

## INFORMATION

### Les lanthanides des éoliennes marines sont-ils toxiques ?

MOTS-CLÉS : LANTHANE. TOXICITÉ

### *Are rare earths used in offshore windpower installations toxic?*

KEY-WORDS : LANTHANUM. TOXICITY

**Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêt en relation avec le contenu de cet article**

Jean-Pierre GOULLÉ \*, Élodie SAUSSEREAU \*\*, Christian LACROIX \*\*, Michel GUERBET \*\*\*, Emmanuel-Alain CABANIS \*

En 2005, l'Académie nationale de médecine s'était saisie des effets éventuels des éoliennes sur la santé de l'homme. Un groupe de travail, présidé par le Professeur Claude-Henri Chouard, avait rédigé un rapport et proposé des recommandations. Il s'agissait à l'époque de répondre à la question de l'éventuelle nocivité du bruit provenant des éoliennes pour l'homme. Dans ses conclusions, le groupe de travail avait estimé : « que la production d'infrasons par les éoliennes est, à leur voisinage immédiat, bien analysée et très modérée : elle est sans danger pour l'homme ; qu'il n'y a pas de risques avérés de stimulation visuelle stroboscopique par la rotation des pales des éoliennes ; que les risques traumatiques liés à l'installation, au fonctionnement et au démontage de ces engins sont prévus et prévenus par la réglementation en vigueur pour les sites industriels, qui s'applique à cette phase de l'installation et de la démolition des sites éoliens devenus obsolètes » [1]. Plus récemment, l'Académie a été interrogée sur le risque toxique lié à la présence de lanthanides dans les éoliennes marines par l'association pour le développement durable, l'expansion et le rayonnement de la Montagne Bourbonnaise (ADERMOB).

\* Membre de l'Académie nationale de médecine ; e-mails : jean-pierre.goulle@univ-rouen.fr, emmanuel-alain.cabanis@upmc.fr

\*\* Groupe Hospitalier du Havre

\*\*\* UFR de Médecine et de Pharmacie de Rouen

*Tirés à part* : Professeur Jean-Pierre GOULLÉ, même adresse

*Article reçu le 15 septembre 2012 et accepté le 8 octobre 2012*

Les lanthanides, anciennement « terres rares », sont une série de quinze éléments, du lanthane au lutécium, entre les numéros atomiques 57 et 71. Ils sont chimiquement similaires au lanthane. Ils présentent des propriétés physiques particulières, avec des températures de fusion et d'ébullition particulièrement élevées. Ces dernières sont comprises entre 3 400° C et 3 500° C pour le lanthane, le cérium et le praséodyme et atteint 3 074° C pour le néodyme. Ils sont présents dans l'écorce terrestre en quantité non négligeable, puisque le plus rare d'entre eux est plus abondant que l'argent. Malheureusement, on ne les rencontre pas à l'état pur comme celui-ci, mais mélangés en faible teneur à d'autres éléments dont il faut les séparer. Leur extraction et leur purification sont très complexes du fait de propriétés chimiques voisines ; de plus elles sont extrêmement polluantes. La production, initialement localisée aux États-Unis de 1965 (17.000 t) à 1985 (40.000 t), a complètement cessé en 2002. Les coûts de production étant beaucoup plus faibles en Chine, c'est ce pays qui assure désormais la quasi-totalité de la production mondiale (95 % environ en 2010, soit 130.000 t). Les multiples applications des lanthanides tiennent à la spécificité de la sous-couche électronique 4 f de leurs atomes, celle-ci permet :

- l'émission de lumière à basse température à type de luminescence (tubes cathodiques pour la télévision couleur, écrans LCD ou plasma, tubes d'éclairage luminescents, lampes basse consommation qui ont totalement envahi le marché de l'éclairage depuis une dizaine d'années en raison de rendements lumineux et d'une durée de vie bien supérieurs aux lampes incandescentes) ; lasers et notamment lasers de puissance pour la fusion nucléaire ;
- des propriétés magnétiques tout à fait exceptionnelles lorsque l'élément est utilisé seul, films photosensibles contenant des lanthanides en radiologie permettant de diminuer le temps d'exposition aux rayons X, emploi du gadolinium comme produit de contraste en IRM. Ils rentrent dans la composition d'alliages métalliques avec le fer, le cuivre ou le cobalt pour réaliser de puissants aimants. Les lanthanides constituent alors des matériaux de choix en raison de leur énergie magnétique considérable et de leur rapport poids/puissance imbattable, ce qui permet la réalisation d'aimants nécessaires à de nombreuses technologies, pour produire des disques durs, des moteurs électriques de voiture, ou des générateurs d'éolienne. L'emploi de lanthanides pour la fabrication d'aimants permet de réduire considérablement leur taille grâce à leur puissante induction magnétique. Ainsi, pour produire une induction de 1 000 gauss (0,1 tesla), le volume d'un aimant constitué avec un alliage de métaux classiques était de 14,3 cm<sup>3</sup> en 1940, alors que pour une même puissance, l'incorporation de lanthanides permet depuis 1995 de réduire son volume à 0,2 cm<sup>3</sup>.

Les autres applications sont nombreuses : industries du verre et des céramiques y compris des céramiques de haute résistance pour l'électronique ; production de colorants ; les nouvelles batteries Ni-MH contiennent des lanthanides (elles remplacent les batteries Ni-Cd renfermant du cadmium toxique). Leur usage se généralise non seulement sur les véhicules hybrides (15 kg de lanthanides par voiture),

mais également sur les véhicules électriques ; pots catalytiques ; additifs au carburant diesel pour améliorer la combustion des composés polyaromatiques cancérigènes ; catalyse des pétroles ; sans oublier l'utilisation du lanthane en thérapeutique dans l'insuffisance rénale chronique (Fosrenol®), carbonate de lanthane per os, prescrit à la posologie de 1,5 g à 3 g/jour).

En 2010, les principaux usages des terres rares étaient les suivants : aimants : 22 % (14 200 t pour les disques durs, 11 540 t pour les éoliennes), catalyse : 21 %, alliages : 19 %, polissage : 16 %, verre : 10 %, luminophores : 7 %, céramiques : 5 %.

De manière très paradoxale, les lanthanides sont obtenus par des procédés extrêmement polluants pour l'environnement, source d'inquiétude majeure pour la santé des habitants résidant dans les zones d'extraction, alors que, étant difficilement substituables, leur mise en œuvre est largement développée dans le domaine environnemental : voitures hybrides et électriques, éoliennes marines pour la production d'électricité « verte ».

La toxicité des lanthanides est avérée. Chez l'homme, peu de données toxicologiques sont disponibles pour ce groupe d'éléments à l'exception du gadolinium (Gd). Dans leur revue, Hirano et Suzuki [2], soulignent que la toxicité des terres rares est assez comparable à celle des métaux lourds. Quelques publications rapportent des effets toxiques ; pour des végétaux [3], chez des organismes vivants : bactéries [4], animaux [5], mais l'absence d'effet toxique avéré des nanoparticules de lanthanides sur des lignées cellulaires humaines [6]. Plusieurs travaux récents tendent à montrer la neurotoxicité des lanthanides. Ainsi, dans des modèles animaux, le lanthane altérerait les fonctions cognitives et notamment les capacités de mémorisation [7]. Depuis peu, la toxicité aiguë de l'un d'entre eux, le Gd est bien décrite chez l'homme. Elle est due, chez des insuffisants rénaux, à un défaut d'élimination de produit de contraste à base du métal qui est injecté pour augmenter le contraste des images en IRM. Elle peut conduire au développement d'une fibrose initialement cutanée, puis se généralisant à tous les organes ou fibrose systémique (FNS) avec, en particulier, une atteinte touchant le système nerveux, les articulations et divers organes : cœur, foie, poumons et pouvant conduire au décès [8]. Il convient de souligner le caractère exceptionnel de l'observation médicale rapportée de FNS chez une patiente néphrectomisée bilatérale pour néoplasie rénale, rapportée ici [8]. L'expérience médicale personnelle de l'un d'entre nous, pionnier de l'IRM médicale en France, rappelle que si un chélate de Gd par voie I.V. a pu aggraver une situation biologique, hélas déjà prévisible, « l'arbre ne doit pas cacher la forêt » [9]. Cette observation, qui aurait pu ne pas exister, ne remet pas en cause les bienfaits du Gd. Il contribue chaque jour dans le monde, au sauvetage de centaines de milliers de vies humaines. De fait, et à la condition première d'être complexé en chélate, l'ion métallique Gd  $3^{+}$  devient le produit de contraste exceptionnel en IRM, car rendu inoffensif, injectable par voie I.V. (voire intra-articulaire, arthrographique), à élimination rénale exclusive et rapide, tout en conservant ses propriétés para-magnétiques, en l'absence de thésaurisose ou de toxicité aiguë (cf compétition de Gd  $3^{+}$  avec les systèmes calcium-dépendants de contractilité cardiaque, de coagulation sanguine ou de

dépolarisation axonale). Ces chélates sont non ioniques, linéaires ou cycliques, ou bien ioniques sous forme cyclique, les plus stables de tous. Ce dernier est le Gd-DOTA ou Gadotérate (Dotarem® IV et Artirem® en voie intra-articulaire) des Laboratoires Guerbet, molécule française utilisée depuis plus de trente ans. En premier sur les autres molécules par sa stabilité cinétique et thermique avec une demi-vie supérieure à un mois, plus longue que celle des autres molécules, le Dotarem® est un succès mondial. Beaucoup plus de cent millions de patients en ont bénéficié. Par ailleurs, l'un de nous rappelle les « bonnes pratiques en radiologie » de la Société Française de Radiologie : elles imposent la vérification scrupuleuse de la normalité de la fonction rénale pour toute injection de produit de contraste, en IRM (Gd 3<sup>+</sup>) et RX (scanner RX et iode) [11].

Concernant les éoliennes marines ou « offshore », leurs aimants chargés de produire le courant sont actuellement les plus puissants connus à ce jour avec un « point de Curie » (température au-delà de laquelle un aimant perd son magnétisme) correspondant à une valeur de 310 °C. Elles utilisent la technologie des moteurs synchrones (sans boîte de vitesses) à aimants permanents à « lanthanides », qui permet de construire des moteurs compacts qui fonctionnent même avec un vent très faible, d'une grande efficacité énergétique nécessitant une maintenance simplifiée, ainsi qu'un gain de place et de poids considérables par rapport aux aimants classiques Al-Ni-Co. Les aimants métalliques de ces éoliennes contiennent un alliage, de fer, de bore et de deux lanthanides, le néodyme et le praséodyme à raison de 155 kg pour le premier et 27,5 kg pour le second, par mégawatt de puissance. À la température de 310 °C, l'aimant demeure totalement intact dans sa structure. Il n'y a pas de risque d'émission dans l'environnement des lanthanides emprisonnés dans l'alliage métallique compte tenu de leurs températures d'ébullition particulièrement élevées (plus de 3 000 °C). Contrairement au danger sanitaire rencontré dans certaines zones d'extraction, il n'existe pas de risque toxique connu ou prévisible, dans des conditions normales d'utilisation, quant à la présence de néodyme et de praséodyme dans les éoliennes marines :

- pour les personnels intervenant sur ces équipements ;
- pour les populations vivant à leur proximité.

Cependant, des précautions devront être prises pour la protection de la main d'œuvre, lors du recyclage des lanthanides après destruction des éoliennes pour une nouvelle utilisation.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHOUARD C.H. — Le retentissement des éoliennes sur la santé de l'homme. *Bull. Acad. Natle Méd.*, 2006, 190, 753-754. Sous forme résumée et in extenso en ligne : <http://www.academie-medecine.fr/detailPublication.cfm?idRub=26&idLigne=294>.

- [2] HIRANO S., SUZUKI K.T. — Exposure, metabolism, and toxicity of rare earths and related compounds. *Environ. Health Perspect.*, 1996, 104, 185-95.
- [3] WILDE E.W., BERRY C.J., GOLI M.B. — Toxicity of gadolinium to some aquatic microbes. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2002, 68, 420-7.
- [4] BABULA P., ADAM V., OPATRILOVA R., ZEHNALEK J., HAVEL L., KIZEK R. — Uncommon heavy metals, metalloids and their plant toxicity. *Environ. Chem. Lett.*, 2008, 6, 189-213.
- [5] FENG L., XIAO H., HE X., LI Z., LI F., LIU N., ZHAO Y., HUANG Y., ZHANG Z., CHAI Z. — Neurotoxicological consequence of long-term exposure to lanthanum. *Toxicol. Lett.*, 2006, 165, 112-20.
- [6] GALLUZZI L., CHIARANTINI L., PANTUCCI E., CURCI R., MERIKHI J., HUMMEL H., BACHMANN P.K., MANUALI E., PEZZOTTI G., MAGNANI M. — Development of a multilevel approach for the evaluation of nanomaterials' toxicity. *Nanomedicine*, 2012, 7, 393-409.
- [7] BADOT P.M. — Les effets neurotoxiques des terres rares : avancées récentes. *Bulletin de veille scientifique. Anses*, 2010, 11, 32-4.
- [8] SAUSSEREAU E., LACROIX C., CATTANEO A., MAHIEU L., GOULLÉ J.P. — Hair and fingernail gadolinium ICP-MS contents in an overdose case associated with nephrogenic systemic fibrosis. *Forensic Sci. Int.*, 2008, 176, 54-7.
- [9] CABANIS E.A., IBA-ZIZEN M.T., HABAS C., ISTOC A., STIEVENART J.L., YOSHIDA M., NGUYEN T.H., GOEPEL R. — Imagerie de l'ensemble de l'encéphale, de la cellule à l'organe. La neuro-imagerie aujourd'hui. Séance commune Académie des Sciences-Académie Nationale de Médecine, A.N.M, Paris, 2 décembre 2008. *Bull. Acad. Natle Méd.*, 2009, 193, 837-847.
- [10] GOULLÉ J.P., CATTANÉO A., SAUSSEREAU E., MAHIEU L., GUERBET M., LACROIX C. — MRI gadolinium-based contrast agents. Radiologists beware ! *Ann. Pharm. Fr.*, 2009, 67, 335-9. Correctif dans *Ann. Pharm. Fr.* 2009, 67, 444-5.
- [11] CLÉMENT O. — Les produits de contraste utilisés en imagerie exposent-ils à des risques ? 18/04/2012. Société Française de Radiologie (SFR), groupe Produits de contraste (CIRTACI).