

La radioactivité dans l'environnement marin après Fukushima

Auteurs : Pavel P. POVINEC

Department of Nuclear Physics and Biophysics, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics,
Comenius University, Bratislava, Slovaquie

& Maria BETTI

European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italie
(auparavant à l'IAEA's Environment Laboratories, Monaco)

Le séisme qui s'est produit le 11 mars 2011 à l'est du Japon, de magnitude 9, était le quatrième séisme le plus violent au monde depuis 1900, et le plus violent au Japon depuis les premiers enregistrements il y a 130 ans (USGS, 2011 ; Koketsu *et al.*, 2011). Il a déclenché un tsunami au large de Fukushima (région de Tohoku). Des vagues de 15 m, près de deux fois plus hautes que le mur de protection, ont frappé la Centrale nucléaire (CN) de Fukushima-Daiichi, causant des dommages majeurs à l'ensemble du réseau électrique (TEPCO, 2011a). Quatre groupes électrogènes au diesel ont perdu leur capacité à produire l'énergie électrique nécessaire pour refroidir les réacteurs nucléaires 1, 2 et 3 qui étaient en service, ainsi que la piscine de stockage des barres de combustible du réacteur numéro 4. Les barres de combustible non refroidies ont surchauffé, produisant de l'hydrogène gazeux des suites de la réaction entre l'eau et le métal. En conséquence, des explosions d'hydrogène dans les bâtiments des réacteurs 1, 3 et 4, ont gravement endommagé la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi, aboutissant notamment à une fusion du combustible dans les cuves sous pression des réacteurs 1, 2 et 3. De la radioactivité a été rejetée dans l'air et l'eau, provoquant une ample opération d'évacuation des alentours. En outre, les rejets de liquide dans l'océan Pacifique ont causé une contamination continue du milieu marin, sans compter que les courants océaniques dominants ont charrié des radionucléides dans le bassin Pacifique. Les eaux souterraines contaminées près de la centrale nucléaire ont récemment suscité de vives préoccupations, car elles sont à l'origine d'une accumulation sous-marine massive, chronique et incontrôlée de radionucléides dans les eaux côtières.

Rejets de radionucléides lors de l'accident de Fukushima-Daiichi

Les explosions d'hydrogène et la destruction des réacteurs ont déclenché une première et importante vague de rejets de radionucléides dans l'atmosphère (par exemple environ 150 PBq d'iode 131 et 15 PBq pour chacun des césium 134 et 137)¹ (TEPCO, 2011b). Les réacteurs nucléaires en surchauffe nécessitaient un refroidissement permanent à l'eau, en partie à l'eau de mer, d'où une eau fortement contaminée qui, pendant les premiers mois, a également été directement rejetée dans les eaux côtières (par exemple environ 4 PBq pour chacun des ¹³⁴Cs et ¹³⁷Cs) (Estournel *et al.*, 2012 ; Aoyama *et al.*, 2013 ; Povinec *et al.*, 2013a). L'obligation de refroidir les réacteurs en continu entraîne une forte contamination des eaux souterraines, qui n'ont pu être entièrement stockées sur place. L'exploitant TEPCO a mis en place des procédures pour éliminer le radiocésium de l'eau de refroidissement, mais un fonctionnement partiel du système s'est produit lors des opérations.

¹ PBq : pétabecquerel = 10¹⁵ Bq

Les dépôts dans l'océan Pacifique nord-ouest à partir de l'atmosphère, peu après l'accident, auraient atteint 12 à 15 PBq pour chacun des ^{134}Cs et ^{137}Cs (Aoyama *et al.*, 2013). Le deuxième radionucléide à vie longue après le ^{137}Cs à avoir été rejeté directement dans l'océan a été le ^{90}Sr dont l'activité totale aurait été d'environ 1 PBq (Povinec *et al.*, 2013a). La demi-vie du ^{134}Cs est de 2,05 années, celle du ^{137}Cs de 30 ans et celle du ^{90}Sr de 29 ans. Le ^{131}I a une demi-vie courte, de 8 jours, et n'était plus détectable après plusieurs mois. Cependant, ^{131}I est l'élément qui contribue le plus à la dose impactant la population, en raison de son accumulation dans la glande thyroïde.

L'accident de Fukushima a été classé au niveau 7 de l'échelle de l'INES² par le gouvernement japonais, soit le plus haut niveau, à égalité avec l'accident de Tchernobyl, bien que les rejets de radionucléides lors de l'accident de Tchernobyl aient été environ dix fois plus élevés (p. ex. 1 760 PBq de ^{131}I et 85 PBq de ^{137}Cs) (AIEA, 2006). Les plus importants rejets de radionucléides dans l'atmosphère ont été, jusqu'à présent, ceux dus aux essais d'armes nucléaires (que l'on appelle également retombées radioactives mondiales), effectués principalement dans les années 1950 et au début des années 1960 (p. ex. 950 PBq de ^{137}Cs et 600 PBq de ^{90}Sr) (Povinec *et al.*, 2013a).

Radionucléides dans l'atmosphère en dehors du Japon

Les niveaux de radionucléides observés dans l'atmosphère à Fukushima ont considérablement varié. ^{131}I particulaire oscillait entre 1 et 10 000 Bq/m³, tandis que ^{137}Cs et ^{134}Cs variaient, dans les aérosols, entre 0,1 et 200 Bq/m³. Les doses impactant les populations, en surface, variaient entre 0,04 µSv/h (au départ) et une valeur maximale de 10 µSv/h (mi-mars 2011), avant de baisser jusqu'à 0,3 µSv/h fin avril 2011 (Povinec *et al.*, 2013a).

Dans un premier temps, les vents d'ouest dominants ont charrié la contamination radioactive de Fukushima vers l'océan Pacifique, puis vers l'Amérique du Nord, l'océan Atlantique nord jusqu'à l'Europe, avant de revenir en Asie (Figure 1). Les dépôts locaux ont été étudiés par de nombreux scientifiques et les autorités japonaises (p. ex. Yoshida & Kanda, 2012). Les premiers signes de radionucléides en dehors du Japon ont été relevés par les stations de l'OTICE (Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires) dans l'archipel de Hawaï. Le nuage radioactif avait été identifié en Islande, avant d'être également détecté en Europe continentale. Dans le ciel européen, ^{131}I particulaire oscillait entre 0,01 et 6 mBq/m³ (jusqu'à 11 mBq/m³ pour la forme gazeuse), tandis que les niveaux de ^{134}Cs et de ^{137}Cs variaient de la même manière entre 0,001 mBq/m³ fin mai 2011, avec un pic d'environ 1,5 mBq/m³ mi-mars 2011 (Povinec *et al.*, 2013a). Un signal atmosphérique a également été détecté au-dessus de Monaco (Masson *et al.*, 2011 ; Pham *et al.*, 2012). Les niveaux extrêmement bas de concentrations de ^{137}Cs dans l'atmosphère qui étaient encore mesurables suite aux essais nucléaires et à l'accident de Tchernobyl ont été approximativement multipliés par 1 000 dans l'atmosphère de l'Europe ; cette hausse récente des niveaux due à Fukushima ne constitue cependant un risque ni pour les humains, ni pour les animaux.

² L'Échelle internationale des événements nucléaires (INES) a été créée en 1990 par l'Agence internationale de l'énergie atomique, AIEA, dans le but de faciliter la diffusion rapide d'informations importantes pour la sûreté en cas d'accident nucléaire.

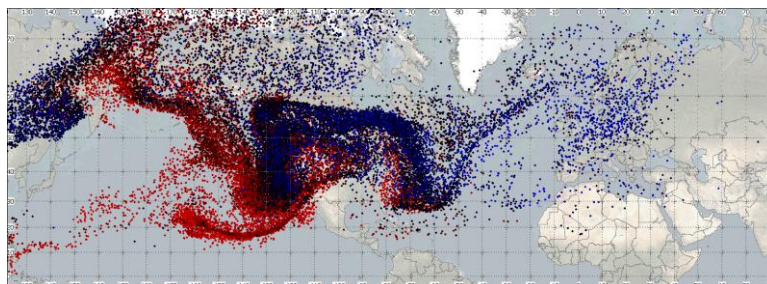


Figure 1. Modélisation lagrangienne de la distribution des particules radioactives dans l'atmosphère suite à l'accident de Fukushima. Trajectoire des particules du 13 au 26 mars 2011, simulation réalisée à l'aide du modèle lagrangien de dispersion (libération des particules le 12 mars 2011). Les nuances de rouge indiquent des particules dans la couche inférieure (jusqu'à 3 km d'altitude) ; les nuances de noir à bleu foncé indiquent la couche intermédiaire (jusqu'à 6 km) ; et les nuances de bleu clair indiquent la couche au-delà de 6 km (état le 21/03/2011 à 06:00 UTC ; modifié après Povinec *et al.*, 2013c).

Radionucléides dans l'eau de mer et les poissons

Les niveaux de radionucléides dans l'eau de mer au large de Fukushima ont oscillé de façon similaire pour le ^{137}Cs et le ^{134}Cs , entre environ 1 kBq/m^3 et 90 MBq/m^3 . L'activité moyenne du ^{137}Cs (ainsi que pour le ^{134}Cs) au large de Fukushima a été d'environ 10 kBq/m^3 pour la majeure partie de l'année 2011. Celle du ^{137}Cs dans les eaux de surface de l'océan Pacifique nord-ouest, avant Fukushima, était d'environ 1 Bq/m^3 ; ainsi, les niveaux post-Fukushima étaient environ 10 000 fois supérieurs à ceux pré-Fukushima, figure 2 (Buessler *et al.*, 2012 ; Povinec *et al.*, 2013b).

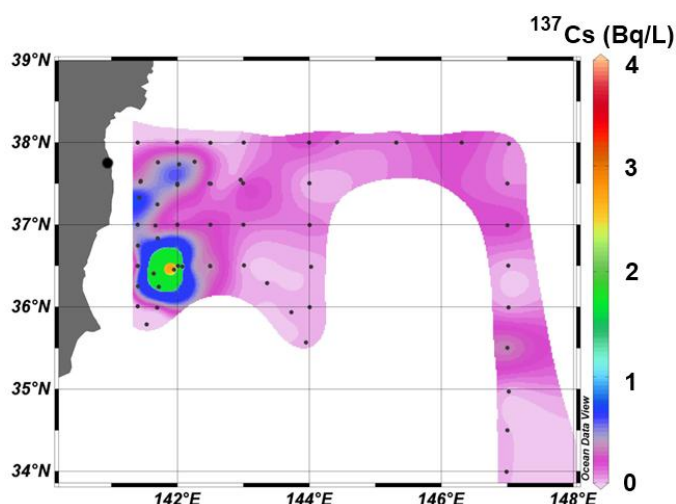


Figure 2. Distribution du ^{137}Cs dans les eaux de surface de l'océan Pacifique en juin 2011 (données de Buessler *et al.*, 2012 ; Povinec *et al.*, 2013b).

La modélisation de la circulation océanique mondiale a montré que le panache radioactif dans l'océan Pacifique est principalement mû par le Kuroshio, un courant très rapide qui balaye la côte orientale du Japon. Les teneurs maximales de ^{137}Cs dans les eaux du Pacifique nord-ouest ont atteint environ 25 Bq/m^3 , figure 3. Après 4 à 6 ans, le panache pourrait atteindre la côte ouest de l'Amérique du Nord, en présentant des concentrations de ^{137}Cs de 3 à 9 Bq/m^3 (en fonction des apports de ^{137}Cs de l'atmosphère à l'océan), ce qui est de 3 à 9 fois supérieur à la situation actuelle résultant des essais nucléaires dans l'océan Pacifique,

et témoigne de l'énorme capacité de dilution des polluants des océans (Buessler *et al.*, 2012 ; Masumoto *et al.*, 2012 ; Nakano et Povinec, 2012 ; Rypina *et al.*, 2013). Au bout de 10 ans, l'ensemble des eaux de surface et intermédiaires (jusqu'à 1 000 m de profondeur) de l'océan Pacifique seront marquées par le ^{137}Cs provenant de Fukushima, avec des concentrations inférieures à 3 Bq/m^3 (Nakano & Povinec, 2012 ; Povinec *et al.*, 2013a).

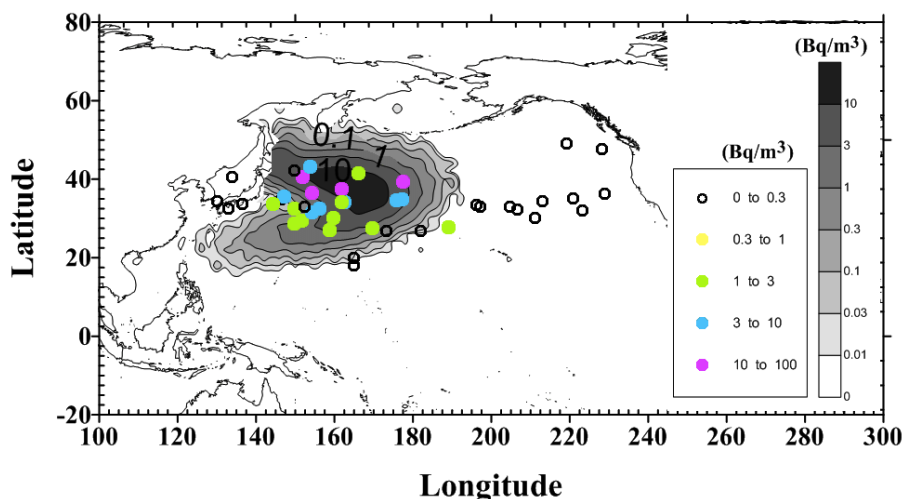


Figure 3. Comparaison des concentrations d'activité de ^{137}Cs prédites (isoplèthes, calculées à l'aide du code LAMER, Nakano & Povinec, 2012) et mesurées (points), dans les eaux de surface de l'océan Pacifique nord-ouest (la valeur de 1 Bq/m^3 , résultant des retombées radioactives mondiales, a été déduite de la concentration de ^{137}Cs mesurée obtenue par Aoyama *et al.* (2013) ; modifiée à partir de Povinec *et al.*, 2013b).

Les concentrations de ^{137}Cs dans les poissons capturés au large des côtes de Fukushima ont varié de plusieurs ordres de grandeur, d'environ 2 Bq/kg p.h. (poids humide) à environ $5\,000 \text{ Bq/kg p.h.}$, la majorité des concentrations de ^{137}Cs étant de l'ordre de 10 à 100 Bq/kg p.h. . Trois ans après l'accident, le nombre de poissons dépassant le seuil de 100 Bq/kg (toléré pour la consommation humaine) diminue dans les prises au large des côtes de la préfecture de Fukushima (ministère de l'agriculture, des forêts et de la pêche du Japon, 2013), et seuls 10 % environ ont présenté un niveau supérieur à cette limite. Les niveaux sont nettement plus faibles lorsque l'on s'éloigne du littoral de Fukushima. Il a été signalé que certaines espèces capturées dans les environs de la zone de déversement ont présenté des niveaux beaucoup plus élevés, mais elles n'ont pas été consommées comme aliments. Suite à l'accident de Fukushima, le gouvernement japonais a renforcé et mis en œuvre des réglementations très strictes concernant la teneur en radionucléides dans les produits de la mer. Au Japon, la limite pour le ^{134}Cs et le ^{137}Cs dans les aliments (dont ceux issus de la mer), après l'accident de Fukushima, a été abaissée de 500 à 100 Bq/kg p.h. , devenant ainsi de quatre à dix fois inférieure à celle des autres pays d'Asie. La valeur de $1\,000 \text{ Bq/kg p.h.}$ du *Codex Alimentarius*³, adoptée par la plupart des pays du monde entier, garantit que la dose effective maximale pour la population est bien en deçà de la valeur maximale recommandée par la CIPR (Commission internationale de protection radiologique) et l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique), qui est de 1 mSv/an .

³ La Commission du Codex Alimentarius, mise sur pied en 1963 par la FAO et l'OMS, élabore des normes alimentaires internationales harmonisées, des orientations et des codes de pratique visant à protéger la santé des consommateurs et à garantir des pratiques équitables dans le commerce des aliments. <http://www.codexalimentarius.org/> Pour plus d'informations, voir p. ex. : http://en.wikipedia.org/wiki/Codex_Alimentarius

Doses de rayonnement

Les doses de rayonnement estimées chez la population japonaise, résultant de l'inhalation, de l'exposition externe à des nuages radioactifs et à des dépôts de radionucléides, et de l'ingestion d'aliments terrestres, seraient, d'après l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2013), nettement inférieures à 25 mSv par an dans l'ensemble. Les répercussions de l'accident de Fukushima devraient donc être inférieures à la limite de 50 mSv/an, établie pour le risque statistique de cancer, ou à la limite d'effet déterministe, de 500 mSv (en somme), au-delà de laquelle on peut s'attendre à des problèmes de santé graves (CIPR, 2012).

En adoptant une approche prudente, il est possible d'estimer une limite supérieure raisonnable pour la dose de rayonnement absorbée par un consommateur japonais moyen de produits marins. En supposant que la concentration d'activité moyenne du ^{137}Cs (ainsi que du ^{134}Cs) dans les eaux de surface au large de Fukushima pendant la majeure partie de l'année 2011 a été d'environ 10 kBq/m³, la dose engagée serait alors de 0,7 mSv/an, en raison de l'ingestion de radionucléides contenus dans les poissons, les fruits de mer et les algues (pour 4 PBq de $^{134+137}\text{Cs}$, rejetés dans les eaux côtières). Bien que cette dose soit d'environ quatre ordres de grandeur supérieure à la dose d'avant-Fukushima (qui était de 0,03 µSv/an), calculée à l'aide de la teneur pré-Fukushima en ^{137}Cs dans l'eau de mer (qui était de 1 Bq/m³), elle est comparable aux doses provenant d'autres sources naturelles (par exemple ^{210}Po). La dose engagée individuelle due à la consommation de ^{137}Cs et de ^{134}Cs dans les organismes marins capturés au large dans l'océan Pacifique nord-ouest en 2012 serait d'environ 2 µSv/an, soit approximativement 30 fois plus que dans le cas des retombées radioactives mondiales. Cette dose est néanmoins 350 fois inférieure à la dose due à la consommation de ^{210}Po naturel dans les poissons et crustacés (0,7 mSv/an). On s'attend dans l'ensemble à ce que les doses réelles dues à la consommation de produits de la mer provenant de la région de Fukushima soient nettement inférieures, car les concentrations dans l'eau de mer se sont avérées bien inférieures, étant généralement de moins de 1 Bq/l environ trois ans après l'accident, en dehors du port de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi, et ne devraient donc pas provoquer par des effets néfastes dus aux rayonnements (NRA, 2014).

Les doses de rayonnement pour la population mondiale résultant de l'inhalation et de l'ingestion d'aliments terrestres et marins étaient inférieures de plusieurs ordres de grandeur à la limite maximale recommandée au public pour les doses provenant de sources externes (1 mSv/an), ainsi qu'à la dose moyenne mondiale provenant de sources naturelles (2,4 mSv/an).

Les doses de rayonnement de Fukushima pour le grand public pourraient être comparées aux doses de rayonnement d'autres sources, par exemple 0,1 mSv pour une simple radiographie, de 0,4 à 0,6 mSv pour une mammographie, et de 10 à 30 mSv pour une tomographie, ou d'autres diagnostics de médecine nucléaire similaires.

Conclusions

Les rejets dans l'océan Pacifique de substances radioactives provenant de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi ont suscité de vives inquiétudes afférentes à la pollution des produits de la mer et à la contamination massive du milieu marin, qui concernent non seulement la population japonaise, mais également les pays de l'océan Pacifique et même d'autres régions du monde. Toutefois, la surveillance des radionucléides dans l'eau de mer et les organismes marins au large de Fukushima et dans l'océan Pacifique, ainsi que l'estimation des doses de rayonnement chez la population japonaise et mondiale, ont indiqué que l'ingestion de produits de la mer contaminés par les radionucléides liés à Fukushima ne devrait provoquer aucun effet nocif.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les nombreux collègues les ayant aidés, en participant à l'échantillonnage, l'analyse et la modélisation. Nous remercions le Dr K.O. Buesseler de la Woods Hole Oceanographic Institution pour avoir fourni des échantillons d'eau prélevés en juin 2011, lors de la mission du navire de recherche *K.O.K.* (financée par la Fondation Gordon et Betty Moore) dans le nord-ouest de l'océan Pacifique. Nous remercions également le Dr H. Nies de l'AIEA-EL (Monaco), le professeur K. Hirose de l'université Sophia (Tokyo) et le professeur M. Aoyama de l'université de Fukushima, pour leur collaboration de longue date. Merci également au Programme opérationnel de Recherche & Développement de l'Union européenne (financé par le FEDER, projet n° 26240220004) pour le soutien apporté à l'université Comenius.

Références scientifiques

- [1] Aoyama M., Uematsu M., Tsumune D. & Hamajima Y. (2013). Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs. *Biogeosciences*, 10, 3067-3078.
- [2] Buesseler K. O. *et al.* (2012). Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 109, 5984-5988.
- [3] Estournel C. *et al.* (2012). Assessment of the amount of cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters. *J. Geophys. Res.*, 117, C11014, doi:10.1029/2012JC007933.
- [4] IAEA (2006). Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience / report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'. Vienna. (Radiological assessment reports series, http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1239_web.pdf)
- [5] ICRP, International Commission on Radiological Protection (2012). Statement on tissue reactions/early and late effects of radiation in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Annals of the ICRP*, 118(41), 1-2.
- [6] Koketsu K. *et al.* (2011). A unified source model for the 2011 Tohoku earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 310 (2011), 480-487.
- [7] MAFF-Japan (2013). Results of the inspection on radioactivity level in fisheries products. <http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/index.html>
- [8] Masson O. *et al.* (2011). Tracking of Airborne Radionuclides from the Damaged Fukushima Dai-Ichi Nuclear Reactors by European Networks. *Environmental Science and Technology*, 45, 7670-7677.
- [9] Masumoto Y. *et al.* (2012). Oceanic Dispersion Simulations of ¹³⁷Cs Released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *ELEMENTS*, June 2012, v. 8, p. (3), 207-212.
- [10] Nakano M. & Povinec P.P. (2012). Long-term simulations of the ¹³⁷Cs dispersion from the Fukushima accident in the world ocean. *J. Environ. Radioact.*, 111, 109-115.
- [11] NRA (2014). Nuclear Regulation Authority of Japan: Readings of Sea Area Monitoring, Regular Internet Information about Monitoring Results. <http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/205/list-1.html>
- [12] Pham M.K., M. Eriksson, I. Levy, H. Nies, I. Osvath & M. Betti (2012). Detection of Fukushima Daiichi nuclear power plant accident radioactive traces in Monaco. *J. Environm. Radioactivity*, 114, 131-137.
- [13] Povinec P.P., Hirose K. & Aoyama M. (2013a). *Fukushima Accident: Radioactivity Impact on the Environment*. Elsevier, Amsterdam, 400 p.
- [14] Povinec P.P. *et al.* (2013b). Cesium, iodine and tritium in NW Pacific waters – a comparison of the Fukushima impact with global fallout. *Biogeosciences*, 10, 5481-5496. www.biogeosciences.net/10/5481/2013/doi:10.5194/bg-10-5481-2013
- [15] Povinec P.P. *et al.* (2013c). Dispersion of Fukushima radionuclides in the global atmosphere and the ocean. *Appl. Rad. Isotopes*, 81, 383-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.03.058>

- [16] Rypina I. *et al.* (2013). Short-term dispersal of Fukushima-derived radionuclides off Japan: modeling efforts and model-data intercomparison. *Biogeosciences Discuss.*, 10, 1517-1550. www.biogeosciences-discuss.net/10/1517/2013/ doi:10.5194/bgd-10-1517-2013.
- [17] TEPCO, Tokyo Electric Power Company: Fukushima Nuclear Accidents Investigation Report (2011a). Results of the investigation on tsunami at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110409e9.pdf
- [18] TEPCO (2011b). <http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/interim/index-e.html>.
- [19] USGS (2011). http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=2727&from=rss_home
- [20] WHO, World Health Organization (2013). *Health Risk Assessment from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami*. WHO, Geneva.
- [21] Yoshida N. & Kanda J. (2012). Tracking the Fukushima Radionuclides. *Science*, 336, 1115-1116.

Pour en savoir plus :

- [22] http://fr.wikipedia.org/wiki/Accident_nucléaire_de_Fukushima
- [23] Povinec P.P. *et al.* (2013). *Fukushima Accident*. Elsevier.