</i> (2012)	Espagne (Madrid)	2003-2005	Case-crossover	Cardiovasculaire	1		☑ (S)	☑ (S)	NS						
				Cardiovasculaire ; été	1		☑ (S)	☑ (S)	NS						
				Cérébrovasculaire	1		☑ (NS)	☑ (NS)	NS						
				Cérébrovasculaire ; été	1		☑ (NS)	☑ (NS)	NS						
Neophytou <i>et al.</i> (2013)	Chypre (Nicosie)	2004-2007	Times series	Cardiovasculaire	0		☑ (NS)	☑ (S)							

NA = non applicable ; NS = non significatif ; S = significatif ; BS = brumes de sable.

Les cases restées vierges indiquent que l'analyse n'a pas été réalisée ou que le résultat n'est pas disponible.

Tableau 12. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité cardiovasculaire en distinguant les PM d'origine désertique et non désertique pour la fraction PM₁₀

Etude							Principaux résultats		
Auteur	Région	Période	Méthode	Mortalité	Lag	BS	PM ₁₀ non désertique	PM ₁₀ désertique	Différence entre PM ₁₀ désertique et non désertique
Stafoggia <i>et al.</i> (2016)	Europe du Sud (13 villes)	2011-2010	Times series	Cardiovasculaire	0-1	NA	↗ (NS)	↗ (S)	NS
Renzi <i>et al.</i> (2017)	Sicile (4 villes)	2006-2012	Times series	Cardiovasculaire	0-1	NA	↗ (S)	↗ (NS)	NS
	Sicile (3 zones)	2006-2012	Times series	Cardiovasculaire	0-5	NA	ND	↗ (S)	
Renzi <i>et al.</i> (2018)	Sicile	2006-2012	Times series	Cardiovasculaire	0-1		↗ (S)	↗ (S)	NS
					2-5		↗ (S)	↗ (S)	S
					0-5		↗ (S)	↗ (S)	S

NA = non applicable ; NS = non significatif ; S = significatif ; BS = brumes de sable.
Les cases restées vierges indiquent que l'analyse n'a pas été réalisée ou que le résultat n'est pas disponible.
Aucun résultat n'a été relevé pour les PM_{2,5-10} et PM_{2,5}.

- Etudes sur la mortalité respiratoire

Tableau 13. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité respiratoire les jours de brumes de sable et les jours sans brumes de sable en lien avec les fractions PM₁₀, PM_{2,5-10} et PM_{2,5}

Etude						Principaux résultats									
Auteur	Région	Période	Méthode	Mortalité	Lag	BS	PM ₁₀			PM _{2,5-10}			PM _{2,5}		
							Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur
Jimenez <i>et al.</i> (2010)	Espagne (Madrid)	2003-2005	GLM stepwise	Respiratoire ; ≥ 75 ans	1-4		NA	↗ (S)	NA	NA	NA	NA	↗ (S)	NA	NA
Zauli-Sajani <i>et al.</i> (2010)	Italie (Emilie Romagne)	2002-2006	Case-crossover	Respiratoire ; ≥ 75 ans	1	↗ (NS)	↗ (NS)	→ (NS)	NS						
				Respiratoire ; ≥ 75 ans ; été	1	↘ (NS)	↗ (NS)	↗ (NS)	NS						
Mallone <i>et al.</i> (2011)	Italie (Rome)	2001-2004	Case-crossover	Respiratoire	0-5		↗ (NS)	↗ (NS)	NS	↗ (NS)	↗ (S)	NS	↘ (NS)	↗ (NS)	NS
Samoli <i>et al.</i> (2011)	Grèce (Athènes)	2001-2006	Times series	Respiratoire	1		↗ (S)	↘ (NS)	S (-)						
			Times series	Respiratoire ; ≥ 75 ans	1		↗ (S)	↗ (NS)	S (-)						
Perez <i>et al.</i> (2012)	Espagne (Barcelone)	2003-2007	Case-crossover	Respiratoire	1					↗ (S)	↗ (NS)	NS	↗ (S)	↗ (NS)	NS
Diaz <i>et al.</i> (2012)	Espagne (Madrid)	2003-2005	Case-crossover	Respiratoire	1		↗ (S)	↗ (S)	NS						
				Respiratoire ; été	1		↘ (NS)	→ (NS)	NS						
Neophytou <i>et al.</i> (2013)	Chypre (Nicosie)	2004-2007	Times series	Respiratoire	0		↘ (NS)	↘ (NS)							

NA = non applicable ; NS = non significatif ; S = significatif ; BS = brumes de sable.

Les cases restées vierges indiquent que l'analyse n'a pas été réalisée ou que le résultat n'est pas disponible.

Tableau 14. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant la mortalité respiratoire en distinguant les PM d'origine désertique et non désertique pour la fraction PM₁₀

Etude						Principaux résultats		
Auteur	Région	Période	Méthode	Mortalité	Lag	PM ₁₀ non désertique	PM ₁₀ désertique	Différence entre PM ₁₀ désertique et non désertique
Stafoggia <i>et al.</i> (2016)	Europe du Sud (13 villes)	2011-2010	Times series	Respiratoire	0-5	↗ (S)	↗ (NS)	NS
Renzi <i>et al.</i> (2017)	Sicile (4 villes)	2006-2012	Times series	Respiratoire	0-5	→ (NS)	↗ (NS)	NS
	Sicile (3 zones)	2006-2012	Times series	Respiratoire	0-5		↗ (NS)	
Renzi <i>et al.</i> (2018)	Sicile	2006-2012	Times series	Respiratoire	0-1	↗ (S)	↗ (S)	NS
					2-5	↗ (S)	↗ (S)	NS
					0-5	↗ (S)	↗ (S)	NS

NA = non applicable ; NS = non significatif ; S = significatif.
Les cases restées vierges indiquent que l'analyse n'a pas été réalisée ou que le résultat n'est pas disponible.
Aucun résultat n'a été relevé pour les PM_{2,5-10} et PM_{2,5}.

- Etudes sur les hospitalisations et passages aux urgences pour causes cardiovasculaires

Tableau 15. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant les hospitalisations et passages aux urgences pour causes cardiovasculaires les jours de brumes de sable et les jours sans brumes de sable en lien avec les fractions PM₁₀, PM_{2,5-10} et PM_{2,5}

Etude							Principaux résultats								
Auteur	Région	Période	Méthode	Hospitalisations / Passages aux urgences	Lag	BS	PM ₁₀			PM _{2,5-10}			PM _{2,5}		
							Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur
Middleton <i>et al.</i> (2008)	Chypre (Nicosie)	1995-2004	Times series	Cardiovasculaires	0	NA	↗ (S)	↗ (NS)							
Alessandrini <i>et al.</i> (2013)	Italie (Rome)	2001-2004	Times series	Cardiopathies	0	NA	↗ (NS)	↗ (NS)	NS	↗ (S)	↗ (NS)	NS	↗ (NS)	↗ (NS)	NS
					0-1	NA	↗ (S)	↗ (NS)	NS	↗ (S)	↗ (S)	NS	↗ (NS)	↗ (NS)	NS
					0-5	NA	↗ (S)	↗ (NS)	NS	↘ (NS)	↗ (S)	S	↘ (NS)	↗ (NS)	NS
Alessandrini <i>et al.</i> (2013)	Italie (Rome)	2001-2004	Times series	Cérébrovasculaires	0	NA	↗ (NS)	↗ (S)	S	↗ (NS)	↗ (NS)	NS	↘ (NS)	↗ (NS)	NS
					0-1	NA	↗ (NS)	↗ (NS)	NS	→ (NS)	↗ (NS)	NS	↘ (NS)	↗ (NS)	NS
					0-5	NA	↘ (NS)	↗ (NS)	NS	↘ (NS)	↗ (S)	S	↘ (NS)	↘ (NS)	NS
Reyes <i>et al.</i> (2017)	Espagne (Madrid)	2003-2005	Times series Stepwise	Cardiovasculaires	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	↗ (S)	NA	NA

NA = non applicable ; NS = non significatif ; S = significatif ; BS = brumes de sable.

Les cases restées vierges indiquent que l'analyse n'a pas été réalisée ou que le résultat n'est pas disponible.

Tableau 16. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant les hospitalisations et passages aux urgences pour causes cardiovasculaires en distinguant les PM d'origine désertique et non désertique pour la fraction PM₁₀

Etude						Principaux résultats		
Auteur	Région	Période	Méthode	Hospitalisations / Passages aux urgences	Lag	PM ₁₀ non désertique	PM ₁₀ désertique	Différence entre PM ₁₀ désertique et non désertique
Stafoggia <i>et al.</i> (2016)	Europe du Sud (13 villes)	2011-2010	Times series	Cardiovasculaires ; ≥ 15 ans	0-1	↗ (NS)	↗ (NS)	
Renzi <i>et al.</i> (2017)	Sicile (4 villes)	2006-2012	Times series	Cardiovasculaires	0-5	↗ (S)	↘ (NS)	
	Sicile (3 zones)	2006-2012	Times series	Cardiovasculaires	0-5		↗ (NS)	

NA = non applicable ; NS = non significatif ; S = significatif.

Les cases restées vierges indiquent que l'analyse n'a pas été réalisée ou que le résultat n'est pas disponible.

Aucun résultat n'a été relevé pour les PM_{2,5-10} et PM_{2,5}.

- Etudes sur les hospitalisations et passages aux urgences pour causes respiratoires

Tableau 17. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant les hospitalisations et passages aux urgences pour causes respiratoires les jours de brumes de sable et les jours sans brumes de sable en lien avec les fractions PM₁₀, PM_{2,5-10} et PM_{2,5}

Etude						Principaux résultats									
Auteur	Région	Période	Méthode	Hospitalisations / Passages aux urgences	Lag	BS	PM ₁₀			PM _{2,5-10}			PM _{2,5}		
							Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur
Middleton <i>et al.</i> (2008)	Chypre (Nicosie)	1995-2004	Times series	Respiratoires	0		☑ (NS)	☑ (NS)							
Samoli <i>et al.</i> (2011)	Grèce (Athènes)	2001-2004	Times series	Asthme ; 0-14 ans	0		☑ (NS)	☑ (S)	NS						
Alessandrini <i>et al.</i> (2013)	Italie (Rome)	2001-2004	Times series	Respiratoires ; ≥ 15 ans	0-1		☑ (NS)	☑ (NS)	NS	☑ (NS)	☑ (NS)	NS	☒ (NS)	☑ (NS)	NS
					0-5		☑ (NS)	☑ (NS)	NS	☒ (NS)	☑ (S)	S	☒ (NS)	☒ (NS)	NS
				Respiratoires ; 0-14 ans	0-1		☑ (NS)	☒ (NS)	NS	☒ (NS)	☑ (NS)	NS	☑ (NS)	☑ (NS)	NS
					0-5		☑ (NS)	☒ (NS)	NS	☒ (NS)	☑ (S)	NS	☒ (NS)	☒ (NS)	NS
Cadelis <i>et al.</i> (2014)	Guadeloupe	2011	Times series	Asthme ; 5-15 ans	0		☑ (NS)	☑ (S)	S	☑ (NS)	☑ (S)	S	☑ (NS)	☑ (NS)	NS
					0-1		☑ (NS)	☑ (S)		☑ (NS)	☑ (S)		☑ (NS)	☑ (NS)	
				Asthme ; 5-8 ans	0		☑ (NS)	☑ (S)		☑ (NS)	☑ (S)				
					0-1		☑ (NS)	☑ (S)		☑ (NS)	☑ (S)				
				Asthme ; 9-11 ans	0		☑ (NS)	☑ (S)		☑ (NS)	☑ (S)				
					0-1		☑ (NS)	☑ (S)		☑ (NS)	☑ (S)				
				Asthme ; 12-15 ans	0		☑ (NS)	☑ (S)		☑ (NS)	☑ (S)				
					0-1		☑ (NS)	☑ (S)		☑ (NS)	☑ (S)				
Reyes <i>et al.</i> (2013)	Espagne (Madrid)	2003-2005	Times series Stepwise	Respiratoires	0/1	NA	NA	☑ (NS)	NA	NA	NA	NA	☑ (S)	NA	NA
					5	NA	NA	☑ (S)	NA	NA	NA	☑ (S)	NA	NA	
					7	NA	NA	NA	NA	NS	☑ (S)	NA	NA	NA	NA
Trianti <i>et al.</i> (2017)	Grèce (Athènes)	2001-2006	Times series	Respiratoires ; passages aux urgences	0	☑ (S)	NA	NA							

Etude						Principaux résultats									
Auteur	Région	Période	Méthode	Hospitalisations / Passages aux urgences	Lag	BS	PM ₁₀			PM _{2,5-10}			PM _{2,5}		
							Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur	Jours sans BS	Jours avec BS	Effet modificateur
				Respiratoires ; hospitalisations	0	☑ (NS)	NA	NA							
				Asthme	0	☑ (S)	NA	NA							
				BPCO	0	↑ (S)	NA	NA							
				Infections respiratoires	0	↑ (S)	NA	NA							
Menendez <i>et al.</i> (2017)	Îles Canaries (Grande Canarie)	2010	Anova	Asthme	NA	→ (NS)									
				BPCO	NA	→ (NS)									
				Pneumonie	NA	☒ (S)									
Lorentzou <i>et al.</i> (2019)	Crète (Héraklion)	Mars 2018	Anova	BPCO	NA	☑ (NS)									
Gutierrez <i>et al.</i> (2020)	Etats-Unis (Miami)	2013-2016	Régression logistique	BPCO	1	☑ (S)									
Silva <i>et al.</i> (2021)	Portugal	2006-2015	Distributed Lag Nonlinear Model (DLNM)	Respiratoires		☑ (S)									
Lopez-Villarubia <i>et al.</i> (2021)	Îles Canaries (Tenerife)	2001-2005	Times series	Respiratoires	0	☑ (S)	☑ (NS)	☑ (S)	NS	☑ (NS)	☑ (NS)	NS	☑ (NS)	☑ (S)	NS
				Asthme		☑ (NS)	↑ (NS)	☒ (NS)	S	↑ (NS)	☒ (NS)	NS	↑ (NS)	☒ (NS)	NS
				BPCO		☑ (S)	☑ (NS)	☑ (S)	NS	☑ (NS)	☑ (S)	NS	☒ (NS)	☑ (S)	NS
	Îles Canaries (Grande Canarie)			Respiratoires		→ (NS)	☒ (NS)	☑ (NS)	NS	☒ (NS)	☑ (NS)	NS	☒ (NS)	☑ (S)	NS
				Asthme		☑ (NS)	↑ (NS)	☑ (NS)	NS	☒ (NS)	☑ (NS)	NS	↑ (NS)	☑ (NS)	S
				BPCO		→ (NS)	☑ (NS)	☑ (S)	NS	☒ (NS)	☑ (S)	NS	☑ (NS)	☑ (S)	NS

NA = non applicable ; NS = non significatif ; S = significatif ; BS = brumes de sable.

Les cases restées vides indiquent que l'analyse n'a pas été réalisée ou que le résultat n'est pas disponible.

Tableau 18. Etudes épidémiologiques incluses dans la synthèse analysant les hospitalisations et passages aux urgences pour causes respiratoires en distinguant les PM d'origine désertique et non désertique pour la fraction PM₁₀

Etude							Principaux résultats		
Auteur	Région	Période	Méthode	Hospitalisations / Passages aux urgences	Lag	BS	PM ₁₀ non désertique	PM ₁₀ désertique	Différence entre PM ₁₀ désertique et non désertique
Stafoggia <i>et al.</i> (2016)	Europe du Sud (13 villes)	2011-2010	Times series	Respiratoires ; adultes	0-5	↗ (NS)	↗ (S)	↗ (NS)	
			Times series	Respiratoires ; enfants	0-5	↗ (NS)	↗ (S)	↗ (S)	
Renzi <i>et al.</i> (2017)	Sicile (4 villes)	2006-2012	Times series	Respiratoires	0-5	NA	↗ (NS)	↗ (NS)	
	Sicile (3 zones)	2006-2012	Times series	Respiratoires	0-5	NA		↗ (S)	

NA = non applicable ; NS = non significatif ; S = significatif ; BS = brumes de sable.

Les cases restées vierges indiquent que l'analyse n'a pas été réalisée ou que le résultat n'est pas disponible.

Aucun résultat n'a été relevé pour les PM_{2,5-10} et PM_{2,5}.

Annexe 6. Détails des principaux résultats d'études toxicologiques expérimentales menées in vitro

Tableau 19. Principaux résultats d'études expérimentales menées in vitro sur l'impact des particules de brumes de sable du Sahara sur la réponse biologique

Modèles cellulaires	Particules	Exposition Concentration Temps	Principaux résultats	Références
BEAS-2B	PM ₁₀ « dust event » et « non-dust event » - Mars 2004 - Porto Rico - Atlantic Ocean	Exposition submergée • de 50 à 250 µg/mL • 24h Inhibition des ENX sur les PM par pré-incubation avec sulfate de polymyxine B	Viabilité cellulaire : Faible PM ₁₀ "dust event" ≈ "non-dust event" Inflammation ↑* sécrétion IL-6 : "dust event" 17x sup à "non-dust event" ☐* sécrétion IL-6 après inhibition ENX : "dust event" 2x sup à "non-dust event" Pas de sécrétion d'IL-8	Ortiz-Martinez et al., 2010


Modèles cellulaires	Particules	Exposition Concentration Temps	Principaux résultats	Références
BEAS-2B	Extraits organiques préparés à partir : PM ₁₀ -AO (Pre et Post "dust event") PM ₁₀ -PRC PM _{2,5} -PRC PM ₁₀ -AO PM ₁₀ -PRC « non-dust event » - Février-Mars 2004 - Porto Rico, - Atlantic Ocean (AO) - Puerto Rican Coast (PRC)	Exposition submergée <ul style="list-style-type: none"> de 10 à 100 µg/mL 24h Inhibition des ENX sur les PM par pré-incubation avec Polymyxin B sulfate Inhibition des Métaux lourds par pré-incubation avec mésylate de déféroxamine (DF)	Niveaux ENX (UE/mg) sur les PM <ul style="list-style-type: none"> PM₁₀ >> PM_{2,5} AO : PM₁₀ (511) > Pre dust event (155) > Post dust event (75.9) PRC : PM₁₀ dust event (114) ≈ PM₁₀ non-dust event (111) PM₁₀ -AO (511) >> PM₁₀ -PRC (114) Viabilité cellulaire : Faible <ul style="list-style-type: none"> PM₁₀-AO ≈ Post-AO > Pre-AO PM₁₀-AO ≈ PM₁₀-PRC PM_{2,5}-PRC dust event > PM_{2,5}-PRC non-dust event Pas de lien avec les niveaux d'ENX Pour PM_{2,5}-PRC, lien avec le niveau de Fer (↑viabilité quand ajout de DF) Inflammation après exposition PM-AO ↑* sécrétion IL-8 après traitement PM ₁₀ Inflammation après exposition PM-PRC ↑* sécrétion IL-8 > IL-6 après traitement PM ₁₀ et PM _{2,5} avec dust event > non-dust event Après inhibition ENX : ▣* sécrétion IL-6 ; ↑* sécrétion IL-8 Pas de sécrétion pour TNF-α, IL-1β, GM-CSF and MCP-1 pour PM-AO et PM-PRC	Rodriguez-Cotto et al. 2013

Modèles cellulaires	Particules	Exposition Concentration Temps	Principaux résultats	Références
BEAS-2B	Extraits organiques préparés à partir de PM campagne <i>Rodriguez-Cotto et al., 2013</i> PM _{2,5} « dust event » PM _{2,5} « non-dust event »	Exposition submergée <ul style="list-style-type: none"> de 25 à 100 µg/mL 1h à 14h Inhibition des Métaux lourds par prétraitement avec mésylate de déféroxamine (DF) (chélateur) Inhibition action stress oxydants par pré-incubation avec N-acétyl cystéine (NAC)	ROS génération après exposition aux PM _{2,5} ↑* génération de ROS : dust event > non-dust event ☒ * production de ROS après prétraitement à la DF (dust event ≈ non-dust event) Capacité antioxydante ↑* ARNm <i>GSTP1</i> et <i>HMOX1</i> après traitement PM _{2,5} dust event ☒ ARNm <i>GSTP1</i> et <i>HMOX1</i> après prétraitement à la DF et à la NAC Inflammation après exposition PM-PRC ↑* ARNm <i>IL-8</i> après traitement PM _{2,5} (dust event > non-dust event) ↑* activation Nrf2 pour PM _{2,5} dust event > PM _{2,5} non-dust event Pas de détection de NFκB	<i>Rodriguez-Cotto et al. 2015</i>
A549	Poussières de particules (PM _{2,5}) de Montmorillonite	Exposition submergée <ul style="list-style-type: none"> de 10 à 1000 µg/mL 24h 	Mort cellulaire par : <ul style="list-style-type: none"> - Modification du cycle cellulaire : les divisions cellulaires diminuent avec l'augmentation des particules « engluées » dans les cellules - Apoptose : <ul style="list-style-type: none"> - Présence de corps apoptotiques - Augmentation de la protéine c-PARP - Up régulation du gène <i>IL-8</i> aux faibles concentrations de PM_{2,5} (jusqu'à 50 µg/mL) - Nécrose : <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la protéine HMGB1 - Up régulation du gène <i>TNFα</i> de façon dose-dépendante à partir de 50 µg/mL 	<i>Ardon-Dryer et al., 2020</i>

Modèles cellulaires	Particules	Exposition Concentration Temps	Principaux résultats	Références
A549	Particules (PM ₁₀) collectées au Cap Vert du 29 Décembre 2016 au 6 Janvier 2017) - Observatoire de l'Air	Exposition submergée <ul style="list-style-type: none"> • 3,13 ; 12,5 ; 50 ; 200 µg.cm⁻² • 4h ou 24h • PM₁₀ et PM_{10b} « baked/chauffées » • Particule référente : quartz DQ12 	<p>Viabilité cellulaire (WST1 – LDH) :</p> <p>☑ * 24h après exposition aux plus fortes concentrations (50 et 200 µg.cm⁻²)</p> <p>Résultats similaires pour PM₁₀ et PM_{10b}</p> <p>Pas de cytotoxicité pour DQ12</p> <p>Inflammation (ELISA) :</p> <p>↑* production IL-6 et IL-8 4h après exposition à 50µg cm⁻² de PM₁₀ ou PM_{10b} (PM₁₀ > PM_{10b})</p> <p>↑* production IL-8 après 4h et 24h d'exposition à 50µg cm⁻² de DQ12 (à 4h PM₁₀ > PM_{10b} < DQ12)</p> <p>Stress oxydant (RTqPCR) :</p> <p>↑* expression <i>HMOX1</i> 24h après exposition à 50µg cm⁻² de PM₁₀ ou PM_{10b} (PM₁₀ < PM_{10b})</p> <p>Pas de modulation de <i>HMOX1</i> après exposition à DQ12</p>	Bredeck, Busch, et al. (2023)
THP1 wild type versus THP1-NLRP3 ^{-/-}	Particules (PM ₁₀) collectées au Cap Vert du 29 Décembre 2016 au 6 Janvier 2017) - Observatoire de l'Air	Exposition submergée <ul style="list-style-type: none"> • 3,13 ; 12,5 ; 50 ; 200 µg.cm⁻² • 4h ou 24h • PM₁₀ et PM_{10b} « baked/chauffées » Particule référente : Quartz DQ12	<p>Inflammation (ELISA) : 50 µg.cm⁻² ; 24h</p> <p>↑* production d'IL-1β avec THP1 >> THP1 NLRP3^{-/-} et PM₁₀ >> PM_{10b}</p> <p>↑* production d'IL-1β après exposition DQ12 avec THP1 >> THP1 NLRP3^{-/-} et DQ12 > PM₁₀ >> PM_{10b}</p> <p>Inflammasome NLRP3 :</p> <p>↑* production</p>	Bredeck, Busch, et al. (2023)

Modèles cellulaires	Particules	Exposition Concentration Temps	Principaux résultats	Références
THP1	Particules (PM ₁₀ - PM _{2,5}) collectées sur 4 stations au Cap Vert (Santiago, stations 1&2 ; São Vicente, stations 1&2) ; 2 événements de poussières de sable : SD1 (du 10 au 13 Février 2022) ; SD2 (du 17 au 19 Février 2022) Période référente (26 au 30 Janvier 2022)	Exposition submergée <ul style="list-style-type: none"> • 5 µg.cm⁻² • 24h 	Inflammation (ELISA) : Pour PM _{2,5} par rapport période de référence ↑* production d'IL-1β pour les périodes SD1&2 Pour PM ₁₀ par rapport période de référence ↑* production d'IL-1β pour une seule période SD1 Corrélation entre la réponse inflammatoire et : Métaux de transition pour les PM de poussières de sable Endotoxines pour les PM collectées lors des périodes de référence.	<i>Bredeck, Dos S. Souza, et al. (2024)</i>

<p>Coculture A549-THP1</p> <p>Avec THP-1 wild type THP1-CASP1^{-/-} THP1-NLRP3^{-/-}</p>	<p>Particules (PM 90 % < 2,5 µm) collectées au Cap Vert du 29 Décembre 2016 au 6 Janvier 2017) - Observatoire de l'Air</p> <p>Particule référente : Quartz DQ12</p>	<p>Exposition à l'interface Air-liquide (Vitrocell™ Cloud 12α system)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10 ; 21 ; 31 µg.cm⁻² • 24h <p>Contrôle positif pour l'inflammation : LPS</p>	<p>Validation des modèles cellulaires :</p> <p>THP-1 wt ; THP1 CASP1^{-/-} ; THP1 NLRP3^{-/-} : cellules présentant des niveaux de récepteurs membranaires comparables CD14 et TLR2, TLR4</p> <p>Coculture THP1 wild type</p> <ul style="list-style-type: none"> • Viabilité (WST1, LDH) : Pas de perte de cytotoxicité • Stress oxydant (RTqPCR) : Pas de modulation de l'expression de : HMOX1 ; APE1/REF1 ; GGCS ; NQO1 • Inflammation (ELISA/RTqPCR) : Pas d'effet de DQ12 Pas de modulation IL-18 ↑* production dose-dépendante pour IL-1β et IL-6 ; ↑* pas dose dépendante pour IL-8, TNFα ↑* expression dose-dépendante pour : IL-1β, IL-6, IL-8 ↑* à la plus forte dose (31 µg.cm⁻²) expression & production : IL-1β x3, IL-6 x5, IL-8 x2 <p>Coculture THP1 wild type ; THP1 CASP1^{-/-} ; THP1 NLRP3^{-/-}</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inflammasome (par rapport au Ctl, cocultures non exposées) <p>Coculture THP1 wild type</p> <p>↑* production et expression IL-1β/ IL-1β, IL-6/IL-6, IL-8/IL-8</p> <p>Pas de modulation d'expression pour TNFα</p> <p>Coculture THP1 NLRP3^{-/-}</p> <p>↑* expression IL-1β, IL-6, IL-8</p> <p>☒ * expression TNFα</p> <p>↑* production IL-6, IL-8</p> <p>Pas de modulation de la production d'IL-1β et TNFα</p> <p>Coculture THP1 CASP1^{-/-}</p> <p>↑* expression d'IL-1β, IL-6, IL-8</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Bredeck, Dobner, et al. (2023)</p>
--	--	--	--	---

Modèles cellulaires	Particules	Exposition Concentration Temps	Principaux résultats	Références
			 * expression <i>TNFα</i> Pas de modulation de la production d'IL-1β, IL-6, IL-8, <i>TNFα</i>	
Coculture A549-THP1	Particules (PM10 - PM2,5) collectées sur 4 stations au Cap Vert (Santiago, stations 1&2 ; São Vicente, stations 1&2) Particule référente : Quartz DQ12	Exposition à l'interface Air-liquide (Vitrocell™ Cloud 12α system) <ul style="list-style-type: none"> • 10 ; 21 ; 31 µg.cm⁻² • 24h Contrôle positif pour l'inflammation : LPS	Après exposition aux particules de poussières de sable Modulation significative de 147 gènes, 91 up-régulés et 56 down-régulés GM-CSF et G-CSF se retrouvent dans 61 des 74 ensembles de gènes régulés GM-CSF régulé à la hausse de 7 fois par rapport au contrôle (cellules non exposées) et G-CSF de 9 fois ↑*sécrétion de 16 cytokines dont GM-CSF (x2,3) et G-CSF (x 1,5) Après exposition aux LPS (endotoxine) ↑*sécrétion de 51 cytokines d'au moins 1,5 fois Après exposition aux particules de quartz DQ12 Modulation significative que pour 55 gènes, 29 régulés à la hausse et 26 à la baisse Faible surexpression et sécrétion de GM-CSF/GM-CSF ; aucune incidence sur G-CSF/G-CSF	Bredeck, Dobner, et al. (2024)

BEAS-2B : Cellules épithéliales humaines bronchiques ; A549 : Cellules épithéliales humaines alvéolaires ; THP1 : Monocytes humains ; A549-THP1 : Co-culture A549 et THP1

ENX : Endotoxines ; SD : Sahara dust ; LPS : Lipopolysaccharides ; ALI : Interface Air-Liquide ; GSTP1 : Glutathion-S-transférase P1 ; HMOX1 : Hème oxygenase 1 ; Nrf2 : Nuclear factor erythroid-derived-like 2 ; NFκB : Nuclear factor-kappa B ; c-PARP : Poly(ADP-ribose) polymérase ; HMGB1 : High mobility group box 1 ; TLR2, TLR4 : toll-like receptor 2, 4 ; CD14 : cluster de différenciation ; CASP1 : Caspase 1 ; APE1/REF1 : apurinic-apyrimidinic endonuclease 1/redox factor 1 ; GGCS : gammaglutamylcysteine synthetase ; NQO1 : NAD(P)H quinone dehydrogenase ; GM-CSF : Granulocyte Macrophage Colony-Stimulating Factor ; G-CSF : Granulocyte colony-stimulating factor

↑* augmentation significative ;  * diminution significative ; ≈ réponse similaire

Notes



anses

CONNAÎTRE, ÉVALUER, PROTÉGER

AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE
de l'alimentation, de l'environnement et du travail

14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr