Étude de la qualité de l'air à Kaboul : résultats d'une campagne de mesures

G. Créhange[a], A. Gollion[b], O. Gorgé[c], H. Delacour[d], A. Mérens[d], F. Caire-Maurisier[e], J. Plantamura[e], S. Bohand[f], J.-U. Mullot[b]

a Direction centrale du Service de santé des armés, Fort Neuf de Vincennes, Cours des maréchaux – 75614 Paris Cedex 12.
b Laboratoire d'analyses de surveillance et d'expertise de la Marine (LASEM), BP 61 – 83800 Toulon Cedex 09.
c DGA Maîtrise NRBC - Le Bouchet, BP 3 – 91710 Vert le Petit.
d Hôpital d'instruction des armées Bégin, Fédération des laboratoires, 69 avenue de Paris – 94163 Saint-Mandé Cedex.
e Pharmacie centrale des armées, TSA 30004 – 45404 Fleury les Aubrais Cedex.
f Service de Protection Radiologique des Armées, 1bis rue du Lieutenant Raoul Batany – 92141 Clamart Cedex.

Article reçu le 14 novembre 2013, accepté le 15 avril 2014.

Résumé

Cet article présente les résultats d'une étude pluridisciplinaire de la qualité de l'air à Kaboul, à des fins d'évaluation des risques sanitaires pour les troupes déployées. Diligentée à la suite de plaintes ou rumeurs en rapport avec la qualité de l'air sur ce théâtre, cette étude a été menée à bien par des pharmaciens du Service de santé des armées, appuyés par leurs laboratoires respectifs de théâtre et de métropole. Afin d'évaluer la qualité de l'air des prélèvements pour analyses chimiques, biologiques et radiologiques ont été réalisés. Les résultats des analyses réalisées sont comparés à des données bibliographiques ou toxicologiques permettant d'évaluer les risques sanitaires associés et d'orienter les études médicales futures : ils mettent en évidence une situation méritant une attention particulière pour deux polluants, les particules fines et l'hydrogène sulfuré. Originale par sa portée (5 laboratoires différents associés) et certains de ses résultats, cette étude vient renforcer et élargir celles d'autres équipes internationales s'intéressant au même sujet et consacre le rôle de conseil au commandement du Service de santé des armées vis-à-vis des risques environnementaux sur les théâtres.

Mots-clés : Afghanistan. Environnement. Microbiologie. Toxiques industriels. Qualité de l'air.

Abstract

ASSESSMENT OF AIR QUALITY IN KABUL.

This article presents the results of a multidisciplinary study about Kabul air quality, designed to assess the health risks faced by deployed troops. Following complaints or rumours about the air quality on this theatre of operations, this study was conducted by a team of pharmacists from the French Defence Medical Service, supported by their respective forward laboratories. In order to assess the air quality, chemical, biological and radiological samples were collected. The results of the analyses were presented and compared to bibliographical or toxicological data to assess the health risks for human beings and guide future medical studies: they describe a worrying situation for two pollutants: particulate matter and hydrogen sulphide. Original in its scope (5 different laboratories involved) and some of the results presented, this study is consistent with the results presented by other international teams interested in the same subject. Additionally, it highlights the role of the French Defence Medical Service as advisers on environmental risks to the Commanding officers in operation theatres.

Keywords: Afghanistan. Air quality. Environment. Microbiology. Toxic industrial chemical.

G. CRÉHANGE, pharmacien en chef, praticien certifié. A. GOLLION, pharmacien, praticien confirmé. O. GORGÉ, pharmacien principal. H. DELACOUR, pharmacien principal, praticien certifié. A. MÉRENS, médecin en chef, praticien professeur agrégé du Val-de-Grâce. F. CAIRE-MAURISIER, pharmacien en chef, praticien certifié. J. PLANTAMURA, pharmacien, S. BOHAND, pharmacien en chef, praticien confirmé. J.-U. MULLOT, pharmacien en chef, praticien professeur agrégé du Val-de-Grâce.

Correspondance : Monsieur le pharmacien en chef J.-U. MULLOT, BCRM Toulon, Laboratoire d'analyses de surveillance et d'expertise de la Marine (LASEM), BP 61 – 83800 Toulon Cedex 9.
E-mail : jean-ulrich.mullot@intradef.gouv.fr

Introduction

Contexte de l'alerte

En janvier 2006, le Commandant Santé (COMSANTE) de Kaboul en Afghanistan a alerté l'État-major des armées (EMA) en raison de symptômes peu spécifiques et non groupés (épistaxis, céphalées…) survenus chez des militaires français. Certains de ces symptômes

auraient été à l'origine d'hospitalisations au retour en France. Leur origine était attribuée par les militaires à la présence alléguée de « 30 % de matière fécale » dans l'air à Kaboul.

La vérification effectuée en février 2006 par la section prévention, sécurité, environnement de l'État-major des armées (EMA/SLI/PSE) n'a pas permis de confirmer l'existence de militaires présentant ces symptômes, ni d'identifier de militaires hospitalisés au retour en métropole suite à de tels signes. Au vu de ces données, l'analyse faite par l'EMA était qu'il s'agissait d'une rumeur.

Néanmoins en mai 2006, le Laboratoire d'analyses de surveillance et d'expertise de la Marine (LASEM) de Toulon a été missionné par l'EMA pour réaliser une expertise de la qualité de l'air à Kaboul. Les analyses réalisées sur les sites de *Kaboul International Airport* (KaIA) et de *Warehouse* n'avaient alors montré aucune anomalie. Cependant, les paramètres bactériologiques pouvant indiquer une contamination de l'air par des matières fécales n'avaient pas été recherchés (1). L'absence de réponse sur la qualité bactériologique de l'air n'a pas permis de contrecarrer la rumeur. Cette dernière n'est pas spécifiquement française et circule également parmi les autres composantes de l'*International Security Assistance* Force (ISAF) (2, 3).

Justification de la mission réalisée en 2012

Selon la rumeur, l'origine des matières fécales en suspension dans l'air proviendrait des défécations à l'air libre qui, sous l'effet de la chaleur et de la sécheresse, seraient mises en suspension. Cependant, à ce jour, aucun élément rationnel ne permet de relier les signes cliniques décrits à un micro-organisme d'origine fécale. De plus, la transmission par voie aérienne de pathogènes fécaux n'est pas un mode de transmission classique. Les préoccupations sanitaires à Kaboul semblent entretenues par deux éléments dont le lien avec les symptômes cités ne peut non plus être établi : la faible espérance de vie chez les Afghans (47 ans pour les hommes et 50 ans pour les femmes) et l'odeur assez persistante de résidus soufrés dans l'air (4).

Par ailleurs Kaboul, situé à 1 800 mètres d'altitude, connaît des variations de température extrêmes entre le gel à l'aube et 38 °C à midi (5). L'hygrométrie est très basse, en moyenne de 20 % contre 70 % à Paris (6). En outre, cette ville concentre plus de 80 % de la circulation automobile afghane. Deux polluants métalliques, le plomb, associé aux carburants automobiles les plus anciens, et le cadmium sont cités dans les données bibliographiques sur la qualité de l'air à Kaboul et ressortent comme les plus préoccupants en termes de santé (7).

Enfin, la ville est souvent noyée dans un nuage de poussières et de sable, qui rend l'air difficilement respirable et maintient dans les basses couches de l'atmosphère la pollution automobile, domestique et industrielle (8).

Ces alertes non formalisées se poursuivant régulièrement depuis 2006, le bureau expertise des risques sanitaires (BERS) de la Direction centrale du Service de santé des armées (DCSSA) a été mandaté par l'EMA pour une nouvelle mission d'expertise de l'air dans le camp de KaIA, nécessairement plus complète que celle de 2006.

Objectifs de la mission

Cette mission avait un double objectif :

– disposer de données objectives sur la qualité microbiologique de l'air afin de confirmer ou d'infirmer la présence d'une contamination par des germes du péril fécal ;

– disposer de données physico-chimiques actualisées à des fins d'évaluation des risques sanitaires pour les militaires français stationnés dans la région de Kaboul.

La mission s'est déroulée du 10 au 21 septembre 2012 et était composée de trois personnels du corps des pharmaciens des armées respectivement de DCSSA, de la Direction générale de l'armement Maîtrise des risques nucléaires radiologiques biologiques et chimiques (DGA MNRBC) et du LASEM de Toulon. L'équipe ainsi constituée a été renforcée sur place par le pharmacien en mission programmée à l'Hôpital médico-chirurgical (HMC) de Kaboul.

Matériel et méthodes

Sauf indication contraire, tous les prélèvements ont été réalisés avec une fréquence quotidienne, entre le 12 et le 20 septembre 2012. Pour les prélèvements de courte durée (paramètres bactériologiques par exemple), plusieurs prélèvements répartis au cours de chaque journée ont été réalisés, *a minima* le matin et l'après-midi.

Paramètres biologiques

En cas de densité importante, les bactéries dans l'air pourraient éventuellement contribuer à des phénomènes inflammatoires ou dysimmunitaires. Par ailleurs, lors de la combustion de déchets contenant des matières fécales, le lipopolysaccharide (LPS ou endotoxines), élément constitutif de toutes les bactéries à coloration de Gram négative, ou un dérivé de leur combustion pourraient être mis en suspension. Ces produits pourraient dès lors être en contact avec une surface importante de la muqueuse respiratoire (9). En sus de la mesure des endotoxines, deux démarches ont été menées concomitamment : la caractérisation de la flore aérienne globale et la détection ciblée de pathogènes.

Méthodes d'échantillonnage

Les échantillons atmosphériques pour la recherche de micro-organismes ont été prélevés activement par deux types de matériels : un échantillonneur cyclonique en milieu liquide (cyclone Mk1 (Biotrace Inc.) – prélèvements de 30 minutes environ à 500 L/min) et deux biocollecteurs d'air à haut débit capturant les particules sur un filtre de microfibres pré-chargées électriquement (modèle SASS3100 – *Research International Inc.*). Le cyclone a été positionné à proximité de l'hôpital du fait de son encombrement et de la nécessité de disposer d'une alimentation électrique. L'un des deux biocollecteurs a

été utilisé en point de collecte statique à proximité du cyclone et le second a été utilisé soit en parallèle, soit en itinérant afin de mimer un parcours moyen dans le camp de KaIA (prélèvements de plusieurs heures à débit de 18 m^3/h). Les prélèvements ont été réalisés chaque jour dans une amplitude horaire allant de 7 heures à 21 heures locales. Les échantillons non analysés sur place ont été conservés à +4 °C entre le moment de collecte et le retour en métropole. À l'issue d'une éventuelle extraction complémentaire après retour en métropole, la conservation a été effectuée au congélateur à -20 °C.

Détermination de la flore microbiologique aérienne globale

La mise en culture de l'ensemble des biocollectats liquides issus du cyclone, ainsi que deux biocollectats sur filtre a été effectuée sur place afin de (i) réaliser une numération globale de la flore bactérienne (culture sur milieu Trypticase Soja incubé 24 ou 72 heures, à température ambiante et à 37 °C), (ii) rechercher les bactéries de la flore fécale (cultures sur milieux Hektoen et Bile Esculine Agar incubés 24 heures à 37 °C), (iii) dénombrer la flore fongique totale (culture sur milieu Sabouraud incubé 72 heures à 30 °C). Les géloses montrant des colonies bactériennes ou fongiques suspectes ont été transférées en métropole à l'Hôpital d'instruction des armées (HIA) Bégin pour identification.

Détection ciblée de pathogènes

Malgré l'invraisemblance scientifique d'une pathogénicité par voie respiratoire, et afin de dissiper les doutes sur cette question, des recherches ont été faites sur les bactéries pouvant être retrouvées habituellement dans les selles :

– soit parce qu'elles font partie intégrante de la flore digestive : *Escherichia coli* (espèce présente chez l'homme à raison de 10^8 bactéries par gramme de selle) et autres entérobactéries (*Klebsiella, Citrobacter, Enterobacter, Proteus…*) ;

– soit parce qu'il s'agit d'entéropathogènes : *Salmonella, Shigella*.

Une analyse génétique (PCR - polymerase chain reaction - ciblée) a été réalisée pour rechercher les marqueurs de virulence de bactéries entéropathogènes sur certains échantillons issus de capture en milieu liquide transportés vers DGA MNRBC. Neuf gènes de virulence ont été recherchés permettant la détection de l'ensemble des souches pathogènes de *Escherichia coli* et de *Shigella spp.* Pour ce faire, ont été utilisés neuf couples d'amorces amplifiant les différents gènes de virulence (Stx1, stx2, eae, bfpA, aggR, elt(LT), estA(ST), daaE, virF, ipaH) décrits en 2011 dans différents pathovars d'*Escherichia coli* (shigelles comprises). Dans les conditions expérimentales retenues, la limite de détection varie de 0,1 à 10 organismes par litre d'air selon les gènes considérés.

Mesure des endotoxines

Les endotoxines, à l'image de la flore bactérienne totale, permettent d'obtenir rapidement une évaluation de la contamination bactérienne de l'air, exclusivement pour les espèces à Gram négatif, dont fait partie *E. coli*. L'intérêt de ce paramètre par rapport à d'autres paramètres microbiologiques réside dans sa plus grande praticabilité dans un contexte opérationnel (transport moins sensible, analyses différées, etc.) et dans l'existence de valeurs bibliographiques permettant une interprétation plus aisée des résultats.

Les prélèvements ont été réalisés par impaction sur des filtres en fibres de verre à l'aide d'une pompe de débit 2L/min fonctionnant 24 heures au cours d'une journée (sauf aléa), chaque jour. Après transport dans le respect de la chaîne du froid, le dosage a été confié au laboratoire de la Pharmacie centrale des armées (PCA) à Orléans et réalisé par une technique colorimétrique en cinétique après une phase d'extraction par de l'eau exempte d'endotoxine bactérienne conformément aux recommandations de l'Institut national de recherche en santé au travail (INRS, base de données Metropol). Cette technique consiste à mesurer la quantité de chromophore libéré par un peptide chromogénique par spectrophotométrie d'absorption moléculaire à 405 nm après désorption des filtres dans une quantité fixe d'eau apyrogène. La colorimétrie cinétique mesure la vitesse de développement de la coloration qui est corrélée à la charge endotoxinique. Les résultats sont exprimés au final en EU (Endotoxin Unit)/m^3.

Paramètres physico-chimiques

Lors du travail préalable de hiérarchisation et priorisation des risques chimiques environnementaux à Kaboul, essentiellement basé sur des données bibliographiques, il est apparu que différents polluants chimiques pouvaient être préoccupants (7). Ce sont les polluants ciblés comme prioritaires lors de ce travail préalable qui ont été recherchés lors de cette campagne :

– les particules fines et poussières ;

– les métaux lourds dont le plomb et le cadmium ;

– l'hydrogène sulfuré en raison des plaintes relatives aux odeurs ;

– les composés organiques volatils enfin, par volonté de complétude.

Méthodes d'échantillonnage

Toutes les mesures dans l'air des familles de polluants physico-chimiques ont été réalisées à hauteur des voies respiratoires sur des durées de 24 heures : au minimum un échantillon quotidien de particules fines a été réalisé. Concernant les prélèvements extérieurs, il a été retenu d'évaluer la qualité de l'air en un unique point, qualitativement considéré comme représentatif de la qualité moyenne de l'air dans le camp de KaIA et plus généralement dans cette partie de la ville de Kaboul. Ce point, proche de l'hôpital militaire de campagne français, a été choisi éloigné des sources ponctuelles identifiées et compatible avec les contraintes pratiques et de sécurité nécessaires à son équipement. Concernant les prélèvements intérieurs il a été retenu de faire varier le point de prélèvement entre différents locaux de vie au cours du temps (chambre, hall de consultations de l'hôpital). En ce sens les mesures en milieu intérieur ont été réalisées avec une visée plus exploratoire que les mesures en milieu extérieur, afin d'apprécier le rôle

protecteur vis-à-vis de la pollution offert par les bâtiments. Des précautions d'assurance qualité (blancs terrain, vérification journalière du débit des pompes) ont été respectées.

Poussières inhalables et métaux

La fraction inhalable des poussières (fraction conventionnelle en hygiène industrielle) est impactée sur un filtre en fibres de quartz contenu dans un porte-cassette relié à une pompe dont le débit est fixé à 2L/min. La quantification des poussières prélevées a été réalisée par gravimétrie après une stabilisation de quelques jours au LASEM de Toulon. Les dosages du plomb et du cadmium sont réalisés par spectrométrie d'émission atomique couplée à une détection optique après digestion des filtres en milieu acide, là aussi après retour au LASEM des échantillons prélevés sur le terrain. D'autres métaux usuels comme le chrome, le fer et le nickel étant accessibles par la même méthode, ils ont également été mesurés. Avec des prélèvements de 24 heures environ, la Limite de quantification (LQ) attendue pour les poussières inhalables est de 35µg/m3. Les LQ pour le plomb, le cadmium, le chrome et le nickel sont respectivement de 3,1 µg/m^3 ; 7,4 µg/m^3 ; 37 µg/m^3 et 18,5 µg/m^3.

Particules fines

Les particules fines constituent un mélange hétérogène et complexe qui évolue dans le temps et dans l'espace. Elles peuvent avoir des caractéristiques physiques diverses et être constituées d'une multitude de composants chimiques (11). La taille des particules atmosphériques détermine l'emplacement où elles sont déposées dans l'appareil respiratoire. Il est admis que les grosses particules (diamètre >5 µm) s'arrêtent dans la région nasopharyngée, les particules de 1 à 5 µm dans la région trachéobronchique, alors que les particules fines, inférieures à 1 µm, peuvent atteindre les régions bronchiolaires et alvéolaire et y persister (11). L'origine de ces particules est mixte : probablement tellurique en milieu désertique mais s'y ajoutent les contributions du trafic automobile important à Kaboul et l'existence d'installations industrielles peu contrôlées utilisant des sources de combustion (briqueteries, cimenteries etc.). Par ailleurs, les travaux réalisés par des armées étrangères ont confirmé le caractère préoccupant des concentrations en particules, justifiant un suivi métrologique renforcé (12, 13). Pour ces raisons, il a été proposé et retenu d'effectuer des dosages de particules. Les particules fines, $PM_{2,5}$ (PM – particulate matter – particules de diamètre aérodynamique moyen inférieur à 2,5 µm) et PM_{10} (particules de diamètre aérodynamique moyen inférieur à 10 µm), ont été mesurées dans l'air extérieur. Les $PM_{2,5}$ ont également été mesurées dans l'air intérieur. Il a été associé des mesures en temps réel et des prélèvements en continu sur filtres en fibres de quartz à l'aide d'un néphélomètre (modèle PDR-1500, fournisseur Thermo-Fischer). Pour plus de précision, une analyse gravimétrique des filtres a été réalisée au LASEM après stabilisation de quelques jours, permettant de corriger si besoin les lectures en direct du néphélomètre. Dans les conditions d'échantillonnage utilisées, la LQ des $PM_{2,5}$ est de 85 µg/m^3 pour un prélèvement de 24 heures analysé par gravimétrie.

Hydrogène sulfuré

L'hydrogène sulfuré est un polluant à l'odeur caractéristique d'œuf pourri émis lors des phénomènes de fermentation de matière organique (réseaux d'assainissement, stations d'épuration, effluents d'élevage, etc.). Le dosage de ce polluant a été retenu dans l'air extérieur et intérieur afin de tenter d'identifier l'origine de la perception olfactive de « matières fécales dans l'air », rapportée à Kaboul tant par les troupes françaises qu'étrangères.

L'hydrogène sulfuré est piégé sur des dispositifs d'échantillonnage passif (Radiello®) à base d'acétate de zinc. L'analyse en laboratoire, après désorption des dispositifs et ajout de réactif, est réalisée par spectrométrie dans le domaine du visible (technique au bleu de méthylène). La LQ pour l'hydrogène sulfuré est de 7ppb (abréviation de l'anglais « part per billion », c'est-à-dire « partie par milliard ») pour des prélèvements de 24 heures.

Composés organiques volatils (COV)

Le dosage de cette famille de polluant a été retenu afin d'obtenir l'image la plus complète possible de la pollution atmosphérique à Kaboul : les composés organiques volatils sont une grande famille de produits chimiques émis dans l'air lors de l'utilisation de carburants, solvants, peintures, produits ménagers etc. Certains d'entre eux ont une toxicité propre importante (par exemple le benzène) même à faibles doses. Les études bibliographiques ne rapportaient pas de concentration particulièrement préoccupante à Kaboul mais le surcoût de cette analyse étant faible, des prélèvements ont été réalisés. La technique analytique employée permet d'identifier et de quantifier jusqu'à 50 composés parmi les plus courants (hydrocarbures aromatiques monocycliques, solvants carbonés, solvants halogénés, etc.), assurant une évaluation satisfaisante du risque « composés organiques ».

Les prélèvements ambiants ont été réalisés à l'aide d'échantillonneurs passifs (ou badges) à charbon actif (Fournisseur 3M) exposés pendant 24 heures. Un badge a par ailleurs été exposé une semaine afin d'abaisser les limites de quantification. Les COV piégés sont désorbés puis analysés par chromatographie gazeuse couplée à une détection par ionisation de flamme.

Pour les prélèvements de 24 heures, la LQ du toluène et des xylènes est de 30 µg/m^3. La LQ du benzène est de 15 µg/m^3. Pour les prélèvements de sept jours les limites de quantification sont proportionnellement plus faibles (benzène environ 2 µg/m^3).

Paramètres radiologiques

Il est apparu intéressant d'ajouter à l'étude de ces différents paramètres celle des radionucléides émetteurs gamma, témoins d'une éventuelle contamination atmosphérique radiologique. La radioactivité ambiante en conditions normales dépend avant tout de la nature du sol et de l'altitude mais peut également être le témoin d'activités humaines spécifiques d'origine artificielle.

Neuf prélèvements d'air ont été effectués à l'aide d'un biocollecteur dans l'air ambiant extérieur ou dans un local, sur le site de KaIA. À l'issue, une spectrométrie gamma a été réalisée au laboratoire de contrôle radiotoxicologique du Service de protection radiologique (SPRA) afin de rechercher la présence de radionucléides (chaîne de mesure SAGA avec détecteur au germanium hyperpur, Canberra). Cette technique d'analyse présente l'avantage d'être non destructive et a ainsi pu être réalisée sur les mêmes filtres que ceux dédiés à la détermination bactérienne. Chaque filtre identifié a été conditionné dans une boîte de Pétri en plastique de diamètre 90 mm puis compté pendant 30 minutes.

L'activité exprimée en becquerel par échantillon (Bq/éch) est calculée à partir des résultats obtenus sur une moyenne de blancs qui permettent de soustraire la radioactivité naturelle issue notamment du béryllium 7 et du potassium 40 de celle de l'échantillon mesuré. Le volume d'air collecté étant connu, il est possible d'exprimer l'activité en Bq/m^3.

Synthèse

La nature et le nombre de prélèvements effectués pendant la durée de la mission sont présentés dans le tableau I.

Tableau I. Nature et nombre de prélèvements effectués à KaIA, 10-21 septembre 2012.

Paramètres recherchés Nature de l'échantillon	**Nombre d'échantillons prélevés**	**Laboratoire chargé des analyses**
Biologique		
Bactéries de la flore fécale Géloses Bile Esculine Agar	9	HIA Bégin
Bactéries de la flore fécale Géloses Hektoen	9	HIA Bégin
Flore totale Géloses Trypticase Soja	9	HIA Bégin
Flore fongique Géloses Sabouraud	9	HIA Bégin
Analyse du bruit de fond naturel Écouvillons de poussières	50	DGA MNRBC
Analyse du bruit de fond naturel Terre	6	DGA MNRBC
Recherche génétique d'entérobactéries et caractérisation métagénomique Collecte liquide de particules	32	DGA MNRBC
Recherche génétique d'entérobactéries et caractérisation métagénomique Collecte de particules sur filtre	19	DGA MNRBC
Physico-chimique		
Endotoxines	10	PCA Orléans
Poussières inhalables – Filtres	6	LASEM Toulon
Particules fines PM_{10} – Filtres	8	LASEM Toulon
Particules fines $PM_{2,5}$ – Filtres	4	LASEM Toulon
Métaux lourds et gravimétrie – Filtres	6	LASEM Toulon
H_2S – support adsorbant	10	LASEM Toulon
COV – support charbon actif	12	LASEM Toulon
Radiologique		
Radionucléides émetteurs gamma Collecte de particules sur filtre	9	SPRA

Résultats

Paramètres biologiques

Le service de biologie de l'HIA Bégin a conclu que les investigations menées n'ont pas mis en évidence la présence de bactéries de la flore fécale. Pour les analyses réalisées par DGA MNRBC, aucun gène de virulence spécifique aux entérobactéries recherchées n'a été mis en évidence, confortant les résultats du service de biologie de l'HIA Bégin. La quantité de bactéries cultivables dans l'air, non spécifiquement d'origine fécale varie entre 200 et 2,6.10^{4}ufc/m^3 en moyenne quotidienne, en outre des espèces de champignons filamenteux ont été isolées sur les différents prélèvements (*Alternaria, Aspergillus, Cladosporium…*). Pour les endotoxines les résultats sont présentés dans le tableau II.

Paramètres physico-chimiques

La sensibilité des méthodes utilisées pour réaliser ces analyses varie selon les conditions exactes de prélèvement, les matériels mis en œuvre ou encore les résultats obtenus lors des contrôles qualité en laboratoire (blanc de transport). Lorsque les produits recherchés n'ont pas été détectés lors des analyses, ou sont présents en quantité trop faible pour que l'incertitude soit acceptable, les résultats correspondants sont rendus sous la forme « < LQ ». Dans la très grande majorité des cas, ces limites de quantification sont inférieures aux valeurs limites retrouvées dans la littérature, autorisant une conclusion (14). Les principaux résultats des analyses physico-chimiques de l'air intérieur et extérieur réalisées par le LASEM Toulon sont présentés dans les tableaux III à V. Pour les composés organiques volatils, les prélèvements ont été quotidiens. Les limites de quantification n'ayant jamais été dépassées en 24 heures, toutes les concentrations journalières sont inférieures aux limites de quantification.

Paramètres radiologiques (émission gamma)

Les neuf filtres ont été analysés pour rechercher la présence de radionucléides émetteurs gamma. L'ensemble des résultats obtenus sur cette campagne de mesure est inférieur à la limite de détection de l'appareillage pour chaque radionucléide potentiellement présent.

Cela permet de conclure qu'aucune contamination d'origine artificielle ou naturelle renforcée, piégée sur les poussières des filtres analysés n'a été mise en évidence.

Tableau II. Dosage des endotoxines dans l'air intérieur et extérieur, KaIA - septembre 2012.

Polluants analysés	Lieu de mesure	Nombre de prélèvements	Étendue des concentrations mesurées	Valeurs limites retrouvées dans la littérature
Endotoxines	Extérieur	8	0,59 - 2,63 EU/m^3	50 EU/m^3 [a] ou 10 EU/m^3 [b]
	Intérieur	2	0,09 - 0,15 EU/m^3	

[a] *INRS. Valeur limite d'exposition professionnelle pour 8 heures par jour (travailleur) pour les Pays-Bas.*
[b] *INRS. Seuil d'irritation des voies respiratoires.*

Tableau III. Résultats des analyses de poussières inhalables et des métaux dans l'air, KaIA - septembre 2012.

Polluants	Lieu de mesure	Nombre de prélèvements	Étendue des concentrations mesurées	Valeurs limites retrouvées dans la littérature
Poussières inhalables	Extérieur	4	232 - 536 µg/m^3	10 mg/m^3 [c] ou 10 000 µg/m^3
	Intérieur	1[c]	< LQ	
Plomb	Extérieur	4	< LQ	100 µg/m^3 [a] - 12 µg/m^3 [b]
Cadmium				50 µg/m^3 [a] - 7 ng/m^3 [b]
Chrome	Intérieur	2	< LQ	2 mg/m^3 [a] - 3,4 µg/m^3 [b]
Nickel				1 mg/m^3 [a] - 0,14 µg/m^3 [b]
Fer	Extérieur	4	0,1 - 18,2 µg/m^3	340 µg/m^3 [b]
	Intérieur	1[c]	1,6 µg/m^3	

[a] *INRS. Valeur limite d'exposition professionnelle pour 8 heures par jour (travailleur).*
[b] *Le seuil « marginal » est un seuil pour lequel des effets peu graves ou réversibles sont attendus (définitions de l'USAPHC), valeur pour une durée maximale de 1 an.*
[c] *Un prélèvement invalidé pour non-respect des critères d'assurance qualité.*

Tableau IV. Résultats des mesures de particules fines dans l'air, KaIA - Septembre 2012.

Polluants	Lieu de mesure	Nombre de prélèvements	Étendue des concentrations mesurées	Valeurs limites retrouvées dans la littérature
$PM_{2,5}$	Extérieur	3	< LQ - 105 µg/m^3	1 an effet négligeable : 65 µg/m^3 [a] 24 heures effet marginal : 250 µg/m^3 [a]
	Intérieur	1	< LQ	
PM_{10}	Extérieur	8	135 - 509 µg/m^3	24 heures effet marginal : 420 µg/m^3 [a]

[a] *le seuil « marginal » est un seuil pour lequel des effets peu graves ou réversibles sont attendus (définitions de l'USAPHC).*

Tableau V. Résultats des mesures d'hydrogène sulfuré dans l'air, KaIA - Septembre 2012.

Polluants	Lieu de mesure	Nombre de prélèvements	Étendue des concentrations mesurées	Valeurs limites retrouvées dans la littérature
Hydrogène sulfuré	Extérieur	8	< LQ - 83 ppb	8 ppb[a] ou 10 ppb[b]
	Intérieur	2	11 - 20 ppb	

[a] *INRS. Seuil de détection olfactive, exposition aigüe.*
[b] *USAPHC, 2010. Concentration limite acceptable pour des militaires en situation opérationnelle jusqu'à 1 an.*

Discussion et perspectives

La pollution atmosphérique est un sujet complexe, d'une grande actualité scientifique et très étudié dans les pays industrialisés, avec des éléments anxiogènes pour un public non averti. En atteste par exemple le récent classement « agent cancérogène » de la pollution atmosphérique, et des particules en particulier, par le centre international de recherches sur le cancer (15, 16). Le déploiement de militaires s'effectuant dans des conditions et/ou des pays peu propices à une connaissance fine de leur environnement, possiblement dégradé, il semble indispensable que les armées modernes disposent de capacités spécialisées, à même d'offrir un niveau de connaissances suffisant pour garantir à leurs personnels déployés un niveau de sécurité sanitaire proche de celui offert en temps de paix (12,14). L'interprétation des résultats souffre des mêmes limites scientifiques qu'en métropole (pas de prise en compte des interactions entre polluants, mécanismes de toxicité non élucidés etc.), auxquelles s'ajoute une question encore très ouverte sur la transposabilité des constats épidémiologiques à des militaires souvent plus jeunes que la population générale et en meilleure santé. La prise en compte de cette difficulté passe notamment par l'utilisation de valeurs de référence dédiées pour les militaires, non existantes en France. La prise en compte de cette difficulté passe notamment par l'utilisation de valeurs de référence considérant les conditions particulières d'exposition des militaires en opérations, introuvables dans le corpus réglementaire en France. Nous avons donc indiqué les valeurs limites proposées pour l'armée américaine en situation de déploiement (14) lorsqu'elles sont disponibles, à défaut les valeurs limites proposées pour la protection des travailleurs en France (17).

Paramètres biologiques

Les investigations menées n'ont pas mis en évidence la présence de bactéries de la flore fécale. Les dénombrements de la flore bactérienne et de la flore fongique correspondent aux valeurs attendues dans de l'air en ambiance extérieure ainsi qu'à une flore microbienne atmosphérique classique telle que rapportée dans différentes études menées dans plusieurs régions du monde (18-21). La charge en particules cultivables est comparable à celle décrite dans une étude pakistanaise, comparant les concentrations bactériennes en zone urbaine et rurale : la zone urbaine est Lahore, avec deux fois plus d'habitants que Kaboul, et un climat plus humide (22). De même, une étude effectuée au Caire, ville beaucoup plus importante, rapporte des concentrations bactériennes viables comparables (23). En dépit de niveaux moyens de pollution microbiologique plutôt caractéristiques de villes plus importantes que Kaboul, et supérieurs à ceux mesurés en métropole (données non publiées), la différence avec des mesures réalisées en métropole ne semble pas significative, possiblement par manque de puissance et en raison de la très grande variabilité des résultats. Il n'existe pas de valeur limite à laquelle comparer ces résultats.

Pour les endotoxines également, les concentrations mesurées sont légèrement supérieures aux valeurs moyennes rapportées en milieu urbain non pollué : dans ces conditions, les valeurs moyennes rapportées sont habituellement inférieures à 1 EU/m^3 avec une variabilité importante selon les micro-environnements. Dans une rue très encombrée du centre-ville de Copenhague par exemple (5 mesures), il est rapporté une concentration moyenne de 4,4 EU/m^3 du même ordre de grandeur que les mesures à Kaboul (24). Toutefois, ces concentrations sont très inférieures aux seuils habituellement retenus pour la protection des travailleurs et n'évoquent pas une contamination bactérienne (bactéries Gram négatif) importante dans l'air extérieur. Les concentrations mesurées en milieu intérieur semblent inférieures au milieu extérieur et de l'ordre de grandeur des valeurs habituellement rapportées en environnement non considéré comme contaminé : une concentration moyenne en endotoxines de 0,5 EU/m^3 est rapportée dans des logements parisiens occupés par des nouveau-nés par exemple (25).

Au bilan, ces résultats n'évoquent pas une pollution microbiologique inacceptable dans l'air intérieur ou extérieur à Kaboul. En l'état actuel des connaissances, il n'est pas attendu d'effet sanitaire particulier aux concentrations mesurées.

Paramètres physico-chimiques

Poussières inhalables et métaux

Les concentrations mesurées en poussières inhalables sont faibles par rapport au référentiel d'hygiène industriel (valeur limite d'exposition professionnelle de l'INRS : 10 mg/m^3), elles sont importantes pour des environnements extérieurs mais les résultats sont difficilement interprétables en l'absence de référentiel pertinent pour les situations opérationnelles avec exposition continue : l'interprétation portera donc sur les poussières fines mieux documentées.

Les concentrations en métaux sont non quantifiables par la technique utilisée, à l'exception du fer. Au vu des limites de quantification, ce résultat permet d'affirmer que les concentrations applicables en milieu professionnel ne sont dépassées pour aucun des métaux recherchés. En outre, la sensibilité de la technique utilisée permet également de confirmer que les concentrations pertinentes en situation opérationnelle (valeur limite 1 an, spécifique des populations militaire) ne sont pas dépassées pour le plomb et le fer en milieu extérieur comme intérieur. Pour les concentrations en nickel, en chrome et en cadmium, la sensibilité de la technique utilisée ne permet pas de conclure par rapport à ce référentiel opérationnel. Ces métaux non détectés n'étaient cependant pas considérés comme prioritaires dans la conception de l'étude et les concentrations mesurées par d'autres équipes permettent de conclure favorablement avec des valeurs systématiquement faibles à Kaboul (12).

Particules fines

Les concentrations en particules fines ($PM_{2,5}$ et PM_{10}) mesurées à l'extérieur sont importantes, dépassant régulièrement les valeurs proposées pour l'exposition des militaires pendant 24 heures et systématiquement pour

les valeurs proposées pour des expositions annuelles. La pollution particulaire est connue dans cette région du monde et nos résultats corroborent les mesures d'autres pays (12).

À ces niveaux de concentration, il est possible d'observer des irritations des voies respiratoires, de la gorge et des yeux avec une possible exacerbation de symptômes chez des personnes fragilisées (asthmatiques, sujets porteurs de maladies respiratoires ou cardiaques) (14). Ces concentrations sont également associées à de la morbi-mortalité cardiovasculaire ou respiratoire sous la forme d'une augmentation de leur incidence – probablement faible lors des déploiements – pouvant justifier un suivi épidémiologique ciblé pendant le déploiement et/ou une stricte sélection médicale des personnels. À long terme, la littérature scientifique évoque enfin des liens entre pollution particulaire et cancer du poumon (15, 16) : les expositions des militaires en Afghanistan étant cependant courtes à l'échelle d'une vie, l'excès possible de cancers – si les données épidémiologiques étaient jugées transposables à la situation de Kaboul – serait indétectable par une étude épidémiologique post-déploiement. Ces résultats ne justifient donc pas à eux seuls la mise en place d'une telle étude (26).

Hydrogène sulfuré

Les concentrations en hydrogène sulfuré mesurées lors de cette campagne, aussi bien en milieu intérieur qu'extérieur sont relativement élevées par rapport aux concentrations habituellement rapportées en milieu urbain à l'écart de toute source importante (< 1 ppb). Des concentrations de quelques dizaines de ppb comme mesurées lors de cette campagne peuvent exister en milieu rural à proximité d'installations d'élevage ou en milieu industriel à proximité de sources connues comme des stations d'épuration (27). La concentration limite acceptable pour des militaires en situation opérationnelle jusqu'à un an a été dépassée chaque jour, sauf un. La concentration limite acceptable pour des durées plus courtes (14 jours) n'a jamais été atteinte.

Les effets sanitaires suspectés à ces niveaux de concentration sont essentiellement des phénomènes d'irritation des yeux, du nez et de la gorge – également attribuables aux particules – associés à une gêne olfactive pour une fraction significative de la population. L'association de ces deux polluants à ces niveaux de concentration pourrait expliquer les plaintes relatives à la qualité de l'air rapportées par les personnels déployés : l'irritation des muqueuses et l'odeur caractéristique de l'hydrogène sulfuré, ici détectable, pourraient expliquer les allégations relatives à la « pollution fécale ». Enfin, de possibles effets neurologiques non spécifiques (comme des maux de tête par exemple) peuvent également être associés à une exposition chronique à l'hydrogène sulfuré à ces niveaux de concentration.

À notre connaissance, il s'agit de la première description de niveaux de concentration en hydrogène sulfuré détectables et significatifs à Kaboul.

Composés organiques volatils (COV)

Malgré la mise en œuvre d'une méthode sensible et la proximité d'un aéroport, peu de COV ont été détectés dans l'air extérieur et aucun dans l'air intérieur. Les concentrations de benzène et de toluène détectées dans l'air extérieur sur l'unique échantillon hebdomadaire (résultats non présentés) sont très éloignées de leurs valeurs limites acceptables pour une exposition jusqu'à 1 an dans des conditions opérationnelles. Par suite, les concentrations en COV n'appellent donc aucune remarque particulière quant à un possible effet sanitaire pour les militaires déployés. Cette conclusion peut raisonnablement être extrapolée à la famille des COV courants dans la mesure où le benzène est le représentant ubiquitaire de cette famille avec un seuil de toxicité parmi les plus faibles.

Limites de l'étude et perspectives

Les prélèvements et analyses réalisés en 2012 l'ont été avec des méthodes proches de la santé environnementale. Lors de la campagne de 2006, les méthodes étaient plus proches de la santé au travail, en particulier avec des seuils de détection plus élevés : cette différence méthodologique n'autorise pas de comparaison entre les deux campagnes.

Les conditions météorologiques très variables pendant la campagne de prélèvement, associées à un faible nombre de résultats, ne permettent pas non plus d'établir une corrélation entre les niveaux de polluants et les conditions météorologiques, limitant l'extrapolation des résultats à des durées plus longues. Les analyses réalisées ont été limitées dans le temps et dans l'espace (pour des raisons de sécurité) alors que les seuils de toxicité retenus sont habituellement ceux acceptables pour des expositions jusqu'à un an. Ces résultats mériteraient des campagnes complémentaires afin d'intégrer la variabilité spatiale et temporelle des concentrations et de mieux approcher l'exposition moyenne des personnels déployés. Des campagnes ciblées de prélèvements (en particulier pour les poussières fines), à l'occasion d'opérations extérieures ou d'exercices internationaux, permettraient également de développer une connaissance de la composition atmosphérique des lieux analysés, absente de la littérature.

Au-delà, il pourrait être envisagé de mener des campagnes de prélèvement dès l'ouverture de chaque théâtre, afin de disposer d'un état des lieux qui ferait référence : ces campagnes pourraient être orientées selon les risques identifiés avant déploiement (renseignement médical et environnemental) et couvrir une période de temps plus importante afin de gagner en représentativité. Dans un avenir plus lointain, l'évaluation de la qualité de l'air en situation opérationnelle pourrait reposer sur des mesures plus systématiques pendant le déploiement, orientées à l'issue de l'état des lieux, autorisant des corrélations avec les indicateurs de santé eux aussi mesurables en temps quasi-réel (28). Cette pratique pourrait reposer sur un laboratoire support en métropole, sur une formation complémentaire dédiée des praticiens déployés sur les théâtres et enfin sur une plus grande interopérabilité des pratiques et raisonnements avec les nations alliées.

Conclusion

L'étude environnementale approfondie de l'air à Kaboul, suite à cette campagne, présente un réel intérêt scientifique en permettant de constituer un dossier d'expertise pouvant se révéler utile pour répondre ultérieurement aux allégations de syndromes post-déploiement toujours mal identifiables. Réalisé avant le déploiement important de troupes, il aurait pu conduire à des conseils sur l'aptitude médicale des personnels et/ou la surveillance syndromique de théâtre. Cet intérêt scientifique est doublé d'un intérêt opérationnel pour le compte de l'EMA avec la projection d'une équipe aux compétences multidisciplinaires, qui a su collaborer et s'appuyer sur ses laboratoires de référence, coordonnée par le BERS.

Au sein de la DCSSA, le positionnement de ce bureau, en charge notamment d'entretenir le fichier des experts en toxicologie environnementale et NRBC du Service de santé des armées (SSA), a démontré que le réseau scientifique tissé entre la Marine, la DGA et le SSA est opérationnel, réactif et efficace.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Le Goff P-A. Rapports d'essais et rapport final du LASEM de Toulon relatifs à la pollution atmosphérique à Kaboul (12 juillet 2006). Document interne ministère de la Défense.
2. Blanchfield M. Kabul troops worry about air quality Ombudsman hears complaints of dusty, fecal-contaminated air. The Ottawa Citizen. Tuesday, November 11, 2003.
3. Saunders D, Salisbury D. Reducing Health Hazards in Kabul. The Maple Leaf (10 December 2003).
4. Site de l'Organisation mondiale de la santé : http:///www.who.int/countries/afg/fr/ (consulté le 20 mars 2012).
5. Fiche Bédouin sur l'Afghanistan consultée le 15 janvier 2012 (réseau Intrasan du service de santé des armées).
6. Site internet de la Météorologie nationale : http://www.meteo.fr
7. Breton D, Cazoulat A, Bohand S, Laroche P, Mullot J-U. Hiérarchisation des risques militaires d'origine environnementale lors d'opérations militaires extérieures. Environnement Risques & Santé 111;2012:502-10.
8. Civil Military Fusion Centre. Toxic Air: Pollution and Health consequences in Afghanistan. June 2011:1-5.
9. Deloraine A, Hedreville L, Arthus C. Étude bibliographique sur l'évaluation des risques liés aux bio-aérosols générés par le compostage des déchets. Mars 2002 : 216p. Contrat ADEME/CAREPS n°: 0075038 - Rapport n°317.
10. Kelly FJ. Influence de la taille, la source et la composition chimique sur les effets sanitaires des particules. Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire 1-2; 2013:9-12.
11. Marano F. A-t-on raison de considérer que les particules atmosphériques fines et ultrafines sont dangereuses pour la santé ? Extrapol 33; 2007:4-7.
12. Magnusson R, Hägglund L, Wingfors H. Broad Exposure Screening of Air Pollutants in the Occupational Environment of Swedish Soldiers Deployed in Afghanistan. Military Medicine 177;2012:318-25.
13. National Research Council. Review of the Department of Defense Enhanced Particulate Matter Surveillance Program Report. 2010 :200p. Rapport disponible à l'adresse http://www.nap.edu/catalog/12911.html.
14. U.S. Army Public Health Command. Technical Guide 230 - Environmental Health Risk Assessment and Chemical Exposure Guidelines for Deployed Military Personnel. Révision de juin 2010: 493 p.
15. World Health Organisation Regional Office for Europe. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project,Technical Report. 2013:309p.
16. Straif K, Cohen A, Samet J. IARC Scientific Publication No. 161 – Air Pollution and Cancer. International Agency for Research on Cancer, 2013:229p.
17. Institut national de recherche et de sécurité (INRS). Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. Aide-mémoire technique ED984. 3e édition, juillet 2012:32p.
18. Papavassiliou JT, Bartzokas CA. The atmospheric fungal flora of the Athens metropolitan area. Mycopathologia 57;1975:31-4.
19. Menezes EA, Trindade EC, Costa MM, Freire CC, Cavalcante Mde S, Cunha FA. Airborne fungi isolated from Fortaleza city, State of Ceará, Brazil. Revista do Instituto de Medicina Tropical de Sao Paulo 46;2004:133-7.
20. Hasnain SM, Akhter T, Waqar MA. Airborne and allergenic fungal spores of the Karachi environment and their correlation with meteorological factors. Journal of Environmental Monitoring. 14;2012:1006-13.
21. Boutin P, Moline J, Torre M, Boissinot E. Atmospheric and respiratory contamination by waste water aerosols. Revue des maladies respiratoires 1;1984:125-31.
22. Nasir ZA, Colbeck I, Sultan S, Ahmed S. Bioaerosols in residential micro-environments in low income countries: A case study from Pakistan. Environmental Pollution 168;2012:15-22.
23. Awad AH, Gibbs SG, Tarwater PM, Casillas ME, Green CF. Seasonal evaluation of fine and coarse culturable bacterial aerosols from residences within a rural and an urban city in Egypt. International Journal of Environmental Health Research 23;2012:1-12.
24. Madsen AM. Airborne endotoxin in different background environments and seasons. Annals of Agricultural and Environmental Medicine 13;2006:81-6.
25. Dassonville C, Demmatei C, Vacquier B, Bex-Capelle V, Seta N, Momas I. Indoor airborne endotoxin assessment in homes of Paris newborn babies. Indoor Air 18;2008:480-7.
26. Green NA, Morris VR. Assessment of Public Health Risks Associated with Atmospheric Exposure to PM2.5 in Washington, DC, USA. International Journal of Environmental Research and Public Health 3;2006:86-97.
27. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for hydrogen sulphide. US Department of health and human services, juillet 2006: 253p.
28. Queyriaux B, Meynard JB, Chaudet H, Michel R, Texier G, Pellegrin L, et al. La surveillance épidémiologique dans l'OTAN. Médecine et Armées 41;2013:225-30.

VIENT DE PARAÎTRE



ATLAS DE MÉDECINE LÉGALE

La vision de la médecine légale au XXIe siècle

Coordination
Dr Bernard Marc
Dr Agnès Barthès, Dr. Armel Ghaith,
Dr. Olivia Toulouse,
Dr. Charles Vangeenderhuysen

L'*Atlas de la médecine légale* est le livre que le monde judiciaire attendait depuis… plus d'un siècle !

Il n'était que temps de pallier ce manque alors que la médecine légale a fait des progrès scientifiques et techniques dont le grand public est aujourd'hui informé.

Destiné aux professionnels en exercice (médecins, magistrats, officiers et techniciens de police judiciaire, avocats, chroniqueurs judiciaires…) ou en formation (internes des hôpitaux, étudiants en droit, futurs policiers ou gendarmes), l'ouvrage a son intérêt pour expliciter les différentes situations rencontrées dans l'exercice médico-légal.

Sa richesse repose sur la variété et la pertinence des photographies, choisies parmi les photothèques professionnelles des auteurs, pour être les plus parlantes, les plus explicites, mais sans recherche du spectaculaire.

Un glossaire de plus de plus de 600 entrées vient enrichir cet ouvrage de référence qui faisait défaut.

ISBN : 978-2-36241-184-7 – Format : 15x21 cm – Pages : 642 – Prix : 49 € – ***Éditions Demos*** *– editions@demos.fr – Tél. : 09 88 66 18 99 – www.editionsdemos.fr*