

## Centrales nucléaires et leucémies infantiles

Le risque de leucémie infantile autour des centrales nucléaires a donné lieu à beaucoup de débats. Plusieurs études épidémiologiques ont analysé l'incidence de la leucémie infantile autour des sites nucléaires (sites 1-5) et, plus spécifiquement, par rapport à l'énergie nucléaire autour des centrales (plants 6-13). En règle générale, aucun risque excessif n'a été mis en évidence par les études multi-sites, bien que des excès persistants de leucémie infantile aiguë (AL) ont été localisés et signalés autour de quelques sites spécifiques : le Sellafield 14-16 et Dounreay 17; 18 centrales nucléaires de retraitement du combustible au Royaume-Uni, et l'usine de Krummel nucléaire en Allemagne 10; 19; 20. Compte tenu des niveaux de rayonnement faible mesurés à proximité des sites, l'hypothèse que la population locale est mêlée à l'installation des sites pourrait faciliter la propagation d'un agent leucémogène a été soulevée. Cette hypothèse est compatible avec certaines observations supplémentaires dans le village de Seascale à proximité de la Sellafield site 24 nucléaires. Seascale a connu une période de mélange intensif de la population et la plupart des excès observés apparaît principalement liée à ce facteur. Récemment, l'Allemand KiKK par une étude basée sur la population de cas-témoins a montré une association entre la leucémie chez les enfants de moins de 5 ans et vivant à moins de 5 km d'une centrale nucléaire (NPP) 25-28. En France, une étude de National Geographic sur la période 1990-1998 a été réalisée mais n'a pas trouvé d'association entre l'incidence de l'AL de l'enfance et la proximité de sites nucléaires. Aucune association n'a été démontrée par une étude qui a étendu en 1990-2001 la zone géographique basée sur la dose de décharge gazeuse estimée pour évaluer l'exposition aux radiations dans les communes près du site 30.

Le but de la présente étude était de fournir des résultats à jour sur le risque de leucémie infantile à proximité de centrales nucléaires françaises, en utilisant une étude de cas-témoins en plus de l'incidence habituelle de l'approche géographiques. Tous les cas de AL enfance pour la période 2002-2007 et un ensemble de contrôle de la population contemporaine ont été individuellement classés et situés en termes de distance par rapport aux 19 centrales nucléaires françaises et la dose à base géographique de zonage (DBGZ). L'étude d'incidence à jour (1990-2007) est également présentée.

### 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le GeoCAP étude de cas-témoins, 2002-2007

L'étude de cas-témoins inclut tous les cas de leucémie infantile chez 2753 Français jusqu'à l'âge de 15 ans à la fin de l'année du diagnostic, diagnostiqués entre 2002 et 2007, et résidant dans la France métropolitaine. Les cas ont été obtenus à partir du Registre national Français

Tumeurs malignes hématopoïétiques Enfance (NRCH) 31.

Un ensemble de 30 000 adresses de contrôle, 5000 chaque année pour la période 2002-2007, représentant de la population française en pédiatrie pour toutes ces années, a été choisi au hasard de la pédiatrie population de France métropolitaine, par l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) en utilisant les bases de données impôt sur le revenu et le conseil. L'échantillon a été stratifié sur la Unité de département administratif. L'échantillon témoin a été étroitement représentatif de sa source la population en termes d'âge et le nombre d'enfants dans le ménage, et en termes de contextuelle des variables socioéconomiques et démographiques: taille de l'unité urbaine, le revenu médian, proportion des cols bleus, la proportion de sujets qui ont réussi haut l'école, et la proportion de propriétaires dans la commune de résidence (tableau 1).

L'âge disponibles dans les bases de l'INSEE a été l'âge à la fin de l'année (c'est à dire basée sur l'année de naissance) et la variable âge a donc également été utilisée pour les cas. La base de données Insee ne précise pas le sexe des enfants.

La répartition par âge des cas inclus dans l'étude a montré le pic attendu de l'incidence, entre 2 et 4 ans. Les cas ont été étroitement comparables aux contrôles en termes de contextuelles variables socio-démographiques (tableau 1). En France, un étude géographique nationale sur la période 1990-1998 a été réalisée mais n'a pas trouvé d'association entre l'incidence de l'AL enfance et à distance à partir de sites nucléaires. Aucune association n'a été démontrée par une étude qui a étendu en 1990-2001 et qui utilisée zonage géographique basée sur la dose de décharge gazeuse estimations pour évaluer l'exposition aux radiations dans les communes près de la sites<sup>30</sup>.

Le but de la présente étude était de fournir des résultats à jour sur le risque de leucémie infantile à proximité de centrales nucléaires françaises, en utilisant une étude cas-témoins en plus de l'incidence habituelle géographiques approche. Tous les cas de AL enfance pour la période 2002-2007 et un ensemble de contrôle de la population contemporaine ont été individuellement classés et situés.

### 3.

Les études d'incidence: 1990-2001, 2002-2007 et 1990-2007

Les études d'incidence réalisées au niveau communal (la plus petite circonscription administrative française l'unité) pour la même période 2002-2007 que l'étude cas-témoins, pour la période précédant 1990 - 2001, et pour la période complète 1990-2007. L'étude de cas a concerné tous les enfants diagnostiqués avec AL avant l'âge de 15 ans et inscrits dans le NRCH pendant les périodes. l'annuelle des taux d'incidence national d'Al estimée par le NRCH ont été pris comme taux de référence.

Les estimations des populations de la Commune par année d'âge ont été directement fournies par l'INSEE pour les années de recensement: 1990, 1999, 2006 et 2007. Pour les autres années, les estimations ont été interpolée à partir des données du recensement et les estimations annuelles fournies par l'INSEE pour les 96 Départements métropolitains français. Années-personnes et le nombre de cas attendus AL ont ensuite été calculés pour chaque année de la période 1990-2007 par la commune et groupe d'âge de cinq ans.

Le géocodage d'adresses, 2002-2007

Les adresses des cas et les témoins ont été géocodées par l'entreprise en utilisant les GEOCIBLE MAPINFO système d'information géographique, les bases de données NAVTEQ rue et détaillée cartes vectorisées de l'Institut géographique national (IGN). Le processus a abouti à la emplacement de la porte avec une incertitude d'au plus 100 mètres pour 92% des cas et 96% des contrôles, et avec une incertitude de 15 mètres pour 67% des cas et 76% de la contrôles. Seulement 3% des cas et 1% des contrôles ont été repérées par leur seule commune de résidence, et ont donc été attribués les coordonnées de la mairie de leur commune.

Les incertitudes de géocodage ont été faibles par rapport à la gamme des distances considérées dans la analyse. Tous les cas et les témoins étaient situés dans les 5 catégories de la distance ([0-5 km [[5 -

10 km [, [10-15 km [, [15-20 km [,  $\geq 20$  km) de centrales nucléaires sans aucune incertitude.

caractéristiques NPP

Il ya 19 centrales nucléaires en France (tableau supplémentaire 1), toutes sauf deux (Chooz et Civaux) ayant été en service avant 1990. La majorité des centrales nucléaires sont situées près d'une rivière, mais quatre d'entre eux sont côtières. Les centrales nucléaires de Cattenom, Chooz et Fessenheim, sont situés à moins de 20 km de la frontière avec le Luxembourg, la

Belgique et l'Allemagne, respectivement. L'énergie nucléaire électrique produite se situe dans des fourchettes de 1.800 à 5.400 MW.

La distance du NPP

Dans le GeoCAP étude cas-contrôle de la distance entre la résidence et le plus proche APM a été dérivée du géocodage. Les 32 753 sujets inclus dans l'étude cas-témoins ont été situés à 5 km en anneaux larges de moins de 20 km de la centrale ou à l'extérieur de la région. Dans l'incidence études, les Communes ont été positionnés par les coordonnées de la mairie, et affecté à les zones définies ci-dessus autour de la centrale nucléaire la plus proche.

Dose à base géographique de zonage (DBGZ)

DBGZ avait été développé par l'Institut national de protection radiologique et nucléaire Sécurité (IRSN) pour des analyses des auteurs précédents. Il a utilisé des doses estimées de moelle osseuse associés aux rejets radioactifs gazeux des centrales nucléaires et a de classé les expositions aux mairies des communes situées à moins de 20 km des sites nucléaires. Les Communes près plus d'un APM ou à un autre site nucléaire inclus dans l'analyse précédente ont été alloué la somme des doses estimées pour chacune des installations voisines. Ce fut le cas pour la centrale nucléaire de Flamanville, qui est à proximité du site nucléaire de La Hague, et pour les Centrales nucléaires de Cruas et de Tricastin, qui sont à proximité du site Pierrelatte . Pour les analyses stratifiées par les Communes proches NPP à plus d'une centrale nucléaire ont été affectés à la centrale nucléaire dont la dose estimée est la plus élevée. Dans l'étude cas-témoins, les cas et les témoins ont été alloués, la dose estimée à la ville de la Commune de résidence. Les seuils ont été choisis de manière à obtenir les mêmes distribution des cas attendus que celle obtenue en divisant la zone autour des centrales nucléaires en rondelles

5 km de large, soit environ 10%, 20%, 30% et 40% des cas attendus.

Analyse statistique

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant le logiciel SAS (version 9; SAS Institute Inc, Cary, NC, États-Unis). Les analyses ont été effectuées sur toutes les centrales nucléaires et tous les cas, et par groupe d'âge (0-4, 5-9, 10-14 ans), sous-type AL: lymphoblastique (LAL) et myéloblastiques (LAM), la PPN et l'année d'études.

Dans l'étude cas-témoins, les odds ratios (OR) et leurs intervalles de confiance à 95% (IC) ont été estimés par régression logistique inconditionnelle ajustés pour l'âge (groupes d'âge de 5 ans) et Département.

Dans les études d'incidence, le risque relatif d'AL a été estimée par l'incidence standardisée ratio (SIR), défini comme le ratio de la valeur observée (O) et attendus (E) le nombre de cas. L'IC à 95% a été calculé à l'aide de approximation<sup>33</sup> Byar. La distribution statistique des nombre de cas observés chaque année autour de chaque centrale nucléaire a été comparée à celle obtenue sous l' hypothèse d'une distribution de Poisson et aucun départ statistiquement significative ou quantitativement a été observée. De plus nos analyses précédentes ne témoignent pas quantitativement d'une importante sur-dispersion sur la commune ou le département

35 échelles en France.

L'hétérogénéité de la SIR par année ou par APM a été testée à l'aide de Pearson chi carré, avec des externes (taux national) et interne (taux de moins de 20 km autour des centrales nucléaires) références. Depuis des petits nombres pourraient avoir porté atteinte à la validité des tests et les niveaux de signification statistique des tests ont été estimés par simulation. Dans tous les 50000, les distributions des cas dans les communes ont été générées sous l'hypothèse nulle d'une distribution de Poisson avec le nombre correspondant au nombre attendu de cas et les statistiques observées ont été comparés à la distribution des 50.000

statistiques simulées.

Des analyses ont également été effectuées après exclusion des sujets vivant à plus de 50 kilomètres à partir d'un PPN dans l'étude cas-témoins et de l'informatique, l'incidence entre 20 et 50 km. Des analyses stratifiées ont été réalisées par caractéristique centrale nucléaire, c'est à dire l'énergie électrique, les zones côtières emplacement et l'emplacement des frontières dans la période 2002-2007 étude cas-témoins et dans l'étude d'incidence. Afin de tenir compte des facteurs confondants potentiels, les analyses ont été répétées après stratification ou ajustement de plusieurs variables contextuelles dans les modèles. Les variables contextuelles ont été extraites des données de 1999 du recensement et a consisté en l'état urbain de la Commune (rural, semi-urbaines ou urbaines), le revenu médian des ménages, la proportion des cols bleus et la proportion de bacheliers. Ces dernières variables ont été utilisées séparément et conjointement de prendre l'hétérogénéité spatiale socioéconomique en compte. Les données ont également été analysées, après exclusion des cas et les témoins qui ont vécu moins de 200 mètres d'une ligne à haute tension et de ceux qui vivaient à moins de 600 mètres d'une puissance ligne, car une association entre la proximité des lignes électriques et les risques d'AL a été suggérée. Les analyses de sensibilité ont été effectuées par l'exclusion, à son tour, chaque année ou chaque NPP, ou en utilisant une fenêtre de 6 ans glissant sur la période 1990-2007.

Les analyses à la dose

Les estimations ont été reproduites en utilisant les seuils sur la base des quartiles de la distribution dans le contrôles.

Pour tester l'existence d'une tendance de l'incidence de l'AL avec la distance à partir d'une centrale nucléaire, la fonction inverse de la distance a été examinée. Un test de linéarité basé sur un ratio de log-vraisemblance

La statistique a été réalisée, compte tenu de la variable catégorielle dérivé d'anneaux de 2-km de large. L'inverse de la distance a ensuite été inclus dans le modèle de régression comme en continu variable indépendante. La signification des paramètres de régression a été évaluée à l'aide 10000 répliqués des ensembles de données. Pour l'analyse cas-témoins, 10 000 permutations des cas-témoins du statut de tous les enfants ont été faites, par département et indépendamment de la distance de la centrale nucléaire. Dans les études d'incidence, les 10.000 ensembles de données répliqués ont été construits sous l'hypothèse d'une distribution de Poisson des cas dans les communes.

Puissance des études

Dans l'étude GeoCAP utilisant un test unilatéral au seuil de 5%, le pouvoir de détecter un OR de deux pour vivre de moins de 5 km d'une centrale nucléaire (à comparer à une vie de plus de 20 km), était égale à 43% pour le groupe d'âge 0-4 ans et 70% pour le groupe d'âge 0-14 ans. Pour l'incidence études, en utilisant un test unilatéral de Poisson au niveau de 5% et le rapprochement suggéré par Breslow et Day33, le pouvoir de détecter un SIR de deux pour vivre moins de 5 km d'une centrale nucléaire (à comparer à une vie de plus de 20 km), était très proche de celle de l'étude GeoCAP pour la période 2002-2007 et plus de 80% pour les périodes 1990-2001 et 1990-2007.

### 3. RÉSULTATS

Enfance AL risques et la proximité des centrales nucléaires

GeoCAP étude cas-témoin (2002-2007)

Parmi les 2753 cas inclus dans l'étude cas-témoins, 99 vivaient moins de 20 km d'une centrale nucléaire. AL a été significativement associée à la vie à moins de 5 km d'un (NPP OR = 1,9 [1,0 à 3,2]) et les RUP proche de l'unité ont été observées pour toutes les régions situées plus à partir des sites (tableau 2). Lorsque le cas et les témoins étaient situés

dans les anneaux de 2 km de large au lieu de 5 km de large, le logarithme de l'odds ratio tend à augmenter légèrement avec l'inverse de la distance de la plus proche NPP (chiffre supplémentaire 1), bien que cette tendance n'était pas statistiquement significative lorsque l'inverse de la distance a été considérée comme une variable continue dans le modèle de régression (Pone-verso = 0,18). Pour les enfants de moins de 5 ans, le ou observés dans l'espace le plus proche était de la même ordre de grandeur que pour l'ensemble du groupe, bien que non significatif (OR = 1,6 [0,7-4.1]).

Modèles très similaires ont été obtenus pour les 5-9 et 10-14 les groupes d'âge par an (données non présentées).

Le cas de vie dans chacun des 5 anneaux km autour des centrales nucléaires présenté avec l'âge habituel, sexe et les caractéristiques des cellules néoplasiques (tableau 3). Le nombre de cas de LAM a été très faible (17 cas moins de 20 km, aucun rayon de 5 km). Les résultats pour toutes étaient très similaires à ceux pour tous les AL, l'OR associé à la vie à moins de 5 km d'une centrale nucléaire étant de 2,4 [1.3 à 4.2]) (table supplémentaire 2).

Etude d'incidence, 2002-2007

Sur la même période, 2002-2007, l'étude d'incidence inclus 2831 cas de leucémie aiguë de moins de 15 ans. Le SIR ont été très proche de l'OR des contemporains étude cas-témoins pour tous les groupes d'âge et catégories de distance (tableau 2). Le logarithme de la SIR a augmenté légèrement avec l'inverse de la distance du plus proche NPP (chiffre supplémentaire 1), mais cette tendance n'était pas statistiquement significative dans le modèle continu (Pone-verso = 0,25).

Pour les 1159 sujets qui ont vécu dans les 20 km de la centrale nucléaire la plus proche, les distances de PPN basée sur les coordonnées de la mairie Commune utilisées dans l'étude d'incidence, et sur la individuelles coordonnées utilisées dans l'étude cas-témoins, ont été fortement corrélés ( $r = 0,97$ ). Cette constat est lié au fait que les centrales nucléaires les plus françaises sont situées dans les zones rurales dans lesquelles la plupart des habitations sont situées à proximité de la mairie.

Dans la période précédente, 1990-2001, déjà couverts par une analysis<sup>30</sup> précédentes, des cas AL 5356 moins de 15 ans ont été enregistrés dans le NRCH. Parmi les cas, 173 vivaient à moins de 20 km d'une centrale nucléaire (tableau 2). Le SIR ne diffère pas de l'un pour l'autre des quatre anneaux de 5 km autour des centrales nucléaires.

1990-2007 Etude d'incidence

Sur toute la période, 1990-2007, 272 des 8187 cas enregistrés par le NRCH vécu moins de 20 km, et 24 moins de 5 km, à partir d'une centrale nucléaire. Le SIR ont été de 1,0 [0,9-1.1] et 1,1 [de 0,7 à 1,7], respectivement (tableau 2). Le SIR pour le proche secteur était légèrement mais significativement plus élevé pour ne pas le groupe d'âge 0-4 ans (1,4 [0,8 à 2,3]; Pone-verso = 0,15).

Analyses sous-groupe, le contrôle des facteurs de confusion et d'analyses de sensibilité Les résultats sont restés inchangés quand les sujets vivant à plus de 50 km d'une centrale nucléaire ont été exclus de l'analyse cas-témoins. Le SIR a été très proche de un (SIR = 1,05 [0,96- 1,15]) pour les résidences entre 20 et 50 km d'une centrale nucléaire. Les analyses stratifiées ont montré que l'association entre l'AL et de vivre moins de 5 km d'une centrale nucléaire ne varie pas substantiellement avec la puissance de la centrale nucléaire, avec localisation sur une côte ou frontière, ou avec le statut urbain / rural de la Commune (tableau 4). L'augmentation du risque avec la vie de moins de 5 km d'une centrale nucléaire semblent plus marquée, mais pas de manière significative, dans les communes ayant le plus faible revenu médian ou moins proportion de bacheliers que dans d'autres communes.

Ajustements pour les variables contextuelles, soit séparément et conjointement et pour la

privation indice ne change pas les estimations. Aucun cas et 5 témoins vivant à moins de 5 km d'un PPN et moins de 200 m d'une ligne à haute tension, et en excluant entre eux n'ont pas sensiblement modifié l'association avec la proximité des centrales nucléaires (OR = 2,0 [1,1; 3,6]). Considérant les enfants qui vivent moins de 600 m de la ligne n'a pas changé l'association avec les centrales nucléaires soit (OR = 2,1 [0,7; 6,4] <600 m et OR = 1,8 [0,9; 3,5] plus loin). Utilisation de la distance entre la municipalité et NPP, plutôt que les distances individuelles conduit à de très similaires ou et SIR.

Le petit nombre a entravé les analyses détaillées par PPN ou de l'année. Aucune association spécifique avec séjour de moins de 5 km d'une centrale donnée n'a été mis en évidence.

Lorsque chaque centrale nucléaire a été exclue, à son tour, à partir du cas-témoins et des analyses d'incidence, l'OR / SIR estimé sur la 18 centrales nucléaires restantes a été très similaire à celle pour les 19 centrales nucléaires (table supplémentaire 3). Il n'y avait pas l'hétérogénéité de la SIR estimé par NPP ( $p = 0,13$ ) et le test de l'hypothèse qu'ils étaient tous égaux à l'un était à la limite de la significativité statistique ( $p = 0,07$ ).

Sur la période 2002-2007, AL cas de vie à moins de 5 km d'une centrale nucléaire étaient pour la plupart diagnostiqués en 2003, 2006 et 2007 (tableau 4). Cependant, les résultats sont demeurés similaires lors de chaque année d'observation a été exclue, à son tour, à partir du cas-témoins et des analyses d'incidence. Pour toute la période, 1990-2007, aucune hétérogénéité significative du SIR annuelle a été démontré ( $p = 0,12$ ), mais le test de l'hypothèse que les SIR sont tous égaux à l'un était sur la limite de la significativité ( $p = 0,06$ ).

Lorsque les analyses d'incidence ont été limités à successives de 6 ans les fenêtres coulissantes sur l'ensemble de 1990 à 2007 période, 2002-2007 a été le seul période pour laquelle une association avec la vie de moins de 5 km d'une centrale nucléaire a été observée. l'utilisation des simulations conduit à des valeurs similaires de la statistique et les mêmes conclusions.

#### Enfance AL et DBGZ

L'estimation des doses de moelle osseuse liée à décharge gazeuse radioactives n'ont pas abouti à la même catégorisation des cas et les témoins (tableau 5): 40% des contrôles dans la plus haute catégorie d'exposition ( $> 0,72$  mSv) ont été dans le ring 0 à 4,99 km, 44% dans l'anneau de 5 à 9,99 km, 11% dans l'anneau de 10 à 14,99 km et 4% dans l'anneau de 15 à 19,99 km.

Aucune association entre AL et DBGZ a été observée dans l'étude cas-témoin ou dans le 2002 - 2007 Une étude d'incidence (tableau 6). Le RSI et les RUP ont été près d'un pour tous les DBGZ catégories. Les résultats étaient les mêmes lorsque les catégories DBGZ étaient basées sur les quartiles de la distribution de l'exposition de contrôle (non représentée). Exclusion des centrales nucléaires à proximité nucléaires autres les sites n'ont pas changé les résultats. Il n'y avait aucune association entre AL et DBGZ pour l'ensemble de la période, 1990-2007 (tableau 6).

#### 4. DISCUSSION

Le GeoCAP étude cas-témoins témoignent une association entre l'enfance et la vie AL moins de 5 km d'une centrale nucléaire pour la période 2002-2007. L'association a également été observée dans le étude d'incidence contemporains, mais pas pour la période précédente, 1990-2001. Utilisation de la DBGZ donné des résultats très différents, avec des SIR et des RUP près d'un pour tous les DBGZ catégories. L'association observée pour 2002-2007 n'était pas spécifique à un groupe d'âge, centrale ou année.

Une force de l'étude réside dans le fait que les cas ont été identifiés par le NRCH, qui a couvert l'ensemble du pays depuis 1990. Le NCRH s'appuie sur environ trois notifications indépendante par cas en moyenne. Son exhaustivité a été estimée à 99,4% 38. Un

autre point fort consiste dans le fait que les contrôles ont été sélectionnés parmi les près de base de données exhaustive des ménages contribuables avec enfants. Comme illustré par le tableau 1, les contrôles dans l'étude étaient très représentatifs de la population source. Un autre force de l'étude est le géocodage GeoCAP qui précise les cas et les contrôles des résidences.

Les deux approches complémentaires utilisés sont sensibles à différentes sources potentielles de biais, sélection des témoins pour l'étude cas-témoins, et des estimations du nombre attendu de cas pour les études écologiques basée sur les données d'incidence agrégées au niveau de la commune. Le fait que deux approches ont abouti à des résultats presque identiques est un argument fort en faveur de la la validité des RUP et des SIR.

Ajustement pour, et la stratification sur l'âge et le socio-économiques et démographiques caractéristiques de la commune de résidence ont été pris d'annuler un certain nombre de confondants potentiels contextuelles.

Une limitation de la présente étude est que les données ne permettent pas d'ajustement pour chaque facteurs de risque potentiels tels que l'ordre de naissance, l'allaitement, fréquentation d'une crèche, ou des pesticides l'exposition. Cependant, il n'y a pas de raison évidente pour ces facteurs de différer au sein et en dehors des 5 anneaux km à proximité des centrales nucléaires conditionnellement sur le statut rural / urbain ou d'autres socio-économiques ou variables démographiques, qui ont été prises en compte. Les données sur l'emploi des parents dans les Centrales nucléaires n'étaient pas disponibles dans l'étude GeoCAP, mais un impact de l'emploi des parents sur les leucémies infantiles n'est pas supporté par la littérature<sup>39</sup>. En outre, le brassage de population ne pouvait pas être évalué dans cette étude. Cependant, l'étude a permis GeoCAP pour rendre compte de l'ajustement sur la proximité des lignes électriques à haute tension.

Comme la plupart des études sur la leucémie infantile à proximité de centrales nucléaires, l'étude GeoCAP n'a pu avoir accès à des histoires complètes résidentielles, ce qui est une limitation importante pour l'évaluation de l'exposition réelle au rayonnement ou à tout autre facteur lié à la proximité des centrales nucléaires.

Toutefois, ni l'étude finlandaise qui a recueilli l'historique complet d'habitation et calculé la distance d'une centrale nucléaire pondérée par le temps passé dans le house<sup>9</sup>, ni les Suisses étude qui a utilisé les adresses à la naissance et diagnosis<sup>6</sup> n'ont révélé une association avec le passé ou la proximité cumulée à la centrale.

Restreindre l'analyse aux enfants âgés de moins de 5 ans, qui sont moins susceptibles d'avoir déménagé depuis la naissance que les enfants plus âgés, ont entraîné des RUP similaires et SIR. Trois centrales nucléaires sont situés à proximité de la frontière française, mais seulement la partie française du rayon de 20 km a été examiné.

Toutefois, en excluant les trois centrales nucléaires n'a pas sensiblement modifié les résultats. Aucune des centrales nucléaires en les pays voisins a été inférieure à 20 km de la frontière française.

La méthode utilisée pour estimer la dose de radiation délivrée à la moelle osseuse par les centrales nucléaires a été basé sur la moyenne annuelle des niveaux de rejets gazeux, la composition de décharge et locales paramètres météorologiques en particulier les vents dominants qui influencent la dispersion des radionucléides. En raison du manque de données sur les débits réels, la décharge des taux de carbone 14 étaient basées sur les limites réglementaires. La contribution du carbone 14 à la dose de rayonnement peut donc avoir été surestimé. Cependant, la méthode était la même pour toutes les centrales nucléaires.

En conséquence, les communes sont susceptibles d'avoir été correctement classées dans une zone centrale donnée en termes d'exposition malgré les erreurs potentielles dans l'estimation

des doses. Contrairement à un grand classique hypothèse, le tableau 5 montre clairement que la répartition de la population en termes de dispersion des radionucléides rejetés dans l'atmosphère ne peut pas être représenté par un simple fonction de la distance de la centrale. L'utilisation de l'DBGZ innovantes semble être une étape pour surmonter les limites des études utilisant le zoning<sup>40</sup> circulaire conventionnel. **Le modèle ne tient pas compte des rejets liquides, bien que leur contribution au total l'exposition aux rayonnements liés à l'activité centrale nucléaire peut avoir été du même ordre de grandeur que que des rejets gazeux.** Les doses de radiation due aux rejets liquides sont principalement déterminées par des comportements individuels (consommation de nourriture et d'eau) et ne sont donc pas tenus de se conformer aux règlements de zonage géographique autour des centrales nucléaires. Par ailleurs, dans de nombreuses situations les doses ne devraient pas diminuer en douceur avec la distance de la centrale. En outre, bien que pour les centrales nucléaires situées sur une côte ou d'une rivière on peut s'attendre à différer à l'égard de doses des rejets liquides, dans les analyses stratifiées les associations avec AL ont été similaires. Globalement, les doses estimées en raison de centrales nucléaires ont été très faibles par rapport aux doses dues à sources de rayonnement naturel . De telles doses ne devraient pas entraîner un risque observables en excès sur la base de la evidence<sup>41</sup> disponibles. Comparé à d'autres études, l'utilisation de DBGZ constitue en des auteurs d'opinion, une amélioration majeure. L'approche utilisée pour dériver DBGZ est déjà assez élaborée (examen d'un large spectre de 12 radionucléides, l'utilisation de moyens réels données sur les congés et les données climatiques locales, le calcul de la dose à l'organe pertinent, etc.) Dans les développements futurs, DBGZ pourrait être affinée en incluant les données réelles pour la décharge de carbone 14 dans les modèles pour les rejets gazeux **et en tenant compte de l'impact des rejets liquides dans la détermination des niveaux de dose.** En outre, DBGZ pourrait fournir des estimations sur le lieu de résidence plutôt que à la mairie. Cependant, alors que DBGZ pourrait gagner en précision et en précision, les estimations ne devraient pas augmenter les gammes de doses qui pourraient exercer un effet notable sur le risque de leucémie selon des modèles prédictifs. Dans l'incidence multisite des auteurs précédents études<sup>29, 30</sup> aucune association entre la proximité de Centrales nucléaires et AL a été observée. Cela a été en ligne avec la plupart des multisite études<sup>1, 2, 8, 12</sup>, et est également en ligne avec les résultats de l'analyse de l'incidence des auteurs sur toute la période, 1990-2007. Dans l'Allemagne, les KiKK étude cas-témoin d'enfants âgés de moins de 5 ans en témoigne d'une association entre AL et NPP proximity<sup>25</sup>. Cependant, il est important de plusieurs différences entre ces résultats et les résultats de la présente étude. L'incidence allemande étude a montré que les taux d'incidence étaient plus élevés en particulier dans le group<sup>42</sup> âge 0-4 ans, qui n'était pas le cas dans cette étude. En outre, dans l'étude allemande, les estimations du risque obtenues dans le l'incidence analysis<sup>26</sup> semblait être inférieures à celles obtenues avec le cas-témoins approach<sup>25</sup>, tandis que dans cette étude, les estimations obtenues avec les deux approches ont été très similaires. Dans l'étude allemande, le risque estimé de la bague 5 km a été très sensible aux si oui ou non la centrale nucléaire de Krummel était incluse , alors qu'aucune différence notable entre les Centrales nucléaires a été observée dans cette étude. Une réévaluation des résultats KiKK montré la marque l'impact du statut urbain / rural de la zone de résidence sur le risk<sup>43</sup> estimé, alors qu'aucune différence notable n'a été observée dans la présente étude. Dans l'étude KiKK, une augmentation de la tendance à l'inverse de la distance à partir des sites, considérée comme une variable continue, a été rapportée, la tendance n'a pas été détectée lorsque la distance est categorical<sup>25</sup>. Dans l'étude GeoCAP, une légère tendance



mais non significative augmentation de l'OR et SIR avec inverse de la distance a été observées.

Globalement, les résultats suggèrent un risque possible de plus de AL dans le proche voisinage des centrales nucléaires françaises en 2002-2007. L'augmentation de l'incidence observée à moins de 5 km des centrales nucléaires dans l'étude GeoCAP qui partiellement soutient les conclusions récentes allemand depuis l'augmentation a été limitée à ces dernières années et n'est pas spécifique aux plus jeunes des enfants. L'absence de toute association avec DBGZ, qui est supposé refléter la répartition du rayonnement gazeux déchargé de centrales nucléaires, pourrait indiquer que l'association observée avec la distance <5 km sur 2002-2007 et plus particulièrement en 2006-2007, n'est pas expliqué par les rejets gazeux, NPP.

Globalement, les résultats suggèrent un risque potentiel supérieur sur la période 2002-2007 qui pourraient être dus à facteurs inconnus liés à la proximité des centrales nucléaires. Parmi les facteurs potentiels sont la population mélangée et l'exposition aux agents physiques, y compris les expositions naturelles ou artificielles au rayonnement ne sont pas modélisés par le DBGZ. Globalement, les résultats d'une enquête pour appel à de potentiel facteurs de risque liés à la proximité des centrales nucléaires, et l'analyse collaborative de toutes les preuves disponibles à partir d'études multisites menée dans différents pays.

#### Remerciements:

Ce travail a été soutenu par l'Institut de Veille Sanitaire (InVS), Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES), l'Association pour la Recherche sur le Cancer (ARC), la Fondation Pfizer, Institut National du Cancer (INCa) et l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).

Les auteurs sont particulièrement reconnaissants à Olivier LAMY et Mathieu CARRÈRE (GEOCIBLE), qui ont soigneusement assuré tous les géocodage et l'Institut Géographique National (IGN), qui fait des cartes précises disponibles pour l'ensemble du pays. Les auteurs sont également reconnaissants à Magda Tomasini et Laurent Auzet (INSEE), qui a effectué le contrôle d'échantillonnage, Aline MORIN (IRSN), qui a réalisé le zonage dose basée géographique, tous les NRCH assistants de recherche qui ont recueilli les adresses des cas et les équipes d'oncologie pédiatrique pour leur aide dans la collecte des données.

Table 2: Distance to the nearest French nuclear power plant (NPP) and childhood acute leukemia - Geocap case control study and incidence studies.

	Geocap study, 2002-2007 <sup>a</sup>					Incidence study, 2002-2007 <sup>a</sup>					Incidence study, 1990-2001 <sup>b</sup>					Incidence study, 1990-2007 <sup>c</sup>					
	(distance: residence-nearest NPP)					(distance: municipality-nearest NPP)					(distance: municipality-nearest NPP)					(distance: municipality-nearest NPP)					
	Cases	Controls	OR	95% CI	p	O	E	SIR	95% CI	p	O	E	SIR	95% CI	p	O	E	SIR	95% CI	p	
<b>Age &lt; 15 years<sup>d</sup></b>																					
0-4.99 km	14	80	1.9	[1.0-3.3]	*	14	7.4	1.9	[1.0-3.2]	*	10	13.6	0.7	[0.4-1.4]		24	21.0	1.1	[0.7-1.7]		
5-9.99 km	17	213	0.9	[0.5-1.5]		19	20.6	0.9	[0.6-1.4]		40	39.2	1.0	[0.7-1.4]		59	59.8	1.0	[0.8-1.3]		
10-14.99 km	27	320	0.9	[0.6-1.4]		30	25.4	1.2	[0.8-1.7]		50	48.5	1.0	[0.8-1.4]		80	73.9	1.1	[0.9-1.4]		
15-19.99 km	41	447	1.0	[0.7-1.4]		36	42.4	0.9	[0.6-1.2]		73	81.5	0.9	[0.7-1.1]		109	124.0	0.9	[0.7-1.1]		
≥ 20 km	2654	28940	1.0																		
<20 km	99	1060	1.0	[0.8-1.3]		99	95.7	1.0	[0.8-1.3]		173	182.9	0.9	[0.8-1.1]		272	278.6	1.0	[0.9-1.1]		
≥ 20 km	2654	28940	1.0																		
<b>Age &lt; 5 years<sup>e</sup></b>																					
0-4.99 km	6	27	1.6	[0.7-4.1]		8	3.6	2.2	[1.0-4.4]	*	6	6.6	0.9	[0.3-2.0]		14	10.2	1.4	[0.8-2.3]		
5-9.99 km	7	55	1.0	[0.5-2.3]		10	10.2	1.0	[0.5-1.8]		21	19.3	1.1	[0.7-1.7]		31	29.5	1.1	[0.7-1.5]		
10-14.99 km	11	103	0.8	[0.4-1.4]		11	12.6	0.9	[0.4-1.6]		18	23.5	0.8	[0.5-1.2]		29	36.1	0.8	[0.5-1.2]		
15-19.99 km	17	136	1.0	[0.6-1.7]		18	20.8	0.9	[0.5-1.4]		39	39.7	1.0	[0.7-1.3]		57	60.6	0.9	[0.7-1.2]		
≥ 20 km	1248	9396	1.0																		
Total <20 km	41	321	1.0	[0.7-1.4]		47	47.3	1.0	[0.7-1.3]		84	89.1	0.9	[0.8-1.2]		131	136.4	1.0	[0.8-1.1]		
≥ 20 km	1248	9396	1.0																		

<sup>a</sup>Odds ratios (OR) and 95% confidence intervals (95%CI) estimated by logistic regression adjusted for age at the end of the year (5-year age groups for the 5-14-year-old children, 1-year age groups for the 0-4-year-old children) and *Doyenne* of residence. <sup>b</sup>Standardized incidence ratio (SIR) calculated as the ratio of the observed (O) to the expected (E) number of cases with Byar's approximation of the 95% confidence interval (95%CI). <sup>c</sup>Age at the end of the year in the Geocap study, exact age in the incidence studies.

\*  $P_{\text{unadjusted}} < 0.5$ .

John Wiley & Sons, Inc.

Table 3: Description of the registered cases within 20 km of the nuclear power plants (NPP) over the period, 2002-2007.

	Distance: residence - nearest NPP											
	0-4.99 km		5-9.99 km		10-14.99 km		15-19.99 km		< 20 km		≥ 20 km	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
<b>Gender</b>	14		17		27		41		99		2654	
Female	7	50.0%	8	47.1%	13	48.1%	20	48.8%	48	48.5%	1302	45.3%
Male	7	50.0%	9	52.9%	14	51.9%	21	51.2%	51	51.5%	1452	54.7%
<b>Age</b>												
< 5 years	6	42.9%	7	41.2%	11	40.7%	17	41.5%	41	41.4%	1248	47.0%
5-9 years	5	35.7%	6	33.3%	11	40.7%	14	34.1%	36	36.4%	829	31.2%
10-14 years	3	21.4%	4	23.5%	5	18.6%	10	24.4%	22	22.2%	577	21.7%
<b>Down's syndrome</b>	0	0%	0	0%	0	0%	1	2.4%	1	1.0%	41	1.5%
<b>Acute leukemia type</b>												
ALL	14	100.0%	13	76.5%	23	85.2%	30	73.2%	80	80.8%	2179	82.1%
B-cell precursor ALL	11	78.6%	10	58.8%	19	70.4%	26	63.4%	66	66.7%	1810	67.2%
T-cell ALL	2	14.3%	3	17.6%	3	11.1%	4	9.8%	12	12.1%	249	9.4%
AML	0	0.0%	4	23.5%	3	11.1%	10	24.0%	17	17.2%	407	15.3%
Other AL	0	0.0%	0	0.0%	1	3.7%	1	2.0%	2	2.0%	68	2.6%

AL: acute leukemia; ALL: acute lymphoblastic leukemia; AML: acute myeloblastic leukemia.

Table 4: Distance to the nearest French nuclear power plant (NPP) and childhood acute leukemia - Geocap and incidence studies, 2002-2007, different stratified analyses

	Geocap case-control study <sup>1</sup> (residence address)										Incidence study, 2002-2007 <sup>2</sup> (town hall address)										
	< 5 km vs. ≥ 20 km					≥ 20 km vs. ≥ 20 km					< 5 km					≥ 20 km					
	Cases	Controls	OR	95%CI	p	Cases	Controls	OR	95%CI	p	O	I	SIR	95%CI	p	O	I	SIR	95%CI	p	
<b>Electrical power</b>																					
5200-5400 MW	5	22	1.4	[0.4-4.9]		28	303	0.9	[0.6-1.4]		3	1.8	1.7	[0.3-4.8]		27	26.2	1.0	[0.7-1.5]		
3600 MW	4	22	2.1	[0.7-6.3]	*	28	325	1.0	[0.6-1.4]		3	1.9	1.6	[0.3-4.5]		27	31.6	0.9	[0.6-1.2]		
2600-2800 MW	6	29	2.1	[0.8-5.1]	‡	33	345	1.1	[0.7-1.5]		7	3.0	2.3	[0.4-8.4]	*	34	30.8	1.1	[0.8-1.5]		
1800 MW	1	7	1.4	[0.2-11.6]		10	87	1.3	[0.6-2.6]		1	0.6	1.7	[0.0-9.3]		11	7.1	1.5	[0.8-2.8]		
<b>Year</b>																					
2002	0	12	0.0			15	180	0.8	[0.5-1.5]		1	1.2	0.8	[0.0-4.5]		15	16.2	0.9	[0.5-1.5]		
2003	3	15	2.1	[0.6-7.5]		18	182	1.2	[0.7-2.0]		3	1.2	2.4	[0.5-7.1]		17	16.2	1.1	[0.6-1.7]		
2004	1	13	0.8	[0.1-6.4]		19	168	1.2	[0.7-2.0]		1	1.3	0.8	[0.0-4.4]		18	16.3	1.1	[0.7-1.7]		
2005	1	13	0.8	[0.1-6.6]		14	161	1.1	[0.6-1.9]		0	1.2	0.0	[0.0-3.1]		17	15.5	1.1	[0.6-1.8]		
2006	5	13	4.9	[1.6-14.8]	*	18	175	1.1	[0.6-1.9]		5	1.2	4.1	[1.3-9.6]	*	17	15.7	1.1	[0.6-1.7]		
2007	4	14	3.9	[1.2-12.9]	*	15	195	0.8	[0.4-1.4]		4	1.2	3.3	[0.9-8.4]	*	15	15.7	1.0	[0.5-1.6]		
<b>Coastal location</b>																					
Yes	3	18	1.7	[0.5-6.0]		26	258	1.1	[0.7-1.3]		3	1.5	2.0	[0.4-5.9]		29	24.7	1.2	[0.8-1.7]		
No	11	62	1.9	[1.0-3.6]	*	73	802	1.0	[0.8-1.3]		11	5.9	1.9	[0.9-3.4]		70	71.1	1.0	[0.8-1.2]		
<b>Border location</b>																					
Yes	4	19	1.9	[0.6-5.9]		17	187	0.9	[0.5-1.5]		4	1.3	3.0	[0.8-7.6]		19	16.4	1.2	[0.7-1.8]		
No	10	61	1.8	[0.9-3.6]		82	873	1.1	[0.8-1.3]		10	6.0	1.7	[0.8-3.1]	‡	80	79.3	1.0	[0.8-1.3]		
<b>Status of the Commune</b>																					
Rural	9	49	2.2	[1.0-4.7]	*	49	445	1.2	[0.8-1.6]		9	3.9	2.3	[1.1-4.4]	*	51	41.8	1.2	[0.9-1.6]	‡	
Semi-urban	3	16	2.2	[0.6-7.9]		26	388	0.8	[0.5-1.3]		3	2.5	1.2	[0.2-3.5]		26	34.6	0.8	[0.5-1.1]		
Urban	2	15	1.5	[0.3-6.6]		24	227	1.3	[0.8-2.1]		2	0.9	2.1	[0.2-7.7]		22	19.4	1.1	[0.7-1.7]		
<b>Median income of the Commune</b>																					
< median	11	51	2.3	[1.2-4.4]	*	63	703	1.0	[0.8-1.3]		11	4.6	2.4	[1.2-4.3]	*	63	64.7	1.0	[0.8-1.3]		
≥ median	3	27	1.1	[0.3-3.6]		35	352	1.1	[0.7-1.6]		3	2.8	1.1	[0.2-3.2]		36	31.0	1.2	[0.8-1.6]		
<b>Proportion of blue-collar workers in the Commune</b>																					
< median	2	15	1.6	[0.4-7.3]		18	175	1.2	[0.7-2.1]		2	1.4	1.5	[0.2-5.2]		18	15.8	1.1	[0.7-1.8]		
≥ median	12	65	1.9	[1.0-3.5]	*	81	885	1.0	[0.7-1.2]		12	6.0	2.0	[1.0-3.5]	*	81	79.9	1.0	[0.8-1.3]		
<b>Proportion of baccalaureate holders in the Commune</b>																					
< median	13	70	1.9	[1.0-3.6]	*	79	819	1.0	[0.8-1.3]		13	6.0	2.2	[1.2-3.7]	*	78	71.5	1.0	[0.9-1.4]		
≥ median	1	10	1.4	[0.2-11.6]		20	241	1.0	[0.6-1.6]		1	1.4	0.7	[0.0-4.1]		21	21.3	0.9	[0.5-1.3]		

<sup>1</sup> Odds ratios (OR) and 95% confidence intervals (95%CI) estimated by logistic regression adjusted for age at the end of the year (5-year age groups for the 0-14-year-old children, 1-year age groups for the 0-4-year-old children) and *Doyenneté* of residence; <sup>2</sup> Standardized incidence ratio (SIR) calculated as the ratio of the observed (O) to the expected (I) number of cases with 1-year approximation of the 95% confidence interval (95%CI) \*  $P_{\text{Pearson}} < 0.05$ ; †  $P_{\text{Pearson}} < 0.10$

**Table 5:** Cross-classification of the 30,000 controls (2002-2007) by the distance to the nearest French NPP and by the Dose Based Geographic Zoning (DBGZ)

Distance to the nearest NPP	Dose Based Geographic Zoning <sup>a</sup>				Total	
	Reference <sup>b</sup>	≤ 0.093 μSv	0.094-0.20 μSv	0.21-0.72 μSv		> 0.72 μSv
0-4.99 km	0	5	5	38	30	87
5.0-9.9 km	0	33	50	93	43	219
10-14.99 km	0	119	104	62	11	296
15-19.99 km	1	260	158	20	4	443
≥ 20 km	28,955	0	0	0	0	28,955
Total	28,956	417	317	213	97	30,000

<sup>a</sup>The "Dose Based Geographic Zoning" is based on the estimated bone marrow radiation dose related to NPP gaseous discharge at the location of the *Cosmezer* town hall and expressed in μSv. By definition, the "Reference" geographic zone of the DBGZ is the same as that which is used for the distance based zoning, that is the *Cosmezer* which town hall is located 20 km or farther away from any NPP.

**Table 6:** Association between Dose Based Geographic Zoning (DBGZ<sup>a</sup>) around the French NPPs and childhood acute leukemia - Geocap case-control study and incidence studies.

	Case-control study, 2002-2007 <sup>b</sup> (distance: municipality-nearest NPP)				Incidence study, 2002-2007 <sup>c</sup> (distance: municipality-nearest NPP)				Incidence study, 1990-2001 <sup>d</sup> (distance: municipality-nearest NPP)				Incidence study 1990-2007 <sup>e</sup> (distance: municipality-nearest NPP)			
	Cases	Controls	OR	95%CI	O	E	SIR	95%CI	O	E	SIR	95%CI	O	E	SIR	95%CI
<b>Age &lt; 15 years<sup>f</sup></b>																
> 0.72 μSv <sup>g</sup>	8	97	1.0	[0.5-2.1]	8	8.3	1.0	[0.4-1.9]	13	16.4	0.8	[0.4-1.4]	21	24.7	0.9	[0.5-1.3]
0.21-0.71 μSv	19	213	1.0	[0.6-1.6]	20	18.5	1.1	[0.7-1.7]	42	36.7	1.1	[0.8-1.6]	62	55.2	1.1	[0.9-1.4]
0.094-0.20 μSv	29	317	1.0	[0.7-1.5]	31	30.0	1.0	[0.7-1.5]	54	56.8	1.0	[0.7-1.2]	85	86.7	1.0	[0.8-1.2]
≤ 0.093 μSv	40	417	1.0	[0.7-1.4]	40	39.0	1.0	[0.7-1.4]	64	73.1	0.9	[0.7-1.1]	104	112.0	0.9	[0.8-1.1]
≥ 20 km	2657	28956	1.0													
<20 km	96	1044	1.0	[0.8-1.3]	99	95.7	1.0	[0.8-1.3]	173	182.9	1.0	[0.8-1.1]	272	278.6	1.0	[0.9-1.1]
≥ 20 km	2657	28956	1.0													
<b>Age &lt; 5 years<sup>f</sup></b>																
> 0.72 μSv <sup>g</sup>	4	28	1.1	[0.4-3.2]	5	4.0	1.2	[0.4-2.9]	7	8.0	0.9	[0.4-1.8]	12	12.0	1.0	[0.5-1.8]
0.21-0.71 μSv	6	59	0.9	[0.4-2.0]	8	9.2	0.9	[0.4-1.7]	23	17.9	1.3	[0.8-1.9]	31	27.1	1.1	[0.8-1.6]
0.094-0.20 μSv	15	88	1.3	[0.7-2.3]	16	14.9	1.1	[0.6-1.7]	29	27.9	1.0	[0.7-1.5]	45	42.8	1.1	[0.8-1.4]
≤ 0.093 μSv	16	137	0.9	[0.5-1.5]	18	19.1	0.9	[0.6-1.5]	25	35.3	0.7	[0.5-1.1]	43	54.5	0.8	[0.6-1.1]
≥ 20 km	1248	9396	1.0													
< 20 km	41	312	1.0	[0.7-1.4]	47	47.3	1.0	[0.7-1.3]	84	89.1	1.0	[0.8-1.1]	131	136.4	1.0	[0.8-1.1]
≥ 20 km	1248	9405	1.0													

<sup>a</sup>The "Dose Based Geographic Zoning" is based on the estimated bone marrow radiation dose related to NPP gaseous discharge at the location of the *Cosmezer* town hall and expressed in μSv. By definition, the "Reference" geographic zone of the DBGZ is the same as that which is used for the distance based zoning, that is the *Cosmezer* which town hall is located 20 km or farther away from any NPP.

<sup>b</sup>Odds ratios (OR) and 95% confidence intervals (95%CI) estimated by logistic regression adjusted for age at the end of the year (5-year age groups for the 0-14-year-old children, 1-year age groups for the 0-4-year-old children) and *Dosimétrie* of residence. <sup>c</sup>Standardized incidence ratio (SIR) calculated as the ratio of the observed (O) to the expected (E) number of cases with Bly's approximation of the 95% confidence interval (95%CI). <sup>d</sup>Age at the end of the year in the Geocap study, exact age in the incidence studies.

**Additional table 1:** Characteristics of the 19 French nuclear power plants.

	Commissioning date	Power (Megawatt)	Coastal location	Border location
Belleville	1987	2600		
Bugey	1971	3600		
Cattenom	1986	5200		<i>Luxembourg</i>
Chinon	1963	3600		
Chooz	1996	2800		<i>Belgium</i>
Civaux	1997	2800		
Cruas	1983	3600		
Dampierre	1980	3600		
Fessenheim	1977	1800		<i>Germany</i>
Flamanville	1985	2600	<i>Channel</i>	
Golfech	1990	2600		
Gravelines	1980	5400	<i>North Sea</i>	
Le Blayais	1981	3600		
Nogent	1987	2600		
Paluel	1984	5200	<i>Channel</i>	
Penly	1990	2600	<i>Channel</i>	
Saint-Alban	1985	2600		
Saint-Laurent	1969	1800		
Tricastin	1980	3600		