Alwadi *et al. Environmental Health* (2025) 24:92
https://doi.org/10.1186/s12940-025-01248-6

RECHERCHE Accès libre

Proximité résidentielle des centrales nucléaires et incidence du cancer dans le Massachusetts, États-Unis (2000-2018)

Yazan Alwadi[1*], John S. Evans[1], Joel Schwartz[1], Carolina L. Zilli Vieira[1], David C. Christiani[1,2], Brent A. Coull[1,3]et Petros Koutrakis[1]

Résumé

Objectif Étudier les associations entre la proximité résidentielle des centrales nucléaires et l'incidence du cancer au niveau du code ZIP parmi les résidents du Massachusetts.

Méthodes Nous avons évalué la proximité des codes ZIP du Massachusetts par rapport aux centrales nucléaires à l'aide d'une métrique pondérée par l'inverse de la distance. Nous avons obtenu des données sur l'incidence du cancer (2000-2018) auprès du Massachusetts Cancer Registry. Nous avons appliqué deux approches : (1) régression de Poisson longitudinale par équation d'estimation généralisée (GEE) pour évaluer les incidences annuelles pour tous les cancers combinés, et (2) régression de Poisson log-linéaire transversale pour les cancers spécifiques au site. Nous avons ajusté les modèles en fonction des PM2,5, des covariables démographiques, socio-économiques, environnementales et des soins de santé, et nous avons stratifié les analyses en fonction du sexe et de quatre groupes d'âge (45-54, 55-64, 65-74, 75 +).

Résultats La proximité des usines a augmenté de manière significative l'incidence du cancer, le risque diminuant en fonction de la distance. À 2 km, les femmes présentaient des RR de 1,52 (IC à 95 % : 1,20-1,94) pour les 55-64 ans, de 2,00 (1,59-2,52) pour les 65-74 ans et de 2,53 (1,98-3,22) pour les 75 ans et plus. Hommes
ont montré des RR de 1,97 (1,57-2,48), 1,75 (1,42-2,16) et 1,63 (1,29-2,06), respectivement. Les analyses spécifiques au siège du cancer ont montré des associations significatives pour le poumon, la prostate, le sein, le cancer colorectal, la vessie, le mélanome, la leucémie, la thyroïde, l'utérus, le rein, le larynx, le pancréas, la bouche, l'œsophage et le lymphome de Hodgkin, avec des variations en fonction du sexe et de l'âge. Nous avons estimé que 10 815 cas de cancer chez les femmes et 9 803 chez les hommes étaient attribuables à la proximité, ce qui correspond à des fractions attribuables de 4,1 % (IC 95 % : 2,4-5,7 %) et de 3,5 % (IC 95 % : 1,8-5,2 %).

Conclusions La proximité résidentielle des centrales nucléaires dans le Massachusetts est associée à des risques élevés de cancer, en particulier chez les adultes plus âgés, ce qui souligne la nécessité d'une surveillance épidémiologique continue dans un contexte de regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire.

Mots clés Centrale nucléaire, Émissions radioactives, Incidence du cancer, Risque relatif, Analyse de proximité, Massachusetts, Épidémiologie environnementale

*Correspondance :
Yazan Alwadi
yazan_alwadi@fas.harvard.edu;yazan.alwadi.epi@gmail.com[1]Département de santé environnementale, Harvard T.H. Chan School of Public Health, 677 Huntington Ave, Boston, MA 02115, USA

[2]Division de la médecine pulmonaire et des soins intensifs, département de médecine, Massachusetts General Hospital et Harvard Medical School, Boston, MA. 02114, USA
[3]Département de biostatistique, Harvard T.H. Chan School of Public Health, Boston, MA, USA

© L'auteur(s) 2025. **Libre accès** Cet article est placé sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License, qui permet l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou dans tout format, à condition de mentionner les auteurs originaux et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des changements ont été apportés. Les images ou autres éléments de tiers figurant dans cet article sont inclus dans la licence Creative Commons de l'article, sauf indication contraire dans la ligne de crédit de l'élément. Si le matériel n'est pas inclus dans la licence Creative Commons de l'article et que l'utilisation que vous souhaitez en faire n'est pas autorisée par la loi ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement auprès du détenteur des droits d'auteur. Pour consulter une copie de cette licence, visitez le site http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

Introduction

L'énergie nucléaire est une pierre angulaire du paysage électrique américain depuis le lancement de la première centrale nucléaire commerciale en 1958. En août 2023, les États-Unis resteront le premier producteur mondial d'électricité nucléaire, avec 93 réacteurs opérationnels répartis dans 54 centrales et 28 États. Malgré une réduction significative du nombre de réacteurs, qui est passé d'un pic de 112 en 1990 à 93 en 2022 [25], l'énergie nucléaire contribue toujours à environ 18-20 % de la production totale d'électricité du pays et à plus de 50 % de l'électricité sans carbone (WNA, U.S. Energy Information Administration (EIA)).

En 2023, le démarrage de l'unité 3 de Vogtle a marqué le début de l'exploitation commerciale du premier nouveau réacteur nucléaire américain depuis plus de trois décennies, ce qui témoigne d'un regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire. Dans un contexte de préoccupations croissantes concernant la sécurité énergétique et la nécessité urgente de décarboniser le secteur de l'électricité, l'intérêt pour l'énergie nucléaire s'est accru, en particulier pour les technologies de réacteurs avancés et les petits réacteurs modulaires (SMR). Des initiatives fédérales telles que la loi de 2022 sur la réduction de l'inflation et le décret de 2025 visant à quadrupler la capacité nucléaire des États-Unis d'ici à 2050 ont encore alimenté cette dynamique. Bien qu'il reste des défis importants à relever, ces signaux politiques suggèrent que l'énergie nucléaire devrait jouer un rôle de plus en plus important à l'avenir.

Composition de l'électricité aux États-Unis (WNA ; U.S. Energy Information Administration).

Toutefois, si cette expansion prévue souligne la contribution potentielle de l'énergie nucléaire à la réalisation des objectifs de décarbonisation, les implications sanitaires et environnementales d'une dépendance accrue à l'égard de la technologie nucléaire méritent d'être examinées attentivement, notamment en raison des polluants radioactifs émis par les centrales nucléaires. Ces polluants peuvent contaminer l'eau, l'air, le sol et les cultures, exposant les populations par inhalation, ingestion et contact cutané avec les émissions primaires. L'exposition peut persister dans le temps, par exemple par le biais des radiations émises par les sols contaminés (également connues sous le nom d'émissions au sol) [12]. Les voies d'exposition humaine dépendent en grande partie du moyen de transport - par exemple, l'air peut transporter ces polluants sous forme de particules radioactives et de gaz. Le rayonnement provenant de la désintégration des radionucléides émis par les centrales nucléaires a été largement étudié et constitue un facteur de risque bien établi pour de nombreux cancers [4, 9, 13, 14, 17, 27].

Compte tenu de ces implications potentielles pour la santé, il est essentiel de comprendre les données épidémiologiques relatives aux émissions des centrales nucléaires afin d'éclairer les politiques et les interventions de santé publique. Malgré le recours généralisé à l'énergie nucléaire aux États-Unis, la recherche épidémiologique sur les effets des centrales nucléaires sur la santé reste relativement limitée, et les études existantes dans le monde entier ont produit des résultats hétérogènes. Certaines études menées à l'échelle internationale ont indiqué que la proximité nucléaires n'a pas d'impact sur le risque de cancer [1, 6-8, 11, 18, 20, 21], tandis que d'autres ont identifié des associations significatives [5, 15, 20, 21].

d'autres ont identifié des associations significatives [5, 15, 23, 26, 28, 29].

Compte tenu de la diversité des données épidémiologiques internationales et du regain d'intérêt pour l'expansion de l'énergie nucléaire aux États-Unis, des analyses détaillées sont de plus en plus cruciales pour évaluer avec précision les risques potentiels pour la santé associés à la proximité des centrales nucléaires. De précédentes analyses écologiques nationales menées par notre groupe (actuellement en cours de révision), qui utilisaient la distance entre le centre géographique de chaque comté et la centrale nucléaire la plus proche, ont mis en évidence des associations positives constantes avec la mortalité tous cancers confondus, ainsi qu'avec la mortalité par cancer du poumon, du sein et colorectal à travers les États-Unis [2, 3]. Toutefois, ces études nationales ont été réalisées à partir de données agrégées au niveau des comtés et se sont appuyées sur des données de mortalité par cancer plutôt que sur des données d'incidence, ce qui peut entraîner une sous-estimation de la charge totale de morbidité liée aux émissions des centrales nucléaires.

Le Massachusetts (MA) représente un cadre idéal pour aborder ces limitations, car ses habitants vivent dans un rayon d'environ 120 km autour de sept centrales nucléaires : Pil-grim Nuclear Power Station, Seabrook Station, Vermont Yankee, Millstone Power Station, Indian Point Energy Center, Connecticut Yankee et Yankee Rowe. En outre, le Massachusetts dispose de l'un des registres du cancer basés sur la population les plus longs et les plus complets des États-Unis (le Massachusetts Cancer Registry, MCR), qui recueille systématiquement des données détaillées sur l'incidence du cancer. La disponibilité de cette ressource de haute qualité renforce la capacité à évaluer rigoureusement les associations entre les émissions des centrales nucléaires et les risques de cancer à des niveaux spatiaux plus fins.

Dans cette étude, nous utilisons les données du registre du cancer du Massachusetts au niveau du code ZIP pour examiner l'association entre la proximité résidentielle des centrales nucléaires et l'incidence du cancer. S'appuyant sur nos analyses antérieures de la mortalité nationale au niveau du comté, cette étude vise à fournir des preuves supplémentaires pour soutenir l'évaluation d'une relation causale potentielle en examinant l'association à l'aide d'un résultat de santé différent et d'une résolution spatiale plus fine. Les résultats visent à informer la politique réglementaire et à orienter les recherches futures sur les effets potentiels des émissions des centrales nucléaires sur la santé, dans un contexte de regain d'intérêt national pour l'énergie nucléaire.

Données

Incidence du cancer

Les données sur l'incidence du cancer par code ZIP pour les années 2000 à 2018 ont été obtenues auprès du Massachusetts Cancer Registry (MCR), géré par l'Office of Population Health du Massachusetts Department of Public Health (2024). Le MCR recueille des rapports sur les cas de cancer nouvellement diagnostiqués auprès des établissements de santé et des praticiens dans l'ensemble de l'État du Massachusetts.

l'État. Chaque année, l'Association nord-américaine des registres centraux du cancer (NAACCR) examine la qualité, l'exhaustivité et l'actualité des données des registres du cancer. Pour la période 2010-2014, le NAACCR a estimé que le nombre de cas annuels du MCR était complet à plus de 95 % pour chaque année. Le RCM a atteint l'étalon-or pour cet élément de certification ainsi que pour six autres éléments de certification pour chaque année de cas depuis 1997. L'ensemble des données comprenait les cancers suivants : oral, œsophagien, stomacal, colorectal, pancréas, larynx, pulmonaire, mélanome, sein, col de l'utérus, utérus, prostate, testicules, vessie, rein, cerveau/NS-invasif, thyroïde, lymphome de Hodgkin (HL), myélome et leucémie.

Les tableaux 1S et 4S du matériel supplémentaire présentent le nombre annuel total et moyen de cas de cancer, stratifié par type de cancer, par sexe et par groupe d'âge, fournissant ainsi un aperçu épidémiologique détaillé de la population étudiée.

Covariables

Nous avons ajusté un ensemble de covariables annuelles au niveau du code ZIP (2000-2018) qui peuvent confondre l'association entre la proximité des centrales nucléaires et l'incidence du cancer ou qui peuvent être associées de manière indépendante au risque de cancer. Aucune de ces covariables n'est supposée se trouver sur le chemin de la causalité entre la proximité des centrales nucléaires et le résultat et ne sont donc pas considérées comme des facteurs médiatiques. Les covariables comprennent le niveau d'éducation, les PM2,5 [30], le revenu médian des ménages, le taux de pauvreté, la composition raciale (Blancs, Asiatiques, Afro-Américains), la densité de population, la température moyenne annuelle et l'humidité relative, la prévalence du tabagisme, la proximité de l'hôpital le plus proche, le pourcentage de la population âgée de plus de 65 ans, la répartition selon l'âge et la proportion de logements locatifs. Les définitions complètes et les sources sont fournies dans le tableau complémentaire 3S. Nous avons calculé les populations spécifiques par groupe d'âge et par sexe pour chaque code ZIP en utilisant les données de la grille de population provenant de Worldpop [31].

Centrales nucléaires

Nous avons obtenu des données sur l'emplacement des centrales nucléaires et leurs délais d'exploitation auprès de l'Administration américaine d'information sur l'énergie (EIA). Pour chaque centre de population du code ZIP du Massachusetts, nous avons identifié toutes les centrales nucléaires situées dans un rayon de 120 km. Au total, sept installations nucléaires répondaient à ce critère : Connecticut Yankee (CT), Millstone (CT), Vermont Yankee (VT), Yankee Rowe (MA), Seabrook Station (NH), Indian Point (NY) et Pilgrim (MA). Les périodes d'exploitation de chaque installation sont détaillées dans le tableau complémentaire 4S.

Méthodes

Évaluation de la proximité des centrales nucléaires

Nous avons calculé la proximité annuelle de chaque code ZIP par rapport aux centrales nucléaires en additionnant les distances inverses (1/d, en kilomètres) de toutes les installations qui étaient à la fois opérationnelles au cours d'une année donnée et situées dans un rayon de 120 km du centre de population du code ZIP. Pour les années au cours desquelles une usine n'était pas opérationnelle, sa contribution en 1/j a été fixée à zéro. Cette formulation tient intrinsèquement compte des zones d'exposition qui se chevauchent, puisque les codes ZIP situés entre plusieurs usines reçoivent des valeurs de proximité cumulées plus élevées, reflétant l'influence combinée de plus d'une installation. Cette mesure continue, pondérée en fonction de la distance, fournit une mesure directe de la proximité cumulée, les valeurs les plus élevées reflétant des installations nucléaires proches et/ou plus nombreuses. Les périodes d'exploitation de toutes les centrales incluses sont indiquées dans le tableau 4S du matériel supplémentaire.

Modèle longitudinal GEE de tous les cancers

Nous avons calculé la somme de tous les cas de cancer pour chaque code ZIP, année, sexe et groupe d'âge (45-54, 55-64, 65-74 et 75 ans et plus), car ces groupes d'âge comptaient suffisamment de cas pour produire des taux stables dans un cadre analytique spatio-temporel. Le tableau complémentaire 2S présente le nombre total de cas de cancer, ainsi que le nombre annuel moyen de cas, stratifié par sexe et par groupe d'âge.

Nous avons modélisé le nombre de tous les cas de cancer de 2000 à 2018 dans tous les codes ZIP du Massachusetts afin d'évaluer l'association entre la proximité des installations nucléaires et le nombre de cas de cancer. Pour estimer cette relation, nous avons utilisé des modèles de régression log-linéaire de Poisson par équation d'estimation généralisée (GEE) pour chaque combinaison de sexe et de groupe d'âge (Eq. 1), en ajustant les covariables au niveau du code ZIP énumérées ci-dessus et détaillées dans le tableau complémentaire 3S.

La variable dépendante de nos modèles était le nombre annuel de cas de cancer, stratifié par sexe et par groupe d'âge. Pour tenir compte des différences de taille de la population entre les codes postaux et les sous-groupes démographiques, nous avons inclus un logarithme naturel de la population, en veillant à ce que les taux d'incidence soient correctement mis à l'échelle par code postal, par âge, par sexe et par année.

Nous avons tenu compte de la corrélation entre les observations répétées au sein d'un même code postal au fil du temps en spécifiant le code postal comme variable de regroupement et en supposant une structure de corrélation échangeable, ce qui signifie que toutes les observations au sein d'un même code postal partagent une corrélation égale, mais en reconnaissant que les EEG n'exigent pas que cette structure de corrélation soit correctement spécifiée afin d'obtenir des estimations d'effet non biaisées. En outre, nous avons utilisé des erreurs standard robustes (sandwich) pour tenir compte de la corrélation à l'intérieur du code ZIP et de la surdispersion potentielle, ce qui garantit une inférence statistique valide.

$$\begin{aligned} log(E(\lambda_{ijk})) = {} & \beta_0 + \beta_1 \text{- C1}_{ij} + \beta_2 \text{- C2}_{ij} + \beta_3 \text{- C3}_{ij} \\ & + \beta_4 \text{- C4}_{ij} + \text{-- -} + \beta_p \text{- Cp}_{ij} + \beta_{(e)\,E(ij)}) + \\ & offset(log(population_{ijk})) \end{aligned} \quad (1)$$

où :

- i indexe les codes ZIP, j indexe les années et k indexe les groupes âge-sexe.
- λ_{ijk}représente le nombre attendu de cas de cancer dans le code postal i à l'année j pour le groupe d'âge k.
- C_{nij}représente tfle covariable n^{tfl}pour le code postal i et l'année j. l'année j.
- E_{ij}représente tfle somme (sur les plantes) de la métrique de proximité de l'inverse de la distance et $\beta_e$est tfle log risque relatif cflcaractérisant tfle association entre tfle résultat et tflis métrique.
- $\beta_0$est le tfle intercept, représentant le tfle logarithme de base du taux d'incidence du cancer.

Pour quantifier le poids de l'incidence du cancer attribuable à la proximité des centrales nucléaires, nous avons utilisé les modèles GEE stratifiés par sexe et par âge pour calculer la fraction attribuable (FA) et les cas attribuables (CA). La FA a été calculée comme (RR-1)/RR, où RR est le risque relatif estimé dérivé comme exp (Proximité × Coefficient), en utilisant la valeur de proximité du code ZIP. Le CA était égal à AF * taux de base * population. Ces calculs ont été effectués séparément pour chaque combinaison unique de code ZIP, d'année, de sexe et de groupe d'âge. Pour estimer les FA pour chaque sexe et groupe d'âge, nous avons additionné les CA entre les codes ZIP et les années dans chaque strate et nous les avons divisés par le nombre total correspondant de cas observés, ce qui a donné une fraction attribuable moyenne représentant la proportion de l'incidence du cancer attribuable à la proximité au sein de chaque groupe.

Modèle transversal des cancers spécifiques au site

Pour examiner les associations entre la proximité des centrales nucléaires et l'incidence des cancers spécifiques au site, nous avons réalisé une analyse transversale distincte. Cette approche de modélisation était nécessaire en raison du nombre relativement faible de cas pour les différents types de cancer après stratification, ce qui a limité la stabilité des estimations de taux annuels dans un modèle spatio-temporel.

Nous avons agrégé le nombre total de cas de cancer spécifiques au site pour chaque code ZIP, stratifié par sexe et groupe d'âge, sur l'ensemble de la période d'étude (2000-2018). Cette agrégation a permis d'éliminer la composante temporelle et d'accroître la stabilité statistique des modèles d'incidence du cancer spécifique au site. L'âge a été divisé en groupes plus larges (45-65 ans et 65 ans et plus) afin de garantir un nombre suffisant de cas dans chaque strate.

Pour cette analyse, nous avons utilisé un modèle de régression de Poisson log-linéaire, en appliquant la même spécification que celle décrite précédemment (Eq. 1), mais en excluant le composant temporel. Plus précisément, les cas de cancer ont été agrégés sur toutes les années (2000-2018) pour chaque code ZIP, stratifié par sexe et par groupe d'âge. La variable de résultat était le nombre total de cas de cancer spécifiques au site pour chaque combinaison de code ZIP, de sexe et de groupe d'âge et, comme dans l'analyse primaire, nous avons inclus un logarithme naturel de la population (somme des populations de 2000 à 2018 pour chaque strate).

2018 pour chaque strate) pour tenir compte de la taille de la population sous-jacente.

La principale variable relative à la proximité des centrales nucléaires était la proximité cumulative moyenne des centrales nucléaires sur la période 2000-2018, définie comme la somme de l'inverse de la distance (1/km) entre chaque centre de population du code ZIP et toutes les centrales nucléaires actives situées dans un rayon de 120 km pour chaque année, en moyenne sur la période. Toutes les covariables étaient des moyennes au niveau du code ZIP sur la même période et comprenaient des facteurs sociodémographiques, environnementaux et d'accès aux soins de santé cohérents avec les modèles principaux (voir tableau complémentaire 3S).

Des modèles distincts ont été ajustés pour chaque combinaison site cancéreux × sexe × groupe d'âge.

Résultats

Proximité des centrales nucléaires

La figure 1 montre la proximité des centrales nucléaires au niveau du code postal utilisée dans le modèle transversal. La figure montre les valeurs annuelles moyennées sur la période d'étude pour produire une seule estimation de proximité à long terme par code ZIP. La figure montre également l'emplacement des sept centrales nucléaires situées à proximité des centres de population des codes ZIP du Massachusetts : Connecticut Yankee, Millstone, Vermont Yankee, Yankee Rowe, Seabrook Sta-tion, Indian Point et Pilgrim.

Tous les cancers : Modèle longitudinal GEE

La figure 2 présente les estimations de l'effet et les intervalles de confiance à 95 % pour l'association entre la proximité d'une centrale nucléaire et l'incidence totale du cancer dans les quatre groupes d'âge, stratifiés par sexe. Chez les femmes, un gradient positif clair dans les estimations de l'effet a été observé avec l'augmentation de l'âge, l'association la plus forte étant observée dans le groupe des 75 ans et plus. Pour les deux sexes, la proximité de centrales nucléaires était significativement associée à une incidence élevée de cancer chez les personnes âgées de 55 ans et plus. Chez les hommes, l'effet le plus important a été observé dans le groupe des 55-64 ans. Pour le groupe le plus jeune (45-54), les estimations étaient faibles et non statistiquement significatives pour les deux sexes.

La figure 3 présente l'association modélisée entre la proximité des centrales nucléaires et l'incidence totale du cancer, sous forme d'estimations du risque relatif (RR) avec des intervalles de confiance à 95 % pour le sexe et les groupes d'âge. Chaque panneau correspond à l'une des huit combinaisons sexe-âge, avec la distance (d'une seule centrale en km) sur l'axe des x commençant à 2 km - la distance minimale approximative observée entre tout centre de population du code ZIP et une installation nucléaire. Dans tous les groupes d'âge, le risque relatif diminue généralement avec l'augmentation de la distance par rapport aux centrales nucléaires.

Ce gradient inverse était plus prononcé chez les femmes, en particulier dans les groupes d'âge de 65 à 74 ans et de 75 ans et plus. À 2 km, le RR était de 2,00 (IC 95 % : 1,59 à 2,52) chez les femmes

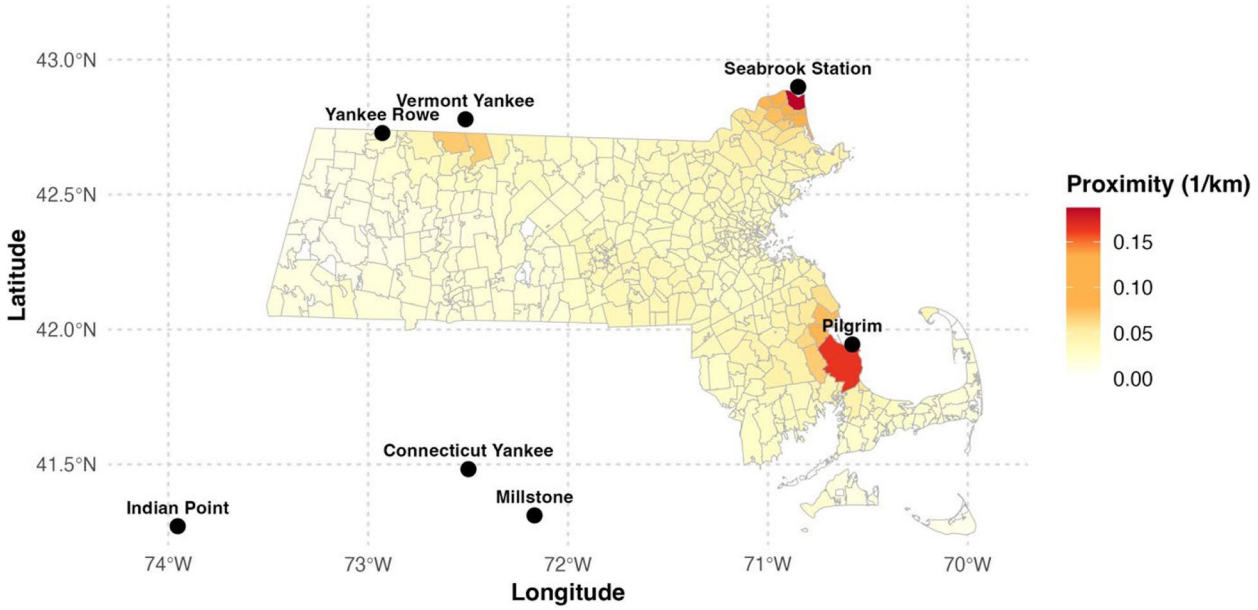

Fig. 1 Proximité moyenne, au niveau du code postal, des sept centrales nucléaires situées à moins de 120 km du Massachusetts (2000-2018)

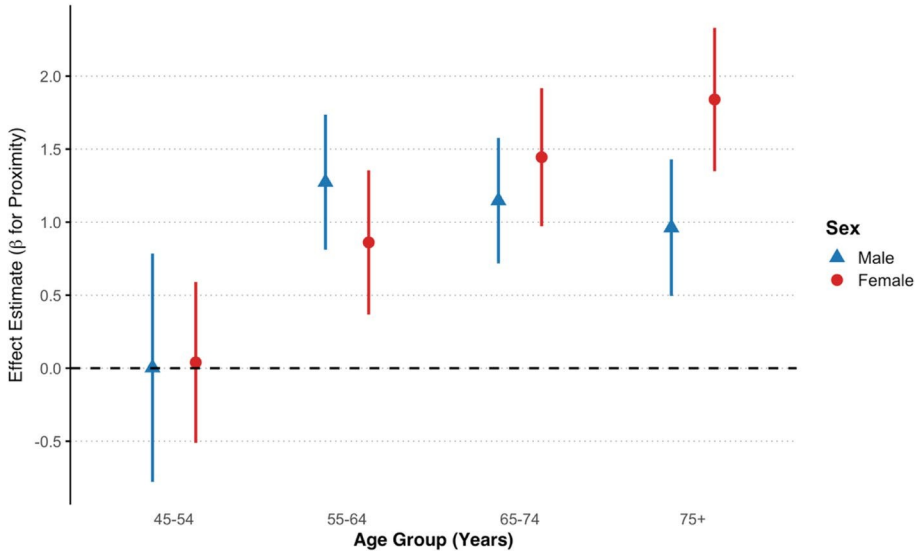

Fig. 2 Associations spécifiques au sexe et au groupe d'âge entre la proximité des centrales nucléaires et l'incidence de tous les cancers dans les codes ZIP du Massachusetts (2000-2018)

Chez les femmes âgées de 65 à 74 ans, l'incidence de l'ensemble des cancers était de 2,53 (IC à 95 % : 1,98 à 3,22) et de 2,53 chez les femmes âgées de 75 ans et plus. Chez les femmes âgées de 55 à 64 ans, le RR était également élevé, à 1,52 (IC à 95 % : 1,20 à 1,94), tandis qu'aucune association statistiquement significative n'a été trouvée chez les femmes âgées de 45 à 54 ans (RR : 1,07, IC à 95 % : 0,81 à 1,40).

Chez les hommes, les associations les plus fortes ont été observées chez les 55-64 ans (RR : 1,97, IC à 95 % : 1,57 à 2,48) et les 65-74 ans (RR : 1,75, IC 95% : 1,42 à 2,16), avec une augmentation plus modérée dans le groupe des 75 ans et plus (RR : 1,63, IC 95% : 1,29 à 2,06). plus modérée dans le groupe des 75 ans et plus (RR : 1,63, IC à 95 % : 1,29 à 2,06). Aucune association statistiquement significative n'a été observée chez les hommes âgés de 45 à 54 ans (RR : 1,02, IC 95 % : 0,70 à 1,50).

Le nombre estimé de cas de cancer attribuables à la proximité d'une centrale nucléaire, ainsi que les fractions attribuables (FA) correspondantes, ont été calculés à partir des données de l'enquête sur la santé publique.

Le nombre estimé de cas de cancer attribuables à la proximité d'une centrale nucléaire, ainsi que les fractions attribuables (FA) correspondantes, stratifiées par sexe et par groupe d'âge et dérivées du modèle spatiotem-poral ajusté, sont présentés dans le tableau 1. Tous groupes confondus, un total de 20 618 cas de cancer ont été attribués à la proximité de centrales nucléaires dans le Massachusetts entre 2000 et 2018.

Alors que les fractions attribuables moyennes se situaient entre 2 et 5 % dans la plupart des tranches d'âge et de sexe, des fractions nettement plus élevées ont été observées dans les communautés situées plus près des installations nucléaires. Les codes ZIP situés dans un rayon de 2 à 10 km présentaient des risques relatifs et des fractions attribuables nettement différents.

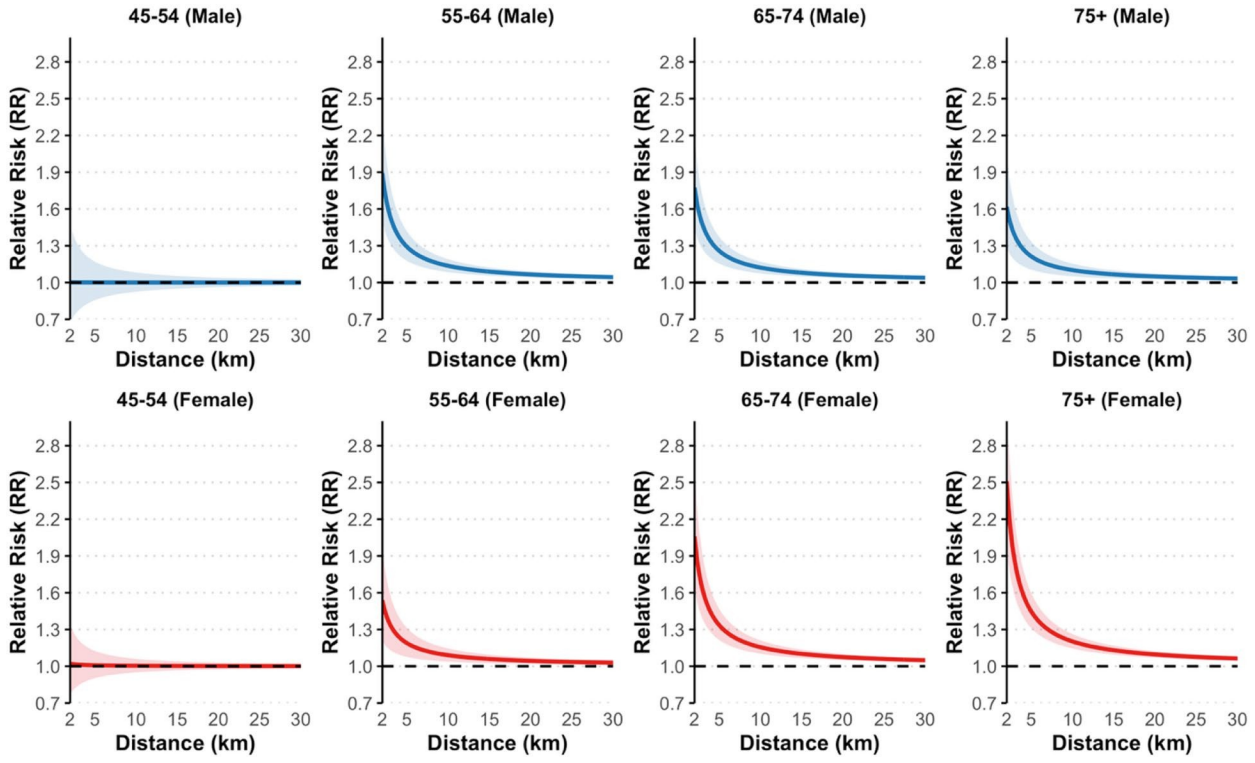

Fig. 3 Risque relatif modélisé de l'incidence totale du cancer en fonction de la distance par rapport à une centrale nucléaire, stratifié par sexe et groupe d'âge.

Tableau 1 Cas de cancer attribuables à la proximité des centrales nucléaires et leurs fractions attribuables par sexe et par groupe d'âge (Massachusetts, 2000-2018)

SEXE	ÂGE GROUPE D'ÂG	CAS ATTRIBUABLES	FRACTION ATTRIBUABLE
FEMMES	45-54	221 (-705, 1126)	0.5% (-1.5%, 2.4%)
FEMMES	55-64	1,887 (811, 2939)	3% (1.3%, 4.6%)
FEMMES	65-74	3,288 (2215, 4339)	4.8% (3.2%, 6.3%)
FEMMES	75 +	5,419 (4043, 6767)	6.3% (4.7%, 7.8%)
	SOMME	10,815 (6364, 15,171)	4.1% (2.4%, 5.7%)
HOMMES	45-54	49 (-900, 967)	0.1% (-2.7%, 2.9%)
HOMMES	55-64	3,591 (2395, 4761)	4.8% (3.2%, 6.3%)
HOMMES	65-74	3,429 (2157, 4678)	3.9% (2.4%, 5.3%)
HOMME	75 +	2,734 (1455, 3987)	3.4% (1.8%, 4.9%)
	SOMME	9,803 (5107, 14,393)	3.5% (1.8%, 5.2%)

Cancers spécifiques : modèle transversal

La figure 4 présente les estimations de l'effet et les intervalles de confiance à 95 % pour l'association entre la proximité des centrales nucléaires au niveau du code ZIP et l'incidence des cancers spécifiques au site, stratifiée par sexe et par groupe d'âge. Les résultats révèlent plusieurs associations fortes et statistiquement significatives, en particulier chez les adultes plus âgés.

Chez les hommes âgés de 65 ans et plus, la proximité des centrales nucléaires était significativement associée à une augmentation de l'incidence du cancer du poumon (β = 2,25, IC 95 % : 1,57 à 2,93), cancer de la prostate (β = 0,90, IC 95 % : 0,35 à 1,44), cancer colorec- cancer de la vessie (β = 1,31, IC 95 % : 0,39 à 2,23), cancer de l'utérus (β = 2,38, IC 95 % : 1,18 à 3,58), cancer du rein (β = 1,20, IC 95 % : 0,31 à 2,09), mélanome (β = 2,24, IC 95 % : 0,31 à 2,09), cancer du sein (β = 1,20, IC 95 % : 0,31 à 2,09).

Les taux de cancer du sein et de cancer du poumon sont plus élevés que ceux du cancer de la prostate (IC : 1,05 à 3,43), de la leucémie (β = 1,65, IC à 95 % : 0,07 à 3,23),

et le cancer du larynx (β = 4,04, IC à 95 % : 1,56 à 6,52). Chez les hommes âgés de 45 à 65 ans, des asso- ciations positives significatives ont été observées pour le cancer du poumon.

ciations positives significatives ont été observées pour le cancer du poumon (β = 1,49, IC à 95 % : 0,45 à 2,54), le cancer de la prostate (β = 1,31, IC à 95 % : 0,72 à

1,91), mélanome (β = 2,18, IC 95 % : 0,80 à 3,56), cancer du rein (β = 2,18, IC 95 % : 0,80 à 3,56).

(β = 1,80, IC 95 % : 0,26 à 3,33), cancer du pancréas

(β = 2,85, IC 95 % : 0,77 à 4,94), le cancer de la bouche (β = 2,52, IC 95 % : 1,06 à 3,98) et le cancer de l'œsophage (β = 2,18).

IC : 1,06 à 3,98) et le cancer de l'œsophage (β = 2,18, IC : 0,04 à 4,33).

Chez les femmes âgées de 65 ans et plus, la proximité nucléaire était significativement associée à une augmentation de l'incidence du cancer du sein (β = 1,50, IC 95 % : 0,91 à 2,09), du cancer du poumon (β = 2,30, IC à 95 % : 1,64 à 2,97), du cancer colorectal (β = 1,45, IC 95 % : 0,59 à 2,31), mélanome (β = 3,03, IC 95 % : 1,52 à 2,31), cancer du sein (β = 3,03, IC 95 % : 1,52 à 2,31).

4,53), cancer de l'utérus (β = 2,38, IC 95 % : 1,18 à 3,58), cancer du rein nes (β = 3,63, IC 95 % : 1,84 à 5,41), cancer de la thyroïde

(β = 6,78, IC 95 % : 4,75 à 8,82), leucémie (β = 2,35, IC 95 % : 0,53 à 4,41).

IC : 0,53 à 4,17), le cancer de l'estomac (β = 2,69, IC 95% : 0,06 à 5,32), et le lymphome de Hodgkin (HL) (β = 6,67, IC 95% : 1,12 à 12,22).

Chez les femmes âgées de 45 à 65 ans, des associations significatives ont été observées pour le cancer du poumon (β = 2,69, IC 95 % : 1,73 à 3,65), le cancer de l ' utérus (β = 1,19, IC 95 % : 0,02 à 2,36) et le cancer de la thyroïde (β = 3,17, IC 95 % : 1,78 à 4,57).

2,36), le cancer de la thyroïde (β = 3,17, IC à 95 % : 1,78 à 4,57) et le cancer de la bouche (β = 2,17, IC à 95 % : 1,78 à 4,57).

cancer de la bouche (β = 2,66, IC à 95 % : 0,12 à 5,21). En revanche,

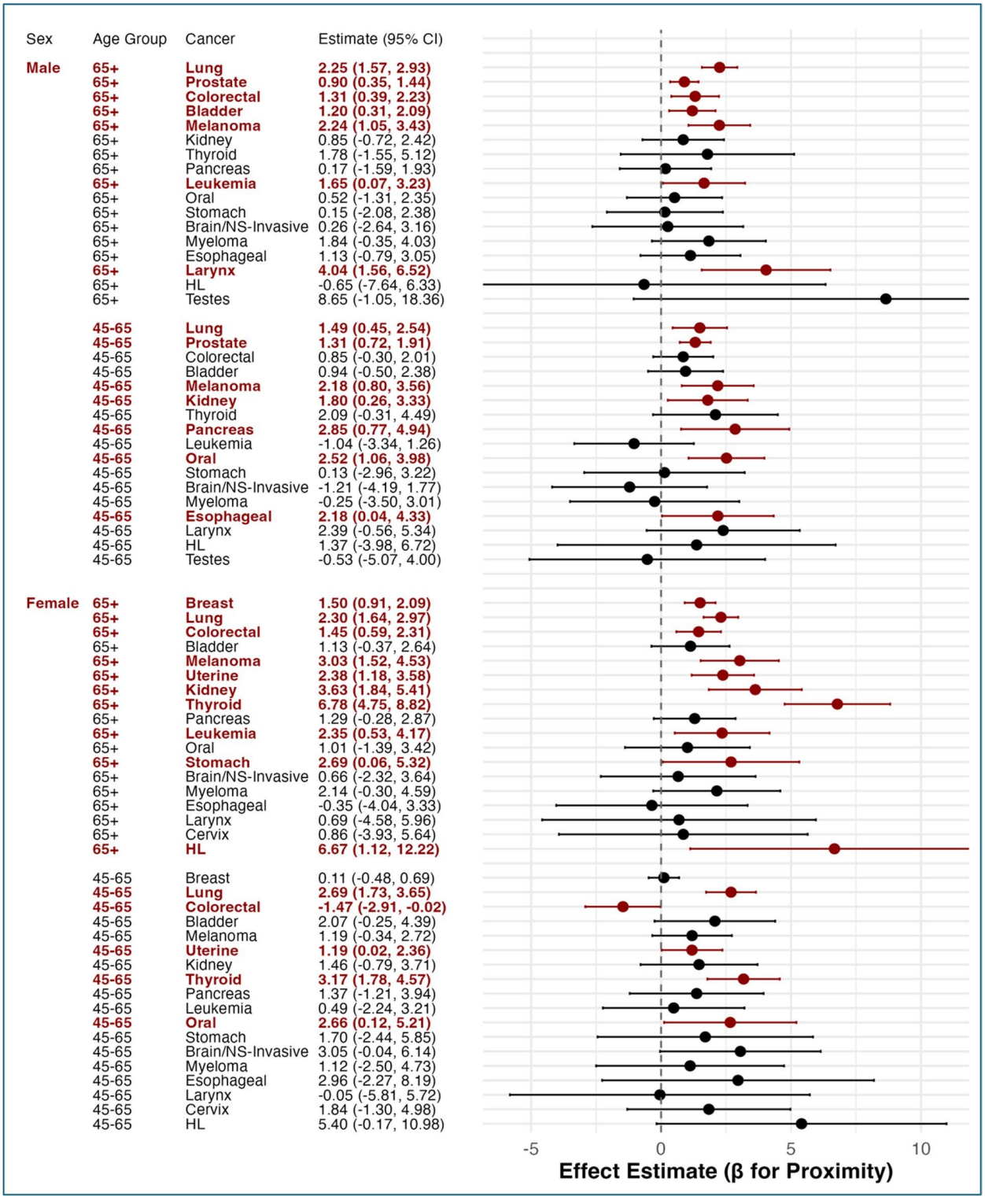

Fig. 4 Associations entre la proximité d'une centrale nucléaire et l'incidence du cancer spécifique au site par sexe et par groupe d'âge dans le modèle transversal (associations sig-nificatives en rouge foncé et non ajustées pour les comparaisons multiples).

Le cancer colorectal a montré une association négative limite (β = -1,47, IC 95 % : -2,91 à -0,02).

Ces résultats mettent en évidence un modèle cohérent de risque de cancer élevé associé à une plus grande proximité des centrales nucléaires, avec des variations spécifiques au site et démographiques.

Analyse de sensibilité

Pour évaluer la robustesse de nos résultats, nous avons effectué plusieurs analyses de sensibilité. Tout d'abord, nous avons réestimé les modèles primaires en utilisant d'autres seuils de distance pour définir le rayon de proximité des centrales nucléaires. Alors que l'analyse principale incluait toutes les centrales nucléaires situées à moins de 120 km des centres de population des codes ZIP, nous avons réexécuté les modèles en utilisant des rayons allant de 80 à 150 km par incréments de 10 km. Les associations estimées étaient très cohérentes pour tous les seuils de distance (figure supplémentaire 3S), ce qui confirme que nos résultats ne sont pas sensibles au seuil spatial spécifique utilisé pour définir l'exposition.

Deuxièmement, nous avons évalué si la structure temporelle de la mesure de proximité influençait nos résultats. Dans les modèles principaux, l'exposition a été définie sur la base de l'état opérationnel de l'année en cours des usines voisines. Pour tenir compte des effets de latence potentiels et de l'exposition cumulative, nous avons répété les analyses en utilisant des moyennes mobiles de la proximité de 1 à 8 ans. Les associations estimées sont restées stables dans toutes les fenêtres de calcul de la moyenne (figure supplémentaire 1S), ce qui indique que nos résultats sont robustes aux hypothèses sur la latence. Comme prévu, les mesures de l'exposition sur ces fenêtres étaient fortement corrélées (Fig. supplémentaire 2S), ce qui reflète la variabilité temporelle limitée de l'état d'exploitation de l'usine, puisque l'exposition ne change que lorsque les usines entrent ou sortent de l'exploitation, et ce qui confirme la stabilité temporelle de nos résultats.

Enfin, nous avons réexécuté nos modèles après avoir supprimé les deux codes ZIP présentant les valeurs de proximité les plus élevées (02360 et 01952) afin de nous assurer que les résultats n'étaient pas influencés de manière disproportionnée par ces lieux spécifiques. Nos résultats se sont maintenus, ce qui confirme la stabilité des associations observées.

Discussion

Notre étude fournit une évaluation complète des risques de cancer associés à la proximité résidentielle de sept centrales nucléaires situées dans un rayon de 120 km des centres de population des codes ZIP du Mas-sachusetts, couvrant la période de 2000 à 2018. Nous avons utilisé un modèle spatio-temporel pour l'incidence de tous les cancers et un modèle transversal pour l'incidence des cancers spécifiques au site afin d'évaluer ces associations.

Pour l'ensemble des cancers, nous avons observé des associations statistiquement significatives entre la proximité des centrales nucléaires et l'augmentation de l'incidence de tous les cancers dans les groupes d'âge plus élevés. Nos analyses transversales ont en outre permis d'identifier des associations significatives entre la proximité des centrales nucléaires et de nombreux cancers spécifiques au site, notamment les cancers du poumon, de la prostate, colorectal, du mélanome, de la leucémie, de la thyroïde, de l'utérus et de la vessie, entre autres, dans des groupes d'âge et de sexe différents.

Notamment, les risques relatifs diminuent fortement avec l'augmentation de la distance, diminuant sensiblement à 5 km et devenant négligeables au-delà d'environ 25 km des installations nucléaires (Fig. 3). Cela suggère que les risques élevés de cancer sont concentrés de manière disproportionnée dans les communautés situées à proximité des centrales nucléaires. Contrairement aux risques sanitaires associés aux centrales au charbon, qui touchent généralement des populations plus importantes réparties sur des zones géographiques plus vastes [19], les impacts des centrales nucléaires semblent être très localisés, affectant de manière significative les communautés résidant le plus près des centrales. Le Massachusetts, qui est l'un des États dont une grande partie de la population réside à proximité de plusieurs centrales nucléaires, souligne l'importance de ces résultats.

Les études antérieures ont fait état d'associations incohérentes entre la proximité des centrales nucléaires et le risque de cancer, ce qui reflète probablement des différences dans les caractéristiques des centrales, les contrôles des émissions et la démographie locale, ainsi qu'une grande variabilité méthodologique. Nombre d'entre elles s'appuient sur de petits échantillons, une couverture géographique limitée ou des mesures de proximité binaires qui simplifient à l'extrême les contrastes d'exposition et réduisent la puissance statistique. En utilisant une mesure d'exposition continue, pondérée par l'inverse de la distance, pour tous les codes ZIP du Massachusetts, sur une période de près de vingt ans, et en s'appuyant sur des données de grande qualité issues des registres du cancer de l'État, notre étude fournit une évaluation plus sensible et plus fine sur le plan spatial, ce qui permet d'expliquer pourquoi des investigations antérieures n'ont pas réussi à détecter des liens entre les deux phénomènes.

Bien que les études précédentes aient abouti à des conclusions contradictoires, plusieurs études internationales ont fait état d'associations significatives. En France, par exemple, la proximité de centrales nucléaires a été associée à un risque accru de cancer de la vessie chez les deux sexes [15]. En Allemagne, des risques accrus de leucémie et de tumeurs solides ont été observés chez les enfants résidant à moins de 5 km d'installations nucléaires [16]. De même, des études menées en Corée du Sud ont fait état d'associations significatives entre le fait de vivre dans un rayon de 5 km autour de centrales nucléaires et un risque accru de cancer de la thyroïde et du sein, ainsi que d'autres cancers sensibles aux rayonnements, notamment les cancers du poumon, de l'œsophage, du côlon, du rein, de la vessie et la leucémie [1, 22]. Des recherches menées en Espagne ont mis en évidence une augmentation linéaire du risque global de cancer en fonction de la distance par rapport aux installations nucléaires [28], ainsi qu'un risque accru de développer des cancers colorectaux et pulmonaires chez les personnes vivant à moins de 15 km des installations de combustible nucléaire [24].

Dans notre analyse nationale de la mortalité tous cancers confondus au niveau des comtés [2], qui a utilisé une métrique d'exposition similaire à l'inverse de la distance

pour les centres de population des comtés à travers les États-Unis, nous avons trouvé des associations positives significatives entre la proximité des centrales nucléaires et la mortalité par cancer dans plusieurs groupes d'âge,

nous avons trouvé des associations positives significatives entre la proximité des centrales nucléaires et la mortalité par cancer dans plusieurs groupes d'âge. Chez les femmes, des associations significatives ont été observées pour tous les groupes d'âge ≥ 45 ans, avec des risques relatifs estimés à 5 km allant de 1,09 (IC à 95 % : 1,04 à 1,15) à 1,16 (IC à 95 % : 1,09 à 1,23).
Chez les hommes, des associations significatives ont été trouvées pour les groupes d'âge ≥ 55 ans, avec des risques relatifs à 5 km allant de 1,08 (IC 95 % : 1,03 à 1,14) à 1,15 (IC 95 % : 1,09 à 1,23).
1.22). Aucune association significative n'a été observée chez les hommes plus jeunes ou les femmes âgées de 35 à 44 ans.

En comparaison, cette étude du Massachusetts sur l'incidence de tous les cancers a identifié des associations positives significatives avec la proximité des centrales nucléaires chez les femmes âgées de 55 ans et plus et chez les hommes âgés de 55 ans et plus. Les risques relatifs à 5 km dans ces groupes variaient de 1,18 (IC à 95 % : 1,08
à 1,30) à 1,49 (IC 95 % : 1,32 à 1,60) pour les femmes et de 1,22
(IC 95 % : 1,11 à 1,33) à 1,31 (IC 95 % : 1,20 à 1,44) pour les femmes.
hommes. Aucune association significative n'a été observée pour le groupe d'âge le plus jeune (45-54), quel que soit le sexe. Ces résultats concordent étroitement avec notre étude nationale sur la mortalité, renforçant la cohérence des associations entre la proximité des centrales nucléaires et les risques élevés de cancer, malgré les différences dans les mesures des résultats (incidence vs. mortalité) et les échelles spatiales (comté vs. code ZIP).

Enfin, notre analyse nationale de la mortalité au niveau des comtés pour les cancers spécifiques à un site [3], la proximité des centrales nucléaires était significativement associée à la mortalité par cancer du poumon chez les hommes âgés de 45 à 54 ans, de 55 à 64 ans, de 65 à 74 ans et de 75 à 84 ans, et chez les femmes âgées de 45 à 54 ans et plus, y compris tous les groupes d'âge jusqu'à 85 ans et plus. Pour le cancer colorectal, des associations significatives ont été observées chez les hommes âgés de 55 à 64 ans, de 65 à 74 ans et de 75 à 84 ans, et chez les femmes âgées de 85 ans et plus. Pour le cancer du sein, des associations positives ont été observées dans toutes les tranches d'âge féminines, de 45-54 à 85 ans et plus. En comparaison, l'analyse de l'incidence du cancer dans le Massachusetts a mis en évidence des associations significatives avec le cancer du poumon chez les hommes et les femmes âgés de 45 ans et plus, avec le cancer colorectal chez les personnes âgées de 65 ans et plus, et avec le cancer du sein chez les femmes âgées de 65 ans et plus. Les analyses spécifiques au site de cancer (Fig. 4) ont été incluses en tant que composante complémentaire de l'étude afin d'illustrer la tendance générale de la relation exposition-réponse entre les différents types de cancer. Dans l'ensemble, malgré les différences méthodologiques au niveau de l'échelle géographique (comté ou code ZIP), de la mesure des résultats (mortalité ou incidence) et de la conception des études (spatiotemporelle ou transversale), ces deux études présentent une concordance substantielle, ce qui renforce les craintes concernant les risques élevés de cancer du poumon, de cancer colorectal et de cancer du sein, ainsi que les risques de cancer de l'ovaire.

cancers associés à la proximité des centrales nucléaires.

Nos calculs des fractions attribuables soulignent en outre la charge considérable de santé publique associée à la proximité des centrales nucléaires, avec un total estimé de 20 618 cas de cancer attribuables au cours de la période d'étude. Les fractions attribuables les plus élevées ont atteint environ 6,3 % chez les femmes âgées (75 ans et plus), ce qui souligne l'impact prononcé sur ces communautés. La forte association observée avec le cancer du poumon, le cancer le plus répandu et le plus mortel dans notre analyse [10], suggère que l'inhalation de radionucléides en suspension dans l'air est une voie d'exposition potentielle.

Notre étude présente plusieurs limites. Premièrement, nos analyses s'appuient sur des données écologiques, ce qui peut introduire une erreur écologique, car la variabilité de l'exposition au niveau individuel au sein des codes postaux n'est pas prise en compte. Deuxièmement, notre mesure de proximité cumulative de l'inverse de la distance suppose une contribution égale de toutes les centrales nucléaires dans un rayon de 120 km et n'intègre pas de mesures directes du rayonnement (dosimétrie), ce qui peut limiter la précision et l'exactitude de l'estimation de l'exposition. Troisièmement, malgré notre ajustement pour de multiples facteurs de confusion au niveau du code ZIP, une confusion résiduelle par des variables non mesurées ne peut être exclue. Cependant, notre ajustement complet pour les facteurs sociodémographiques, environnementaux et d'accès aux soins de santé permet d'atténuer ce problème. Quatrièmement, nous n'avons pas intégré les antécédents résidentiels, ce qui pourrait entraîner une mauvaise classification de l'exposition si les individus ont changé de code postal. Bien qu'il soit peu probable que la mobilité résidentielle soit systématiquement liée à la proximité des centrales nucléaires, une telle erreur de mesure de l'exposition non différentielle tendrait à biaiser nos résultats vers l'hypothèse nulle. Cinquièmement, notre analyse de tous les cancers combinés, bien qu'elle fournisse une évaluation solide de la charge globale de cancer, peut masquer des variations de cancer spécifiques au site en raison de différentes tumeurs malignes ayant des périodes de latence et des sensibilités aux rayonnements différentes. Sixièmement, nous n'avons pas examiné les cancers de l'enfant en raison de la rareté des données lorsqu'elles sont stratifiées par groupe d'âge, par sexe, par code postal et par année. Une évaluation correcte du risque de cancer chez l'enfant nécessiterait une approche analytique différente, spécifiquement adaptée aux résultats rares. Enfin, notre analyse n'a pas pu prendre en compte de manière explicite le regroupement potentiel des travailleurs de la centrale nucléaire ou des résidents proches qui peuvent subir des expositions plus élevées que celles prises en compte par les mesures au niveau du code ZIP. Toutefois, ces effets sont probablement minimes étant donné que les employés de la centrale et les voisins immédiats représentent une très petite fraction de la population environnante, et notre analyse de sensibilité excluant les codes postaux les plus proches a donné des résultats cohérents.

Néanmoins, notre étude présente des points forts importants. En utilisant à la fois un modèle longitudinal GEE pour l'incidence globale du cancer et des modèles transversaux pour des cancers spécifiques, nous avons fourni des preuves solides d'associations entre la proximité des centrales nucléaires et les risques de cancer.

entre la proximité d'une centrale nucléaire et les risques de cancer. Notre analyse s'appuie sur les données exhaustives et de grande qualité du registre du cancer du Massachusetts, ce qui permet une estimation précise de l'incidence du cancer à des échelles spatiales fines. En outre, notre mesure de l'exposition par l'inverse de la distance représente une avancée méthodologique par rapport aux modèles traditionnels de seuil de distance fixe, réduisant les erreurs potentielles de classification de l'exposition et renforçant la validité des associations observées. En outre, des ajustements détaillés des covariables pour les facteurs démographiques, socio-économiques, environnementaux et d'accès aux soins de santé renforcent la robustesse de nos résultats en minimisant les biais de confusion.

Étant donné le regain d'intérêt politique pour l'expansion de l'énergie nucléaire aux États-Unis, nos résultats soulignent la nécessité de poursuivre la recherche et de renforcer la surveillance de la santé publique à proximité des installations nucléaires. Les études futures devraient affiner l'évaluation de l'exposition en utilisant la surveillance directe des rayonnements, la modélisation de la dispersion et les données sur les antécédents résidentiels, et utiliser des modèles longitudinaux pour mieux évaluer la latence et les risques de cancer spécifiques au site. Le renforcement des contrôles des émissions, l'amélioration de la surveillance de l'environnement et l'établissement de priorités en matière de recherche et de surveillance dans un rayon de 25 à 30 km autour des centrales nucléaires seront essentiels pour faire progresser la protection des communautés voisines sur la base de données probantes.

Conclusion

Nous avons observé une augmentation de l'incidence des cancers chez les habitants du Massachusetts vivant à proximité des centrales nucléaires, les associations les plus fortes étant observées chez les adultes plus âgés. Les analyses spécifiques aux sites de cancer ont mis en évidence des risques élevés pour de nombreux cancers, notamment les cancers du poumon, de la prostate, du sein, du côlon, de la vessie, du mélanome, de la leucémie, de la thyroïde, de l'utérus, du rein, du larynx et du pancréas, entre autres, avec des variations selon le sexe et la tranche d'âge. Ces résultats concordent étroitement avec ceux de nos précédentes études nationales, ce qui renforce les inquiétudes concernant les effets sur la santé de la proximité résidentielle des installations nucléaires. Avec le regain d'intérêt pour l'expansion de l'énergie nucléaire en vue de la décarbonisation et de la sécurité énergétique, nos résultats soulignent l'importance d'intégrer des considérations de santé publique dans les politiques d'énergie nucléaire, de renforcer les efforts de surveillance et de mener des recherches supplémentaires pour élucider les voies d'exposition spécifiques et renforcer la base de l'interprétation causale de ces résultats.

Informations complémentaires

La version en ligne contient du matériel supplémentaire disponible sur https://doi.org/10.1186/s12940-025-01248-6.

Matériel supplémentaire 1.

Remerciements
La Harvard T.H. Chan School of Public Health a accordé une bourse de doctorat à Yazan Alwadi. La collecte des données sur l'incidence du cancer utilisées dans cette étude a été financée par le Massachusetts Cancer Registry. Les idées et les opinions exprimées ici sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement c e l l e s du ministère de la santé publique du Massachusetts.

Plans de partage des données
Les données sur l'incidence du cancer utilisées dans cette étude ont été obtenues auprès du Massachusetts Cancer Registry (MCR) et sont confidentielles ; nous ne pouvons donc pas les partager. Les parties intéressées peuvent demander l'accès au MCR. Toutes les autres sources de données sont accessibles au public. Un exemple de code pour les modèles statistiques épidémiologiques utilisés dans notre analyse peut être fourni sur demande.

Normes éthiques
Cette étude a utilisé des données anonymes et agrégées et n'a pas impliqué de participation humaine directe. La recherche a été menée conformément aux principes de la Déclaration d'Helsinki.

Contributions des auteurs
Yazan Alwadi a conçu la mesure de l'exposition, effectué les analyses statistiques, rassemblé les données et rédigé le manuscrit. Petros Koutrakis a supervisé le projet et fourni une orientation générale. John S. Evans, Joel Schwartz, David C. Christiani et Brent A. Coull ont assuré le mentorat, contribué à la conception de l'étude et apporté des révisions critiques au manuscrit. Carolina L. Zilli Vieira a contribué à la conservation des données et à la révision du manuscrit. Tous les auteurs ont revu et approuvé le manuscrit final.

Financement
Cette recherche n'a bénéficié d'aucune subvention spécifique de la part d'organismes de financement des secteurs public, commercial ou à but non lucratif.

Disponibilité des données
Les données sur l'incidence du cancer utilisées dans cette étude ont été obtenues auprès du Massachusetts Cancer Registry (MCR) et sont confidentielles ; nous ne pouvons donc pas les partager. Les parties intéressées peuvent demander l'accès au MCR. Toutes les autres sources de données sont accessibles au public. Un exemple de code pour les modèles statistiques épidémiologiques utilisés dans notre analyse peut être fourni sur demande.

Déclarations

Approbation éthique et consentement à participer
Sans objet, car cette étude s'est appuyée exclusivement sur des données anonymes et agrégées provenant du registre du cancer du Massachusetts.
Sans objet. Cette étude a utilisé des données dépersonnalisées au niveau de la population provenant du registre du cancer du Massachusetts ; aucun consentement individuel n'a été requis.

Intérêts concurrents
Les auteurs ne déclarent aucun intérêt concurrent.

Reçu : 19 septembre 2025 / Accepté : 11 novembre 2025
Published online: 18 December 2025

Références

1. Ahn Y-O, Li ZM, Group KS, autres. Cancer risk in adult residents near nuclear power plants in Korea-a cohort study of 1992-2010. J Korean Med Sci. 2012;27:999.
2. Alwadi Y, Alahmad B, autres. A national analysis of the impact of nuclear power plants on all-cancer mortality in the U.S. During 2000-2018 (under review). Nat Comm. 2025.
3. Alwadi Y, Schwartz J, autres. A national analysis of the impact of proximity to nuclear power plants on lung, breast and colon cancer mortalities in the U.S., 2000-2018 (under review). Environ Res. 2025.
4. Bailey M. The new ICRP model for the respiratory tract. Radiat Prot Dosimetry. 1994;53:107-14.
5. Bazyka DA, Prysyazhnyuk AY, Romanenko AY, Fedorenko ZP, Gudzenko NA, Fuzik MM, et al. Cancer incidence and nuclear facilities in Ukraine : a community-based study. community-based study. Exp Oncol. 2012;34(2):116–20. https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/139073.
6. Boice JD Jr, Bigbee WL, Mumma MT, Heath CW Jr, Blot WJ. Cancer incidence in municipalities near two former nuclear materials processing facilities in Pennsylvania-an update. Health Phys. 2009;96:118-27.

7. Boice JD Jr, Mumma MT, Blot WJ. Cancer mortality among populations residing in counties near the Hanford site, 1950-2000. Health Phys. 2006;90:431-45.
8. Bollaerts K, Fierens S, Van Bladel L, Simons K, Sonck M, Poffijn A, et al. Thyroid cancer incidence in the vicinity of nuclear sites in Belgium, 2000-2008. Thyroid. 2014;24:906-17.
9. Bozigar M, Konstantinoudis G, Zilli Vieira CL, Li L, Alwadi Y, Jones RR, et al. Domestic radon exposure and childhood cancer risk by site and sex in 727 counties in the United States, 2001-2018. Sci Total Environ. 2024;954:176288. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176288.
10. Bray F, Laversanne M, Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Soerjomataram I, et al. Global cancer statistics 2022 : GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. CA Cancer J Clin. 2024;74:229-63.
11. Bunch K, Vincent T, Black R, Pearce M, McNally R, McKinney P, et al. Updated investigations of cancer excesses in individuals born or resident in the vicinity of Sellafield and Dounreay. Br J Cancer. 2014;111:1814-23.
12. Dagher RLE, Thompson PA, Burtt J. Radiation exposure and cancer incidence (1990 to 2008) around nuclear power plants in Ontario, Canada. JEP. 2013;04:888–913. https://doi.org/10.4236/jep.2013.49104.
13. Dagle G, Sanders C. Radionuclide injury to the lung. Environ Health Perspect. 1984;55:129-37.
14. De Villiers A, Windish J. Lung cancer in a fluorspar mining community : l. radia- tion, dust, and mortality experience. Occup Environ Med. 1964;21:94-109.
15. Desbiolles A, Roudier C, Goria S, Stempfelet M, Kairo C, Quintin C, et al. Cancer incidence in adults living in the vicinity of nuclear power plants in France, based on data from the French network of cancer registries. Int J Cancer. 2018;142:899–909. https://doi.org/10.1002/ijc.31116.
16. Ghirga G. Cancer chez les enfants résidant à proximité des centrales nucléaires : une question ouverte . Ital J Pediatr. 2010;36:1-4.
17. Gilbert ES. Rayonnements ionisants et risques de cancer : qu'avons-nous appris de l'épidémiologie ? Int J Radiat Biol. 2009;85:467-82. https://doi.org/10.1080/0955 3000902883836.
18. Gulis G, Fitz O. Cancer incidence around the Nuclear Power Plant Jaslovské Bohunice. Cent Eur J Public Health. 1998;6:183-7.
19. Henneman L, Choirat C, Dedoussi I, Dominici F, Roberts J, Zigler C. Mortality risk from United States coal electricity generation. Science. 2023;382:941-6.
20. Jablon S. Cancer in populations living near nuclear facilities : a survey of mortality nationwide and incidence in two states. JAMA. 1991;265:1403. http s://doi.org/10.1001/jama.1991.03460110069026.
21. Jablon S, Hrubec Z, Boice JD Jr. Cancer in populations living near nuclear facilities. A survey of mortality nationwide and incidence in two states. JAMA. 1991;265(11):1403–8. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1999880/.
22. Kim J-M, Kim M-H, Ju Y-S, Hwang S, Ha M, Kim B-K, et al. Reanalysis of epide-miological investigation of cancer risk among people residing near nuclear power plants in South Korea. Int J Environ Res Public Health. 2018;15:481. htt ps://doi.org/10.3390/ijerph15030481.
23. Levin RJ, De Simone NF, Slotkin JF, Henson BL. Incidence du cancer de la thyroïde autour de l'installation nucléaire de Three Mile Island : suivi sur 30 ans. Laryngo- scope. 2013;123:2064-71.
24. López-Abente G, Aragonés N, Pollán M. Solid-tumor mortality in the vicinity of uranium cycle facilities and nuclear power plants in Spain. Environ Health Perspect. 2001;109:721-9.
25. Lovins AB. US nuclear power : status, prospects, and climate implications. Electr J. 2022;35:107122. https://doi.org/10.1016/j.tej.2022.107122.
26. Rekacewicz C, de Vathaire F, Delise MJ. Incidence du carcinome thyroïdien différencié autour de la centrale nucléaire française de Chooz. Lancet. 1993;341(8843):893. https://doi.org/10.1016/0140-6736(93)90245-C.
27. Ron E. Ionizing radiation and cancer risk : evidence from epidemiology. Radiat Res. 1998;150:S30. https://doi.org/10.2307/3579806.
28. Silva-Mato A, Viana D, Fernández-SanMartín MI, Cobos J, Viana M. Cancer risk around the nuclear power plants of Trillo and Zorita (Spain). Occup Environ Med. 2003;60:521–7. https://doi.org/10.1136/oem.60.7.521.
29. Spix C, Schmiedel S, Kaatsch P, Schulze-Rath R, Blettner M. Case-control study on childhood cancer in the vicinity of nuclear power plants in Germany 1980-2003. Eur J Cancer. 2008;44:275–84. https://doi.org/10.1016/j.ejca.2007. 10.024.
30. Van Donkelaar A, Hammer MS, Bindle L, Brauer M, Brook JR, Garay MJ, et al. Monthly global estimates of fine particulate matter and their uncertainty. Environ Sci Technol. 2021;55:15287-300.
31. WorldPop. Population mondiale à 1 km. 2018. https://doi.org/10.5258/SOTON/WP 00647.

Note de l'éditeur

Springer Nature reste neutre en ce qui concerne les revendications juridictionnelles dans les cartes publiées et les affiliations institutionnelles.