



Article : 117

Le coût de production de l'électricité d'origine nucléaire en France

DESSUS Benjamin, LAPONCHE Bernard

août-16

Niveau de lecture : Peu difficile

Rubrique : Energie nucléaire

Mots clés : Coût de l'énergie, Déchets, Démantèlement, Economie de l'énergie, Electricité, France, Réacteurs nucléaires.



Au début, dans les années 1950, on pensait qu'on allait produire de l'électricité tellement bon marché que ce ne serait pas la peine de mettre des compteurs... Il y avait une expression pour dire cela : « *Too cheap to meter* », trop bon marché pour mettre un compteur. Le cours des choses n'a pas exactement répondu à cette attente.

A partir de la mise en évidence de la fission et de la réaction en chaîne dans la première « pile atomique » en 1942 à Chicago, c'est avec un objectif militaire qu'ont été développés les réacteurs nucléaires et les industries du combustible nucléaire. Toutes les techniques utilisées aujourd'hui découlent très directement du « Projet Manhattan » et de ses suites aux Etats-Unis. Cette articulation étroite entre nucléaire civil – la production d'électricité –

et nucléaire militaire – production des armes nucléaires et propulsion des sous-marins nucléaires – a prévalu dans les « puissances nucléaires » qui ont suivi les Etats-Unis : Union Soviétique, Royaume-Uni, France, plus tard Chine, Inde, Pakistan, Israël¹. Le nucléaire civil a largement profité des développements nucléaires militaires et aujourd'hui, si la séparation peut être effective dans le secteur des centrales nucléaires, elle ne l'est pas dans celui des industries du combustible : enrichissement de l'uranium et retraitement du combustible pour la production du plutonium. Et le « désir » de certains pays de maîtriser les techniques nucléaires « civiles » ne saurait masquer l'intention sous-jacente de se doter de l'arme nucléaire.

Cette « complémentarité » n'est pas sans influence sur la question des coûts du nucléaire. En effet, plus qu'aucune autre technique de production d'électricité, le nucléaire a profité largement de la recherche et développement et même de certains investissements en réacteurs ou usines du combustible financés par les budgets militaires. En même temps, le nucléaire civil a beaucoup joué, notamment dans les milieux scientifiques et auprès du public, de son image de « rédemption » vis-à-vis d'un nucléaire militaire marqué par Hiroshima et Nagasaki et la menace permanente d'un conflit mondial dévastateur au temps de la guerre froide. C'est bien le message *Atom for peace* du président Eisenhower à la tribune des Nations Unies en 1952 qui a lancé la grande offensive au niveau mondial des entreprises américaines du nucléaire. En 2016, 88% de la puissance électronucléaire installée au monde est constituée par des réacteurs à eau ordinaire et uranium enrichi des filières américaines *Pressurized Water Reactor* (PWR) et *Boiled Water Reactor* (BWR).

A la suite de cette impulsion industrielle et commerciale d'envergure, la production d'électricité d'origine nucléaire s'est développée de façon significative à partir de 1960, jusqu'à atteindre 18% de la production mondiale d'électricité en 1996. Ce n'était pas négligeable mais, pour une technique ayant pendant un demi-siècle joui d'un soutien massif des Etats l'ayant développée, cela ne correspondait pas aux attentes de ses promoteurs. La stagnation puis l'amorce de décroissance de l'électronucléaire au niveau mondial, en part de la production mondiale et même en valeur absolue à partir de 2006, s'explique par deux types de facteurs.

Le premier facteur est la confirmation des risques liés à l'utilisation de cette technique, d'abord par l'accident de Three Mile Island aux Etats-Unis en 1979 qui a pratiquement bloqué le développement dans ce pays, puis par les catastrophes de Tchernobyl (Ukraine en Union Soviétique, 1986) et Fukushima (Japon, 2011). Le déclin du nucléaire a démarré avant Fukushima mais cet accident a confirmé l'Allemagne et l'Italie, deux pays de haut niveau technologique, dans leur décision de renoncer à l'électronucléaire. Dans le même registre, le

¹ L'Allemagne et le Japon, par obligation, ne développeront que des programmes civils ; le Canada et la Suède également, mais par décision volontaire de ne pas développer le nucléaire militaire.

problème des déchets radioactifs, présent depuis le début du développement de cette technique, pesait de façon croissante dans la balance des avantages et des inconvénients.

Le second facteur, qui n'était pas anticipé car nombre de soutiens financiers étaient masqués et que les risques étaient minimisés ou même niés, est la question des coûts : ceux-ci n'ont pas cessé d'augmenter et se révèlent, en ce début du 21^{ème} siècle, de plus en plus prohibitifs (investissements de construction des réacteurs, coûts à venir du démantèlement et de la gestion des déchets, coût de l'accident majeur).

1. Les évaluations de la Cour des Comptes

La référence la plus récente sur le coût de production du kWh par les centrales nucléaires françaises² est le rapport de la Cour des comptes de 2014³. Dans ce rapport, comme dans les précédents, la Cour utilise la méthode du coût courant économique (CCE) qui est constitué de charges de capital correspondant aux investissements passés, de charges annuelles d'exploitation ou d'investissements de maintenance annuels⁴ et de provisions annuelles pour diverses charges futures. La prise en compte du capital investi se fait sous la forme d'un coût annuel de rémunération et de remboursement permettant à la fin de vie de l'ouvrage ou du parc d'ouvrages de reconstituer en monnaie constante l'investissement initial.

1.1. Le coût de production du parc actuel

Le premier rapport évaluait le CCE du kWh produit par le parc nucléaire français à 49,5 euros par MWh (€/MWh), en euros courants de l'année 2010⁵.

Le second rapport présente une actualisation de ce coût ainsi que sa réévaluation pour l'année 2013 et aboutit à la valeur de 59,8 €/MWh, en euros courants, soit une augmentation de 10,2 €/MWh (21%). Cette forte évolution est due à la croissance soutenue des dépenses d'exploitation entre 2010 et 2013, ainsi que des investissements de maintenance.

1.2. Les investissements passés

La Cour des comptes (rapport 2012) évalue à 96 milliards d'euros (G€) 2010 l'investissement initial dans les 58 réacteurs actuels, pour une puissance électrique nette installée de 63,13 GW_e, soit 1,52 M€ par MW_e installé. Historiquement, la filière nucléaire n'a pas profité des réductions de coût qu'on attend généralement de l'apprentissage industriel, comme le montrent bien le tableau 1 et la figure 1.

² 19 centrales équipées de 58 réacteurs à uranium enrichi et eau sous pression (REP ou PWR) d'une puissance électrique de 900 à 1450 MW. La puissance totale nette du parc nucléaire est de 63,13 GW_e.

³ Cour des comptes : *Le coût de production de l'électricité nucléaire – Actualisation 2014*, mai 2014. Ce rapport est l'actualisation du *Rapport public thématique : Les coûts de la filière électronucléaire*. La Documentation française, janvier 2012. Ces rapports sont disponibles sur www.ccomptes.fr.

⁴ Frais d'exploitation annuels comprenant les frais d'opération, de maintenance et de combustibles.

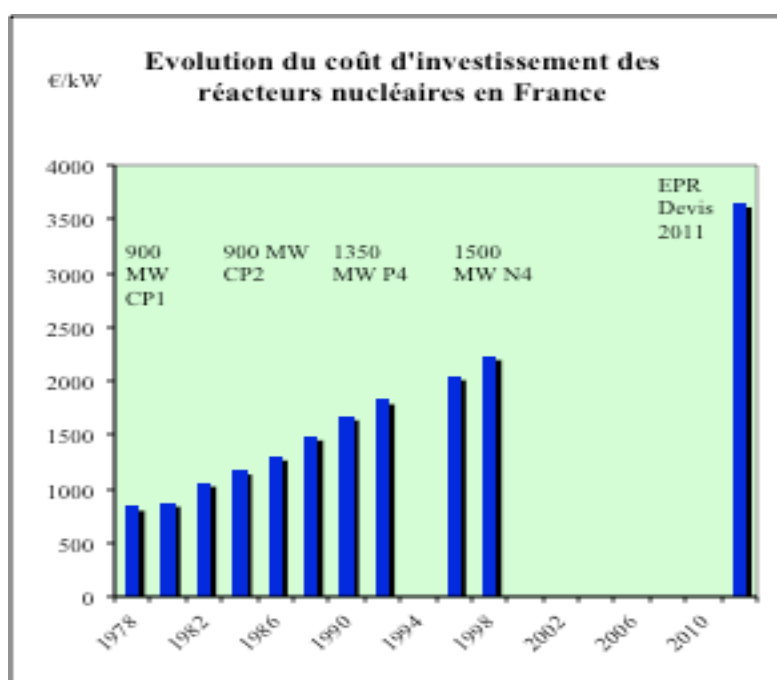
⁵ Le coût serait supérieur d'environ 6 €/kWh si l'on prenait en compte les dépenses publiques de recherche et développement, estimées à 38 G€.

Tableau 1 : Evolution des coûts des réacteurs nucléaires français en fonctionnement.

Palier	Puissance électrique nette (MW _e)	Coût des deux premiers réacteurs mis en service (1000 € / MW _e)	Coût moyen des réacteurs suivants (1000 € / MW _e)
CP0 (6 réacteurs)	880 - 910	836	893 (+7%)
CP1 et CP2 (28 réacteurs)	890 - 915	1 191	1078 (-9%)
P4 (8 réacteurs)	1310 - 1335	1 531	1 190 (-29%)
880-910P'4 (12 réacteurs)	1300 - 1330	1 358	1 191 (-22%)
N4 (4 réacteurs)	1495 - 1500	1 635	1 251 (-24%)

Source. Sénat : *Electricité : assumer les coûts et préparer la transition énergétique*. Commission d'enquête 2011-2012.

Fig. 1 : Coût du MW installé des différents paliers de la filière REP (en euros 2010)



Note : la puissance électrique du réacteur EPR est de 1650 MW. Source : Arnulf Grübler, IIASA : *The Cost of the French Nuclear Scale-up: A Case of Negative Learning by Doing*, *Energy Policy* 38 (2010), 5174-5188.

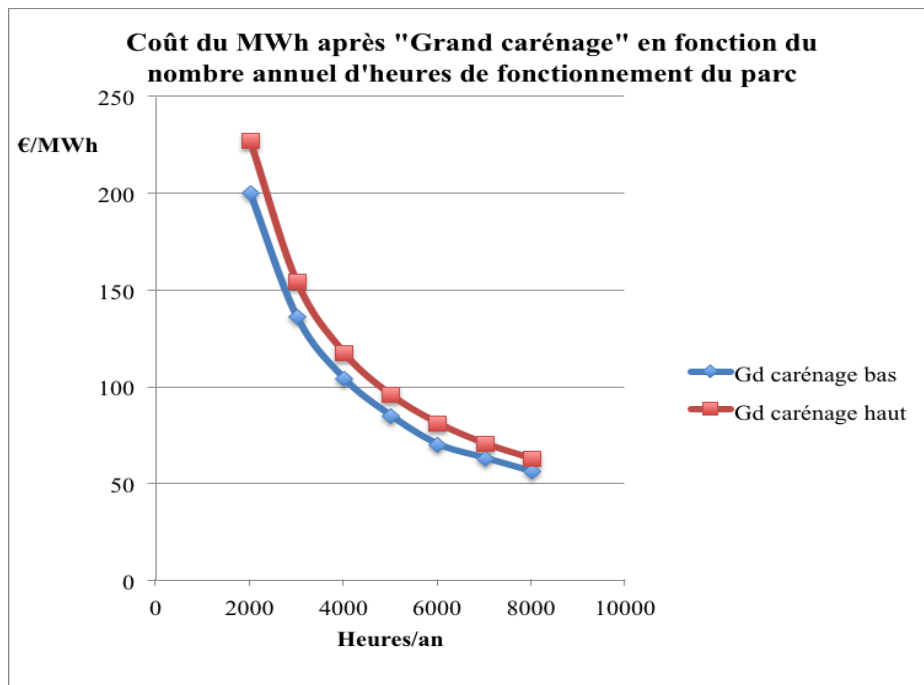
Les autres investissements du programme électronucléaire français relèvent du cycle du combustible : la Cour les estime à environ 40 G€ de 2010, dont 19 G€ seulement sont pris en compte car destinés à répondre aux besoins du parc français.

1.3. Les investissements pour la poursuite du fonctionnement du parc actuel

D'après la Cour des comptes (rapport 2014), pour mettre le parc actuel en capacité de maintenir sa production et, éventuellement, de prolonger sa durée d'exploitation au-delà de 40 ans, une partie des investissements serait réalisée au-delà de 2025. Même si un chiffrage à un tel horizon est par nature un exercice très incertain, le total des investissements sur la période 2011-2033, qui devrait couvrir la quasi totalité des 4^{èmes} visites décennales des réacteurs de 900 MW_e et 1300_e MW, atteindrait environ 90 G€ 2010, soit 110 G€ courants.

Dans le cadre de l'élaboration de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) résultant de l'application de la loi sur la transition énergétique pour une croissance verte d'août 2015, il a été évoqué par certains, la possibilité de respecter l'objectif de 50% de la part du nucléaire dans la production française d'électricité en 2025 en réduisant le nombre d'heures de fonctionnement des réacteurs plutôt que d'en arrêter définitivement un certain nombre.

Fig. 2 : Coût du MWh en fonction de la durée annuelle de fonctionnement



Le coût au MWh du parc après « Grand carénage » estimé par la Cour des comptes entre 63 et 70 € sur la base du taux de charge annuel actuel pourrait ainsi subir une augmentation de 35% et atteindre de 85 à 96€.

1.4. Les incertitudes

Elles sont de plusieurs sortes.

1.4.1. Le coût de l'allongement de la durée de fonctionnement des réacteurs

Les coûts de renforcement des réacteurs associés à une éventuelle prolongation de la durée de vie au-delà de 40 ans restent très incertains. L'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), n'a pas encore fait connaître ses exigences, réacteur par réacteur, mais elle a annoncé que les réacteurs devraient atteindre le niveau de sûreté des réacteurs de troisième génération (EPR).

Les opérations concernées seraient alors souvent inédites et l'estimation de leur coût reste difficile. En première analyse⁶, le coût pourrait atteindre 1,5 G€ par réacteur dans un scénario de sûreté renforcée et pourrait dépasser 4 G€ dans une démarche d'application systématique des meilleures garanties de sûreté s'approchant des exigences fixées pour de nouveaux réacteurs⁷.

⁶ Yves Marignac (2014). *L'échéance des 40 ans pour le parc nucléaire français*, Wise-Paris, février.

⁷ Notamment la « bunkerisation » d'éléments vitaux pour la sûreté des réacteurs, ainsi que des « piscines » des combustibles irradiés.

1.4.2. Le démantèlement des centrales et usines nucléaires

Les trois étapes du démantèlement d'un réacteur sont classées comme suit.

A/ niveau I : mise à l'arrêt définitif (MAD) comprenant le déchargement du combustible du cœur du réacteur et son entreposage pendant deux ans en piscine de "désactivation" du bâtiment combustible, ce qui comprend :

- la décharge du combustible nucléaire ;
- la vidange des circuits.

B/ niveau II : démantèlement partiel incluant la destruction de tous les bâtiments en dehors du bâtiment abritant le réacteur, ce qui comprend :

- la décontamination et destruction de tous les bâtiments en dehors du bâtiment abritant le réacteur nucléaire ;
- le confinement du bâtiment du réacteur nucléaire.

C/ niveau III : démantèlement total du bâtiment réacteur, ce qui comprend :

- le démantèlement des échangeurs thermiques ;
- le démantèlement du bloc réacteur ;
- la destruction du bâtiment du réacteur nucléaire.

EDF affirmait en 2000, mais sans le justifier, que le démantèlement coûterait environ 15% du coût d'investissement du parc de centrales. En 2003, dans ses « coûts de référence », le ministère de l'industrie reprenait cette estimation sans la discuter. Sur cette base, un réacteur ayant coûté 1,5 G€ devrait pouvoir être démantelé pour 220 M€, soit une douzaine de milliards d'euros pour l'ensemble du parc français. Mais les premiers démantèlements d'installation, qui se sont révélés bien plus complexes et beaucoup plus onéreux que prévu, laissent penser que ces coûts sont très sous-estimés, comme le montre le cas de Brennilis, centrale de 70 MW_e électriques en Bretagne (Monts d'Arrée) équipée d'un réacteur à uranium naturel, eau lourde, gaz (CO₂) démarrée en 1968 et arrêtée définitivement en 1985. Le coût du démantèlement en cours de Brennilis est aujourd'hui estimé à 482 M€, soit vingt fois supérieur à celui prévu par la Commission PEON (Production d'électricité d'origine nucléaire).

La Cour des comptes (rapport de 2012) a effectué la comparaison des évaluations des charges de démantèlement de six pays (Allemagne, Belgique, Japon, Royaume-Uni, Suède et Etats-Unis, avec parfois plusieurs évaluations disponibles par pays).

Tableau 2 - Extrapolation du coût du démantèlement du parc français actuel, en G€ 2010

Méthodes utilisées par	EDF	Suède	Belgique	Japon	Etats-Unis 3 méthodes	Grande-Bretagne	Allemagne 4 méthodes
Extrapolation pour 58 réacteurs	18,1	20	24,4	38,9	27,3	46	25,8
					33,4		34,6
					34,2		44
							62

Les quatre évaluations allemandes ont été respectivement effectuées par les exploitants allemands (25,8 G€), la compagnie d'électricité E.ON (44 G€) et le cabinet Arthur D. Little (34,6 à 62 G€). Les valeurs calculées à partir des données étrangères sont toutes supérieures à celle d'EDF.

1.4.3. La gestion des déchets nucléaires

En quelques années, l'évaluation par l'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets RADIOactifs) de l'investissement du stockage géologique, décidé par la loi de 2006 comme solution définitive au stockage des déchets à haute et moyenne activité et à longue durée de vie, est passée de 15 à 35 G€. Mais il n'est pas acquis que le projet actuel soit réalisé. Une solution de stockage à sec en sub-surface serait préférable et très probablement moins chère.

2. Le cas de l'EPR⁸

Les incertitudes affectant le coût de l'électricité d'origine nucléaire sont encore beaucoup plus grandes pour les nouveaux réacteurs en construction ou en projet.

2.1. Le réacteur de Flamanville

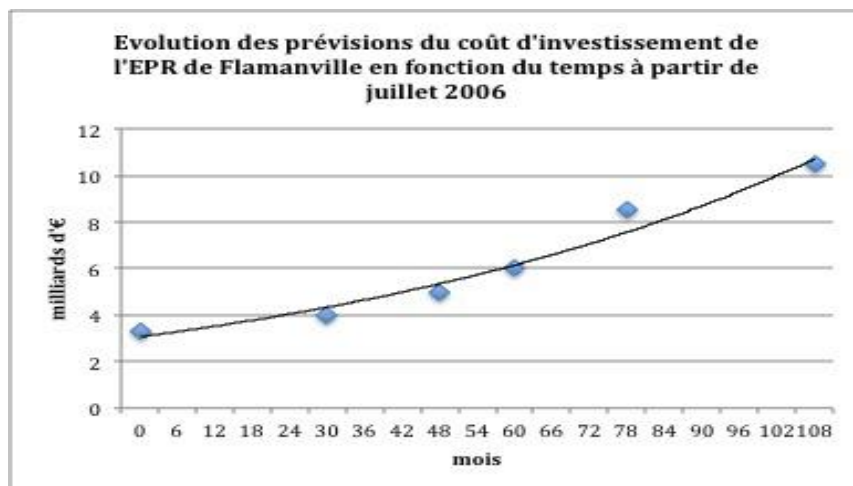
L'EPR est un réacteur à uranium enrichi et eau sous pression (REP ou PWR) de 1650 MW_e de puissance électrique. Quatre réacteurs de type EPR, fournis par AREVA sont actuellement en construction : Olkiluoto 3 (Finlande, depuis 2005), Flamanville 3 (France, depuis 2007), Taishan 1 et 2 (Chine, depuis 2009).

Depuis le démarrage du chantier en 2006, le coût prévisionnel de l'EPR de Flamanville a évolué de façon exponentielle (figure 3). C'est dire que chaque année de retard coûte plus cher en valeur absolue : 0,3 G€ par an entre 2006 et 2008, 0,5 entre 2008 et 2010, mais 1,1 par an depuis 2010 (soit près de 100 M€ par mois). Le président d'EDF vient d'annoncer un nouveau décalage de près de deux ans et un coût de deux milliards supplémentaires pour l'EPR de Flamanville (10,5 G€ en faisant le pari risqué que dans un an les essais imposés par l'Autorité de Sûreté sur la solidité des cuves⁹ et le fonctionnement des soupapes du réacteur mis en cause début 2015 lèveront toute hypothèque sur la sûreté du réacteur. EDF ne donne plus de prévision du coût du kWh, mais, sur la base du coût d'investissement actuel (10,5 G €), le calcul du coût courant économique (CCE) selon la méthode de la Cour des comptes donne des valeurs de 110 à 120 €/MWh pour un taux de rémunération du capital de 8%.

⁸ EPR : initialement projet de réacteur franco-allemand (Areva-Siemens), baptisé *European Pressurized Reactor*, transformé en *Evolutionary Power Reactor* à la suite du retrait de Siemens consécutif à la décision de l'Allemagne de renoncer au nucléaire.

⁹ Défauts (trop forte teneur en carbone) détectés sur le couvercle et le fond de cuve, fabriqués par Areva.

Fig. 3 : Evolution des prévisions du coût d'investissement de l'EPR de Flamanville.



Le chantier du réacteur d'Olkiluoto en Finlande, a connu les mêmes déboires, tant du point de vue de l'allongement du temps de construction que de l'augmentation des coûts. Ce réacteur ne serait opérationnel qu'en 2018. Le chantier des deux réacteurs de Taishan s'est déroulé plus correctement et a presque atteint la phase de chargement du combustible mais les interrogations sur la qualité de la cuve des réacteurs¹⁰ risquent de retarder le démarrage.

2.2. Le marché d'Hinkley Point

EDF et le gouvernement britannique ont signé un accord pour la construction de deux réacteurs nucléaires sur le site de Hinkley Point (Somerset), basé sur un « prix garanti » de vente du kWh par EDF. Ce prix, en octobre 2014, était de 92,5 £/MWh, soit 126 € ou 142 \$/MWh, équivalent à plus de deux fois le coût du nucléaire amorti en France.

C'est, en 2016, la seule donnée officielle que l'on possède sur le coût du kWh produit par un EPR. La Commission européenne a donné son feu vert à cet accord en octobre dernier, estimant que le prix garanti de l'électricité ne constituait pas une aide d'Etat. Ce qui n'a pas empêché en juillet dernier le gouvernement de l'Autriche, pays très opposé au nucléaire, et dix fournisseurs d'énergie, de porter plainte contre cette décision. Les prix du MWh suscitent également des remous en Angleterre. Le 9 septembre 2015, le *Financial Times* a publié un éditorial appelant le gouvernement britannique à reconsidérer le projet.

3. Le coût d'un accident nucléaire

D'après le rapport de la Cour des comptes, les estimations de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) donnent un coût moyen compris entre 70 G€ pour un accident modéré sur un réacteur, comme celui qui s'est produit à Three Mile Island en 1979, et 600 à 1 000 G€ pour un accident très grave comme ceux de Tchernobyl ou de Fukushima.¹¹

¹⁰ Même problème de qualité de la cuve qu'à Flamanville.

¹¹ *Les coûts de la filière électronucléaire*, Rapport public thématique de la Cour des comptes, janvier 2012, p. 242, note de bas de page n°200.

En 2007, un rapport de l'IRSN¹² écrivait en conclusion de l'annexe 4 : « Ainsi, dans le cas de l'accident majorant S1, les conditions météorologiques décident en grande partie du sort de millions de personnes et de l'avenir du pays. Prenant en compte les autres facteurs de variabilité, le coût de l'accident majorant peut descendre à 300 G€ mais peut aussi atteindre 5 800 G€ »¹³. On voit que les emplacements choisis pour implanter des installations nucléaires, mais aussi la chance ou le hasard, jouent un rôle important sur les conséquences d'un accident nucléaire.

Dans un rapport récent¹⁴, l'IRSN présente sa méthode de calcul de façon très détaillée et conclut, pour un accident sur un réacteur électronucléaire français, à un coût global de l'accident et de ses conséquences de 130 G€ pour un accident grave (type Three Mile Island) et 450 G€ pour un accident majeur.

¹² http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/Documents/Reacteurs/IRSN_Rapport-IRSN-DSR-157_GP-05072007.pdf

¹³ N'oublions pas que, pour l'accident majeur de Fukushima, si le vent avait soufflé vers le sud, il aurait fallu évacuer Tokyo (30 millions d'habitants).

¹⁴ *Rapport IRSN / PRP-CRI / SESUC 2013-00261. Méthodologie appliquée par l'IRSN pour l'estimation des coûts d'accidents nucléaires en France* (pdf).