

# CHERNOBYL'S SUBCLINICAL LEGACY: PRENATAL EXPOSURE TO RADIOACTIVE FALLOUT AND SCHOOL OUTCOME IN SWEDEN.

Douglas ALMOND, Lena EDLUND, Marten PALME

The Quarterly Journal of Economics Nov. (2009) 124 (4): 1729-1772doi:10.1162/qjec.2009.124.4.1729

<http://qje.oxfordjournals.org/content/124/4.toc>

## Abréviations :

**OLS = Ordinary Least Square = Moindres Carrés Ordinaires (méthode des)**  
**SES = SocioEconomic Status = Statut Socio Economique**  
**2SLS=Two Stage Least Square = méthode des moindres carrés en deux étapes**

## L'héritage infraclinique de Tchernobyl : exposition prénatale aux retombées radioactives et résultats scolaires en Suède ✠

*Douglas Almond\**, *Lena Edlund\*\** and *Marten Palme\*\*\**

6 Novembre 2008

✠ Nous voudrions remercier Leif Moberg (Autorité Suédoise de Protection des Radiations) pour avoir fourni les données de radiations et les références clés. Nous remercions aussi Johanna Adami, Hoyt Bleakley, David Brenner, Janet Currie, Lucas Davis, Tore Ellingsen, Avraham Ebenstein, Andrew Foster, Michael Greenstone, Eric Hall, Par Hall, Ethan Kaplan, Wojciech Kopczuk, Wilbert van der Klaauw, David Lee, Bhashkar Mazumder, Costas Meghir, Torsten Persson, Cristian Coup, Heather Royer, William Schull, David Strömberg, Ezra Susser, Miguel Urquiola, Simon Wright et Lydia Zablotska pour des commentaires précieux. Sarena Goodman a fourni une aide de recherche précieuse. L'assistance financière de la Fondation nationale pour la science (accord 0721155) et de la Fondation Russell Sage est remerciée avec reconnaissance.

\* Dept. d'Économie, Université Columbia et NBER. Courrier électronique : da2152@columbia.edu

\*\* Dept. d'Économie, Université Columbia. Courrier électronique : le93@columbia.edu

\*\*\* Dept. d'Économie, Université de Stockholm. Courrier électronique : marten.palme@ne.su.se

## Résumé

Nous utilisons l'exposition prénatale aux retombées de Tchernobyl en Suède comme une expérience naturelle pour la capacité cognitive. Les étudiants nés dans les régions de la Suède ayant les retombées les plus élevées ont eu les plus mauvais résultats scolaires de l'enseignement secondaire, en Maths en particulier. Les dégâts sont accentués dans des familles (c'est-à-dire, par comparaison avec la fratrie) et parmi des enfants nés de parents ayant un niveau d'éducation faible. Au contraire, nous ne détectons aucun dégât correspondant à des conséquences pour la santé. Selon ce que les parents ont répondu à l'enquête cognitive, nous avons déduit que des capacités parentales ont renforcé les dégâts initiaux de Tchernobyl. Dans une perspective de santé publique, nos découvertes suggèrent que le développement neural est compromis aux doses de radiations actuellement considérées comme sûres.

## I. INTRODUCTION

Des études empiriques dans la principale tradition humaine ont cherché à isoler le rôle de variables latentes - comme le talent ou le contexte familial - de différences d'autres apports ou des techniques mises en œuvre. Un défi évident pour de telles études est le manque de variation exogène dans les variables latentes, qui peuvent être fortement corrélées l'une par l'autre. Par exemple, la capacité cognitive d'un enfant peut être positivement reliée au contexte familial et ce contexte peut affecter d'autres investissements humains primordiaux en retour (ou les deux). En outre, les parents ou les politiques éducatives peuvent répondre aux réalisations d'une variable latente, par exemple en apportant une aide compensatoire aux enfants à capacité innée basse.

Une expérience naturelle de facteur latent spécifique pourrait aider à débrouiller certaines de ces relations. D'abord, l'importance de l'impact de réduction sur la formation du capital humain pourrait être évaluée - par exemple, combien de capacité cognitive importe-t-il ? Deuxièmement, avec des données sur des caractéristiques de base (par exemple, le contexte familial), nous pourrions observer comment les facteurs prédéterminés interagissent avec l'apport latent pour produire les capacités humaines.

L'environnement physique peut fournir une variation exogène dans des apports de capacités humaines latentes. Cunha et Heckman [2007] ont observé que "des capacités sont sensibles aux influences environnementales, y compris au cours de la période *in utero*." Mais l'*hypothèse de Tiebout* (ou le *tri de Tiebout*) implique que la proximité des risques environnementaux puisse être endogène [Banzhaf et Walsh, 2008].

Donc, des changements de l'environnement local causés par des accidents ou la pollution pourraient s'imposer empiriquement davantage, particulièrement quand le dommage environnemental est physiquement disséminé à partir de sa source. Finalement, l'épidémiologie environnementale peut montrer des voies par lesquelles l'environnement affecte les apports latents spécifiques, par exemple, l'exposition à la famine prénatale et la schizophrénie chez l'adulte [Clair et al., 2005].

Dans cet article, nous soutenons que les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl en 1986 en Suède offrent une expérimentation naturelle de capacité cognitive. Bien qu'à plus de 500 miles de distance de Tchernobyl, les conditions météorologiques ont fait que la Suède a reçu environ 5% des retombées du Césium de l'accident. En raison de quantités de pluie variables, tandis que le nuage radioactif passait au dessus de la Suède, il y a eu des variations géographiques extrêmes dans les niveaux de dépôts des retombées. [Otake and Schull, 1998, Nowakowski et Hayes, 2008].<sup>1</sup> Malgré le ciblage de la capacité cognitive, les études empiriques de formation du capital humain n'ont pas, jusqu'à présent, pris en compte les dégâts des radiations. Les études épidémiologiques précédentes étaient centrées sur les irradiations où, soit la dose évaluée était d'un ordre de grandeur plus haut, soit les doses étaient basses mais les expositions n'étaient vraisemblablement pas exogènes, par exemple, l'irradiation par le radon ou par des actes médicaux. Suite aux découvertes lors des études de survivants de la Bombe atomique, nous nous sommes concentrés sur la cohorte *in utero* de 8 à 25 semaines de gestation au moment de l'accident et donc nés à la fin de 1986.

Nous avons évalué l'impact de Tchernobyl en utilisant les données administratives sur l'entourage de la naissance, la sortie de l'hôpital et les résultats scolaires en Suède pour les cohortes nées en 1983-1988 (il est trop tôt pour évaluer leur devenir sur le marché du travail). En particulier nous évaluons : (1) l'état de santé défini par les données de natalité et le registre de patients hospitalisés qui inclut toutes les hospitalisations entre 1987 et 2006; (2) les performances en dernière année d'école obligatoire (à 16 ans); (3) les performances au lycée (à 19 ans). De façon importante, nous observons le lieu de naissance ainsi que l'éducation parentale. Ceci nous permet de comparer des évaluations d'impact de l'éducation parentale, comme suggéré par Currie et Hyson [1999], Case et al. [2002], Currie et Moretti [2007].

Nous constatons que la cohorte de naissance de fin 1986 a eu des performances considérablement plus mauvaises en dernière année de scolarité obligatoire (c'est-à-dire collège). Les notes de Mathématiques ont été particulièrement affectées. Cette cohorte était aussi moins apte à poursuivre ses études au lycée (en 2006) et avait de plus mauvaises conditions d'obtention d'un diplôme.

En outre, l'ampleur de dégâts de la cohorte de fin 1986 correspond aux différences régionales des retombées. Par projection, nous évaluons que Tchernobyl causera une réduction de 3 pour cent des revenus annuels pour les Suédois les plus exposés. Par contre, nous ne détectons pas de dégâts correspondants pour la santé. Ni les données de naissance (incluant le poids de naissance) ni les rapports de sortie de l'hôpital ne révèlent des dégâts. Ainsi, nous croyons que les retombées de Tchernobyl en Suède ont réussi à isoler un facteur latent : la capacité cognitive.

De façon intéressante, les dégâts au capital humain sont fortement concentrés dans les familles dont les parents présentent un faible niveau d'éducation. Ce modèle existe tant autour que à l'intérieur des familles, c'est-à-dire, quand nous comparons exclusivement dans la fratrie de l'enfant exposé à Tchernobyl *in utero*. Ce modèle - associé au fait que les effets fixés estimés dans la fratrie sont généralement plus forts qu'une simple différence-dans-les-différences - suggère que si les parents répondent par des investissements postnatals, ils renforcent très probablement, c'est-à-dire, accentuent les différences de dons de naissance [Rosenzweig et Schultz, 1982, Loughran et al., 2008, Rosenzweig et Zhang, 2008]. Finalement, nos évaluations d'impact sont renforcées quand nous instrumentons pour l'erreur de mesure dans les dépôts de retombées avec les précipitations,<sup>2</sup> suggérant que nos évaluations de dégâts MCO =par la méthode des Moindres Carrés ordinaire [voir **Abrév. au début**] sont conservatrices. Dans une perspective de santé publique, parce que s'abriter à l'intérieur est très efficace dans la réduction de l'exposition aux retombées radiatives [Finck, 1991], nos découvertes suggèrent que les femmes enceintes des zones recevant des averses traversant le nuage radioactif doivent rester à l'intérieur après des accidents ou des attaques nucléaires.<sup>3</sup>

**La suite de notre article est organisé comme suit. La section II** décrit l'accident de Tchernobyl, récapitule la littérature sur l'exposition prénatale aux radiations ionisantes et décrit ensuite le système scolaire suédois. **La Section III** décrit les radiations, les études et les données de santé que nous analysons. **La Section IV** présente nos résultats principaux, suivis par une approche de variables instrumentales utilisant les chutes de pluie; nous estimons ensuite les coûts de l'accident. **La Section V** étudie si des investissements en capital

1 - En effet, le lien fait entre l'irradiation médicale prénatale et la microcéphalie (petite circonférence de la tête) en 1929 a été "la première indication de malformations induites par un agent iatrogène chez des humains" [DeSantis et al., 2005].

2 Cette approche IV n'a précédemment été employée dans aucune étude de retombées malgré le fait que la première étape est forte et bien connue des scientifiques environnementaux [Holmberg et al., 1988].

3 Comme nous le montrerons, cette réponse passe une analyse coûts-bénéfices avec des suppositions conservatrices et va à l'encontre de la conclusion de l'Institut de Protection de Radiation suédois que "il n'y avait jamais de nécessité" de maintenir les gens à l'intérieur [Moberg, 1991].

humain ont pu répondre aux dégâts de Tchernobyl et interprète la concentration de dégâts parmi des familles aux parents de faible niveau d'éducation. Finalement, **la Section VI** discute la validité externe de nos résultats pour diverses sources de radiations ionisantes.

## II. CONTEXTE

### A. L'Accident de Tchernobyl

La fusion du cœur à Tchernobyl est arrivée à 1h24 le 26 avril 1986 en Ukraine.<sup>4</sup> La nouvelle de l'accident est venue de Suède, où l'intensification des niveaux de radioactivité a provoqué l'alarme à la centrale nucléaire suédoise de Forsmark, à environ 680 miles de distance. Pendant les dix jours qu'il a fallu pour contrôler l'incendie, de grandes quantités de matières radioactives se sont échappées. L' Europe a reçu la plus grande partie des retombées, mais des niveaux mesurables de dépôts au sol ont été détectés dans tous les pays de l'hémisphère nord [UNSCEAR, 2000].

L'accident de Tchernobyl fournit une expérience naturelle presque idéale de l'exposition aux radiations. Les conditions météorologiques ont fait que la Suède a reçu environ 5 pour cent des retombées de Césium, créant un pic prononcé dans les niveaux de radiations [Moberg, 1991]. La **Figure I** montre la mesure de radiations gamma à Njurunda dans la municipalité de Sundsvall (à environ 1 000 miles de Tchernobyl). Les radiations gamma à Njurunda ont atteint un niveau maximal le 29 avril de plus de dix fois supérieur au niveau de base.

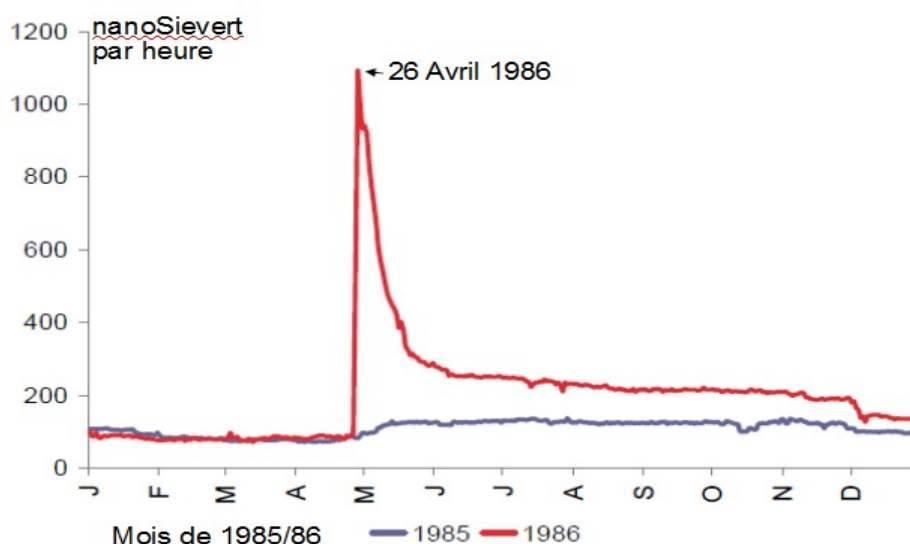


Figure 1 : Radiations quotidiennes à Njurunda, Suède

Source: Kjelle [1987]

Il y a eu aussi une variation géographique substantielle dans les dépôts principalement à cause des différences de précipitations au moment de l'accident [Holmberg et al., 1988].<sup>5</sup> Njurunda a enregistré le niveau de radiation le plus élevé parmi des stations de contrôle gamma fixes suédoises [Kjelle, 1987]. Les dépôts au sol dans la pire des zones affectées (autour de Gävle et Sundsvall) ont égalé ceux trouvés juste à l'extérieur de la zone d'exclusion de rayon de 30 km (19 miles) de Tchernobyl, tandis que les parties les plus au nord de la Suède ont été pratiquement épargnées (voir **Figure II**). En plus d'une période particulière et d'une variation géographique, cette expérience naturelle a exposé un grand nombre de personnes, surmontant ainsi un défi important pour l'évaluation des effets des radiations des faibles doses (puisque les tailles d'effet sont, elles aussi, vraisemblablement petites [Brenner et al., 2003]).

-----  
<sup>4</sup> UTC+3 (heure de Moscou)

<sup>5</sup> Les données de pluies quotidiennes pour environ 100 stations météorologiques en Suède 1985-1986 (Département américain du commerce) révèlent qu'entre le 27 avril et le 30 mai, il a plu considérablement plus à proximité de Gävle et Sundsvall. Et aussi, la pluie pendant cette période n'était pas corrélée avec es précipitations du reste de l'année (voir Section IV partie D).

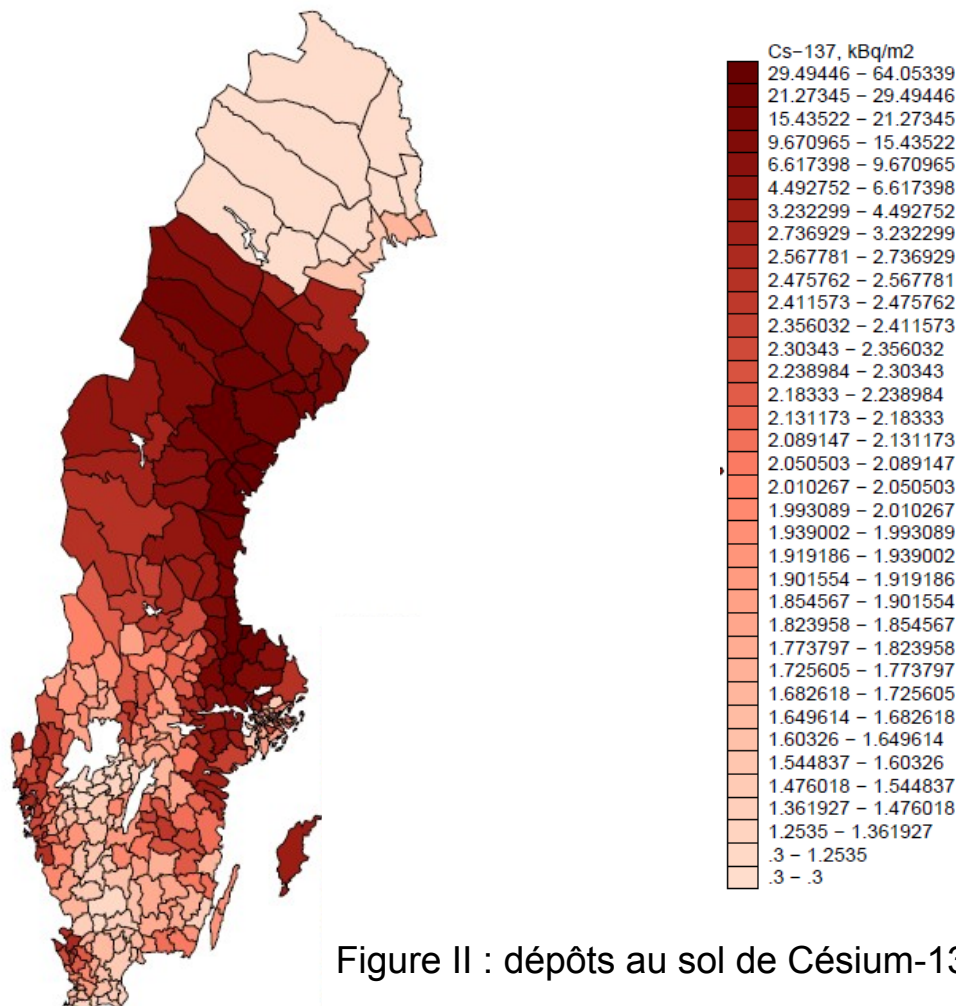


Figure II : dépôts au sol de Césium-137 en kBq/m<sup>2</sup> par municipalité

## B. Irradiation Prénatale et Dégâts Cognitifs

Il est généralement admis que l'irradiation prénatale expose à des dégâts cognitifs. Cependant, les études épidémiologiques les mieux considérées ont concerné des doses de radiations d'un ordre de grandeur plus élevé que la dose maximale évaluée pour des Suédois après Tchernobyl: 4 mSv la première année [Edvarson, 1991a] **6; 7** Bien que l'exposition à de faibles doses de radiation ionisante soit commune, la question des faibles doses reste non résolue [DeSantis et al., 2005, Peplow, 2006]. Ci-dessous, le mécanisme physiopathologique des effets cognitifs est récapitulé, suivi par les études épidémiologiques des radiation médicale et des bombardements atomiques de 1945 à Hiroshima et Nagasaki.

Les atteintes du développement neural par irradiation prénatale sont biologiquement plausibles. Les radiations ionisantes éjectent des électrons capables de casser des liaisons chimiques, dont celles de l'ADN en particulier. Quoiqu'il y ait une certaine capacité de réparation, une réparation incorrecte peut entraîner des mutations ou la mort cellulaire. **8** L'ADN est particulièrement vulnérable durant le cycle cellulaire et la division, plus fréquente chez le jeune. **9** Le cerveau diffère d'autres organes épithéliaux car il y a peu de divisions cellulaires dans le cerveau adulte. Ce renouvellement limité signifie que les atteintes du cerveau au cours du développement auront probablement des effets permanents. Nowakowski et Hayes [2008, p. 527] : "*n'importe quelle perte neurale ayant lieu pendant la période de développement est conservée pour la vie.*" Les semaines 8 à 25 après la conception forment une période neurogénique majeure du néocortex. Pendant cette période,

**6** Voir la Section III partie A (dernier paragraphe) et l'Annexe A pour le résumé des mesures de radiation et de leurs ampleurs.

**7** Tandis que des expériences contrôlées de laboratoire ont aussi été une aide, quant à d'autres critères (par exemple, la durée de vie), la fonction cognitive est plus difficile à évaluer en utilisant des sujets animaux. Dans ces publications annexes, 60 mGy sont la dose prénatale la plus basse pour laquelle les dégâts ont été observés : dégâts cérébraux ou comportementaux chez le rat [Hall et Giaccia, 2005, table 12.2]. Le Gray (Gy) mesure la dose absorbée et le Sievert (Sv) la dose effective (efficace). Pour la radiation gamma, ils sont numériquement identiques.

**8** Tandis que la mort cellulaire est supposée être grossièrement proportionnelle au taux de dose, la capacité de réparer et compenser est inconnue.

**9** L'effet de radiation sur l'ADN et la vulnérabilité de l'ADN pendant la division cellulaire sont une raison du fait que la radiation peut à la fois causer et traiter des cancers - les cellules cancéreuses ne montrant pas le ralentissement de croissance typique de cellules normales.

le néocortex se multiplie plus de 100 fois [Nowakowski et Hayes, 2008] et le nombre normal de neurones dans le néocortex de l'adulte peut déjà avoir été atteint à la 16ème semaine [Otake et Schull, 1998]. À part l'hippocampe, aucune multiplication de cellule souche neuronale n'a lieu après la naissance [Gluckman et Hanson, 2005]. **10** La radiation atteint les deux processus principaux de prolifération et de migration vers le cortex et aboutit à des neurones moins nombreux et/ou incorrectement câblés (la migration est guidée par des neurones spécialisés qui s'autodétruisent plus tard).

La première indication que l'irradiation pendant la grossesse a causé des dégâts cognitifs est venue des études de cas d'enfants nés de femmes qui avaient été traitées par de hautes doses d'irradiation médicale pendant la grossesse. Avant le début des années 1930, la radiographie "thérapeutique" et l'irradiation au radium du bassin maternel (pour cancer de l'utérus) ont été menées avec des doses supérieures à 100 mGy. De telles doses pendant la grossesse ont été trouvées induire des microcéphalies (petite taille de la tête) et des déficiences intellectuelles chez le fœtus [DeSantis et al., 2005]. Ces malformations ont été limitées aux grossesses de 20 semaines de gestation au moins, mais le petit échantillon de l'étude (25 enfants symptomatiques) en limite la portée.

Ce sont les études à grande échelle des survivants des bombes atomiques qui ont permis une meilleure analyse du moment de la grossesse où les rayons étaient les plus destructeurs. L'échantillon utilisé dans ces études contient des informations sur 1 566 individus (1 242 à Hiroshima et 324 à Nagasaki) qui étaient avant la naissance à moins de 2 000 mètres de l'hypocentre de l'explosion de la bombe atomique. Deux groupes témoins des mêmes zones ont été associés à l'échantillon sur la base de l'âge et le sexe : le premier, de survivants exposés à plus grande distance (3 000-4 000 mètres de l'hypocentre) et le second, de survivants non-exposés (> 10 000 mètres). En plus de quelques mesures anthropométriques (par exemple, le poids, la taille et le périmètre crânien) ces études ont aussi analysé la capacité cognitive (Quotient Intellectuel) et les résultats scolaires. L'effet sur le quotient intellectuel a été évalué être une diminution de 25-30 points de QI par Gy (1 000 mGy) pour ceux exposés à la période post-ovulatoire de 8-15 semaines. Une réduction plus faible a été notée pour l'âge de 16-25 semaines. Pour les enfants exposés plus tôt ou plus tard, aucun effet significatif n'a été trouvé.

L'irradiation à l'extérieur de la fenêtre de 8-25 semaine n'a pas été associée à une diminution des capacités cognitives chez les survivants de la Bombe A. Cela ne veut pas dire que la radiation n'a pas d'effets en dehors de ces âges. Dans la période de pré implantation (les deux premières semaines après la conception), la radiation est supposée aboutir à la mort embryonnaire, mais n'avoir pas d'effets sur le développement des survivants [hypothèse du "tout ou rien" *n. du trad.*]. Pendant l'organogenèse, 2 à 7 semaines après la conception, les organes internes se développent et la radiation pendant cette période peut provoquer des malformations et un retard de croissance incluant surtout une petite taille (mais sans déficience intellectuelle). L'irradiation au troisième trimestre peut augmenter le risque du cancer [Hall et Giaccia, 2005]. Mais dans la mesure où le système nerveux central est concerné, la période postérieure à la 25ème semaine de grossesse est "relativement radio-résistante" [DeSantis et al., 2005].

L'exposition médiane pour des survivants de la Bombe atomique a été évaluée à 40 mGy [Otake et Schull, 1984]. Savoir si les découvertes à partir des survivants de la Bombe atomique sont généralisables aux doses de moins de 10 mGy n'a pas encore été établi [Hall et Giaccia, 2005, BEIR, 2006]. À la lumière des effets documentés ci-dessus, des considérations tant éthiques que de coût rendent les expériences contrôlées de petites doses de radiation infaisables.

### C. Études de Tchernobyl

Un certain nombre d'études précédentes ont trouvé une réduction de la fonction cognitive suite à irradiation prénatale dans les zones de retombées élevées d'Ukraine, de Biélorussie et de Russie, par exemple, Nyahu et al. [1998], Kolominsky et al. [1999], Loganovskaja et Loganovsky [1999]. Ces études se sont centrées sur des populations nées près du réacteur. En conséquence, elles ont été exposées à des niveaux beaucoup plus élevés de radiations que ce qui est envisagé ici et les tailles d'échantillons ont été relativement petites.

Des impacts périnataux ont été évalués dans les zones de l'Europe ayant des niveaux nettement inférieurs de retombées de Tchernobyl. Les résultats incluant les conceptions, avortements spontanés, avortements provoqués, morts à la naissance, durée de gestation, poids de naissance et mortalité néonatale ont tous été étudiés [Lüning et al., 1989, Sperling et al., 1994, Ericson et Källén, 1994, Scherb et al., 1999, Auvinen et al., 2001, Laziuk et al., 2002]. Pour chaque étude, les résultats sont variables : certaines trouvent des effets et d'autres non et généralement les effets sont faibles.

---

**10** Le cerveau continue à grandir après la naissance, mais cette croissance est en grande partie celle de la myéline, pas des neurones.

Dans un souci de place, nous renvoyons le lecteur à notre étude de travail, Almond, Edlund et Palme [2007], pour une discussion plus minutieuse de ces études.

## D. Le système scolaire suédois

Les études primaires et moyennes (*Grundskola*), avec des niveaux de un à neuf, sont obligatoires en Suède (contrairement aux États-Unis, où la scolarité obligatoire est liée à l'âge). L'année scolaire commence en août et classiquement, les élèves s'inscrivent au premier niveau l'année civile de leurs sept ans.<sup>11</sup>

Bien qu'une certaine spécialisation soit autorisée après le sixième niveau, les étudiants restent dans des classes communes et les grades-niveaux de fin d'année sont fixés sur la base des résultats aux tests nationaux.

Les élèves sont testés pour 16 sujets différents. Les niveaux sont testés en deux étapes. Dans la première étape, le niveau moyen de chaque école est basé sur les résultats nationaux des élèves de l'école. Les niveaux spécifiques de sujets que nous analyserons - Maths et suédois - sont tous deux réalisés selon des tests standardisés nationaux. (Ce banc d'essai national tendrait à atténuer l'effet de cohorte principal ci-dessous, mais pas l'évaluateur de différence-dans-les-différences.) Dans la deuxième étape, les notes de l'élève sont données individuellement. En plus de sa performance dans le test national, la performance dans les tests locaux et dans l'école est prise en compte (ce qui n'est pas standardisé au niveau national). Les catégories sont assignées selon une échelle à quatre points :

- Échec (0 points)
- Réussite (10 points)
- Réussite avec distinction (15 points)
- Réussite avec distinction spéciale" (20 points).

Les notes de la dernière année à l'école obligatoire (à ce moment l'élève atteint 16 ans) sont utilisées pour l'admission au deuxième cycle. En particulier une note réussie dans trois matières fondamentales - anglais, suédois et Maths - est exigée pour l'inscription.

Grossièrement 90 % continuent au Collège d'enseignement général (*Gymnasieskolan*), qui est électif et divisé en deux voies de base : professionnel et universitaire. Dans ces voies, il y a des programmes différents, dont la plupart durent trois ans. Les programmes principaux dans les voies universitaires sont les Sciences, les sciences Sociales et l'Administration d'entreprises. Chaque programme consiste en cours séparés. Certains de ces cours sont communs même entre des programmes différents et gradés sur la base des résultats aux tests nationaux, utilisant le même système de classification que pour l'école obligatoire. Les notes au collège d'enseignement général sont utilisées pour l'admission à l'enseignement supérieur ("collèges" et universités).

### D.1. Regroupement au niveau des Municipalité

Depuis 1989, les municipalités ont assumé la responsabilité de gérer l'enseignement secondaire et obligatoire (avant 1989, l'administration scolaire était de la responsabilité du comté). Bien que les écoles soient régulées par un programme d'études national, la majorité politique dans chaque municipalité a le choix de la gestion des écoles et des ressources allouées à l'enseignement. Ceci, ensuite, peut conduire à une corrélation entre les performances scolaires des individus et la municipalité aussi bien qu'à l'auto-corrélation au fil du temps. Nos cohortes sont entrées dans l'enseignement primaire en 1990 et donc nous aurons des erreurs standard de groupe au niveau des municipalités.<sup>12</sup>

## III. DONNÉES

Ci-dessous, nous décrivons l'irradiation, les données d'études et de santé que nous analyserons. Les données des résultats sont disponibles pour les cohortes nées en 1983-1988. En partant du principe que le nuage radioactif a balayé la Suède du 27 Avril au 10 mai, et pour une période de gestation post-conception de 38 semaine, ceci implique, pour une gestation de 8 à 25 semaines, une naissance entre le 27 juillet et le 13 décembre 1986. Ainsi, nous considérerons la cohorte née entre août et décembre 1986 comme la cohorte "*in utero*".

-----  
<sup>11</sup> L'enseignement public, ou gratuit (tous niveaux) est majoritaire dans le système scolaire Suédois. Récemment, il y a eu une augmentation des écoles privées financées par l'État en contrepartie de l'absence de frais de scolarité. Il n'existe qu'une poignée d'écoles avec frais de scolarité.

<sup>12</sup> Le nombre de groupes - 286 - est suffisant pour éviter un biais vers le bas dans les évaluations d'erreurs standard [Angrist et Pischke, 2008]. En outre, l'approche la plus conservatrice, suggérée par Donald et Lang [2007], est d'utiliser le traitement et le contrôle des moyennes de groupe. Nos effectifs estimés sont encore fortement significatifs en utilisant cette méthode (résultats disponibles par les auteurs).

## A. Données de radiations

A la suite de Tchernobyl, les dépôts au sol des retombées de Cs-137 (demi-vie 30.2 ans) ont été cartographiés pour la plus grande part de l'Europe, voir UNSCEAR [2000] .13 Pour la Suède, le Swedish Geological Co. (SGAB) (commissionné par l'Autorité de Protection de Radiation suédoise, le *Statens Strålskyddsinstitut*) a conduit les mesures aériennes de dépôts au sol des radiation  $\gamma$  (gamma) de Césium 137 au cours de la période de Mai à octobre 1986 et correction de la décroissance à mai 1986.14

Nous avons obtenu ces mesures aériennes pour 2 380 paroisses (sur 2 517). Une paroisse est une unité géographique plutôt petite et pour la plupart des personnes, des activités quotidiennes impliqueraient un franchissement des frontières paroissiales. Donc nous avons effectué un regroupement au niveau de la municipalité ou du comté.15 Les mesures aériennes de dépôts ont été étalonnées contre des mesures spectrométriques gamma *in situ* utilisant des détecteurs Gamma à haute résolution *Gedetectors*, sur 61 emplacements couvrant 48 municipalités [Holmberg et al., 1988, Edvarson, 1991b]. À cause de leur importance, nous nous sommes concentrés sur le Césium et l'Iode 131 (demi-vie 8 jours) .16

Nous considérons deux types de mesures de base de radiations dans cet article. D'abord, il y a les mesures de dépôt au sol de Césium radioactif. Deuxièmement, il y a les mesures de dose, qui reflètent l'énergie absorbée par la matière. Le dépôt est plus facilement mesuré que la dose. Les évaluations de dépôts sont mesurées en kilo-becquerels (kBq) par unité appropriée (par exemple, par mètre carré) et les doses en millisieverts (mSv), où le sievert se réfère à l'équivalent de dose (qui pour la radiation de gamma est l'équivalent numérique de la dose absorbée, notée en unités de Gray (Gy)). Pour donner une idée grossière des ampleurs, on a considéré les régions avec plus de 37 kBq/m<sup>2</sup> comme "contaminées," tandis que 6 mSv sont une évaluation commune de la dose annuelle due à la radiation de fond. Ces mesures sont décrites de façon plus détaillée dans l'Annexe A.

### A.1. Groupes Régionaux

En nous basant sur les informations des mesures aériennes et des mesures *in situ*, nous classifions la Suède en quatre groupes détaillés dans le **Tableau I** et cartographiés dans la **Figure III**. La classification aux extrêmes mesurés est directe. Les zones autour de Gävle et Sundsvall ont été très fortement touchées, tandis que le comté de Norrbotten a été pratiquement épargné.

**Tableau I** : Classification Géographique par Retombées - cartographiée dans la **Figure III**

Zone	Description	Nouveau-nés :		Cs-137 kBq/m <sup>2</sup>
		1983-1988	Août-Décembre 1986	
R3	Älvkarleby, Heby, Gävle, Timrå, Härnösand, Sundsvall, Kramfors et Sollefteå (municipalités)	18 253	1 139	44,1 <sub>a</sub>
R2	zones non R0, ni R1, ni R3	375 556	24 094	4,74
R1	Värmland, Örebro et Stockholm (comtés)	140 143	9 540	1,93
R0	Norrbotten (comté)	17 678	1 061	0,96 <sub>a</sub>
	Toute la Suède	551 630	35 834	5,7

Les valeurs de radiation sont pondérées à la population. Les zones R0-R3 sont mutuellement exclusives et collectivement exhaustives.

**a** Toutes valeurs estimées par l'Autorité de Protection de Radiation suédoise, (sauf **b**, voir plus loin).

**b** Edvarson [1991b].

13 "du point de vue radiologique, l'I-131 et le Cs-137 sont les radionucléides les plus importants à considérer, parce qu'ils sont responsables de la plus grande partie de l'irradiation reçue par la population générale." UNSCEAR [2000, para. 21]. Les rejets de I-131 et Cs-137 ont été évalués à 1 760 pBq et 85 pBq respectivement [UNSCEAR, 2000].

14 En fait, le Césium 134 (demi-vie 2,1 ans) a été mesuré grâce à son rapport connu au Césium 137 (ratio Cs-137/Cs-134 = 1,7) et le fait que les radiations précédentes des essais nucléaires atmosphériques ont été presque exclusivement du Césium-137, ce qui a rendu l'isotope Cs-134 un indicateur plus précis des retombées de Tchernobyl liées au Césium.

15 Le comté (*län*) est le premier niveau de division administrative et politique. Il y a 21 comtés. Le deuxième niveau est la municipalité (*kommun*) et il y a environ 286 municipalités. La paroisse (*församling*) est le troisième et dernier niveau.

16 Les autres radionucléides mesurés étaient : Zr-95, Ru-103 et Te-132.

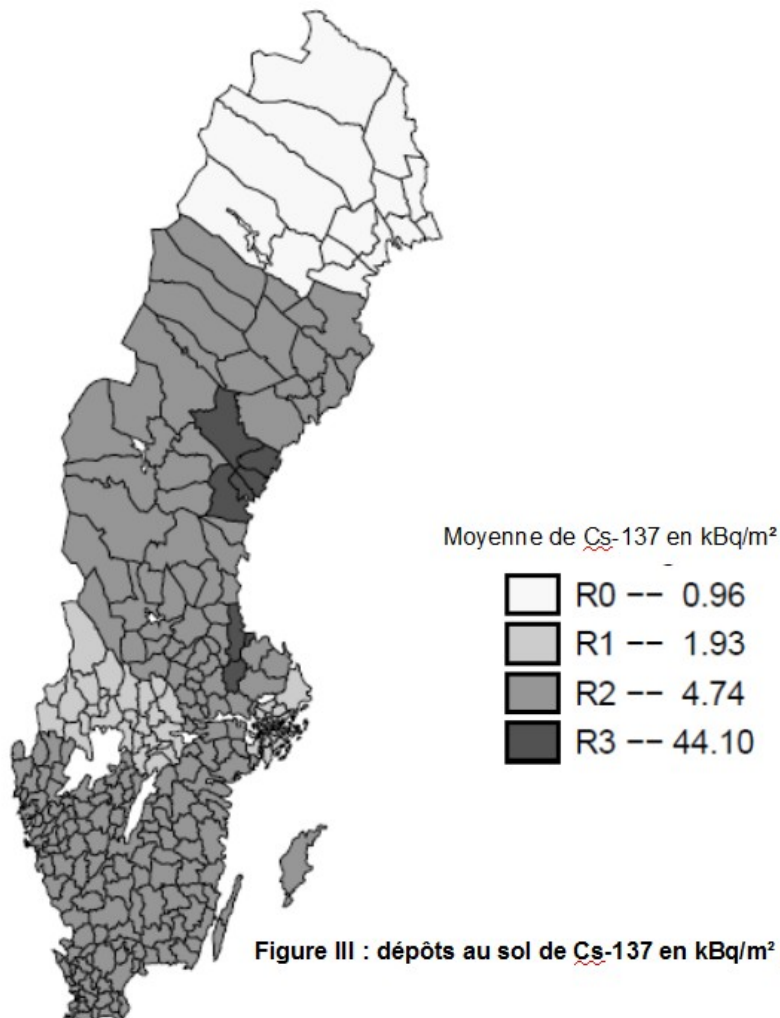


Figure III : dépôts au sol de  $\text{Cs-137}$  en  $\text{kBq/m}^2$  par région

Par conséquent, nous incluons dans le groupe le plus élevé Gävle et Sundsvall et six municipalités contiguës. Ensembles, ces huit municipalités ont enregistré les huit niveaux les plus élevés de dépôt au sol de Césium 137. Quant au groupe témoin, le choix de R0 (comté de Norrbotten) est dicté par Edvarson [1991b, tableau 2] et [UNSCEAR, 2000, Figure 10], où Norrbotten montre les valeurs les plus basses de Césium 137.

Norrbotten est, cependant, un comté à faible densité de population. Donc, nous présentons aussi des résultats de l'utilisation d'un groupe témoin plus large. Basé sur Holmberg et al. [1988, figure 2] reproduit dans notre article de travail [Almond, Edlund et Palme, 2007, Figure 4], nous étendons le groupe témoin pour inclure aussi les comtés notés R1 (dans le **Tableau I**) : Stockholm, Örebro et Värmland.

En somme, tandis que les données choisies sont claires pour nos deux zones extrêmes - R0 et R3 - la division "du milieu" en R1 et R2 peut être vue comme exploratoire. Cependant, cette catégorisation nous permettra de présenter les résultats en deux figures et les tables de régression avec plus d'un seul groupe de comparaison.

## A.2. Mesures supplémentaires

Nous considérons aussi quatre mesures supplémentaires d'irradiation :

- **I-131, in situ, par municipalité.** Dans les 43 municipalités, les taux pour I-131 sont de 3,3 à 627  $\text{kBq/m}^2$ .
- **Cs-134, in situ, par municipalité.** Dans les 48 municipalités pourvues de données, les taux sont de 0,12 à 54  $\text{kBq/m}^2$ . Ces valeurs ont été utilisées pour calibrer les mesures aériennes et devraient donc coïncider (avec un facteur de 1,7) avec les mesures aériennes pour l'emplacement en question. Nous incluons cette mesure pour permettre la comparaison avec les mesures d'I-131. Tandis que la composition des nucléides était variable, ces deux radionucléides étaient fortement corrélés (corrélation 0.97).
- **Cs-137, aérien, par municipalité.** Avec une couverture complète, les taux moyens par municipalité étaient de 0,3 à 64  $\text{kBq/m}^2$ . Nous avons fait les substitutions suivantes. Conformément à Edvarson [1991b, tableau 2], nous assignons la valeur 0,3  $\text{kBq/m}^2$  à toutes les municipalités sauf pour quatre municipalités côtières du comté de Norrbotten et une valeur de 4,1  $\text{kBq/m}^2$  pour le comté de Gotland. La variation géographique au niveau des municipalités est montrée dans la **Figure II**.
- **Cs-137, aérien, par comté.** Ce sont les valeurs par municipalité agrégées au niveau du comté. Le comté atteint en moyenne la gamme de moyennes de 1 à 32  $\text{kBq/m}^2$ .



Les mesures *in situ* viennent [d'Edvarson, 1991b, tableau 7] où nous assignons la valeur mesurée à la municipalité de la station de mesure. Il y avait 61 stations, couvrant 48 municipalités **17** Pour l'iode (I-131) des résultats manquaient pour quelques stations, donc pour l'iode nous avons seulement les résultats de 43 municipalités. Tandis que les lectures *in situ* peuvent être plus fiables que les mesures aériennes, il y a une différence nette dans l'efficacité car nous pouvons assortir ces relevés à moins d'un tiers des échantillons étudiés **18**

## B. Résultats Scolaires

Ci-dessous nous décrivons les données scolaires. Ces données sont associées aux mesures de radiation ci-dessus sur la base de la paroisse de résidence de la mère au moment de la naissance. En conséquence, nous avons une assez bonne mesure de la localisation probable de la mère en Suède pendant la grossesse.

### B.1. Scolarité obligatoire

Les rapports de scolarité obligatoire pour des cohortes nées en 1983-1988 viennent de deux sources. Le premier ensemble de données consiste en toutes les personnes qui soit, sont nées entre 1983 et 1985, soit, sont des enfants de parent suédois, nés entre 1940 et 1985. Par conséquent, cet ensemble de données couvre presque la totalité de la cohorte née de 1983 à 1985. Pour la cohorte de naissance 1986, nous récupérons tous ceux qui avaient au moins un parent suédois de moins de 46 ans (en 1986) et pour 1987 et 1988 cet âge est de 47 et 48 ans, respectivement. Puisque la fertilité est presque terminée pour les femmes de 45 ans, cela signifie que la couverture pour la cohorte postérieure est aussi presque totale.

À cet ensemble de données nous avons fait correspondre les notes finales de la dernière année d'école obligatoire (ayant lieu typiquement à 16 ans), aussi bien que les informations individuelles du Registre National des Naissances et du Registre National des Malades hospitalisés, contenant le code de diagnostic pour toutes les admissions dans les hôpitaux suédois. En tout, nous avons 551 630 observations complètes. Le **tableau Annexe XI** contient les statistiques descriptives.

En plus des notes individuelles en Mathématiques et Suédois, nous nous concentrons sur les variables de résultat suivantes :

**Qualification pour le Lycée.** Comme indiqué dans la Section II partie D, il faut réussir l'anglais, le suédois et les Mathématiques du 9ème niveau pour avoir le droit de s'inscrire au lycée.

**Moyenne des notes.** Note moyenne pour 16 sujets, avec un maximum de 20 points. Elle est utilisée pour la demande d'enseignement secondaire.

### B.2. Lycée

Nous avons obtenu les résultats de lycée en 2006 pour tous les étudiants nés en Suède. Les étudiants obtiennent généralement leur diplôme l'année de leurs 19 et ainsi nous limitons notre échantillon à ceux nés entre 1983 et 1987. Pour cet ensemble de données nous avons 444 583 observations complètes et leur statistique descriptive est fournie dans le **Tableau Annexe XII**.

Nous sélectionnons les données suivantes : si la personne a terminé ses études au lycée (73 %), les notes moyennes et individuelles en Mathématiques et Suédois.

## C. Variables de contrôle

**Education parentale.** Nous avons obtenu des informations sur l'éducation parentale à partir de 1990, toute première année disponible. L'éducation parentale est fournie par le Registre National d'Éducation, à partir de la base de données *LISA*, que nous avons fusionnée avec les rapports d'études en utilisant un identifiant personnel unique. Nous incluons des variables aléatoires pour le niveau d'éducation (deux ensembles, pour chaque parent). Cette variable indique le plus haut niveau d'études atteint : l'enseignement obligatoire (ancien système), enseignement primaire de 9 années, le lycée professionnel, le lycée universitaire, certaines universités (mais sans diplôme pour un programme de 3 ans), le diplôme d'université (programme de 3 ans ou plus), ou le diplôme du 3e cycle. Idéalement, nous devrions avoir l'éducation parentale avant l'accident de Tchernobyl en 1986, nous notons que l'âge moyen de première naissance était 26 ans en 1985, un âge auquel nous nous attendons à ce que l'éducation soit achevée ou près d'être achevée).

-----  
**17** Pour trois stations, nous ne pouvions pas localiser la position avec assez de précision pour identifier une municipalité unique et nous avons recouru à l'assignation des lectures de radiation mesurées aux municipalités adjacentes.

**18** Comme les mesures aériennes ont été calibrées en utilisant les lectures *in situ*, une approche de variables instrumentale pour corriger l'erreur de mesure n'est pas faisable. Voir la Section IV partie D.

**Conditions du marché local du travail.** Les taux d'emploi et de chômage sont disponibles à partir des Statistiques Suédoises par trimestre et par comté pour les ages de 16 à 64 ans. Dehejia et Lleras-Muney [2004] ont mis en évidence l'effet du cycle économique sur les caractéristiques moyennes des parents qui ont conçu des enfants. Nous considérons donc que les conditions de marché du travail sont décalées de trois trimestres. Par exemple, si un étudiant est né au quatrième trimestre, le taux de chômage dans son comté de naissance pendant le premier trimestre est appliqué.

Les moyennes des variables de contrôle (par région) sont rapportées dans le **Tableau Annexe XIII**.

#### *D. Résultats de Naissance*

Le Registre de Naissance suédois contient des informations sur les grossesses et les accouchements pour toutes les naissances dans les hôpitaux suédois depuis 1973. Ceci fournit la date d'accouchement, des informations sur les grossesses précédentes, la durée de gestation, la clinique, le mode de naissance, la taille, le poids, aussi bien que les diagnostics de la mère et l'enfant (codes ICD-7). Il y a entre 85 000 et 120 000 naissances par an en Suède. La perte annuelle d'information se situe entre 0.5 et 3 pour cent. Nous nous concentrons sur les critères variables suivants:

**Poids de Naissance.** Poids mesuré en grammes immédiatement après naissance.

**Durée de gestation.** Durée de gestation mesurée en jours sur la base des dernières règles ou d'évaluation clinique (en utilisant l'échographie pendant la grossesse).

**Score Apgar.** Le score Apgar est un test réalisé 5 minutes après la naissance. Le score d'Apgar est la somme des nombres 0, 1 ou 2 pour cinq critères (la fréquence cardiaque, l'effort respiratoire, le tonus musculaire, la réactivité réflexe et la coloration de la peau). Le score minimal est de 0 (mort apparente) et le maximum est de 10 (absence de problème).

#### *E. Hospitalisations pendant l'enfance*

Le registre hospitalier Suédois des malade hospitalisés contient un rapport pour chaque admission hospitalière. Le registre a été commencé en 1964 et couvre tous les hôpitaux suédois depuis 1987. Le registre inclut des codes ICD-7 pour jusqu'à huit diagnostics, la date d'admission, le nombre de jours d'hospitalisation et le mode de départ. Cette couverture est très proche de la totalité. **19**

En utilisant un identifiant de personne unique, nous avons fait correspondre cet ensemble de données à notre ensemble de données de Scolarité obligatoire et assigner ainsi l'exposition probable à la radiation de Tchernobyl basée sur la paroisse et la date (le mois) de naissance. Puisque nous sommes intéressés par la preuve de dégâts des radiations, nous nous concentrons sur les résultats suivants :

**Malformations.** Les soins hospitaliers entraînés par les malformations congénitales sont identifiés par les codes de diagnostic ICD-7 750 à 759 (qui incluent les malformations congénitales d'organes divers, les monstruosité, l'hydrocéphalie congénitale, la fente palatine et le bec-de-lièvre). Puisque notre cohorte d'étude a été probablement exposée pendant la période fœtale et donc après la période d'organogenèse où il est prouvé que la radiation peut entraîner des malformations, nous ne nous attendons pas à détecter des effets. Les cohortes au risque plus grand font partie de notre groupe de référence (né en janvier et février 1987) et dans la mesure où il y aurait des effets tératogènes, ceci aurait tendance à atténuer nos résultats. Cependant, le fait que Ericson et Källén [1994] n'ont pas trouvé d'augmentations des malformations suggère que de tels effets sont minimes.

**Troubles mentaux, nerveux et sensoriels.**

Nous notons les hospitalisations avec des diagnostics liés à la santé mentale, les maladies du système nerveux et les maladies des organes sensoriels (ICD-7 code 300-398). Ces conditions peuvent être liées au développement du système cérébral et nerveux.

**Néoplasies.** La plupart des recherche sur les effets sur la santé des radiations ionisantes se concentrent sur le cancer. Nous notons les cancers comme le cancer de la thyroïde et la leucémie, aussi bien que des tumeurs non malignes (ICD-7 code 140-239).

**Jours d'hospitalisation.** Ceci est une mesure sommaire qui peut éclairer sur les dépenses globales des services médicaux.

## **IV. RÉSULTATS**

Notre analyse exploite les variations avec le temps (**Figure I**) et la géographie (**Figures II et III**) de la radioactivité de Tchernobyl. Nous évaluons trois spécifications de base, décrites ci-dessous.

---

**19** La perte annuelle d'informations est évaluée à moins de 1 pour cent, la perte d'information sur le diagnostic principal et d'identifiant de la personne sont d'environ 1 pour cent chacun.

## A. Spécification Économétrique

Pour commencer, nous regroupons les régions de Suède en quatre zones selon les retombées - R0 (les plus basses) à R3 (les plus hautes) - comme détaillé dans le **Tableau I** et la **Figure III**.

$$y_i = \alpha_0 \times I(\text{inutero})_i + \sum_{j=1}^3 \alpha_j \times R_j \times I(\text{inutero})_i + \beta X_i + \tau_{yob} + \gamma_{mob} + \lambda_{muni} + \epsilon_i, \quad (1)$$

Où  $y_i$  est une variable dépendante d'intérêt.

$I(\text{inutero})$  est une variable d'indication qui prend

la valeur 1 pour la cohorte née d' Août à Décembre 1986 et 0 sinon.

$\alpha_0$  est "l'effet principal," et nous nous attendons à ce que  $\alpha_0 < 0$ . Si les retombées de Tchernobyl ont affecté le cerveau en développement, nous nous attendons aussi à des performances inférieures dans les zones qui ont reçu plus de retombées. Donc, nous faisons interagir la variable d'indicateur *inutero* avec les variables d'indicateur **R1**; **R2**; **R3** pour les trois zones R1, R2 et R3 exposées à des degrés divers aux retombées.

$X_i$  est un vecteur de contrôle pour le genre, l'éducation parentale (sept niveaux d'éducation, mère et père séparément) et les conditions du marché du travail du comté autour du moment de la conception (emploi et taux de chômage) pour contrôler la sélection de la fécondité.

$\tau_{yob}$  un vecteur des indicateurs de l'année de naissance.

$\gamma_{mob}$  un vecteur des indicateurs du mois de naissance.

$\lambda_{muni}$  un vecteur d'indicateurs de naissance de municipalité .

**Paramètres  $\alpha_j$ ;  $j = 1; 2; 3$**  tiennent compte des effets différentiels par région et nous formulons l'hypothèse que  $\alpha_3 \leq \alpha_2 \leq \alpha_1 < 0$ .

Ces paramètres mesurent l'étendue des résultats pour les enfants *inutero* nés dans les zones correspondantes au moment de l'accident qui diffèrent des enfants *inutero* nés dans la zone de référence, en contrôlant toutes les différences permanentes entre des zones, c'est-à-dire, nous supposons que :

$$\text{cov}(\epsilon_i, R_j \times I(\text{inutero})_i | X_i, \tau_{yob}, \gamma_{mob}, \lambda_{muni}) = 0, j = 1, 2, 3.$$

Dans la mesure où les parents ou l'école ont répondu aux dégâts cognitifs, ceci aurait tendance à atténuer les dégâts observés si la réponse était compensatoire. (Nous discutons cette question de façon plus détaillée dans la Section V.)

Notre deuxième stratégie utilise les mesures continues de retombées radioactives au niveau de la municipalité ou du comté au lieu du groupement régional pour évaluer un modèle de forme :

$$y_i = \alpha_0 \times I(\text{inutero})_i + \alpha_1 \times \log(FALLOUT_r) \times I(\text{inutero})_i + \beta X_i + \tau_{yob} + \gamma_{mob} + \lambda_{region} + \epsilon_i, \quad (2)$$

Où **FALLOUT<sub>r</sub>** mesure les retombées moyennes dans la région  $r$  (municipalité ou comté), par exemple, le niveau municipal de Cs-137 en kBq/m<sup>2</sup>. Un avantage de cette méthode consiste en ce qu'il évite de reclassifier des municipalités dans les groupes régionaux. Cependant, les suppositions de forme fonctionnelle deviennent plus importantes. **20**

De nouveau, notre supposition d'identification est l'indépendance entre les perturbations et la mesure d'exposition conditionnelle sur des différences permanentes entre les zones à exposition différente et les autres variables de contrôle.

Notre troisième stratégie empirique doit appliquer l'approche de différence-dans-les-différences à un échantillon limité aux enfants de mêmes parents (utilisant la mère unique et le père des identifiants) et comparer ceux-là *in utero* pendant Tchernobyl aux enfants de mêmes parents (fratrie).

C'est-à-dire que nous évaluons l'équation (1) avec les effets fixes de la famille :

20 Quoique des résultats similaires soient obtenus quand **FALLOUT<sub>r</sub>** n'est pas enregistré.

$$y_i = \alpha_0 \times I(\text{inutero})_i + \sum_{j=1}^3 \alpha_j \times R_j \times I(\text{inutero})_i + \pi_{family} + \tau_{yob} + \gamma_{mob} + \lambda_{muni} + \epsilon_i, \quad (3)$$

où  $\pi_{family}$  est un vecteur de variables d'indicateur, un pour chaque famille (5 547 au total). Les effets fixes par municipalité sont identifiés par les familles qui rapportent différentes municipalités de naissance pour leurs enfants. Nous limitons l'échantillon à ces familles à deux enfants de même sexe des mêmes parents avec des pères mariés (pour réduire la probabilité que les parents se soient séparés, un événement pouvant avoir des effets différentiels selon l'âge sur des enfants de mêmes parents) où un enfant de mêmes parents a appartenu à la cohorte exposée et l'autre non (mais né entre 1983 et 1988).

L'inclusion de ces effets fixes est équivalente à différencier les résultats et les régresseurs de l'enfant de mêmes parents *in utero* pendant des retombées de Tchernobyl de son/son enfant de mêmes parents. Donc, les comparaisons identifiant l'effet de Tchernobyl sont seulement faites dans (et pas à travers) des familles. Comme auparavant, si la performance(l'exécution) scolaire est affectée par des retombées de Tchernobyl, nous n'(nous) attendrions à ceux nés entre décembre auguste 1986 pour fonctionner(nous produire) plus mauvais que leurs enfants de mêmes parents et cette différence pour être plus grand pour ceux nés dans les zones(domains) qui ont reçu plus de retombées. Cette approche contrôle pour toute l'hétérogénéité non observée au niveau familial.

## B. Santé

Avant de considérer la performance scolaire, nous évaluons la santé dans les données des rapports de naissance et des hospitalisations de 2006. La Suède a une assurance maladie universelle et les honoraires, quand ils sont facturés, sont symboliques et donc il est peu probable qu'ils dissuadent les familles à bas revenus d'utiliser les soins de santé. **21**

Le **Tableau II** rapporte les résultats d'évaluation de l'équation (1) sur notre natalité et nos données de Malades hospitalisés. Les évaluations dans la colonne 1 ne révèlent aucun effet significatif pour le poids de naissance; ni les ampleurs d'évaluations de point correspondant à la variation géographique dans des niveaux de retombées. La plus grande différence (pour R2) indique une différence moyenne de moins de .3 % dans le poids de naissance. Nous ne détectons pas non plus de différences significatives du score d'APGAR (colonne 2) ou la durée de gestation (colonne 3). Et de nouveau, l'ordre des évaluations de point ne correspond pas à la variation dans des retombées.

En nous tournant vers les hospitalisations jusqu'en 2005 (c'est-à-dire, pendant les 19 ans suivant l'accident), nous ne trouvons nouveau aucun modèle systématique ou des différences statistiquement significatives pour la cohorte née en fin 1986. Cette cohorte était pas plus probablement pour être diagnostiqué avec des malformations congénitales (colonne 4), des problèmes de système mentaux ou nerveux (colonne 5), ou être hospitalisé plus de jours (colonne 6). Il n'y a aucune modification systématique d'amplitude de taille de ces points.

Nous avons aussi étudié l'occurrence de néoplasmes et maladies du sang. Cependant, le risque faible de ces maladies les rend peu utilisables en analyse de régression et nous rapportons au lieu de cela l'occurrence réelle et l'occurrence prévue sur la base des moyennes types. Pour les néoplasmes (tumeurs), nous avons trouvé 6 cas pour ceux nés dans la zone R3, d'Août à Décembre 1986, face au nombre prévu de 6,82 (1154 x 0,0059175). Pour les maladies du sang et des organes du sang, les chiffres correspondantes étaient 0 cas réels, face au nombre prévu de 0,32.

En résumé, nous ne pouvons détecter aucune aberration significative pour ce qui touche les naissances et les hospitalisations des enfants nés d'Août à Décembre 1986.

---

**21.** Les services médicaux privés existent en Suède, mais sont rares.

**Tableau II : Santé**

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Données de natalité			Données sur les patients hospitalisés		
moyenne	Poids de naissance (gr)	Apgar < 10	Gestation (jours)	Malformations	troubles mentaux	hospitalisation (jours)
	3 484 gr	0,175	280 jours	0,021	0,068	5,6 jours
inutero x zone						
R3	-4,32 [15,85]	-0,015 [0,014]	-0,371 [0,318]	-0,007 [0,005]	-0,012 [0,011]	-0,143 [0,853]
R2	-9,37 [15,79]	-0,21 [0,014]	-0,284 [0,322]	-0,002 [0,001]	-0,002 [0,002]	0,025 [0,656]
R1	-0,057 [19,10]	-0,015 [0,022]	-0,343 [0,383]	0 [0,002]	-0,002 [0,002]	-0,328 [0,670]
N	584 014	595 354	586 139	551 631	551 631	551 632
R <sup>2</sup>	0,001	0,011	0,001	0	0	0

**Apgar < 10** - la valeur attribuée égale 1 si le score d'Apgar à cinq minutes était inférieur à 10. Les données pour les malades hospitalisés sont de 2005.

**Malformation** - la valeur attribuée égale 1 si n'importe lequel des codes de diagnostics (jusqu'à huit pour chaque rapport de malade hospitalisé) a indiqué des malformations congénitales (codes ICD-7 : 750-759).

**Troubles mentaux**- la valeur égale 1 si n'importe lequel des codes de diagnostics (jusqu'à huit pour chaque rapport de malade hospitalisé) a indiqué un trouble mental, psycho-neurologique, des troubles de la personnalité ou une maladie du système nerveux et des organes des sens (codes ICD-7 : 300-398) dans n'importe lequel des rapports de malade hospitalisé pour une personne.

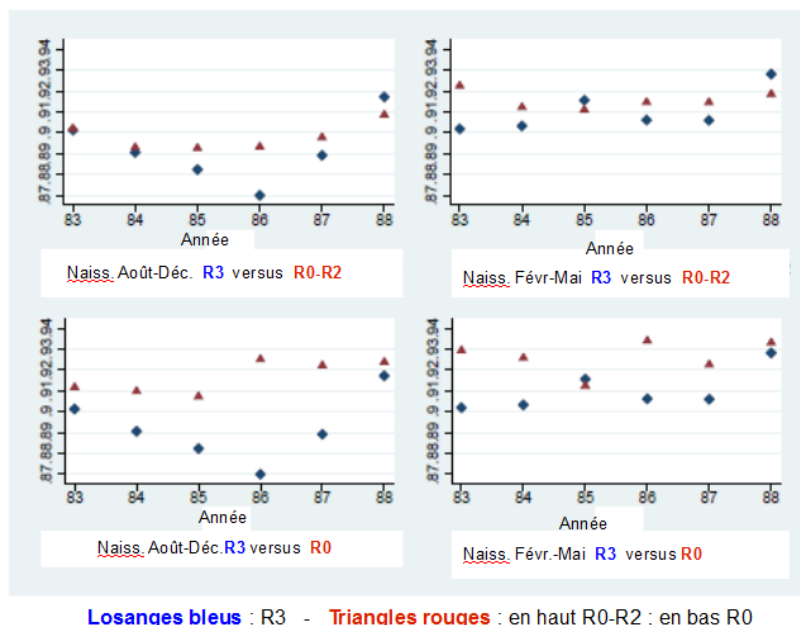
**Hospitalisation** - Somme de jours d'hospitalisation, moyenne=5.6 et médiane=1.

## C. Performances Scolaires

### C.1. Résultats Graphiques

Nous commençons en présentant la qualification d'entrée au lycée, les notes moyennes et les notes moyenne en maths dans une série de figures.

La **Figure IV** montre la fraction de chaque cohorte de naissance qualifiée pour le lycée. A cause de la saisonnalité substantielle dans la performance scolaire par mois de naissance, nous comparons ceux nés

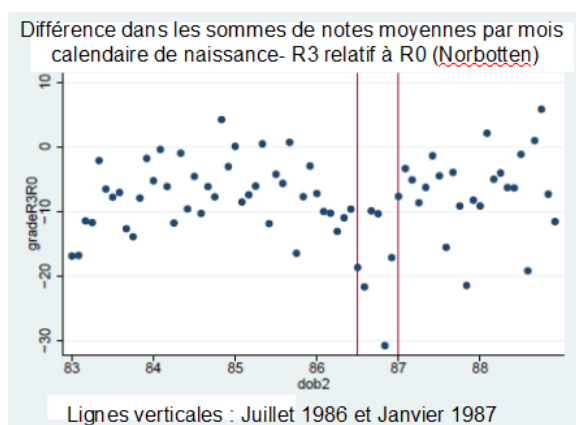


**Figure IV : Fraction qualifiée pour le lycée par année et saison de naissance**  
 Groupe traité: R3 (Gävle-Sundsvall) – Groupe contrôle: reste de la Suède (en haut); R0 (en bas)

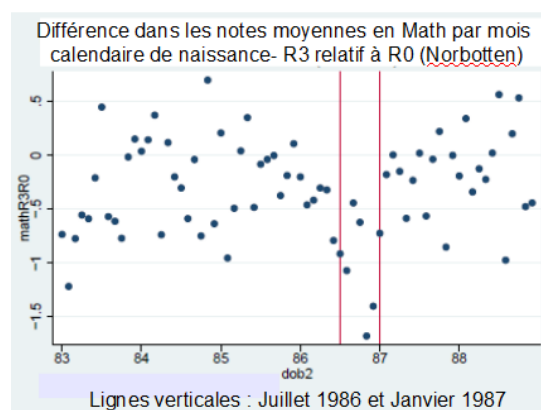
d'Août à Décembre 1986 à ceux nés d'Août à Décembre des années adjacentes dans les deux panneaux de gauche. Dans le panneau gauche supérieur, nous comparons des taux de qualification annuels pour ceux nés dans les zones R3 (retombées les plus élevées) au reste de la Suède (R0-R2). Les deux séries se suivent assez étroitement jusqu'en 1986, quand la qualification de la part des R3 baisse considérablement pour produire un écart de point de 3%. Le panneau le plus bas à gauche place à nouveau les moyennes R3, mais maintenant contre la région de retombées la plus basse de la Suède : Norrbotten (R0). L'écart est maintenant plus grand, d'environ 5% et il est remarquable que la différence se manifeste avec les succès obtenus par le groupe témoin né pendant cette même année de naissance. **22** Ceci est cohérent avec les notes dans les matières fondamentales (et ainsi la qualification pour le lycée) qui sont assignées dans la partie basée sur le test standardisé national (voir la Section II D) où la norme nationale a été temporairement étendue.

Comme exercice d'extrapolation, les panneaux de droite de la **Figure IV** réalisent les mêmes comparaisons régionales pour ceux nés entre février et mai, c'est-à-dire, des cohortes pour lesquelles les études de survivants de la Bombe A ne prévoient pas d'effets attribuables à la radiation. Clairement, les médiocres résultats de la cohorte R3 ne s'étendent pas à ceux nés juste avant l'accident et exposés au pic de radiation noté dans la **Figure I**, en tant que nouveau-nés. Cette découverte réduit la probabilité que des effets géographiquement variables sans rapport avec Tchernobyl représentent le modèle observé pour les cohortes très probablement exposées entre des semaines 8 et 25 de gestation.

Ensuite, nous présentons les catégories par mois de naissance. La **Figure V** détermine la différence entre la somme des notes moyennes dans R3 et R0 et la **Figure VI** fait de même pour la moyenne des notes en Mathématiques. Alors qu'elle est généralement légèrement négative, la différence montre là une diminution prononcée pour la cohorte née fin 1986. Nous n'observons pas de plus grands écarts régionaux pour ceux né avant Tchernobyl (par exemple, âgés de 2 ans lors de l'accident) que pour ceux conçus après le maximum de radiations. Ceci suggère que, non seulement les cohortes exposées pendant les semaines 8 à 25 ont été le plus affectées, mais aussi que les enfants exposés après la naissance n'ont pas été particulièrement affectés (en accord avec Otake et Schull [1998]).



**Figure V**



**Figure VI**

### C.2. Résultats de régression

Les **Tableaux III-VI** présentent nos évaluations de régression principales, où les erreurs standard sont groupées au niveau des municipalités (comme discuté dans la Section D.1). À l'exception du **Tableau VI**, les résultats à l'école obligatoire sont rapportés. (Comme décrit ci-dessus, pour la scolarité obligatoire nous analysons des cohortes nées en 1983-1988 et pour des résultats de lycée nous considérons des cohortes 1983-1987, puisque la cohorte 1988 aurait seulement effectué deux ans de lycée en 2006, dernière années de nos données de lycée.)

-----  
**22.** L'écart "de prétraitement" dans des taux de qualification dans le bas du panneau de gauche de la Figure IV est compatible avec des effets sur des enfants nés avant Tchernobyl et donc exposés après la naissance. À la mesure à laquelle cet écart de cohorte est dû à Tchernobyl, nos évaluations de régression peuvent être interprétées comme un effet supplémentaire attribuable à l'exposition prénatale. Cependant, des écarts "de prétraitement" correspondants ne sont pas apparents dans des Figures V et VI.

D'abord nous présentons des résultats de l'évaluation (1) sans les termes d'interaction de région. Ceci revient à exploiter seulement la variation de temps et l'effet évalué est négatif pour tous les quatre résultats, bien que non statistiquement significatif, dans le **tableau III**, colonnes (1) et (5). Ensuite, nous nous tournons vers notre évaluation de différence-dans-les-différences où nous exploitons à la fois la période et la variation régionale. Les termes d'interaction régionale sont entrés séquentiellement pour tenir compte de groupes de base différents dans les régressions, dans le **tableau III**, colonnes (2) - (4) et (6) - (8). D'abord, la pire zone affectée, R3, est comparée au reste de la Suède; puis à R0 et R1; et finalement à R0. En accord avec les dégâts liés aux radiations, l'effet évalué est négatif et l'amplitude augmente avec la différence dans les retombées, et l'ampleur correspond à l'ampleur des retombées. Pour les notes moyennes, nous évaluons la réduction à 0,54 points, ou grossièrement à 2,5 centiles dans la distribution des notes pour la cohorte inutero de R3. **23** Nous constatons aussi que ce groupe est de 3 pour cent moins qualifié pour entrer au lycée. Quant aux Mathématiques, les notes de la cohorte in utero dans la zone la plus exposée sont évaluées à 0.67 points de moins, soit une réduction de six pour cent (0,67/11,9). La taille d'effet est comparable avec l'effet évalué du retard d'une année entière au niveau scolaire (à partir du mois de naissance, non rapporté, disponible sur demande). Les résultats pour le Suédois sont qualitativement similaires, bien que de plus faible ampleur.

**Tableau III: Notes à l'école élémentaire - Effets par aires géographiques**

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	<b>Note moyenne</b> (moyenne=12,78)				<b>Qualification pour le lycée</b> (moyenne=0,912)			
<b>inutero</b>								
	-0,028 [0,026]	-0,023 [0,037]	0,125** [0,053]	0,367*** [0,139]	-0,003 [0,002]	-0,003 [0,002]	0,003 [0,003]	0,015** [0,007]
<b>inutero x zone</b>								
<b>R3</b>		-0,153 [0,113]	-0,301** [0,119]	-0,543*** [0,176]		-0,012 [0,008]	-0,018** [0,008]	-0,030*** [0,010]
<b>R2</b>			-0,213*** [0,054]	-0,456*** [0,140]			-0,009*** [0,003]	-0,020*** [0,007]
<b>R1</b>				-0,269* [0,147]				-0,013* [0,007]
<b>N</b>	551 630	551 630	551 630	551 630	551 630	551 630	551 630	551 630
<b>R<sup>2</sup></b>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05
	<b>Mathématiques</b> (moyenne=11,96)				<b>Suédois</b> (moyenne=12,73)			
<b>inutero</b>	-0,026 [0,032]	-0,02 [0,040]	0,028*** [0,046]	0,170*** [0,104]	-0,034 [0,031]	-0,031 [0,035]	0,082 [0,055]	0,303** [0,141]
<b>inutero x zone</b>								
<b>R3</b>		-0,184** [0,010]	-0,333*** [0,097]	-0,674*** [0,133]		-0,084 [0,158]	-0,198 [0,164]	-0,418** [0,209]
<b>R2</b>			-0,214*** [0,047]	-0,555*** [0,103]			-0,163*** [0,059]	-0,384*** [0,142]
<b>R1</b>				-0,380*** [0,106]				-0,245 [0,151]
<b>N</b>	551630	551630	551630	551630	551630	551630	551630	551630
<b>R<sup>2</sup></b>	0,13	0,13	0,13	0,13	0,2	0,2	0,2	0,2

Erreurs standard agglomérées au niveau des municipalités entre crochets

23. Pour des catégories moyennes, la qualification et les Maths, les @ j estimés dans (1) sont significativement différents pour R3 versus R2 et R3 versus R1 avec au moins une différence de 5 %.

Le **Tableau IV** répète l'analyse en utilisant quatre mesures continues différentes de retombées (en logs). Les deux premières sont les mesures *in situ* de Cs-134 et I-131, qui ont été agrégées au niveau des municipalités comme décrit ci-dessus. Puisqu'il y avait seulement 61 sites de contrôle, notre taille d'échantillons est réduite en conséquence. Les deux dernières régressions utilisent les mesures aériennes de Cs-137 pour les niveaux des municipalités et du comté respectivement et ici nous avons une couverture complète. La baisse des notes en Mathématiques est statistiquement significative pour toutes les mesures de radiation et pour la qualification HS, la mesure aérienne au niveau du comté est significative. La relation estimée entre les notes et l'exposition est négative dans dix des 11 cases restantes, mais n'est pas statistiquement significative.

Une violation de notre supposition d'identification pour les équations (1) et (2) aurait lieu si les caractéristiques non observables des familles des zones de radiations élevées de Suède avec des enfants nés fin 1986 étaient détériorées. D'abord, nous notons que contrôlant pour des caractéristiques observables de fond (par exemple, l'éducation parentale) ne change pas considérablement nos estimations de dégâts. **24** Cette possibilité motive notre estimation d'effets fixes pour les enfants de mêmes parents, le plus fort témoignage de notre hypothèse. Le **Tableau V** présente les résultats. La comparaison d'enfant de mêmes parents confirme les découvertes dans la section croisée, réduisant la probabilité que la preuve trouvée de dégâts soit due à une hétérogénéité systématique parmi les familles. De plus, les tailles d'effet sont plus grandes que dans la section croisée. Par exemple, l'effet sur les notes de mathématique de l'exposition prénatale à Tchernobyl est supérieur à 10 %. Le renforcement des quantités de dégâts suggère que le degré de réponse parentale à la dotation cognitive, puisse avoir renforcé de telles réponses [Rosenzweig et Schultz, 1982, Loughran et d'autres., 2008, Rosenzweig et Zhang, 2008].

Finalement, nous répétons l'analyse de base pour ceux qui ont terminé les études au lycée. Le **Tableau VI** présente les résultats de l'évaluation (1) pour l'obtention de diplôme, les notes moyennes, en mathématiques et suédois. Des effets significatifs sont trouvés pour les notes moyennes, avec le classement attendu d'évaluations de point pour d'autres résultats. À l'exception de l'obtention de diplôme, cependant, la taille d'effet évaluée est plus petite que ceux que nous avons trouvés pour la scolarité obligatoire. Ceci est vraisemblablement dû au fait que les diplômés de lycée sont sélectionnés positivement et que le passage au lycée n'est pas obligatoire.

**Tableau IV : Notes de l'école obligatoire - Mesure continue d'exposition**

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	Municipalité			Conté	Municipalité			Conté
	Moyenne de notes				Qualification pour lycée			
<b>Cs-134</b>	-3,400 [2,548]				-0,053 [0,125]			
<b>I-131</b>		-0,249 [0,254]				-0,003 [0,046]		
<b>Cs-137</b>			-2,740 [2,483]				-0,241 [0,182]	
<b>Cs-137</b>				-2,921 [2,781]				-0,522*** [0,171]
<b>N</b>	181258	169659	551630	551630	181258	169659	551630	551630
<b>R<sup>2</sup></b>	0,2	0,2	0,19	0,2	0,05	0,05	0,04	0,05
	Mathématiques				Suédois			
<b>Cs-134</b>	-4,087*** [1,949]				-1,306 [3,693]			
<b>I-131</b>		-0,540*** [0,190]				0,190 [0,252]		
<b>Cs-137</b>			-4,491* [2,354]				-2,436 [3,466]	
<b>Cs-137</b>				-6,185* [2,968]				-2,369 [3,830]
<b>N</b>	181 258	169 659	551 630	181 258	181 258	169 659	551 630	551 630
<b>R<sup>2</sup></b>	0,14	0,14	0,13	0,13	0,2	0,2	0,19	0,2

Erreurs standard agglomérées au niveau du traitement d'agrégation (municipalité ou comté) entre crochets

**24** Par exemple, voir les évaluations non ajustées pour la qualification dans le Tableau 4 d'Almond, Edlund et Palme [2007].



**Tableau V : École obligatoire - Effets fixés de fratrie**

	(1)	(2)	(3)	(4)
	Moyenne de notes	Qualification lycée	Maths	Suédois
<b>inutero x zone</b>				
<b>R3</b>	-0,935** [0,427]	-0,049 [0,044]	-1,439*** [0,503]	-0,733 [0,541]
<b>R2</b>	-0,795** [0,374]	-0,028 [0,041]	-1,417*** [0,472]	-0,843* [0,434]
<b>R1</b>	-0,617 [0,382]	-0,009 [0,044]	-1,215** [0,486]	-0,679 [0,435]
<b>N</b>	11 094	11 094	11 094	11 094
<b>R<sup>2</sup></b>	0,8	0,55	0,73	0,76

Erreurs standard agglomérées au niveau des municipalités entre crochets

**Tableau VI : Devenirs au lycée - Effets par aire géographique**

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	<b>Licence obtenue (moyenne=0,732)</b>				<b>Note moyenne (moyenne=14,2)</b>			
<b>inutero</b>	-0,004 [0,003]	-0,003 [0,003]	0,006 [0,005]	0,015 [0,020]	-0,025 [0,024]	-0,021 [0,024]	0,014 [0,029]	0,132*** [0,048]
<b>inutero x zone:</b>								
<b>R3</b>		-0,016 [0,014]	-0,026* [0,014]	-0,035 [0,24]		0,138 [0,165]	-0,173 [0,166]	-0,291* [0,169]
<b>R2</b>			-0,014*** [0,005]	-0,023 [0,020]			-0,05 [0,033]	-0,168*** [0,049]
<b>R1</b>				-0,01 [0,020]				-0,131*** [0,052]
<b>N</b>	444 583	444 583	444 583	444 583	325 255	325 255	325 255	325 255
<b>R<sup>2</sup></b>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,18	0,18	0,18	0,18
	<b>Mathématiques (moyenne=13,3)</b>				<b>Suédois (moyennes=13,9)</b>			
<b>inutero</b>	-0,034 [0,040]	-0,03 [0,041]	0,054 [0,051]	0,173 [0,160]	-0,24 [0,031]	-0,24 [0,032]	-0,075 [0,048]	0,057 [0,137]
<b>inutero x zone:</b>								
<b>R3</b>		-0,108 [0,164]	-0,193 [0,1368]	-0,312 [0,225]		0,019 [0,232]	0,07 [0,235]	-0,62 [0,268]
<b>R2</b>			-0,120** [0,061]	-0,24 [0,161]			0,072 [0,054]	-0,059 [0,138]
<b>R1</b>				-0,133 [0,165]				-0,147 [0,143]
<b>N</b>	324 285	324 285	324 285	324 285	323 879	323 879	323 879	323 879
<b>R<sup>2</sup></b>	0,11	0,11	0,11	0,11	0,17	0,17	0,17	0,17

Erreurs standard agglomérées au niveau des municipalités entre crochets

### D- Erreur de Mesure

La mesure aérienne de dépôt de Césium en Suède n'a commencé que le 9 mai 1986 [Isaksson et *all.*, 2000], deux semaines après l'accident. On suppose que l'iode a été le plus grand fournisseur simple de doses de radiation initiale, mais en raison de sa demi-vie relativement courte (8 jours), il a été supplanté par d'autres radionucléides à plus longue demi-vie au cours de l'été 1986. Par exemple, le niveau de radiation gamma à Njurunda avait déjà baissé de moitié par rapport au pic du 29 avril quand les vols ont commencé le 9 mai (voir **Figure I** et Kjelle [1987]). Tandis que nos données *in situ* indiquent que la correspondance entre l'iode et le

Césium était élevée, cette relation s'affaiblit au fil du temps. Ainsi, nous nous attendons à une certaine diminution entre l'ampleur du pic de radiation initial et la mesure aérienne ultérieure de Césium (erreur de mesure).

Nous pouvons être capables d'améliorer la mesure des différences géographiques du pic de radiation initial en utilisant les pluviosités. Comme indiqué ci-dessus, l'accident de Tchernobyl a produit "une distribution fortement non uniforme des dépôts au sol, due aux pluies" [Hohenemser, 1988]. Devell [1991] a noté :

*"La pluie aux emplacements où elle a traversé le panache a lessivé des quantités significatives de matières radioactives, qui ont été déposées sur le sol. "*

Le lessivage par ruissellement dépend de la quantité de pluie totale ou de l'intensité de l'averse. Une étude de retombées de Tchernobyl à Göteborg (en Suède occidentale) a trouvé que 99 % des dépôts de Tchernobyl étaient dus aux pluies. [Mattsson et Vesanen, 1988].

Les données des précipitation quotidiennes des 94 stations météorologiques de la Suède sont disponibles au Centre National de Données Climatiques du Département du Commerce US. **25** Les pluies des 10 jours qui ont suivi l'accident de Tchernobyl (pendant que le panache était sur la Suède) sont en effet fortement prophétiques des dépôts - R<sup>2</sup> de .77.**26** Comme le dépôt humide est un processus physique bien connu [Holmberg et all., 1988], un premier stade fort doit être attendu. Les pluies dans les suites de Tchernobyl ne sont que faiblement (et négativement) corrélées avec les pluies pendant le reste de l'année.**27** Ainsi, les dépôts n'étaient pas situés dans les parties "pluvieuses" de la Suède. Comme les mesures aériennes des dépôts n'ont commencé que le 9 mai 1986, c'est-à-dire, quatre jours après la fin de la fenêtre de pluies de 10 jours [Isaksson et all., 2000], une erreur de mesures de radiation due aux conditions météorologiques est peu probable.

Notre outil pour l'erreur de mesure est le dépôt de Césium utilisant un processus physique bien spécifié. Malheureusement, peu de stations de contrôle de radiation *in situ* étaient placées près des enregistreurs de pluviométrie disposés séparément. Donc, nous organisons les mesures de radiation aériennes au niveau du comté.

Le **Tableau VII** rapporte les MCO et le coefficient IV estimé pour les mesures de dépôt de césium (enregistré) au niveau de comté corrélé avec les semaines 8 à 25 de gestation pendant Tchernobyl. Parce que nous n'avons pas de mesures de pluviométrie pour le comté Södermanland, nous commençons avec des évaluations de MCO diminuées pour l'échantillon de ce comté; elles sont trivialement différentes des évaluations du Tableau IV de l'article. **28** En instruisant le dépôt des précipitations dans les 10 jours suivant

**Tableau VII : MCO versus estimations IV**

	(1)	(2)	(3)	(4)
Résultat	Note	Qualification	Maths	Suédois
<b>Cs-137 MCO</b>	-2,92 [2,78]	-0,526*** [0,171]	-6,19** [2,95]	-2,63 [2,86]
<b>Cs-137 IV</b>	-14,0 [10,3]	-0,909** [0,340]	-10,9 [7,76]	-11,2 [9,72]
<b>Cs-137 IV, effets fixes de fratrie</b>	-25,0 [23,9]	-1,84** [0,827]	-11,1 [19,4]	-25,1 [26,5]

Tchernobyl, on trouve des estimations ponctuelles plus importantes - à peu près le double des estimations des **Moindres Carrés Ordinaires**. Le motif de l'augmentation des estimations ponctuelles suggère que nous avons effectivement un problème d'erreur de mesure. Les écarts-types sont également sensiblement plus grands, mais l'estimation IV pour la qualification à l'école secondaire est significative au seuil de 5%. **29** Enfin, nous présentons les estimations IV pour les comparaisons entre frères et sœurs - à savoir, où les différences entre frères et sœurs sont identifiées par des différences de précipitations au niveau du comté. Ces estimations ponctuelles sont sensiblement plus grandes que les résultats IV de base (à l'exception des mathématiques). Les erreurs types sont encore plus grandes, mais la qualification reste significative au seuil de 5%. Ainsi, l'augmentation constante des estimations ponctuelles suggère que nos résultats sont fiables aux augmentations de mesure de l'exposition aux radiations là où la source de variation est plausible et clairement définie.

**25** [www.ncdc.noaa.gov/oa/hcdc.html](http://www.ncdc.noaa.gov/oa/hcdc.html)

**26** Population pondérée par régression au niveau du comté du dépôt de Césium sur la précipitation, précipitation élevée au carré, et constante.

**27** Pour les 84 moniteurs de pluie isolés, la pente de coefficient sur le coefficient des pluies pendant le reste de l'année est -0.0017 avec une erreur standard de 0.033 (t-stat = -.51). Des résultats semblables sont obtenus avec une spécification au niveau du comté (comme dans la note 26).

**28** N=35 954, ou 97% de l'échantillon du Tableau IV

**29** Ici, nous regroupons les erreurs standard au niveau du comté parce que l'instrument des précipitations varie seulement à ce niveau.

## E. Effets des salaires projetés

### E.1 Suède

Un rendement scolaire inférieur peut se traduire par une baisse de productivité et des revenus quand ces cohortes entrent sur le marché du travail. À cette fin, nous étudions la cohorte née en 1972, la plus ancienne cohorte pour laquelle nous pouvons assortir pour chacun l'école et le registres des salaires (ce dernier à partir de la base de données LISA). Les données de salaires sont le revenu du travail avant impôts en 2003 (lorsque la cohorte a 31 ans). La cohorte 1972 a été évaluée avec une échelle différente. Par souci de comparabilité, nous convertissons les notes en centiles de notes.

Nous effectuons la régression du logarithme des gains (panneau supérieur) ou le centile de la distribution des bénéfices de cette cohorte (panneau inférieur) sur les notes dans l'enseignement obligatoire (**Tableau VIII**, colonnes 1 et 2) et niveau de scolarité atteint (**Tableau VIII**, colonne 3) et un genre factice.<sup>30</sup> Nous constatons que un déplacement de centile 1 au sein de la répartition des notes est associé à un changement de 0,6 pour cent du bénéfice, ou une variation de 0,25 dans la distribution de centile.<sup>31</sup> Pour la cohorte *in utero* dans la zone la plus touchée, nous avons estimé que les retombées de Tchernobyl ont réduit les notes en mathématiques d'en moyenne, - 0,67 (**Tableau III**), soit une réduction de 2,2 en centile.<sup>32</sup> **En utilisant ? (plugging)** ces chiffres, nous obtenons un dommage dû à Tchernobyl d'environ 1,3 pour cent des revenus, soit une baisse de 0,55 dans la distribution du centile des gains, pour la cohorte la plus touchée. Pour ceux des zones moins touchées (hors de Norrbotten), en R1, les chiffres correspondants sont une réduction de 1,3 centile dans les notes en mathématiques, ce qui implique une réduction de 0,8 pour cent du revenu, soit une baisse de 0,3 centile de la distribution des revenus.

Si, au contraire, nous utilisons la moyenne des notes, les dégâts estimés seraient une réduction d'environ 6 centiles, ce qui prédit une réduction des revenus de 3,3 pour cent ou une baisse de 1,5 centiles de la distribution des revenus.

**Tableau VIII : Réponse à l'éducation, cohorte née en 1972**

	(1)	(2)	(3)
	<b>log 2003 (salaires-gains)</b>		
<b>Centile de notes <sup>a</sup> :</b>			
<b>Maths</b>	0,0058*** [0,0001]		
<b>Somme</b>		0,0063*** [0,0001]	
<b>Education accomplie <sup>b</sup> :</b>			
<b>Lycée</b>			0,187*** [0,014]
<b>Collège</b>			0,353*** [0,144]
<b>R<sup>2</sup></b>	0,103	0,106	0,09
	<b>Distribution des salaires (centiles)</b>		
<b>Centile de notes <sup>a</sup> :</b>			
<b>Maths</b>	0,235*** [0,003]		
<b>Somme</b>		0,259*** [0,003]	
<b>Education accomplie <sup>b</sup> :</b>			
<b>Lycée</b>			5,58*** [0,35]
<b>Collège</b>			14,59*** [0,36]
<b>R<sup>2</sup></b>	0,21	0,219	0,186
<b>N</b>	85 706	85 706	85 706

(a)- école obligatoire

(b)- comme en 2003. Les catégories d'éducation (mutuellement exclusive, collectivement exhaustive) sont : abandon du lycée ou moins, Diplômé du lycée, passage en Faculté ou plus. Les régressions incluent une constante aléatoire pour les filles.

<sup>30</sup> Malheureusement, nous n'avons pas les caractéristiques parentales concernant cet échantillon.

<sup>31</sup> En estimant les hommes et les femmes séparément, nous constatons un effet légèrement plus grand pour les femmes.

<sup>32</sup> Supposant que les notes observées sont les milieux des distributions uniformes (dans les catégories observées).

En ce qui concerne l'obtention du diplôme d'études secondaires, **Tableau VIII**, colonne 3, nous avons constaté que les diplômés du secondaire gagnaient, en moyenne, 19 pour cent de plus que les personnes sans diplôme d'études secondaires, ou en termes de position dans la distribution des revenus, une différence en centile de 5,6. Prenant notre réduction estimée de la probabilité d'obtenir un diplôme d'études secondaires de 2,9 pour cent, cela seul suffirait à prévoir une baisse de 0,5 pour cent dans les revenus de cette cohorte. Cette estimation est inférieure à celle prédite par les différences dans les notes de mathématiques, ce qui peut découler du fait qu'elle ne tient pas compte de la possibilité qu'il y ait également un effet sur la poursuite des études à l'université (un résultat qu'il est encore trop tôt pour mesurer)

Comme mentionné précédemment, une autre façon de quantifier le dommage est de noter que pour les mathématiques, la réduction estimée de performances pour la cohorte la plus touchée correspond à un retard d'une année complète lors de l'entrée à l'école (calculée en utilisant les coefficients sur les mois de naissances factices, non rapporté ici).

## **E.2. Europe**

La plus grande partie de l'Europe a reçu des retombées de niveau R1 ou au-dessus. Ou, plus précisément, la zone entre 5 et 50 degrés de longitude est, et 45 à 65 degrés de latitude nord, ainsi que la plus grande partie de l'Europe à l'Est de l'Italie [UNSCEAR, 2000, Figure 10]. Cette zone abrite environ 410 millions d'habitants.<sup>33</sup> Si nous supposons que la cohorte de naissance de 1986 a été de 1/100e de la population totale, et les naissances d'Août à Décembre représentent 5/12 de ces naissances, nous arrivons à 1,7 million d'enfants touchés. En supposant une perte de 1 pour cent de productivité avec un revenu annuel de 30 000 USD, cela se traduit par un demi-milliard USD (30 000 x 1,7M/100 €) de perte de productivité chaque année lorsque ces cohortes atteignent l'âge de travailler.

## **V. RÉPONSES COMPENSATOIRES ?**

Un compte rendu complet de dégâts de Tchernobyl en Suède comprendrait le coût d'un comportement préventif et celui d'investissements réparateurs. Le fait que nous trouvons des effets plus forts lorsque nous effectuons des comparaisons exclusivement dans la fratrie (**Tableaux V et VII**) souligne l'importance potentielle des réponses comportementales à une mauvaise santé ou à un dommage reçu. Dans notre contexte, ces comportements auraient eu lieu principalement pendant la période postnatale, car il n'était pas connu au moment de l'accident qu'un tel niveau d'exposition aux radiations engendrerait des dommages, ni qu'ils seraient disproportionnée pour les fœtus entre 8 et 25 semaines de gestation.<sup>34</sup> Dans le cas des dommages cognitifs observés, les investissements pourraient répondre aux dommages indépendamment du fait que ces dégâts aient été attribués à Tchernobyl. Ces investissements pourraient inclure des changements dans la disponibilité parentale et la contribution scolaire. A défaut de tenir compte des investissements de rattrapage dans la petite enfance, s'ils existent, cela conduirait à une sous-estimation des coûts, voir Harrington et Portney [1987] et Deschne et Greenstone [2007].<sup>35</sup>

Dans la section A, nous procédons à l'évaluation des réponses potentielles *les plus faciles à mesurer* à des dommages cognitifs radio-induits.<sup>36</sup> Dans la section B, nous étudions les réponses parentales et ce qui peut être déduit de nos données sur le processus de formation du capital humain. Nous n'avons aucune mesure des investissements parentaux et nous recourons donc à une approche indirecte : nous divisons l'échantillon d'après l'éducation parentale et nous constatons que des dégâts sont concentrés dans les familles à faible niveau d'éducation.

### **A. Dépenses d'Études**

Une façon possible de compenser les effets négatifs sur la performance scolaire est à travers des ressources supplémentaires des municipalités pendant l'enseignement primaire. Pour évaluer une telle réponse, nous considérons deux données d'études : (i) les dépenses scolaires moyennes par élève des municipalités

-----  
<sup>33</sup> Pour ce calcul, on soustrait de la population de 728 millions d'européens, 22 pour cent de population Russe (142 millions), les populations du Royaume-Uni, des Pays-Bas, de Belgique, France, Espagne, Portugal, Italie et Turquie. La Turquie (70 millions de personnes) est exclue, faute de données sur les retombées.

<sup>34</sup> Nous ne trouvons aucune preuve d'un comportement de protection dans nos données par rapport au lieu de naissance. Par exemple, il n'y a pas eu de changement dans la disposition naturelle des mères de niveau d'éducation élevé à donner naissance dans des zones de Suède à fort taux de rayonnement dans les mois suivant l'accident de Tchernobyl.

<sup>35</sup> Une approche alternative à l'estimation des coûts des accidents nucléaires / sécurité pourrait envisager le coût du logement près des réacteurs nucléaires avant et après l'accident de Tchernobyl par rapport aux zones plus éloignées, comme suggéré par Chay et Greenstone [2005] et Davis [2008].

<sup>36</sup> Nous avons également examiné si la probabilité et le moment d'arrivée des enfants suivants ceux touchés par l'exposition prénatale aux retombées de Tchernobyl avait changé- c'est-à-dire si l'expérience «quantité-qualité» s'était inversée. Contrairement à Rosenzweig et Wolpin [1988], nous n'avons pas détecté de modification systématique entre la naissance altérée et le comportement de fécondité ultérieure.

pendant les neuf ans où les enfants sont dans l'établissement secondaire financé par les municipalités, et (ii) le ratio élève-professeur moyen. Nous utilisons la spécification empirique suivante :

$$y_{it} = \sum_{i=1}^3 \gamma_i \times R_i \times I(86) + \sum_{i=1}^3 \delta_i \times R_i + \tau_t + \epsilon_{it}, \quad (4)$$

où les indices **i** et **t** représentent la municipalité et l'année, respectivement; **I(86)** est une variable factice qui égale 1 pour les années où la cohorte 1986 a l'âge de la scolarité obligatoire;  **$\tau$**  est un vecteur d'indicateurs d'année.

Nous incluons les années de données d'études pour les cohortes nées entre 1983 et 1988 (comme dans les résultats de scolarité obligatoire). Par exemple, la cohorte 1983 entre à l'école obligatoire en 1990 et la quitte en 1999, tandis que la cohorte 1986 entre en 1993 et sort en 2002. Ainsi, des données d'école annuelles au niveau de la municipalité couvrent les années 1990-2004 et le **I(86)** aléatoire est égal à **1** pour les années 1993-2002 et à **0** sinon.

Le **tableau IX** présente les résultats quand ce modèle est évalué sur des données de toutes les municipalités suédoises et quand aucune des évaluations de coefficient n'est significative. C'est-à-dire que nous ne détectons pas d'évidence de comportement compensatoire (ou de renforcement) par les ressources des écoles municipales.

**Tableau IX: Dépenses scolaires des municipalités, 1990-2004**

	Dépenses scolaires par élève	Ratio élève-professeur
<b>I (86) x</b>		
<b>R3</b>	3,02 [31,0]	0,70 [2,21]
<b>R2</b>	5,90 [19,4]	0,96 [1,31]
<b>R1</b>	10,79 [21,3]	0,65 [1,43]
<b>R<sup>2</sup></b>	0,34	0,32
<b>N</b>	2 307	1 707

Erreurs standard entre crochets

**I(86)** est un indicateur variable, de valeur 1 pour les années 1993-2002, et 0 par ailleurs

## B. Hétérogénéité dans les effets de l'éducation parentale

Le **Tableau X** présente les résultats quand nous divisons l'échantillon selon l'éducation du père. Le panneau supérieur présente les résultats pour ceux dont le père avait deux ans ou moins d'enseignement au lycée et le panneau du bas le reste de l'échantillon. **37** D'abord, nous notons que limiter la comparaison aux paires d'enfants de mêmes parents double la taille des effets estimés (voir **Tableau V**). Deuxièmement, ces effets sont concentrés parmi les étudiants dont les pères sont de bas niveau éducatif (voir **Tableau X**).

Pour le groupe de niveau d'enseignement faible, l'ordre de taille d'effet est préservé pour les Mathématiques et le suédois. Les évaluations de dégâts pour ceux dont des pères sont mieux instruits sont plus petites et statistiquement non significatives. Dans l'analyse d'indifférences-dans-la-différence, les dégâts sont aussi concentrés parmi des familles à bas niveau d'enseignement (résultats disponibles sur demande) **.38**

Comment interprétons-nous cette découverte que les dégâts sont concentrés parmi des familles à bas niveau d'éducation ? Une possibilité consiste en ce que les mieux instruits ont été moins affectés en 1986. Nous ne croyons pas cela probable. Le point de vue officiel alors (et maintenant) était que les doses de radiation en question étaient trop petites pour avoir un effet.

Par conséquent, notre point de départ est que les enfants ont subi un bouleversement négatif de leur capacité cognitive qui n'a pas varié systématiquement avec les caractéristiques parentales. Étant donné cette supposition, qu'est-ce qui peut expliquer le modèle observé ?

Nous considérons trois possibilités :

1. Tandis que le choc négatif sur la santé pourrait avoir été similaire, les niveaux d'atteinte initiale peuvent avoir été différents. Par exemple, ceux à meilleure instruction apparente avaient une capacité cognitive

**37** Les séparations ont été choisies pour créer des groupes de taille grossièrement égale.

**38** Pour des notes moyennes, la qualification et le suédois, les tests d'égalité d'effets à travers des groupes d'enseignement sont facilement rejetés

initiale plus élevée. S'il en est ainsi, tout ce dont nous avons besoin pour un effet de Tchernobyl plus petit sur le résultat mesuré est une diminution de productivité marginale, soit dans la production "de capacité innée," soit dans la transformation de cette capacité dans, disons, une note en Mathématique. Cette première possibilité assume un effet purement mécanique, sans réponse d'investissement (et n'explique pas les résultats plus forts dans des familles).

2. Il est possible que les parents aient répondu à la capacité cognitive observée. Ces réponses pourraient ou compenser (le fait de contrebalancer des différences de capacité produites par Tchernobyl) ou renforcer (variant positivement avec des différences de capacité) [Becker et Tomes, 1976]. En outre, les parents mieux instruits peuvent avoir réagi différemment à l'atteinte de capacité que les moins instruits. La concentration observée de dégâts parmi des enfants dont les parents ont un bas niveau d'éducation est compatible avec une plus grande réponse compensatoire par les parents à haut niveau d'éducation comparés aux parents à bas niveau d'éducation. Sinon, une réponse de renforcement plus petite par des parents à haut niveau d'éducation est aussi possible.

Des données supplémentaires sur les investissements parentaux étant absentes, il est difficile de discerner lequel de ces scénarios est plus probable. Le fait que les évaluations dans la fratrie des effets des dégâts de Tchernobyl sont plus grandes que les évaluations de différence-dans-les-différences suggère que le renforcement d'investissements puisse jouer un rôle.

La technologie de production (procédé de création?) peut aussi avoir façonné la réponse parentale aux dégâts de Tchernobyl. Des modèles économiques implicites supposent que : "la production de compétences à différentes étapes de l'enfance sont de parfaits substituts (parfaitement substituables?)" [Cunha et Heckman, 2007].

Ici, nous considérons le côté substituable entre les dégâts prénatals et les investissements postnatals dans la production de capacité cognitive. Si des investissements postnatals en capacité cognitive sont des remplaçants parfaits de prénatals, alors la période d'investissements pendant les étapes de l'enfance n'est pas très importante (escomptant de côté). Par contre, si les investissements postnatals sont un mauvais substitut des prénatals, alors l'altération de la trajectoire cognitive subie *in utero* est plus coûteuse (par exemple en termes de consommation prévue exigée pour investir). Dans le cas extrême de compléments de production parfaits, des investissements compensatoires seraient complètement inefficaces. En fait, la réponse optimale devrait renforcer des dégâts cognitifs prénatals. Dans cet exemple Leontief, "les premiers inconvénients devraient se perpétuer" pour des raisons d'efficacité [Cunha et Heckman, 2007].

Une réponse de renforcement est ainsi compatible avec une élasticité basse de substitution dans la production parmi les différentes étapes de l'enfance. **39**

3. Une troisième possibilité consiste en ce que les parents ont un niveau cible pour la réussite scolaire, par exemple que l'enfant atteigne le niveau parental. En outre, en l'absence de Tchernobyl, l'objectif est contraignant pour les enfants dont les parents ont un haut niveau d'éducation, mais pas pour les enfants de parents à niveau d'éducation faible. Après un choc de la taille de Tchernobyl, les enfants de parents à haut niveau d'éducation seraient plus loin de leur objectif que les enfants de parents à niveau d'éducation bas. Des parents à haut niveau d'éducation auraient beaucoup plus de remédiation pour agir après le choc de Tchernobyl que des parents à niveau d'éducation bas. Ici aussi, des dégâts plus grands seraient observés parmi les enfants de parents moins instruits. Cependant, à moins que ces objectifs varient dans les familles pour les fratries, nous ne nous attendons pas à de plus grandes évaluations de dégâts à partir de la comparaison des fratries.

Finalement, une littérature parallèle dans économie de la santé [Currie et Hyson, 1999, Currie et Moretti, 2007, Lin et al., 2007] a étudié si l'impact négatif d'une santé médiocre dans l'enfance sur l'accumulation de capital humaine ultérieure est plus important dans les familles à niveau d'éducation faible ou à revenus bas. En général, ces études trouvent les plus grands effets d'une santé médiocre parmi les familles à bas Statut socio-économique, compatibles avec nos découvertes pour les dégâts cognitifs. **Cependant, il est prouvé que "le taux de réalisation" d'états de santé ultérieurs est aussi plus élevé parmi des familles à bas Statut Socio-économique [Case et al., 2002, Currie et Stabile, 2003, Condliffe et Link, 2008]. Au contraire, nous ne nous attendons pas à ce que des chocs cognitifs ultérieurs soient corrélés avec l'exposition prénatale aux retombées de Tchernobyl.**

---

**39** L'hétérogénéité dans l'ampleur de réponse de renforcement parmi les familles est possible pour une haute complémentarité qui manque d'une (pour une) fonction de production Leontief.

## VI . VALIDITÉ EXTERNE

La validité externe de nos découvertes ne repose pas sur la probabilité "d'un autre Tchernobyl." Parmi les sources diverses de radiations ionisantes, l'applicabilité de nos résultats peut être à peu près organisée. Nous commençons par ce qui est le plus étroitement lié :

**1. Accidents de centrales nucléaires** On s'attend à des accidents majeurs de centrales nucléaires dans les 50 prochaines années. Ce n'est pas les avancées technologiques dans la conception des réacteurs depuis Tchernobyl qui vont éliminer efficacement le risque d'accidents futurs. Par exemple, une étude interdisciplinaire du MIT (Massachusetts Institute of Technology) (qui soutient énergiquement la construction de centrales nucléaires supplémentaire) conclut :

*"En ce qui concerne la mise en œuvre du scénario de croissance mondiale pendant la période 2005-2055, les données tant historiques que d'estimation de probabilités montrent une fréquence d'accidents inacceptable. Le nombre attendu d'accidents avec fonte du cœur dans ce scénario [de construction accrue de réacteurs] avec la technologie actuelle serait de 4."*

Comme "les dégâts d'un cœur de réacteur ont le potentiel de libérer de la radioactivité dans l'air et l'eau souterraine," [Sharp, 2003, p. 48] nos découvertes sont potentiellement pertinentes pour les personnes enceintes sous le vent (et pas seulement à proximité) des accidents futurs. De plus, la recrudescence récente d'intérêt pour la production d'électricité nucléaire, due autant à l'augmentation du prix de l'énergie qu'aux préoccupations concernant le réchauffement climatique, a rendu "le scénario de croissance mondiale" préconisé par Sharp [2003] plus probable.

Début octobre 2008, 38 nouvelles centrales nucléaires étaient en construction, surtout en Chine, Inde, ou Russie **40**. Aux EU, la Loi de Politique énergétique de 2005 offre des primes Fédérales et des garanties de prêt pour les centrales nucléaires (Wall Street Journal, "*Deuxième développement de l'énergie Nucléaire?*" 5 septembre 2007). En signant le projet de loi en 2005, le Président Bush a annoncé : "*Nous commencerons à construire de nouvelles centrales nucléaires vers la fin de cette décennie.*" **41**

Une part de réponse efficace à un accident futur pourrait inclure la diffusion rapide des informations concernant la localisation du panache et la probabilité de pluie : "*Une deuxième leçon clé de Tchernobyl pour le monde est que le transport atmosphérique des désastres entraîne des impacts extrêmement variables, dépendant fortement des précipitations locales ... et des modèles de dispersion*" [Hohenemser, 1988] **42** Se réfugier à l'intérieur est fort efficace pour réduire l'irradiation [Finck, 1991]. En termes de revenus de travail obtenus, cela aurait été rentable pour les femmes de Suède qui étaient enceintes pendant l'accident de rester à l'intérieur pendant 2 semaines : avec des suppositions conservatrices, le taux interne de retour de cette protection était de 6 % (voir **Annexe B** pour détails). Ainsi, si un accident nucléaire arrivait, nos découvertes suggèrent que des femmes enceintes entre les semaines 8 et 25, dans une zone de dépôt humide puissent être avisées d'avoir à s'abriter à l'intérieur. La force de la première étape des évaluations IV (et l'ampleur de nos estimations 2SLS) soulignent l'importance des dépôts humides immédiatement après un accident.

**2. Des attaques nucléaires** Il est évidemment difficile d'évaluer la probabilité d'attaque future. Ce qui est plus certain est que due à une explosion nucléaire ou à un dispositif terroriste de dispersion de radioéléments (c'est-à-dire, "une bombe sale"), une attaque "*viserait probablement une zone publique, probablement dans un milieu urbain*" [Valentin, 2006] et ainsi serait plus destructrice, toutes choses égales par ailleurs, qu'un accident nucléaire. De plus, parce que "*des explosions Nucléaires produisent des mouvements aériens, qui dispersent les substances radioactives*" [Vogel, 2007], ceux-ci peuvent entraîner de substantiels dommages pour la santé tant dans la zone ciblée que plus loin. On peut s'attendre à ce que ces dégâts cognitifs surviennent pour des doses d'un ordre de grandeur plus bas que ceux évalués à Nagasaki et Hiroshima.

**3. Le radon** En plus de l'inclusion de la plus grande partie de l'irradiation naturelle, la distribution de l'exposition au Radon de la population est très variable. Par exemple, Price et Gelman [2004] ont constaté que la concentration moyenne de radon dans des résidences américaines a une moyenne de  $\log(0,67)$  pCi/L et un écart-type de  $\log(3,1)$  **43**

---

**40** Répartition comme suit : Argentine 1, Bulgarie 2, Chine 6, Taïwan 2, Finlande 1, Inde 6, Iran 1, France 1, Japon 2, Pakistan 1, Russie 8, Corée du Sud 4, Ukraine 2, États-Unis 1.

Http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html

**41** <http://www.whitehouse.gov/news/releases/2005/08/20050808-6.html>

**42** De plus, dans des accidents de centrale nucléaire, "la part de radionucléides à longue demi-vie est plus grande que dans les explosions nucléaires" [Vogel, 2007], quoique les deux relâchent des radionucléides à vie courte.

**43** 1 pCi/l correspond à 37 Bq/m<sup>3</sup>

À la lumière de ce qui précède, les doses de radon peuvent être élevées par comparaison à celles des retombées de Tchernobyl. En 1986, Hůlka et Malátová [2006] ont pris des mesures de radiation *in vivo* en Tchécoslovaquie (mesure directe "organisme entier").<sup>44</sup> Les doses de radiation de "l'exposition naturelle intérieure étaient souvent plus élevées que l'exposition extérieure à l'impact de Tchernobyl", *même au cours de l'été 1986*. Comme une barrière de protection aurait tendance à augmenter l'exposition au radon, nos découvertes suggèrent que les efforts de remédiation (par exemple, la ventilation de sous-sols) puissent être augmentés.

**4. Radiation Médicale** Les doses médicales actuelles peuvent être substantielles, particulièrement pour les scanners de Tomographie Informatique (CT) Les doses moyennes à l'organisme) entier sont entre 10 et 40 mGy (en gros d'un ordre de grandeur plus élevé que la dose évaluée de Tchernobyl pour la Suède). Parce que la durée d'exposition est plus courte pour les radiographies médicales et les scanners CT qu'après Tchernobyl on devrait s'attendre à ce que l'irradiation par une dose médicale donnée cause plus de dommages.<sup>45</sup> Les plus fortes doses de radiation au fœtus viennent des CXT scans pelvien et de l'abdomen de la mère (10 à 25 mGy), des procédures de médecine nucléaire et de lavement au Baryum (70 mGy) [DeSantis et all., 2005]

Un avantage d'étudier la radiation médicale elle-même consiste en ce que les irradiations sont directement mesurables au niveau individuel. Un inconvénient est la faiblesse de base dans les moyens de recherche utilisés pour les études <sup>46</sup>

Dans la mesure où le déficit intellectuel est concerné ( manifestation de dégâts cognitifs typiquement considérée), la pratique actuelle en radiologie envisage la relation avec le déficit intellectuel d'être "déterministe", où la probabilité de dégâts est de zéro aux petites doses de radiation, "mais au-dessus d'un certain niveau de dose, appelé *dose seuil*, la probabilité augmente rapidement avec la dose jusqu'à 100 %" [Hall et Giaccia, 2005]. On considère que ce seuil se situe "à environ 0,1 à 0,2 Gy," [le Hall et Giaccia, 2005] c'est-à-dire, 100-200 mGy. Au contraire, les radiations sont supposées avoir un effet "stochastique" sur le cancer (relation dose-réponse sans seuil). Quantifier la relation dose-réponse pour des dégâts cognitifs aux faibles doses est au-delà de la portée de notre travail de recherche, mais est suggérée par nos découvertes <sup>47</sup>

Plus généralement, nos découvertes suggèrent que les radiations endommagent les capacités cognitives et donc le capital humain aux doses actuellement considérées comme sûres.<sup>48</sup> Comme indiqué ci-dessus, la dose maximale pour la population suédoise a été évaluée à 4 mSv la première année [Edvarson, 1991a]. Si cette évaluation est exacte, [la dose] est bien plus basse que les doses étudiées à Hiroshima et Nagasaki (autour de 40 mSv) <sup>49</sup> et est comparable aux doses annuelles de rayonnement de fond (autour de 6 mSv). Nos découvertes contrastent avec celles de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, qui a conclu : "l'impact sur la santé mentale de Tchernobyl est le plus grand problème de santé publique entraîné par l'accident à ce jour" [AIEA, 2006] :36. Comme la Suède a reçu juste 5 % de retombées de Tchernobyl, la recherche future pourrait évaluer si [les enfants] nés dans d'autres pays européens ont été semblablement affectés.,

-----  
<sup>44</sup> Ce qui permet d'identifier les sources de radiation en distinguant parmi des radionucléides spécifiques.

<sup>45</sup> "En général, des expositions prolongées aux rayons X ou  $\gamma$  sont associées à des risques inférieurs que ceux d'une exposition aiguë à la même dose totale, tant pour le cancer que pour d'autres résultats" [Brenner et all., 2003].

<sup>46</sup> La recherche épidémiologique sur l'exposition prénatale aux radiations médicales s'est concentrée sur les conséquences à la naissance. Par exemple, l'étude par Hujoel et all. [2004], publiée dans le JAMA, a lié radiographies dentaires *ante partum* et poids de naissance bas. Cependant, les caractéristiques observables diverses de mères subissant des radiographies dentaires étaient plus mauvaises (par exemple, plus probablement elles fumaient ou recevaient des soins prénatals inadéquats). Des problèmes semblables gênent des travaux précédents reliant les radiographies médicales à un poids de naissance réduit (par exemple, Hamilton et all. [1984]). Peut-être du fait de ces faiblesses, il n'y a aucun consensus sur le fait que les irradiations médicales prénatales (couramment pratiquées) soient généralement dangereuses.

<sup>47</sup> A cette fin, collaborent Johanna Adami et Magnus Kaijser (Institut Karolinska, Unité d'Épidémiologie Clinique) pour évaluer la natalité et les résultats de scolarité ultérieurs d'environ 1 700 enfants nés dans les années 1980 dont les mères avaient eu des examens radiographiques pelviens pendant la grossesse (de tels examens étaient utilisés en routine à cette période pour déterminer le besoin de césarienne). En plus de l'application des doses de radiations prénatales individuelles aux résultats scolaires, ce projet utilisera des accouchements par le siège comme un groupe témoin pour l'exposition à l'irradiation.

<sup>48</sup> Selon le PNUD/UNICEF, dans leur rapport "les Conséquences Humaines de l'accident nucléaire de Tchernobyl", seules les 6 municipalités les plus touchées de Suède seraient considérées comme "contaminées" bien que pas à un niveau associé à un quelconque risque objectif pour la santé : " les radiations n'entraînent de risques sérieux pour la santé d'aucun groupe particulier. Des activités économiques peuvent être gênées par l'association indirecte avec Tchernobyl. "PNUD/UNICEF [2002] :tableau 3.4.

<sup>49</sup> Dans une extrapolation linéaire d'Otaka et Schull [1998], une réduction de 30 points de quotient intellectuel par Gy (supposant une conversion de 1 pour 1 en Sv), implique un effet négligeable ( $4 \times 30/1000=0,12$  points maximum). Cependant le scepticisme au sujet des effets d'un tel bas niveau de radiation ionisante caractérise l'opinion consensuelle [ICRP, 2005, BEIR, 2006]. L'ampleur de nos découvertes est, cependant, en accord avec l'étude d'Ofstedal de performance scolaire après les retombées des essais nucléaires [Ofstedal, 1989, 1991]

## Références



Douglas **Almond**, Lena Edlund, and Mårten Palme. Chernobyl's subclinical legacy: Prenatal exposure to radioactive fallout and school outcomes in Sweden. *NBER Working Paper No. 13347*, August 2007.

Joshua D. **Angrist** and Jörn-Steffen Pischke. *Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2008. forthcoming.

Anssi **Auvinen**, Mikko Vahteristo, Hannu Arvela, Matti Suomela, Tua Rahola, Matti Hakama, and Tapio Rytmaa. Chernobyl fallout and outcome of pregnancy in Finland. *Environmental Health Perspectives*, 109(2):179-185, February 2001.

Spencer **Banzhaf** and Randall P. Walsh. Do people vote with their feet? an empirical test of Tiebout. *The American Economic Review*, 98(3):843-63, June 2008.

Gary S. **Becker** and Nigel Tomes. Child endowments and the quantity and quality of children. *The Journal of Political Economy*, 84(4):S143-S162, August 1976.

**BEIR**. *Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII, Phase 2*. National Academies Press, Washington, D.C., 2006. Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, National Research Council.

D.J. **Brenner**, R. Doll, D.T. Goodhead, E.J. Hall, and et al. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: Assessing what we really know. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(24):13761-13766, November 25 2003.

Anne **Case**, Darren Lubotsky, and Christina Paxson. Economic status and health in childhood: The origins of the gradient. *American Economic Review*, 92(5):1308, December 2002.

Kenneth Y. **Chay** and Michael Greenston. Does air quality matter? evidence from the housing market. *Journal of Political Economy*, 113(2):376-424, April 2005.

David St **Clair**, Mingqing Xu, Peng Wang, Yaqin Yu, Yoorong Fang, Feng Zhang, Xiaoying Zheng, Niufan Gu, Guoyin Feng, Pak Sham, and Lin H. Rates of adult schizophrenia following prenatal exposure to the Chinese famines of 1959-1961. *Journal of the American Medical Association*, 294(5):557-562, August 2005.

Simon **Condliffe** and Charles R. Lin. The relationship between economic status and child health: Evidence from the United States. *The American Economic Review*, 98(4):1605-1618, September 2008.

Flavio **Cunha** and James J. Heckman. The technology of skill formation. *American Economic Review*, 97(2):31-47, May 2007.

Janet **Currie** and Rosemary Hyson. Is the impact of shocks cushioned by socioeconomic status? the case of low birth weight. *American Economic Review*, 89(2):245-250, May 1999.

Janet **Currie** and Enrico Moretti. Biology as destiny? short- and long-run determinants of intergenerational transmission of birth weight. *Journal of Labor Economics*, 25(2): 231-263, April 2007.

Janet **Currie** and Mark Stabil. Socioeconomic status and child health: Why is the relationship stronger for older children? *The American Economic Review*, 93(5):1813-1823, December 2003.

Lucas W. **Davis**. The effect of power plants on local housing values and rents: Evidence from restricted census microdata. manuscript, University of Michigan, July 2008.

Rajeev **Dehejia** and Adriana Lleras-Muné. Booms, busts, and babies' health. *The Quarterly Journal of Economics*, 119(3):1091-1130, August 2004.

M. **DeSantis**, E. DiGianantonio, G. Straface, A.F. Cavaliere, A. Caruso, F. Schiavon, R. Berletti, and M. Clement. Ionizing radiations in pregnancy and teratogenesis: A review of literature. *Reproductive Toxicology*, 20(3):323-329, September-October 2005.

Olivier **Deschnes** and Michael Greenstone. Climate change, mortality, and adaptation: Evidence from annual fluctuations in weather in the US. *NBER Working Paper No. 13178*, June 2007.

Lennart **Devell**. Composition and properties of plume and fallout materials from the Chernobyl accident. In Leif Moberg, editor, *The Chernobyl Fallout in Sweden, Results from a Research Programme on Environmental Radiology*. The Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, 1991.

Stephen G. **Donald** and Kevin Lang. Inference with difference-in-differences and other panel data. *Review of Economics and Statistics*, 89(2):221-233, May 2007.

Kay **Edvarson**. External doses in Sweden from the Chernobyl fallout. In Leif Moberg,

- editor, *The Chernobyl Fallout in Sweden, Results from a Research Programme on Environmental Radiology*. The Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, 1991a.
- Kay **Edvarson**. Fallout over Sweden from the Chernobyl accident. In Leif Moberg, editor, *The Chernobyl Fallout in Sweden, Results from a Research Programme on Environmental Radiology*. The Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, 1991b.
- Anders **Ericson** and Bengt Käll´e. Pregnancy outcome in Sweden after the Chernobyl accident. *Environmental Research*, 67(2):149-159, 1994.
- Robert **Finck**. Shielding factors for gamma radiation. experiments and calculations for Swedish dwellings. In Leif Moberg, editor, *The Chernobyl Fallout in Sweden, Results from a Research Programme on Environmental Radiology*. The Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, 1991.
- Peter **Gluckman** and Mark Hanso. *The Fetal Matrix: Evolution, Development and Disease*. Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- Eric J. **Hall** and Amato J. Giacci. *Radiobiology for the Radiologist*. Lippincott Williams & Wilkins, 6th edition, 2005.
- PM **Hamilton**, PL Roney, KG Keppel, and PJ Placek P. Radiation procedures performed on U.S. women during pregnancy: findings from two 1980 surveys. *Public Health Reports*, 99(2):146-151, March-April 1984.
- Winston **Harrington** and Paul R. Portney. Valuing the benefits of health and safety regulation. *Journal of Urban Economics*, 22(1):101-112, July 1987.
- Christoph **Hohenemser**. The accident at chernobyl: Health and environmental consequences and the implications for risk management. *Annual Review of Energy*, 13: 383-428, 1988.
- M. **Holmberg**, K. Edvarson, and R. Finc. Radiation doses in Sweden resulting from the Chernobyl fallout: A review. *International Journal of Radiation Biology*, 54(2): 151-166, 1988.
- PP **Hujoel**, AM Bollen, CJ Noonan, and MA del Aguil. Antepartum dental radiography and infant low birth weight. *Journal of the American Medical Association*, 291 (16):1987-1993, April 2004.
- J. **Hůlka** and I. Malátov. A comparison of exposure due to Chernobyl accident and radon exposure in the Czech republic. manuscript, National Radiation Protection Institute, 2006.
- IAEA**. Chernobyl 's legacy: Health, environmental and socio-economic impacts and recommendations to the governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. Technical report, International Atomic Energy Agency, 2006. <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf>.
- ICRP**. *2005 Recommendations of the International Committee on Radiation Protection*. 2005. (Draft for Consultation).
- Mats **Isaksson**, Bengt Erlandsson, and Maj-Lena Linderson. Calculations of the deposition of 137cs from nuclear bomb tests and from the chernobyl accident over the province of skne in the southern part of sweden based on precipitation. *Journal of Environmental Radiology*, 49:97-112, 2000.
- Per Einar **Kjelle**. Gamma monitoring stations annual reports 1985-1986. Technical Report SSI-rapport 87-08, National Insitute of Radiation Protection, Statens Strålskyddsinstitut, Stockholm, March 1987.
- Y. **Kolominsky**, S. Igumnov, and V. Drozdovitch. The psychological development of children from Belarus exposed in the prenatal period to radiation from the Chernobyl atomic power plant. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 40(2):299-305, 1999.
- GI **Laziuk**, IO Zatsepin, P Verger, V Gagniere, E Robert, ZhP Kravchuk, and RD Khmel. Down syndrome and ionizing radiation: Causal effect or coincidence. *Radiatsionnaia Biologiya, Radioecologiya*, 42(6):678-683, November-December 2002.
- Ming-Jen **Lin**, Jin-Tan Liu, and Shin-Yi Chou. As low birth weight babies grow, can well-educated parents buffer this adverse factor? a research note. *Demography*, 44(2): 335-343, May 2007.
- Tatiana N. **Loganovskaja** and Konstantin N. Loganovsky. EEG, cognitive and psychopathological abnormalities in children irradiated in utero. *International Journal of Psychophysiology*, 34:213-224, 1999.
- David **Loughran**, Ashlesha Datar, and Rebecca Kilburn. The response of household parental investment to child endowments. *Demography*, 2008. forthcoming.

- Günther **Lüning**, Jens Scheer, Michael Schmidt, and Heiko Ziggel. Early infant mortality in West Germany before and after Chernobyl. *The Lancet*, 8671:1081–1083, November 1989.
- Soren **Mattsson** and Raine Vesanen. Patterns of Chernobyl rainfall in relation to local weather conditions. *Environment International*, 14:177–180, 1988.
- Leif **Moberg**. In Leif Moberg, editor, *The Chernobyl Fallout in Sweden*, Results from a Research Programme on Environmental Radiology. The Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, 1991.
- Richard S. **Nowakowski** and Nancy L. Hayes. Radiation, retardation and the developing brain: Time is the crucial variable. *Acta Paediatrica*, 97(5):527–531, May 2008.
- Angelina I. **Nyahu**, Konstantin N. Loganovsky, and Tatiana K. Loganovskaja. Psychophysiological aftereffects of prenatal irradiation. *International Journal of Psychophysiology*, 30:303–311, 1998.
- Per **Oftedal**. Scholastic achievement in relation to fetal exposure to radioactive fallout in Norway. In K. F. Baverstock and J.W. Stather, editors, *Low Dose Radiation*, pages 343–353. Taylor & Francis, London, 1989.
- Per **Oftedal**. Biological low-dose radiation effects. *Mutation Research*, 258(2):191–205, September 1991.
- M. **Otake** and W.J. Schull. In utero exposure to a-bomb radiation and mental retardation. a reassessment. *British Journal of Radiology*, 57:409–414, 1984.
- M. **Otake** and W.J. Schull. Review: Radiation-related brain damage and growth retardation among the prenatally exposed atomic bomb survivors. *International Journal of Radiation Biology*, 74:159–171, 1998.
- Mark **Peplow**. Special report: Counting the dead. *Nature*, 440(7087):982–983, April 2006.
- Philip N. **Price** and Andrew Gelman. Should you measure the radon concentration in your home? manuscript, Department of Statistics, Columbia University, January 2004.
- Mark R. **Rosenzweig** and Paul T. Schultz. Market opportunities, genetic endowments, and intrafamily resource distribution: Child survival in rural India. *The American Economic Review*, 72(4):803–815, September 1982.
- Mark R. **Rosenzweig** and Kenneth I. Wolpin. Heterogeneity, intrafamily distribution and child health. *Journal of Human Resources*, XXIII(4):437–461, fall 1988.
- Mark R. **Rosenzweig** and Junsen Zhang. Do population control policies induce more human capital investment? Twins, birthweight, and China's 'One Child' policy. *Review of Economic Studies*, forthcoming 2008.
- Hagen **Scherb**, Eveline Weigelt, and Irene Brückus-Hohlfeld. Europe an stillbirth proportions before and after the Chernobyl accident. *International Journal of Epidemiology*, 28(5):932–940, October 1999.
- Phil **Sharp**. *The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study*. MIT, Cambridge, 2003.
- K **Sperling**, J Pelz, R-D Wegner, A Dorries, A Gruters, and M Mikkelsen. Significant increase in trisomy 21 in Berlin nine months after the Chernobyl reactor accident: temporal correlation or causal relation? *British Medical Journal*, 309(6948):158–162, July 1994.
- UNDP/UNICEF**. The human consequences of the Chernobyl nuclear accident: A strategy for recovery. Report 240102 (available online: <http://www.undp.org/dpa/publications/chernobyl.pdf>), 2002.
- UNSCEAR**. Report to the General Assembly: Sources and Effects of Ionizing Radiation, volume II, Annex J. United Nations, (<http://www.unscear.org/docs/reports/annexj.pdf>) New York, 2000.
- Jack **Valentin**. *Protecting People Against Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack*, volume 96 of *International Commission on Radiological Protection series*. Elsevier, 2006.
- H. **Vogel**. Rays as weapons. *European Journal of Radiology*, 63:167–177, 2007.

## Appendice A

**Le Becquerel (symbole Bq)** est l'unité de radioactivité dérivée du Système International, définie comme l'activité d'une quantité de matière radioactive dans laquelle un noyau se désintègre par seconde. La radioactivité ainsi exprimée doit aussi spécifier le radionucléide en cause et l'unité (c.à d. m2, m3 ou autre) signifiante. Le becquerel remplace l'ancienne unité, le Curie (Ci), qui correspond grossièrement à l'activité de 1 gramme de l'isotope de radium Ra-226 et 37 kBq correspond à 1<sup>1</sup> Ci. Les zones où les mesures dépassent 37 kBq Cs-137/m2 (ou 1 Ci/km<sup>m</sup>) sont appelées "contaminées" [UNSCEAR, 2000].

**[1 Ci = 37 000 000 Bq]**

Les éléments ci-dessous reposent fortement sur Hall et Giaccia [2005].

**La dose Absorbée mesurée en Gray (Gy)** est l'absorption d'un joule d'énergie de radiation par un kilogramme de matière. Un gray est équivalent à 100 rad.

**Le sievert (Sv)** mesure la dose équivalente, qui est le produit de dose absorbée par un facteur de radiation qui pour les rayons X et gamma est de un, rendant ainsi le Sv numériquement équivalent au Gy pour ces types de radiation.

**L'efficacité biologique relative (EBR)** est l'inverse de la dose d'une radiation particulière nécessaire pour produire le même effet biologique qu'une dose de 250-kV de rayons X. L'EBR dépend de la dose, du type de radiation, du tissu impliqué et de la manière dont la dose est délivrée (le nombre et la durée des irradiations)

**[ EBR = Dref / Dr avec : Dref: dose de référence et Dr: dose du rayonnement ]**

Table XI: Descriptive Statistics Compulsory School

Variable	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Qualify to HS	.91	.284	0	1
Grade Average	12.78	3.97	0	20
Math	11.96	4.66	0	20
Swedish	12.72	4.70	0	20
inutero	.06	.246	0	1
R0	.03	.176	0	1
R1	.25	.435	0	1
R2	.68	.466	0	1
R3	.03	.178	0	1
I-131 (municipality)	44.96	114.186	3.26	627.2
Cs-134 (municipality)	4.61	11.003	.12	53.66
Cs-137 (municipality)	4.86	8.999	.3	64.05
Cs-137 (county)	4.93	7.546	1.00	32.26
Male	.51	.499	0	1
Mother's Education:				
6-year Compulsory	.02	.169	0	1
9-year Compulsory	.17	.378	0	1
2-year HS	.43	.495	0	1
3-year HS	.09	.287	0	1
Some College	.16	.368	0	1
3-year College	.10	.312	0	1
Graduate Degree	.00	.042	0	1
Father's Education:				
6-year Compulsory	.06	.241	0	1
9-year Compulsory	.18	.388	0	1
2-year HS	.36	.482	0	1
3-year HS	.11	.324	0	1
Some College	.11	.323	0	1
3-year College	.13	.342	0	1
Graduate Degree	.01	.09	0	1
Labor Market (County):				
Unemployment Rate	.02	.008	.002	.05
Employment Rate	.80	.030	.72	.87

N = 551,630.

Table XII: Descriptive Statistics High School

Variable	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Graduate HS	.73	.44	0	1
Grade Average	14.19	2.97	0	20
Math	13.27	4.53	0	20
Swedish	13.93	3.88	0	20
inutero	.080	.272	0	1
R0	.030	.173	0	1
R1	.246	.431	0	1
R2	.689	.462	0	1
R3	.032	.177	0	1
male	.495	.499	0	1
Mother's Education:				
6-year Compulsory	.027	.1622	0	1
9-year Compulsory	.146	.3539	0	1
2-year HS	.111	.314	0	1
3-year HS	.392	.488	0	1
Some College	.171	.376	0	1
3-year College	.133	.340	0	1
Graduate Degree	.016	.126	0	1
Father's Education:				
6-year Compulsory	.064	.245	0	1
9-year Compulsory	.169	.375	0	1
2-year HS	.012	.111	0	1
3-year HS	.444	.496	0	1
Some College	.131	.337	0	1
3-year College	.146	.353	0	1
Graduate Degree	.031	.174	0	1
Labor Market (County):				
Unemployment Rate	.021	.008	.00	.05
Employment Rate	.805	.029	.72	.87

N = 325,255 (except for Graduate HS, where N = 444,583).

Table XIII: Means of Control Variables by Region

Variable	Region:			
	R0	R1	R2	R3
<b>Mother's Education:</b>				
6-year Compulsory	0.015	0.032	0.029	0.019
9-year Compulsory	0.127	0.156	0.18	0.191
2-year HS	0.517	0.386	0.445	0.455
3-year HS	0.088	0.105	0.085	0.082
Some College	0.155	0.178	0.156	0.158
3-year College	0.094	0.137	0.1	0.092
Graduate Degree	0	0.002	0.001	0
<b>Father's Education:</b>				
6-year Compulsory	0.034	0.048	0.069	0.046
9-year Compulsory	0.117	0.168	0.194	0.198
2-year HS	0.482	0.33	0.375	0.417
3-year HS	0.128	0.136	0.113	0.107
Some College	0.112	0.132	0.114	0.116
3-year College	0.12	0.172	0.124	0.11
Graduate Degree	0.004	0.01	0.009	0.002
<b>Labor Market (County):</b>				
Unemployment Rate	0.04	0.014	0.02	0.024
Employment Rate	0.748	0.836	0.803	0.788

*Compulsory School Sample*

## Annexe B

Considérant l'extension géographique de la contamination du sol et le fait que la plus grande partie de l'exposition à l'irradiation a eu lieu dans les deux premières semaines, bien avant que n'importe quelle carte détaillant les retombées soit disponible, il n'est pas évident que les évacuations au-delà de ce qui a été réalisé (zone d'exclusion mentionnée ci-dessus) aient été justifiées. Les gens doivent aller quelque part. De plus, le voyage par la route avec un trafic dense probable apporte ses propres risques.

Une proposition peut-être plus pratique aurait été pour la population en danger de rester confinée à l'intérieur dans la mesure du possible, ce que l'on n'a pas recommandé à l'époque, ni indiqué a posteriori [Moberg, 1991]. Les immeubles d'habitation ont été estimés fournir jusqu'à 99% de protection, selon les matières utilisés et leur structure [Finck, 1991].<sup>50</sup>

En assumant que le coût de confinement est assimilé à la perte de revenu du travail d'un travailleur à plein temps, ceci s'élève à 4 % de productivité (2/50). En outre, supposez que cette action aboutit à un gain de 1 % dans la productivité adulte et que l'enfant travaillera entre 25 et 65 ans et aura la même productivité de base que sa mère (supposition conservatrice, puisque la moitié des enfants sont des garçons et qu'aucune croissance de productivité n'est assumée). Dans ce cas, le taux interne de retour est de 6 %.<sup>51</sup> Si nous pensons à 6 % comme étant un taux de retour raisonnable, une autre façon d'évaluer le coût monétaire de dégâts prénatals en raison de Tchernobyl est un coût de deux semaines de confinement pour environ 1,7 millions de femmes qui étaient enceintes de 8 à 25 semaines à l'époque. En assumant que des coûts sont ceux d'un revenu à plein temps et un revenu annuel de 30 000 \$ US, nous arrivons à une valeur de 2 milliards de dollars US (30 000 x 0,04 x 1,7M).

-----  
<sup>50</sup> En supposant une maison sans radon.

<sup>51</sup> En supposant la possibilité de coûts plus faible, soit 2 % de revenus (par exemple de femmes enceintes travaillant seulement à 50 pour cent), on augmente le taux interne de retour à 8 %.