




Article de recherche original

De face. Bioeng. Biotechnol., 14 février 2022

| <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.800011>

L'élimination des nanoparticules environnementales augmente la synthèse des protéines et la production d'énergie chez les humains en bonne santé

 Eduardo Antuña ^{1,2,3},  Juan Carlos Bermejo-Millo ^{1,2,3},  Enrique Caso-Onzain ^{4,5},  Enrique Caso-Peláez ^{5,6,7},  Yaiza Potes ^{1,2,3} * et  Ana Coto-Montes ^{1,2,3} *

- ¹ Département de Morphologie et Biologie Cellulaire, Faculté de Médecine, Université d'Oviedo, Oviedo, Espagne
- ² Instituto de Investigación Sanitaria Del Principado de Asturias (ISPA), Av. Del Hospital Universitario, Oviedo, Espagne
- ³ Instituto de Neurociencias del Principado de Asturias (INEUROPA), Université d'Oviedo, Oviedo, Espagne
- ⁴ Unité Innovation, BiowAir Total Systems SL, C/Michel Faraday, Gijón, Espagne
- ⁵ PDG scientifique MyOmics SL, Gijón, Espagne
- ⁶ Système et médecine de précision, Hôpital Covadonga Gijón, Gijón, Espagne
- ⁷ Unité biomédicale, BiowAir Total Systems SL, Gijón, Espagne

Actuellement, l'activité industrielle provoque le rejet dans l'environnement de nanoparticules qui ont de multiples effets néfastes sur la santé des populations. Il existe une corrélation claire entre l'augmentation de la pollution atmosphérique particulaire et l'augmentation des taux de mortalité et de morbidité chez les adultes et les enfants, ce qui démontre les effets toxiques de ces particules. Cependant, l'effet de l'élimination des particules sur les individus en bonne santé est inconnu. Ainsi, dans cette étude préliminaire, nous avons montré, pour la première fois, comment le

matériel de filtrage que nous utilisions réduisait significativement une grande quantité de nanoparticules en un minimum de temps et induisait une réduction des dommages oxydatifs chez les individus sains des deux sexes après 25, 50 et 100 jours d'exposition. Ces effets ont conduit à une synthèse protéique accrue et à une efficacité mitochondriale améliorée, entraînant ainsi un déclenchement très significatif de la synthèse d'ATP. Ces résultats donnent non seulement un aperçu des effets chroniques que les nanoparticules environnementales ont sur les individus avant le développement de pathologies, mais démontrent également un système capable d'inverser la toxicité des nanoparticules et de permettre la récupération d'énergie cellulaire.

1. Introduction

La pollution de l'environnement est une modification défavorable de notre environnement en raison de l'urbanisme, de la croissance démographique, du rayonnement solaire et, principalement, de l'activité industrielle que les êtres humains ont développée ces dernières années. Au cours des derniers siècles, cette activité a acquis une importance particulière en raison de son augmentation exponentielle et de la nécessité pour l'homme d'identifier des systèmes capables d'arrêter la pollution qui en résulte compte tenu de la mise en évidence croissante de ses effets dans l'exposition à moyen et long terme.

L'exposition aux particules est fréquemment associée à des processus pathogènes et même à la mortalité ([Brook et al., 2010](#)), et la taille des particules est l'une des principales caractéristiques qui contribuent à la létalité. De plus, les particules sont divisées en fonction de leurs tailles aérodynamiques. Ainsi, les particules dont la taille aérodynamique se situe entre 10 et 2,5 μm (PM10-2,5) sont appelées fraction grossière, tandis que les particules inférieures à 2,5 μm (PM2,5) sont appelées fraction fine. Les particules dites ultrafines sont les particules égales ou inférieures à 0,1 μm , et les particules inférieures à 100 nm constituent des nanoparticules ([Gwinn et Vallyathan, 2006](#) ; [Nemmar et al., 2013](#)).

La proportion de nanoparticules avec laquelle nous vivons habituellement, ainsi que la proportion qui se répand dans l'air ou contenue dans les

atomiseurs, a une influence significative sur notre état de santé, du fait qu'elles peuvent être absorbées dans notre corps par la peau les pores, les tissus fragilisés et les injections, ainsi que par les voies olfactives, respiratoires et intestinales ([Yah et al., 2012](#)). Par la suite, ils peuvent être systématiquement disséminés, entraînant des effets encore mal identifiés mais souvent nocifs puisqu'ils peuvent fonctionner comme cofacteurs ou aggravants d'événements biologiques indésirables de divers types, allant de l'inflammation pulmonaire ([Lopes et al., 2009](#)) à la maladie pulmonaire obstructive chronique ([Rennard, 1998](#)) et comprenant différents types de tumeurs ([Nemmar et al., 2002](#) ; [Warheit et al., 2004](#)). De plus, ces effets peuvent également entraîner des dommages au cerveau ([Oberdörster et al., 2004](#)). Bien que ces altérations soient bien documentées, avec un nombre croissant d'affections détectées chaque jour, les mécanismes cellulaires qui sont affectés par l'infiltration quotidienne de nanoparticules restent pratiquement inconnus, ce qui est un domaine de recherche en santé relativement récent.

L'élimination de ces nanoparticules environnementales, qui s'effectue principalement par des processus de filtrage, devrait réduire significativement les effets susmentionnés, suivant une courbe dose-réponse et en fonction de la taille des particules filtrées, en plus d'être directement liée à l'état basal de la individuel. Cependant, les systèmes de filtrage d'air habituels n'interfèrent pas couramment avec les concentrations des nanoparticules dispersées, car ces particules sont plus petites que le pore ou le système de filtrage. Ce phénomène a été largement documenté en relation avec l'infection mondiale par le SRAS-CoV-2, car la taille du virion est comprise entre 60 et 140 nm ([Liu et al., 2020](#)). De plus, les climatiseurs ne filtrent pas forcément l'air mais peuvent créer un système de recirculation d'air sans apport extérieur ([Li et al., 2021](#)), qui maintient la concentration de nanoparticules inchangée. Par conséquent, des stratégies efficaces pour réduire les événements de concentration de polluants dans l'air intérieur sont indispensables.

Les preuves montrent des différences entre les hommes et les femmes dans plusieurs indicateurs de santé. Globalement, l'espérance de vie est plus

élevée pour les femmes que pour les hommes. Cependant, les femmes manifestent un degré de dépendance plus élevé à un âge avancé ([Institute of Medicine \(US\) Committee on Gender Differences in Susceptibility to Environmental Factors, 1998](#)). La synthèse des protéines et la bioénergétique cellulaire sont considérées comme des processus moléculaires clés impliqués dans le contrôle de la qualité cellulaire et la durée de vie. L'augmentation de la synthèse protéique est associée à l'amélioration du fonctionnement cellulaire en favorisant l'activation des voies protectrices et l'atténuation des processus de mort cellulaire. Des altérations substantielles de la synthèse des protéines qui conduisent à des malformations ou à un mauvais repliement des protéines entraînent finalement la mort cellulaire ([Rubio-González et al., 2020](#)). À l'inverse, les améliorations de la fonction cellulaire sont mises en évidence par une synthèse protéique plus efficace ([Bermejo-Millo et al., 2018](#)). La cible mammifère de la voie rapamycine/protéine ribosomale S6 kinase bêta-1, généralement connue sous le nom de mTOR/p70S6K, est directement impliquée dans le contrôle du métabolisme et de la croissance cellulaire, et son activation est directement liée aux processus de synthèse et de dégradation des protéines ([Zanchi et Lancha, 2008](#)). De même, un manque d'énergie, qui est principalement induit par un dysfonctionnement mitochondrial, non seulement ralentit les processus cellulaires ([Poeggeler et al., 2005](#)), mais déclenche également la production de radicaux libres d'oxygène qui peuvent causer des dommages irréparables aux macromolécules cellulaires ([Potes et al., 2019](#)). La protéomique est une stratégie puissante qui permet une approche précise pour détecter les modifications que l'environnement provoque au niveau cellulaire ([Schinzel et Dillin, 2015](#)), ce qui peut nous permettre d'identifier le niveau spécifique auquel les mécanismes cellulaires sont affectés.

La caractérisation des effets indésirables que l'inhalation de nanoparticules provoque au niveau cellulaire et moléculaire dans la population générale est considérablement entravée par la difficulté d'obtenir un environnement sans nanoparticules sans atteindre également la stérilité, qui serait toxique pour les témoins. Cependant, nous possédons des équipements de filtration d'air qui nous permettent d'obtenir un environnement avec une réduction

significative des nanoparticules. Ainsi, l'objectif de la présente étude était d'étudier l'effet que la combinaison de la filtration de l'air et de l'ionisation du plasma a sur la santé humaine aux niveaux systémique et cellulaire. Nos résultats obtenus ont montré, pour la première fois, comment cette stratégie combinée peut induire une réduction des dommages oxydatifs en conjonction avec une amélioration substantielle de la synthèse des protéines et de la production d'énergie chez l'homme en bonne santé.

2. Matériels et méthodes

2.1 Participants

Cinquante-huit individus sélectionnés au hasard dans la population asturienne constituaient la cohorte BioW (BioW). Tous les participants étaient indépendants, en bonne santé et étaient des individus des deux sexes (28 hommes et 30 femmes), âgés de 22 à 82 ans ($\bar{X} \pm s = 55,59 \pm 14,59$). Le consentement éclairé a été obtenu de tous les sujets impliqués dans l'étude.

Les critères d'inclusion pour la cohorte comprenaient les éléments suivants : personnes en bonne santé générale, sans problème médical pertinent ; maison bien conditionnée avec une isolation thermique adéquate; un mode de vie régulier sans modifications significatives de la vie quotidienne et une hygiène de sommeil adéquate. Indice de Barthel ≥ 80 chez les personnes de plus de 65 ans.

Les critères d'exclusion comprenaient : maladies majeures et/ou comorbidités ; déficience cognitive; obésité (indice de masse corporelle IMC ≥ 30), mode de vie irrégulier, manque de logement adéquat.

Une étude longitudinale de l'effet temporel causé par l'utilisation de l'éliminateur de nanoparticules (développé par BioW © [BioWAir Total System SL, Espagne]) a constitué le groupe BioW. La procédure s'est déroulée de la manière suivante. Le système a été placé dans la chambre à coucher des participants, afin d'assurer son effet pendant au moins 6 à 8 h de sommeil réparateur. Le système a été maintenu allumé pendant 24 heures par jour sans interruption pendant toute la durée de l'étude. De plus, le système a été programmé pour maintenir le niveau d'élimination des nanoparticules pendant 24 heures par jour. Les résultats obtenus ont été

comparés aux niveaux de référence des mêmes individus au temps 0. Des échantillons de sang ont été prélevés avant l'utilisation de l'équipement et à 25, 50 et 100 jours d'utilisation.

2.2 Dissolvant de nanoparticules

Au cours de l'étude, la qualité de l'air dans la localité a toujours été maintenue à des niveaux adéquats en termes de concentration de particules en suspension, conformément à la législation espagnole en vigueur (décret royal 102/2011).

Les nanoparticules ont été retirées de l'espace intérieur en appliquant un système de nanofiltration automatique, multicouche, hétérogène à large spectre, unique à la génération continue de flux (BioW[®]). Le système intègre automatiquement un processus continu complexe, comprenant 1) un préfiltre d'entrée pour l'élimination des plus grosses impuretés, 2) une feuille bactéricide, 3) un filtre HEPA 13 (High Efficiency Particle Arresting), 4) une couche de charbon actif qui absorbe les particules volatiles (gaz, fumées et odeurs) et élimine les composés organiques volatils (COV), 5) un filtre en acier inoxydable robuste conçu pour les débits d'air élevés et un déflecteur ultraviolet (UV) pour la catalyse au platine, 5) la lumière ultraviolette (UV) pour la dénaturation du matériel génétique bactérien et viral, 6) un ioniseur de plasma pour générer un changement de charge des nanoparticules, induisant ainsi leur agglutination pour un filtrage plus efficace et 6) une plaque de stérilisation thermique à 200°C avant la sortie du flux laminaire du système .

L'installation électrique du coffret où il a été utilisé est conforme aux réglementations CE. Dans cette étude, l'appareil a été placé dans la chambre, il a été maintenu à une distance maximale de 2 m du lit et le mode automatique a été activé, dans lequel l'écran s'éteint en l'absence de lumière et s'allume dans la présence de luminosité. Ainsi, bien que l'équipement soit sur 24h/24, on s'attend à ce que l'effet le plus direct et le plus efficace soit réalisé pendant les heures de sommeil, ce qui est la raison de l'exclusion des volontaires qui n'ont pas maintenu une hygiène veille/sommeil adéquate. L'équipement ne nécessite aucune mesure supplémentaire à adopter dans des conditions raisonnablement prévisibles, en ce qui concerne les

variations de pression, d'accélération ou de sources d'inflammation thermiques. En termes de coûts fixes d'équipement, dans l'étude, la conception était gratuite et aucune dépense d'installation n'a été nécessaire pour préparer le site pour l'installation du système. Parmi les coûts variables, le coût récurrent pour le fonctionnement du système sur la consommation électrique (<22,4 W) était inférieur à 1,00 € par mois pendant les 3 mois d'étude. Bien que le système ne nécessite qu'un remplacement annuel du filtre, en raison de la période d'étude, il n'y a eu aucun coût supplémentaire pour l'approvisionnement, le matériel et la maintenance pendant les 100 jours du protocole d'étude.

2.3 Détermination des nanoparticules

Le niveau de particules (PM) en suspension (tailles 0,3 ; 0,5 ; 1,0 ; 2,5 ; 5,0 et 10) a été testé à l'aide d'un compteur de particules portable PC-220 (TROTEC) (numéro de série calibré : 17020034, SGS Tecno SA & Comfort Direct) sur des échantillons d'environnement intérieur provenant de dimensions d'espace comprises entre 23,75 m³ de volume minimum et 183,60 m³ de volume maximum. Des tests sur le débit volumétrique, la vitesse de l'air et la température de sortie du système ont également été effectués.

2.4 Prélèvement sanguin

Des échantillons de sang ont été extraits par ponction veineuse après une nuit de jeûne. Tous les échantillons de sang veineux ont été obtenus avant 10h00 pour éviter les variations circadiennes.

Les échantillons de sang collectés ont été fractionnés en plasma, érythrocytes et cellules mononucléaires du sang périphérique (PBMC) dans un gradient Ficoll-Paque Plus (Ficoll-Paque Plus GE Healthcare) et stockés à -80 °C jusqu'à une analyse plus approfondie, comme cela a été décrit précédemment ([de Gonzalo-Calvo et al., 2010](#) , [2012](#)). La méthode de Bradford ([Bradford, 1976](#)) a été utilisée pour mesurer les concentrations de protéines plasmatiques.

2.5 Études sur le stress oxydatif

Les dommages oxydatifs aux protéines (PD) ont été mesurés dans le plasma en utilisant les méthodes décrites par Levine et al. ([Levine et al., 1990](#)), avec

des modifications de Coto-Montes et Hardeland ([Coto-Montes et Hardeland, 1999](#)), pour la détermination des concentrations de protéines carbonylées. Les résultats sont présentés en nmol de protéine carbonylée/mg de protéine.

L'activité antioxydante totale (TAA) a été déterminée dans le plasma en utilisant la méthode ABTS/H₂O₂/HRP ([Arnao et al., 2001](#)), qui a été modifiée dans notre laboratoire pour les échantillons de plasma ([de Gonzalo-Calvo et al., 2010](#) , [2012](#)). Les résultats sont exprimés en équivalents de mg de Trolox/g de protéine.

2.6 Test immunologique Western Blot

Pour les différents immunodosages Western blot, des homogénats de tissus (50 µg de protéine par échantillon) ont été mélangés avec du tampon d'échantillon de Laemmli (BioRad Laboratories, Inc., CA, États-Unis). Les échantillons ont été fractionnés en utilisant SDS-PAGE à 200 V. Après séparation, la protéine a été transférée sur des membranes de fluorure de polyvinylidène à 350 mA (Immobilon TM-P ; Millipore Corp., MA, États-Unis). La β-actine (protéine domestique typique) n'a pas montré de variations significatives de leurs niveaux ; par conséquent, il a été utilisé pour assurer un chargement égal. Les membranes ont été incubées avec les anticorps primaires suivants : p-70S6 kinase (9,202, Cell Signaling) ; phospho-p-70S6 kinase (9 206, signalisation cellulaire); CI-20 (NDUFB8) (ab110242, Abcam, Cambridge, Royaume-Uni); CII-30 (SDHB) (ab14714, Abcam, Cambridge, Royaume-Uni) et CV (ATP5A) (ab14748, Abcam, Cambridge, Royaume-Uni). Les membranes ont été incubées avec l'anticorps secondaire conjugué à la peroxydase de raifort correspondant (Sigma-Aldrich, Missouri, États-Unis). Les membranes ont été développées en utilisant un substrat de peroxydase de raifort chimioluminescent (WBKLS0500, Millipore Corp., Darmstadt, Allemagne), selon les instructions du fabricant. Le logiciel Image Studio Lite 5.2.5 (LI-COR Biosciences, Nebraska, États-Unis) a été utilisé pour l'analyse quantitative.

2.7 Production d'ATP

Les niveaux d'adénosine triphosphate (ATP) ont été déterminés à l'aide d'un kit bioluminescent ATP disponible dans le commerce (FLAA, Sigma-

Aldrich, Saint Louis, MO, États-Unis). Le test a été effectué comme indiqué par le fabricant. Les résultats sont exprimés en nmol ATP/g de protéine.

2.8 Analyse statistique

Le progiciel statistique SPSS 20.0.0 pour Macintosh (SPSS Inc., Chicago, IL, États-Unis) a été utilisé pour toutes les analyses statistiques. Les données sont exprimées en moyenne et en erreur standard de la moyenne (SEM). La normalité des données a été analysée en utilisant le test de Kolmogorov-Smirnov. Les comparaisons entre les points temporels et entre les sexes ont été effectuées à l'aide du test t de Student ou du test *U* de Mann-Whitney pour les variables continues. La signification a été acceptée avec $p < 0,05$.

3. Résultats

Ces résultats sont divisés en deux groupes principaux, selon qu'ils sont liés à l'identification des propriétés des équipements ou aux effets produits au niveau cellulaire.

3.1 Détermination des nanoparticules

Avant de commencer l'étude, des tests de détection de nanoparticules ont été effectués. Les tests effectués sur des échantillons environnementaux pour les PM en suspension ont montré une réduction rapide et efficace des PM de tailles 0,3, 0,5, 1,0, 2,5, 5,0 et 10 μm dans les espaces intérieurs après 30, 40 et 60 min, PM se référant aux particules en suspension avec un diamètre inférieur au nombre qui l'accompagne. [La figure 1](#) montre les niveaux des différentes tailles de PM avant l'initiation du système ([figure 1A](#)), après 30/40 min ([figure 1B](#)) et après 60 min ([figure 1C](#)). Les contrôles et les tests ont montré que le débit volumétrique, la vitesse de l'air et la température de sortie du système étaient de 156,8, 224,5 et 284,7 m^3/h pour un débit moyen pendant le fonctionnement du système aux vitesses 1, 2 et 3, respectivement, et une température de $24,8^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$. Les résultats de cette étude ont montré de très faibles niveaux de nanoparticules en suspension dans l'air intérieur ; en fait, les niveaux de nanoparticules obtenus ont été maintenus en dessous de la limite minimale établie par l'OMS pour les espaces intérieurs. De plus, une charge de particules plus

élevée en suspension indiquait un pourcentage de réduction plus élevé obtenu avec le système.

FIGURE 1

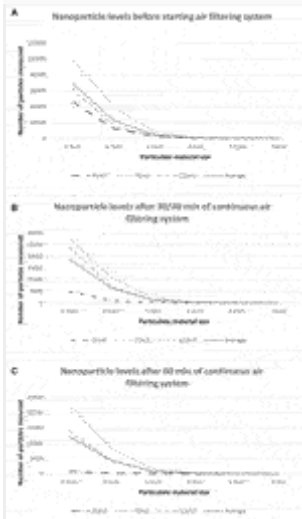


FIGURE 1 . Niveaux de nanoparticules avant de démarrer le système de filtrage de l'air et après 30/40/60 min d'utilisation continue du système de filtrage de l'air. Résultats du test de détection des particules (PM) de différentes tailles (0,3, 0,5, 1,0, 2,5, 5,0 et 10 µm) dans l'air présent dans plusieurs espaces intérieurs ; 25 m³ (pointillés épais), 70 m³ (pointillés épais), 122 m³ (pointillés fins) et la valeur moyenne (pointillés fins). Le nombre total de particules a été mesuré à un taux de 2,83 L par minute et toutes les 217 21 s, avec des intervalles de 0,99 L. **(A)** avant le système de filtrage de l'air ; **(B)** après 30/40 min et **(C)** après 60 min de système de filtrage d'air continu.

3.2 Études de sang

3.2.1 Stress oxydatif

Le gaz ionisant à haute énergie électrique en fonction de la nature des électrons, des ions et des espèces neutres modifie toute voie contrôlée directement ou indirectement par ou liée aux espèces réactives de l'oxygène (ROS) ([Vandamme et al., 2012](#)). Par conséquent, l'étude des variations du niveau de stress oxydatif induit au niveau systémique devrait être la première étape de l'investigation.

Les résultats ont montré une diminution significative de la MP ([Figure 2](#)) dans tous les groupes BioW ; cependant, il existait des différences temporelles selon le sexe, dues au fait que les hommes montraient une

réduction significative dès 25 jours (25 jours $p < 0,001$; 50 jours $p < 0,01$; 100 jours $p < 0,01$), alors que chez les femmes, il était retardé jusqu'à 50 jours (50 jours $p < 0,01$; 100 jours $p < 0,01$).

FIGURE 2

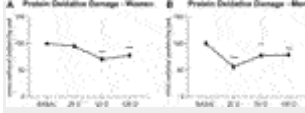


FIGURE 2 . Dommages oxydatifs protéiques (exprimés en nmol de protéine carbonyle/mg prot) du plasma extrait de femmes (**A**) et d'hommes (**B**) au départ (BASAL), 25 jours (25 J), 50 jours (50 J) et 100 jours (100 RÉ). Les données sont moyennes \pm SEM. *BASAL vs 25, 50 et 100 D. Le nombre de symboles marque le niveau de signification : un pour $p < 0,001$.

L'activité antioxydante totale a montré une tendance généralisée à la baisse dans les groupes BioW ([Figure 3](#)), qui n'était significative qu'à 25 et 50 jours, chez les femmes (25 jours $p < 0,01$; 50 jours $p < 0,05$) et à 25 ($p < 0,001$) et 100 ($p < 0,05$) chez les hommes.

FIGURE 3

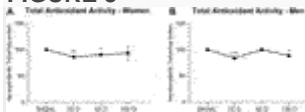


FIGURE 3 . TAA (exprimé en mg Trolox (Tx)/g prot) de plasma extrait de femmes (**A**) et d'hommes (**B**) à l'inclusion (BASAL), 25 jours (25 J), 50 jours (50 J) et 100 jours (100 RÉ). Les données sont moyennes \pm SEM . *BASAL vs 25, 50 et 100 D. Le nombre de symboles marque le niveau de signification : un pour $p < 0,05$, deux pour $p < 0,01$ et trois pour $p < 0,001$.

3.2.2 Synthèse des protéines

p70S6K est activé par phosphorylation au niveau de la thréonine 389 (p-p70S6K), qui induit la synthèse des protéines et est couramment utilisé comme marqueur de l'activation de mTOR. Cependant, cette activation est directement dépendante de la quantité de p70S6K total dans le milieu ; ainsi, le rapport p-p70S6K/p70S6K est le véritable indicateur de l'activation de la synthèse protéique ([Figure 4](#)).

FIGURE 4

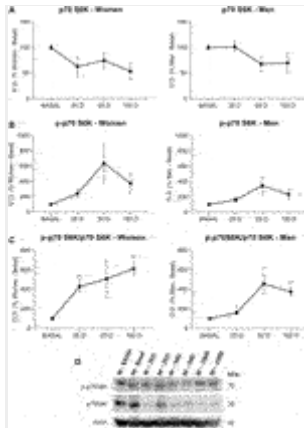


FIGURE 4 . Analyse Western blot pour étudier la voie de synthèse des protéines dans les lymphocytes extraits de femmes et d'hommes à l'inclusion (BASAL), 25 jours (25 J), 50 jours (50 J) et 100 jours (100 J). Diagramme à barres montrant la densité optique (OD) (unités arbitraires) des bandes de transfert de **(A)** p70S6K, **(B)** p-p70S6K et **(C)** p-p70S6K/p70S6K, **(D)** Images d'immunoblots représentatifs. L'actine a été utilisée comme contrôle de charge. Les données sont moyennes \pm SEM. *BASAL vs 25 D, 50 D et 100 D. Le nombre de symboles marque le niveau de signification : un pour $p < 0,05$, deux pour $p < 0,01$ et trois pour $p < 0,001$.

Les niveaux d'expression de p70S6K ont montré une nette diminution dans les groupes traités par BIOW, qui était progressive chez les mâles et brutale à partir de 25 jours chez les femelles ([Figure 4A](#)). La phosphorylation de p70S6K a montré un schéma similaire chez les deux sexes, étant plus marquée chez les femmes mais sans atteindre de différences significatives entre les différentes périodes de temps. ([Figure 4B](#)). Le ratio a montré une augmentation progressive au fil du temps chez les femmes qui était équivalente chez les hommes, bien que dans ce sexe, l'augmentation ait commencé avec un certain retard ([figure 4C](#)). Ainsi, la comparaison entre les sexes a montré que chez les femelles, les augmentations étaient brutales, avec des valeurs bien supérieures à celles observées chez les mâles.

3.2.3 Phosphorylation oxydative mitochondriale

Nous avons émis l'hypothèse que les mitochondries pourraient augmenter leur efficacité avec la réduction des éléments toxiques environnementaux ; ainsi, l'expression des sous-unités des complexes de la chaîne de transport

d'électrons mitochondriale a été évaluée. L'immunoblot a révélé que l'activité des complexes mitochondriaux I, II et V variait légèrement au fil du temps, montrant un schéma similaire chez les deux sexes. Alors que les complexes I et II ont montré de petites réductions, étant significative cette réduction du complexe I pour les hommes (25 jours $p < 0,001$; 100 jours $p < 0,05$) et du complexe II pour les femmes (100 jours $p < 0,01$), le complexe V a montré une augmentation dans son activité, principalement après 50 jours chez les deux sexes sans atteindre des niveaux significatifs ([Figure 5](#)).

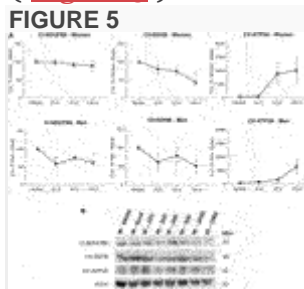


FIGURE 5 . Analyse Western blot pour étudier les taux de protéines des sous-unités des complexes de la chaîne de transport d'électrons mitochondriale dans les lymphocytes extraits de femmes et d'hommes à l'inclusion (BASAL), 25 jours (25 J), 50 jours (50 J) et 100 jours (100 J). Diagramme à barres montrant la densité optique (OD) (unités arbitraires) des bandes de transfert de **(A)** (NADH déshydrogénase ubiquitone) 1b sous-complexe 8 (NDUFB8) du complexe I (CI), sous-unité fer-soufre (SDHB) du complexe II (CII) et la sous-unité α de l'ATP synthase (ATP5A) du complexe V (CV). **(B)** Images d'immunoblots représentatifs. L'actine a été utilisée comme contrôle de charge. Les données sont moyennes \pm SEM. *BASAL vs.25, 50 et 100 D. Le nombre de symboles marque le niveau de signification : un pour $p < 0,05$ et deux pour $p < 0,01$.

3.2.4 Production d'énergie

Pour caractériser les niveaux d'énergie, la production d'ATP a été étudiée ([Figure 6](#)). L'augmentation des niveaux d'ATP a montré un schéma similaire pour les deux sexes, avec une augmentation significative par rapport aux niveaux basaux à 25 jours de traitement ($p < 0,001$ pour les femmes ; $p < 0,01$ pour les hommes), une diminution à nouveau à 50 jours ($p < 0,05$ pour les femmes ; $p < 0,01$ pour les hommes), et un pic brutal à

100 jours de traitement avec BioW ($p < 0,001$ dans les deux sexes), représentant une multiplication par quatre chez les hommes et les femmes par rapport aux niveaux de base.

FIGURE 6

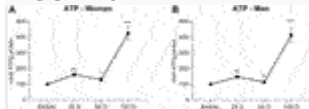


FIGURE 6 . Teneur en ATP (exprimée en nmol ATP/g de protéine) des lymphocytes extraits de femmes (**A**) et d'hommes (**B**) à l'inclusion (BASAL), 25 jours (25 J), 50 jours (50 J) et 100 jours (100 J) . Les données sont moyennes \pm SEM. *BASAL vs.25, 50 et 100 D. Le nombre de symboles marque le niveau de signification : un pour $p < 0,05$, deux pour $p < 0,01$ et trois pour $p < 0,001$.

4. Discussion

L'extraordinaire augmentation des polluants avec lesquels les êtres humains doivent coexister au quotidien (notamment dans les zones industrialisées), englobés sous le terme de pollution, présente un environnement toxique qui a un effet multifactoriel sur la santé ([Hoet et al., 2004](#)). Ce niveau de toxicité a récemment été aggravé par des altérations des propriétés physiques et chimiques de produits apparemment inoffensifs, entraînant ainsi une augmentation de la toxicité à l'échelle nanoscopique pouvant entraîner des conséquences néfastes pour les travailleurs, l'environnement et la société en général ([Service, 2004](#) ; [Lee et al., 2005](#)). Cette contamination environnementale favorise le développement de maladies gastro-intestinales ([Bhavsar et Amiji, 2007](#)), de dermatites ([Monteiro-Riviere, 2021](#)) et les troubles oculaires ([Järvinen et al., 1995](#)), qui peuvent réduire considérablement la capacité immunitaire contre les infections ([Favarato et al., 2021](#) ; [Katoto et al., 2021](#)) et favoriser le développement de processus tumoraux ([Coleman et al., 2021](#) ; [Khorrami et al., 2021](#) ; [Rojas-Rueda et al., 2021](#)). Des résultats récents ont mis en évidence le rôle toxique important joué par les particules ultrafines et les nanoparticules dans ces processus pathologiques induits par la pollution de l'air ([Maher et al., 2020](#)). L'utilisation d'équipements de nanofiltration est très efficace pour réduire les processus pathologiques liés à la pollution de l'environnement, tels que

la silicose ou les infections virales ([Boczkowski et Hoet, 2010](#) ; [Fermo et al., 2021](#)), alors que l'exposition aux nanoparticules s'est avérée être un facteur majeur . risque de morbidité et de mortalité ([Nishihama et al., 2021](#)). Cependant, les effets bénéfiques de l'élimination de telles nanoparticules pour des sujets sains ou en l'absence de pathologies ne sont pas connus à ce jour.

Les études montrant une relation directe entre l'exposition à la pollution de l'air et une augmentation des ERO ([Møller et al., 2010](#)) sont abondantes. Ces espèces très instables peuvent endommager tous les types de macromolécules biologiques dans leur voisinage, provoquant ainsi un degré élevé de détérioration cellulaire ([Hardeland et al., 2003](#)). Chez l'homme, des études de biosurveillance ont démontré une association claire entre les particules de fumée de bois ou la pollution de l'air et les dommages oxydatifs au niveau des désoxynucléotides et des lipides, ce qui réduit significativement à la fois la qualité de vie et les perspectives de santé future de la population soumise à ces effets. Différentes nanoparticules ont montré un effet oxydant sur les membranes biologiques en augmentant la carbonylation des protéines induite par les dommages oxydatifs de ces molécules ; ces effets peuvent, dans certains cas, être inversés avec des antioxydants ([Kamat et al., 2000](#)). De même, des études *in vitro* ont montré que, parmi les effets des nanoparticules, une diminution de la capacité antioxydante peut augmenter les dommages initiaux aux protéines ([Møller et al., 2010](#)). Cependant, nos résultats ont montré une réduction significative et directe en fonction du temps des dommages oxydatifs aux protéines chez les sujets masculins et féminins BioW. Curieusement, la diminution des dommages oxydatifs des protéines constatée chez les femmes commence à 50 jours, présentant un retard par rapport aux hommes. Le retard décrit peut être dû à la susceptibilité différente selon le sexe aux facteurs de stress, dans laquelle les hormones sexuelles semblent jouer un rôle critique ([Institute of Medicine \(US\) Committee on Gender Differences in Susceptibility to Environmental Factors, 1998](#) ; [Kingston et al., 2017](#)).

La synthèse des protéines, qui est principalement réalisée par le réticulum endoplasmique, est un processus délicat qui est facilement découplé et

entravé. Des infections virales ou bactériennes ([Chamberlain et Anathy, 2020](#) ; [Alshareef et al., 2021](#)) au développement de toute maladie neurodégénérative ([Ghemrawi et Khair, 2020](#) ; [Schneider et al., 2021](#)), le stress du réticulum est une manifestation cellulaire courante de ces pathologies. Le stress du réticulum endoplasmique régule mTOR, qui à son tour module la croissance cellulaire et la synthèse des protéines par la phosphorylation de p70S6K. De plus, la signalisation mTOR/p70S6K est étroitement impliquée dans la régulation des processus de contrôle de la qualité cellulaire. L'inhibition de mTOR et la réduction de la production d'énergie déclenchent l'autophagie qui agit comme un mécanisme de survie et décide finalement si l'apoptose doit se poursuivre ou non ([Duan et al., 2016](#) ; [Prieto-Domínguez et al., 2017](#)). La récupération du contrôle de la synthèse protéique est beaucoup plus compliquée et a été démontrée dans quelques cas, comme par exemple avec un traitement à la mélatonine, qui est un puissant antioxydant dont l'activité en tant que facteur de récupération de l'activité endoplasmique en tant que régulateur de l'autophagie a été largement démontrée. ([Aouichat et al., 2021](#)). Cependant, cette augmentation nécessite de l'énergie dans tous les cas.

La production d'énergie, qu'elle soit aérobie ou anaérobie, est essentielle à la survie des cellules et aucune pathologie associée à une surproduction d'énergie n'a été décrite. La découverte de niveaux accrus d'ATP avec une exposition temporaire à BioW ne peut être liée qu'à un fonctionnement mitochondrial amélioré et à une activité métabolique efficace lors de l'élimination des nanoparticules environnementales ([Møller et al., 2010](#)). La réduction de la synthèse d'ATP due aux dommages mitochondriaux dans un environnement riche en nanoparticules est connue depuis longtemps ([Ueng et al., 1997](#)). Ainsi, les nanoparticules peuvent induire une diminution de l'efficacité de la chaîne de transport d'électrons qui s'accompagne d'une inhibition du transporteur ADP dans les mitochondries, entraînant ainsi une augmentation de la production de stress oxydatif ([Hussain et al., 2005](#)) qui peuvent déclencher la mort cellulaire par apoptose ([Xia et al., 2004](#)). Il faut souligner que dans notre étude, il n'y a pas eu de variations significatives dans l'expression d'OXPPOS alors même que son activité était

nécessairement augmentée, indiquant une augmentation de son efficacité. Cette différence essentielle est directement corrélée à la production d'ATP, qui est considérablement augmentée avec la réduction des nanoparticules environnementales. Par conséquent, la réduction observée de l'expression de ces complexes est la preuve d'une amélioration de l'efficacité mitochondriale. De nombreux articles ont montré une diminution de l'efficacité mitochondriale dans des conditions stressantes, telles que le vieillissement ([Gonzalez-Freire et al., 2018](#)) et la maladie. Plusieurs agents sont connus pour augmenter la production d'ATP, y compris des médicaments qui permettent de guérir d'une maladie et des traitements qui induisent une surproduction d'énergie chez les individus en bonne santé. Ainsi, l'exercice physique ([Vigh-Larsen et al., 2021](#)) et divers antioxydants, comme la mélatonine et la vitamine D ([Latham et al., 2021](#) ; [Reiter et al., 2021](#)), se sont avérés jouer un rôle dynamisant dans les mitochondries en augmentant la production d'ATP dans ces organites. À notre connaissance, aucun équipement de nanofiltration, à l'exception de celui utilisé dans la présente étude, n'a été montré pour améliorer la production d'énergie cellulaire. Encore une fois, les résultats semblent imiter un effet antioxydant au niveau cellulaire et nous permettent de conclure que l'élimination efficace des nanoparticules conduit à une amélioration de l'efficacité et de l'efficacité cellulaires, même chez les individus en bonne santé.

5. Conclusion

Nos résultats ont montré, pour la première fois à notre connaissance, que la chute des nanoparticules environnementales, induite par le dissolvant BioW, provoque chez les personnes saines une réduction du stress oxydatif, dénotée par une réduction des dommages oxydatifs aux protéines et une nette diminution des antioxydants. capacité chez les hommes et les femmes et l'évaluation d'une large tranche d'âge. Compte tenu de cette réduction de l'environnement oxydatif, la synthèse des protéines et la capacité mitochondriale de production d'énergie sont améliorées en fonction du temps. L'optimisation de l'activité des organites les plus sensibles au stress oxydatif au sein de la cellule semble être à l'origine de ces deux effets,

suggérant un rôle important des nanoparticules environnementales dans l'épuisement cellulaire progressif et prématuré.

Déclaration de disponibilité des données

Les contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l'article/matériel supplémentaire, d'autres demandes peuvent être adressées aux auteurs correspondants.

Déclaration d'éthique

Les études impliquant des participants humains ont été examinées et approuvées par L'étude a été menée conformément aux directives de la Déclaration d'Helsinki et approuvée par l'Hôpital universitaire central des Asturies (HUCA) (2020.141, 12/03/2020). Les patients/participants ont fourni leur consentement éclairé écrit pour participer à cette étude.

Les contributions de l'auteur

Conceptualisation, YP et AC-M ; méthodologie, YP et AC-M; logiciels, EA et JB-M ; enquête, EA, JB-M, EC-O et EC-P ; rédaction—préparation de l'ébauche originale, EA et JB-M ; rédaction—révision et édition, YP et AC-M; supervision, YP et AC-M ; acquisition de financement, AC-M.

Le financement

Ce travail a été soutenu par : ISPA-BioW/20-21.

Conflit d'intérêt

EC-O et EC-P ont été employés par BiowAir Total Systems SL.

Les autres auteurs déclarent que la recherche a été menée en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêts potentiel.

Note de l'éditeur

Toutes les affirmations exprimées dans cet article sont uniquement celles des auteurs et ne représentent pas nécessairement celles de leurs organisations affiliées, ou celles de l'éditeur, des éditeurs et des réviseurs. Tout produit pouvant être évalué dans cet article, ou toute réclamation pouvant être faite par son fabricant, n'est ni garanti ni approuvé par l'éditeur.

Les références

Alshareef, MH, Hartland, EL et McCaffrey, K. (2021). Effecteurs ciblant la réponse protéique dépliée lors d'une infection bactérienne intracellulaire. *Microorganismes* 9, 705.

doi:10.3390/microorganisms9040705

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Aouichat, S., Navarro-Alarcon, M., Alarcón-Guijo, P., Salagre, D., Ncir, M., Zourgui, L., et al. (2021). La mélatonine améliore la voie IRE1 α médiée par le stress du réticulum endoplasmique chez le rat gras diabétique de Zücker. *Produits pharmaceutiques* 14, 232. doi : 10.3390/ph14030232

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Arnao, MB, Cano, A. et Acosta, M. (2001). La contribution hydrophile et lipophile à l'activité antioxydante totale. *Chimie alimentaire*. 73, 239–244. doi:10.1016/S0308-8146(00)00324-1

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Bermejo-Millo, JC, Guimarães, MRM, de Luxán-Delgado, B., Potes, Y., Pérez-Martínez, Z., Díaz-Luis, A., et al. (2018). Une Consommation Élevée De Fructose Altère Le Système Redox Et Le Contrôle De La Qualité Des Protéines Dans Le Cerveau Des Hamsters Syriens : Effets Thérapeutiques De La Mélatonine. *Mol. Neurobiol.* 55, 7973–7986. doi:10.1007/s12035-018-0967-2

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Bhavsar, MD, et Amiji, MM (2007). Distribution Gastro-intestinale Et Études *In Vivo* De Transfection De Gènes Avec Le Système Oral De Nanoparticules En Microsphère (NiMOS). *J. Version contrôlée* 119, 339–348. doi:10.1016/j.jconrel.2007.03.006

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Boczkowski, J. et Hoet, P. (2010). Quoi de neuf en nanotoxicologie ? Implications pour la santé publique à partir d'une brève revue de la littérature de 2008. *Nanotoxicologie* 4, 1–14. doi:10.3109/17435390903428844

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Bradford, MM (1976). Une méthode rapide et sensible pour la quantification de microgrammes de protéines utilisant le principe de la

liaison protéine-colorant. *Anal. Biochimie.* 72, 248-254. doi:10.1006/abio.1976.999910.1016/0003-2697(76)90527-3

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Brook, RD, Rajagopalan, S., Pope, CA, Brook, JR, Bhatnagar, A., Diez-Roux, AV, et al. (2010). Pollution atmosphérique par les particules et maladies cardiovasculaires. *Circulation* 121, 2331–2378. doi:10.1161/CIR.obo13e3181dbee1

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Chamberlain, N., et Anathy, V. (2020). Conséquences pathologiques de la réponse protéique dépliée et des isomérases disulfures protéiques en aval dans les infections virales pulmonaires et les maladies. *J. Biochem.* 167, 173–184. doi:10.1093/jb/mvz101

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Coleman, NC, Ezzati, M., Marshall, JD, Robinson, AL, Burnett, RT et Pope, CA (2021). Pollution de l'air par les particules fines et risque de mortalité chez les patients et les survivants du cancer aux États-Unis. *JNCI Cancer Spectr.* 5, pkab001. doi:10.1093/jncics/pkab001

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Coto-Montes, A., et Hardeland, R. (1999). Effets antioxydants de la mélatonine chez *Drosophila melanogaster* : antagonisation des dommages induits par l'inhibition de la catalase. *J. Pineal Res.* 27, 154-158. doi:10.1111/j.1600-079x.1999.tb00610.x

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

de Gonzalo-Calvo, D., de Luxán-Delgado, B., Rodríguez-González, S., García-Macia, M., Suárez, FM, Solano, JJ, et al. (2012). Interleukine 6, récepteur I du facteur de nécrose tumorale soluble et largeur de distribution des globules rouges comme marqueurs biologiques de la dépendance fonctionnelle dans une population âgée : une approche translationnelle. *Cytokine* 58, 193–198. doi:10.1016/j.cyto.2012.01.005

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

de Gonzalo-Calvo, D., Neitzert, K., Fernández, M., Vega-Naredo, I., Caballero, B., García-Macia, M., et al. (2010). Réponses inflammatoires différentielles dans le vieillissement et la maladie : TNF- α et IL-6 comme

biomarqueurs possibles. *Radic libre. Biol. Méd.* 49, 733–737. doi:10.1016/j.freeradbiomed.2010.05.019

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Duan, P., Quan, C., Huang, WT et Yang, KD (2016). Les voies de signalisation PI3K-Akt/LKB1-AMPK-mTOR-p70S6K/4EBP1 participent à la régulation du développement des testicules et de la spermatogenèse : une mise à jour. *Zhonghua Nan Ke Xue* 22, 1016–1020.

[Résumé PubMed](#) | [Google Scholar](#)

Favarato, G., Clemens, T., Cunningham, S., Dibben, C., Macfarlane, A., Milojevic, A., et al. (2021). Pollution de l'air, logement et infections des voies respiratoires chez les enfants : étude nationale sur la cohorte de naissance (PICNIC) : protocole d'étude. *BMJ Open* 11, e048038. doi:10.1136/bmjopen-2020-048038

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Fermo, P., Artíñano, B., De Gennaro, G., Pantaleo, AM, Parente, A., Battaglia, F., et al. (2021). Améliorer la qualité de l'air intérieur grâce à un purificateur d'air capable de réduire les particules d'aérosol (PM) et les composés organiques volatils (COV) : résultats expérimentaux. *Environ. Rés.* 197, 111131. doi:10.1016/j.envres.2021.111131

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Ghemrawi, R., et Khair, M. (2020). Stress du réticulum endoplasmique et réponse protéique dépliée dans les maladies neurodégénératives. *Ijms* 21, 6127. doi:10.3390/ijms21176127

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Gonzalez-Freire, M., Adelnia, F., Moaddel, R. et Ferrucci, L. (2018). Recherche d'une racine mitochondriale au déclin de la fonction musculaire avec le vieillissement. *J. Cachexia, Sarcopénie Muscle* 9, 435–440. doi:10.1002/jcsm.12313

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Gwinn, MR, et Vallyathan, V. (2006). Nanoparticules : effets sur la santé - avantages et inconvénients. *Environ. Perspective Santé.* 114, 1818–1825. doi:10.1289/ehp.8871

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Hardeland, R., Coto-Montes, A. et Poeggeler, B. (2003). Rythmes circadiens, stress oxydatif et mécanismes de défense antioxydante. *Chronobiologie Int.* 20, 921–962. doi:10.1081/cbi-120025245

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Hoet, PH, Brüske-Hohlfeld, I. et Salata, OV (2004). Nanoparticules - Risques pour la santé connus et inconnus. *J. Nanobiotechnol* 2, 12. doi:10.1186/1477-3155-2-12

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Hussain, SM, Hess, KL, Gearhart, JM, Geiss, KT et Schlager, JJ (2005). Toxicité *in vitro* des nanoparticules dans les cellules hépatiques de rat BRL 3A. *Toxicol. Vitro* 19, 975–983. doi:10.1016/j.tiv.2005.06.034

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Järvinen, K., Järvinen, T. et Urtti, A. (1995). Absorption oculaire après administration topique. *Adv. Déliv. Rév.* 16, 3–19. doi:10.1016/0169-409X(95)00010-5

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Kamat, J., Devasagayam, TP, Priyadarsini, KI et Mohan, H. (2000). Dommages membranaires médiés par les espèces réactives de l'oxygène induits par les dérivés du fullerène et ses implications biologiques possibles. *Toxicologie* 155, 55–61. doi:10.1016/S0300-483X(00)00277-8

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Katoto, PDMC, Brand, AS, Bakan, B., Obadia, PM, Kuhangana, C., Kayembe-Kitenge, T., et al. (2021). Exposition aiguë et chronique à la pollution atmosphérique en relation avec l'incidence, la prévalence, la gravité et la mortalité de la COVID-19 : un examen systématique rapide. *Environ. Santé* 20, 41. doi:10.1186/s12940-021-00714-1

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Khorrami, Z., Pourkhosravani, M., Rezapour, M., Etemad, K., Taghavi-Shahri, SM, Künzli, N., et al. (2021). Exposition multiple aux polluants atmosphériques et cancer du poumon à Téhéran, Iran. *Sci. Rép.* 11, 9239. doi : 10.1038/s41598-021-88643-4

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Kingston, A., Wohland, P., Wittenberg, R., Robinson, L., Brayne, C., Matthews, FE, et al. (2017). La dépendance tardive augmente-t-elle ou non ? Une comparaison des études sur la fonction cognitive et le vieillissement (CFAS). *Le Lancet* 390, 1676–1684. doi:10.1016/S0140-6736(17)31575-1

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Latham, CM, Brightwell, CR, Keeble, AR, Munson, BD, Thomas, NT, Zagzoog, AM, et al. (2021). La vitamine D favorise la régénération des muscles squelettiques et la santé mitochondriale. *De face. Physiol.* 12, 660498. doi:10.3389/fphys.2021.660498

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Lee, B., Qi, L. et Copeland, T. (2005). Nanoparticules pour la conception de matériaux : présent et futur. *J. Céram. Traiter. Rés.* 6, 31–40.

[Google Scholar](#)

Levine, RL, Garland, D., Oliver, CN, Amici, A., Climent, I., Lenz, A.-G., et al. (1990). [49] Détermination de la teneur en carbonyle dans les protéines modifiées par oxydation. *Méthodes Enzymol.* 186, 464–478. doi:10.1016/0076-6879(90)86141-h

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Li, Y., Qian, H., Hang, J., Chen, X., Cheng, P., Ling, H., et al. (2021). Transmission aérienne probable du SRAS-CoV-2 dans un restaurant mal ventilé. *Immeuble Environ.* 196, 107788. doi:10.1016/j.buildenv.2021.107788

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Liu, Y., Ning, Z., Chen, Y., Guo, M., Liu, Y., Gali, NK, et al. (2020). Analyse aérodynamique du SRAS-CoV-2 dans deux hôpitaux de Wuhan. *Nature* 582, 557–560. doi:10.1038/s41586-020-2271-3

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Lopes, FDTQS, Pinto, TS, Arantes-Costa, FM, Moriya, HT, Biselli, PJC, Ferraz, LFS, et al. (2009). L'exposition aux niveaux ambiants de particules émises par la circulation aggrave l'emphysème chez les souris. *Environ. Rés.* 109, 544–551. doi:10.1016/j.envres.2009.03.002

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Maher, BA, González-Maciel, A., Reynoso-Robles, R., Torres-Jardón, R. et Calderón-Garcidueñas, L. (2020). Nanoparticules de pollution atmosphérique riches en fer : un facteur de risque environnemental non reconnu pour le dysfonctionnement myocardique mitochondrial et le stress oxydatif cardiaque. *Environ. Rés.* 188, 109816.

doi:10.1016/j.envres.2020.109816

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Møller, P., Jacobsen, NR, Folkmann, JK, Danielsen, PH, Mikkelsen, L., Hemmingsen, JG, et al. (2010). Rôle des dommages oxydatifs dans la toxicité des particules. *Radic libre. Rés.* 44, 1–46. doi:10.3109/10715760903300691

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Monteiro-Rivière, NA (2021). *Facteurs anatomiques affectant la fonction barrière*. Septième édition. Boca Raton, FL : Dermatotoxicologie . Disponible

sur : [https://www.academia.edu/44620577/Anatomical Factors Affecting Barrier Function](https://www.academia.edu/44620577/Anatomical_Factors_Affecting_Barrier_Function) (consulté le 29 juillet 2021).

[Google Scholar](#)

Nemmar, A., Hoet, PHM, Vanquickenborne, B., Dinsdale, D., Thomeer, M., Hoylaerts, MF, et al. (2002). Passage des particules inhalées dans la circulation sanguine chez l'homme. *Circulation* 105, 411–414. doi:10.1161/hc0402.104118

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Nemmar, A., Holme, JA, Rosas, I., Schwarze, PE et Alfaro-Moreno, E. (2013). Progrès récents en matière de particules et de toxicologie des nanoparticules : examen des études in vivo et in vitro. *Biomédical. Rés. Int.* 2013, 1–22. doi:10.1155/2013/279371

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Nishihama, Y., Jung, C.-R., Nakayama, SF, Tamura, K., Isobe, T., Michikawa, T., et al. (2021). Qualité de l'air intérieur de 5 000 foyers et ses déterminants. Partie A : Concentrations de particules (PM_{2,5} et PM_{10-2,5}) dans l'étude sur l'environnement et les enfants au Japon. *Environ. Rés.* 198, 111196. doi:10.1016/j.envres.2021.111196

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Oberdörster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Kreyling, W., et al. (2004). Translocation des particules ultrafines inhalées vers le cerveau. *Inhalation Toxicol.* 16, 437–445. doi:10.1080/08958370490439597

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Poeggeler, B., Durand, G., Polidori, A., Pappolla, MA, Vega-Naredo, I., Coto-Montes, A., et al. (2005). Médecine mitochondriale : neuroprotection et prolongation de la vie par la nouvelle nitrone amphiphile LPBNAH1 agissant comme un agent antioxydant très puissant. *J. Neurochem.* 95, 962–973. doi:10.1111/j.1471-4159.2005.03425.x

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Potes, Y., Pérez-Martinez, Z., Bermejo-Millo, JC, Rubio-Gonzalez, A., Fernandez-Fernández, M., Bermudez, M., et al. (2019). Le surpoids chez les personnes âgées induit un changement dans le métabolisme énergétique qui compromet l'intégrité musculaire. *Vieillessement Dis.* 10, 217–230. doi:10.14336/AD.2018.0430

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Prieto-Domínguez, N., Méndez-Blanco, C., Carbajo-Pescador, S., Fondevila, F., García-Palomo, A., González-Gallego, J., et al. (2017). La mélatonine améliore les actions du sorafénib dans les cellules d'hépatocarcinome humain en inhibant mTORC1/p70S6K/HIF-1 α et la mitophagie médiée par l'hypoxie. *Oncocible* 8, 91402–91414. doi:10.18632/oncotarget.20592

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Reiter, RJ, Sharma, R. et Rosales-Corral, S. (2021). Effet anti-Warburg de la mélatonine : un mécanisme proposé pour expliquer son inhibition de plusieurs maladies. *Ijms* 22, 764. doi:10.3390/ijms22020764

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Rennard, SI (1998). MPOC : aperçu des définitions, de l'épidémiologie et des facteurs influençant son développement. *Poitrine* 113, 235S–241S. doi:10.1378/chest.113.4_supplement.235s

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Rojas-Rueda, D., Alsufyani, W., Herbst, C., AlBalawi, S., Alsukait, R. et Alomran, M. (2021). Charge de morbidité due aux particules dans l'air ambiant au Royaume d'Arabie saoudite. *Environ. Rés.* 197, 111036. doi:10.1016/j.envres.2021.111036

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Rubio-González, A., Reiter, RJ, De Luxán-Delgado, B., Potes, Y., Caballero, B., Boga, JA, et al. (2020). Rôle pléiotropique de la mélatonine dans les mitochondries cérébrales de souris obèses. *Mélatonine Res.* 3, 538–557. doi:10.32794/mr11250078

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Schinzl, R., et Dillin, A. (2015). Aspects endocriniens du stress organelle - Signalisation cellulaire non autonome des mitochondries et du RE. *Courant. Avis. Cell Biol.* 33, 102–110. doi:10.1016/j.ceb.2015.01.006

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Schneider, B., Baudry, A., Pietri, M., Alleaume-Butaux, A., Bizingre, C., Nioche, P., et al. (2021). La connexion Cellular Prion Protein-ROCK : contribution à l'homéostasie neuronale et aux maladies neurodégénératives. *De face. Cél. Neurosci.* 15, 660683. doi:10.3389/fncel.2021.660683

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Service, RF (2004). La nanotechnologie grandit. *Sciences* 304, 1732–1734. doi:10.1126/science.304.5678.1732

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Ueng, T., Kang, JJ, Wang, HW, Cheng, YW et Chiang, LY (1997). Suppression des monooxygénases microsomales dépendantes du cytochrome P450 et de la phosphorylation oxydative mitochondriale par le fullerénol, un fullerène polyhydroxylé C60. *Toxicol. Lett.* 93, 29–37. doi:10.1016/s0378-4274(97)00071-4

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Vandamme, M., Robert, E., Lerondel, S., Sarron, V., Ries, D., Dozias, S., et al. (2012). Implication des ROS dans une nouvelle stratégie antitumorale basée sur le plasma non thermique. *Int. J. Cancer* 130, 2185–2194. doi:10.1002/ijc.26252

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Vigh-Larsen, JF, Ørtenblad, N., Spriet, LL, Overgaard, K. et Mohr, M. (2021). Métabolisme du glycogène musculaire et performances d'exercices à haute intensité : une analyse narrative. *Méd. sportive*. 51, 1855–1874. doi:10.1007/s40279-021-01475-0

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Comité de l'Institute of Medicine (États-Unis) sur les différences entre les sexes en matière de sensibilité aux facteurs environnementaux (1998). dans *Différences entre les sexes dans la susceptibilité aux facteurs environnementaux : une évaluation des priorités : rapport d'atelier*. Rédacteurs VP Setlow, CE Lawson et NF Woods (Washington (DC) : National Academies Press). (États-Unis) Disponible sur : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK100873/> (consulté le 23 septembre 2021).

[Google Scholar](#)

Warheit, DB, Laurence, BR, Reed, KL, Roach, DH, Reynolds, G. a. M., et Webb, TR (2004). Évaluation comparative de la toxicité pulmonaire des nanotubes de carbone à paroi unique chez le rat. *Toxicol. Sci.* 77, 117–125. doi:10.1093/toxsci/kfg228

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Xia, T., Korge, P., Weiss, JN, Li, N., Venkatesen, MI, Sioutas, C., et al. (2004). Les quinones et les composés chimiques aromatiques dans les particules induisent un dysfonctionnement mitochondrial : implications pour la toxicité des particules ultrafines. *Environ. Perspective Santé*. 112, 1347-1358. doi:10.1289/ehp.7167

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Yah, CS, Simate, GS et Iyuke, SE (2012). Toxicité des nanoparticules et leurs voies d'exposition. *Pak J. Pharm. Sci.* 25, 477–491.

[Google Scholar](#)

Zanchi, NE et Lancha, AH (2008). Stimuli mécaniques du muscle squelettique : Implications sur mTOR/p70s6k et la synthèse des protéines. *EUR. J. Appl. Physiol.* 102, 253–263. doi:10.1007/s00421-007-0588-3

[Texte intégral de la référence croisée](#) | [Google Scholar](#)

Mots clés : nanoparticules, pollution de l'air, filtration, ATP, synthèse protéique p70S6K, activité antioxydante totale, mitochondries

Citation : Antuña E, Carlos Bermejo-Millo J, Caso-Onzain E, Caso-Peláez E, Potes Y et Coto-Montes A (2022) L'élimination des nanoparticules environnementales augmente la synthèse des protéines et la production d'énergie chez les humains en bonne santé. *De face. Bioeng. Biotechnol.* 10:800011. doi : 10.3389/fbioe.2022.800011

Reçu : 25 octobre 2021 ; **Accepté :** 24 janvier 2022 ;

Publié : 14 février 2022.

Édité par:

[Segaran P. Pillai](#) , Département américain de la santé et des services sociaux, États-Unis

Revu par:

[Maria Lurdes Pinto](#) , Université de Trás-os-Montes et Alto Douro, Portugal

[Bassam Ossama Hayek](#) , Chercheur indépendant, Amman, Jordanie

Copyright © 2022 Antuña, Carlos Bermejo-Millo, Caso-Onzain, Caso-Peláez, Potes et Coto-Montes. Il s'agit d'un article en libre accès distribué sous les termes de la **[licence Creative Commons Attribution \(CC BY\)](#)**. L'utilisation, la distribution ou la reproduction dans d'autres forums est autorisée, à condition que le ou les auteurs originaux et le ou les titulaires des droits d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée, conformément à la pratique académique acceptée. Aucune utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions n'est autorisée.

***Correspondance :** Yaiza Potes, potesyaiza@uniovi.es ; Ana Coto-Montes, acoto@uniovi.es

Avis de non-responsabilité : toutes les affirmations exprimées dans cet article sont uniquement celles des auteurs et ne représentent pas nécessairement celles de leurs organisations affiliées, ni celles de l'éditeur, des éditeurs et des réviseurs. Tout produit pouvant être évalué dans cet article ou toute réclamation pouvant être faite par son fabricant n'est ni garanti ni approuvé par l'éditeur.