

Doug Bruges  
Aaron Datesman

# Les secrets honteux de l'énergie nucléaire à l'ère du Changement climatique

Préface de Helen Caldicott

OPEN ACCESS



Springer

Les secrets honteux de l'énergie  
nucléaire à l'ère du changement climatique

Doug Brugge • Aaron Datesman

Les secrets obscurs du nucléaire

Le pouvoir à l'ère du changement climatique

Préface de Helen Caldicott

 Springer

Doug Bruges  
Université du Connecticut  
Farmington, Connecticut, États-Unis

Aaron Datesman  
Université de Virginie  
Washington, DC, États-Unis



ISBN 978-3-031-59594-3 <https://doi.org/10.1007/978-3-031-59595-0>

ISBN 978-3-031-59595-0 (eBook)

© L'éditeur(s) (le cas échéant) et l'auteur(s) 2024, publication corrigée 2024  
Ce livre est une publication en libre accès.

Accès libre Ce livre est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou format, à condition de créditer l'auteur(s) d'origine et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été apportées.

Les images ou autres éléments tiers contenus dans ce livre sont inclus dans la licence Creative Commons du livre, sauf indication contraire dans une ligne de crédit du matériel. Si le matériel n'est pas inclus dans la licence Creative Commons du livre et que votre utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation légale ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement du détenteur des droits d'auteur.

L'utilisation de noms descriptifs généraux, de noms enregistrés, de marques commerciales, de marques de service, etc. dans cette publication n'implique pas, même en l'absence d'une déclaration spécifique, que ces noms sont exemptés des lois et réglementations de protection pertinentes et donc libres d'utilisation générale.

L'éditeur, les auteurs et les rédacteurs peuvent supposer que les conseils et informations contenus dans ce livre sont considérés comme vrais et exacts à la date de publication. Ni l'éditeur, ni les auteurs ou les rédacteurs ne donnent de garantie, expresse ou implicite, concernant le contenu du présent ouvrage ou pour toute erreur ou omission qui aurait pu y être commise. L'éditeur reste neutre à l'égard des revendications juridictionnelles figurant dans les cartes publiées et des affiliations institutionnelles.

Cette empreinte Springer est publiée par la société Springer Nature Switzerland AG enregistrée  
L'adresse enregistrée de la société est : Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Suisse

Si vous jetez ce produit, veuillez recycler le papier.

Dédié à la mémoire du professeur Steven  
Wing de l'Université de Caroline du Nord,  
Chapel Hill.

## Avant-propos

Ce livre, *Dirty Secrets of Nuclear Power in an Era of Climate Change*, est une explication scientifique impérative des raisons pour lesquelles l'énergie nucléaire n'est PAS la réponse au réchauffement climatique.

Il commence par expliquer soigneusement les mécanismes complexes du réchauffement climatique et la menace permanente qui pèse sur la vie biologique, et pourquoi certaines personnes pensent que l'énergie nucléaire sera la solution évidente à ce dilemme créé par l'homme.

Le livre se penche ensuite sur l'histoire médicale et les tragédies humaines associées à l'ensemble du cycle du combustible nucléaire, depuis l'extraction de l'uranium jusqu'aux émissions radioactives de routine des réacteurs nucléaires, en passant par les tragédies des fusions, et jusqu'à la menace associée de guerre nucléaire imposée par l'énergie nucléaire, car les pays peuvent fabriquer des armes nucléaires à partir de leurs déchets nucléaires.

Il décrit ensuite la tragédie imposée aux générations futures par des millions de tonnes de déchets radioactifs cancérogènes, qui pollueront l'eau et les chaînes alimentaires pour le reste des temps, induisant ainsi des mutations génétiques obligatoires aléatoires.

Et enfin, il contient une explication lucide et scientifique des radiations dites « à faible dose » et de leur relation évidente avec le cancer, ainsi que de l'ignorance sournoise de ce sujet perpétrée auprès du grand public par les bastions de la toute-puissante industrie nucléaire.

Président émérite de Physicians for Social  
Responsabilité — Prix Nobel de la paix 1985  
Melbourne, Australie

Hélène Caldicott

# Prologue

L'un d'entre nous (Brugge) a interviewé James Hansen, l'une des premières personnes à avoir alerté sur les dangers du changement climatique, en 1988. Il était, à l'époque, directeur du Goddard Institute for Space Studies de la NASA à New York.

Hansen s'est fait connaître sur la scène nationale cette année-là après son témoignage au Congrès sur le changement climatique. À bien des égards, son témoignage a été le coup d'envoi de décennies de peur, d'inquiétude, de débat et de controverse.

Aujourd'hui, Hansen reste un fervent défenseur de la cause climatique et continue de promouvoir des réponses vigoureuses. Au cours de sa carrière, les dommages sont devenus plus évidents et l'on s'attend à ce que les conséquences futures soient de plus en plus importantes. Cette année, en 2023, il a publié un article controversé, couvert par le New York Times, affirmant que le changement climatique se produit plus rapidement et que ses conséquences sont plus imminentes que le consensus scientifique (Wallace-Wells, 2023).

Malgré notre admiration pour Hansen et notre ouverture à ses inquiétudes quant à la gravité du changement climatique, nous nous trouvons en désaccord avec lui sur un aspect crucial. Dans son article le plus récent, il continue de voir un rôle important pour l'énergie nucléaire dans la limitation du changement climatique (Hansen et al., 2023). Contrairement à Bill McKibben, un autre pilier des discussions et des luttes sur les facteurs anthropiques des températures mondiales, Hansen considère le nucléaire comme un élément essentiel de la lutte.

Nous espérons, à travers les éléments présentés dans ce livre, vous convaincre, chers lecteurs, que malgré les conséquences considérables du changement climatique et l'attrait superficiel de l'énergie nucléaire comme élément de réponse, le nucléaire comporte trop de risques, est trop coûteux et trop lent à se déployer pour jouer un rôle majeur. Nous ne sommes pas systématiquement antinucléaires. Au contraire, nous pensons que le bilan de l'énergie nucléaire nous amène objectivement à conclure qu'il ne s'agit pas d'une option souhaitable ni viable.

L'objectif de ce livre est triple. D'abord, il s'agit de convaincre les personnes qui ne sont pas convaincues par la question. Ensuite, il s'agit de fournir aux militants antinucléaires des arguments bien argumentés pour soutenir leur position. Mais aussi, troisièmement, il s'agit de faire valoir auprès de personnes raisonnables, comme Hansen, qui sont rationnelles et fondées sur la science, que le nucléaire a des limites qu'elles ignorent ou sous-estiment.

Nous tenons à souligner que nous respectons ceux qui ne sont pas d'accord avec nous en raison de leur interprétation alternative des faits. Cependant, nous cherchons à présenter ici uniquement une critique non technique de l'énergie nucléaire afin qu'elle soit accessible aux non-scientifiques. Au lieu d'amasser autant de preuves en faveur de notre argument, nous avons l'intention de reconnaître dans ce livre les limites ainsi que les points forts de notre position. Nous comprenons également qu'une objectivité totale est impossible. Cependant, nous pensons qu'il est possible d'être transparent et nous nous efforçons de le faire.

Si ce livre suscite un débat et une discussion qui vous convainc de réfléchir plus profondément et de manière critique sur la question, il aura rempli son objectif principal.

Enfin, avant de renvoyer le lecteur au texte principal, il convient de noter que, même si nous sommes presque entièrement d'accord dans notre critique de l'énergie nucléaire par rapport au changement climatique, chacun d'entre nous a une « voix » et une approche distinctes de son écriture. Comme nous avons pris la tête de différents chapitres, le lecteur remarquera nos styles respectifs. Pour rendre la transition entre les chapitres plus claire, nous avons indiqué lequel d'entre nous était l'auteur principal de chaque chapitre.

## Références

- Hansen, JE, Sato, M., Simons, L., Nazarenko, L.S., Sangha, I., Kharecha, P., Zachos, J.C., von Schuckmann, K., Loeb, NG, Osman, MB, Jin, Q. , Tselioudis, G., Jeong, E., Lacis, A., Ruedy, R., Russell, G., Cao, J. et Li, J. (2023). Le réchauffement climatique en perspective. *Changement climatique ouvert à Oxford*, 3(1). <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad008>
- Wallace-Wells, D. (2023). Le parrain de la science climatique fait monter la température : David Wallace-Wells. <https://www.proquest.com/blogs-podcasts-websites/godfather-climate-science-turns-up-heat/docview/2887030899/se-2?accountid=30699>

# Remerciements

Nous remercions Sangita Kunwar pour son aide à la préparation du manuscrit, en particulier pour avoir sollicité les autorisations de réimpression des figures, et Sandy Bartholet pour avoir révisé le contenu du chapitre 8. Nous tenons également à remercier nos épouses, Miho Matsuda et Andria Thomas, pour leur soutien indéfectible et leur patience. Les auteurs tiennent également à remercier leurs collaborateurs pour leur implication et leurs efforts exceptionnels dans l'enquête 3MILER RUN : Heidi Hutner de l'université de Stony Brook, Susan Bailey de l'université d'État du Colorado, et Chris Tompkins et Erin Robinson de KromaTiD, Inc. La publication en libre accès du livre électronique a été rendue possible grâce aux fonds de la chaire de médecine communautaire de Health Net, Inc.

# Contenu

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Changement climatique : fonte des glaces et modèles statistiques . . . . . | 1  |
| Points récapitulatifs . . . . .                                              | 8  |
| Références . . . . .                                                         | 9  |
| 2 Le sale problème de la classe ouvrière . . . . .                           | 11 |
| Résumé Points . . . . .                                                      | 18 |
| Références . . . . .                                                         | 18 |
| 3 Déchets nucléaires . . . . .                                               | 21 |
| Résumé Points . . . . .                                                      | 28 |
| Références . . . . .                                                         | 28 |
| 4 Prolifération nucléaire . . . . .                                          | 31 |
| Résumé Points . . . . .                                                      | 39 |
| Références . . . . .                                                         | 39 |
| 5 Les fardeaux sociétaux imposés par les accidents nucléaires . . . . .      | 43 |
| L'effondrement canadien . . . . .                                            | 43 |
| Toutes les technologies sont en proie aux accidents . . . . .                | 45 |
| Sujets courants . . . . .                                                    | 46 |
| Tchernobyl et Fukushima Une . . . . .                                        | 48 |
| bataille impossible contre la poussière . . . . .                            | 51 |
| Pennsylvanie centrale, 1979. . . . .                                         | 54 |
| Résumé Points . . . . .                                                      | 56 |
| Références . . . . .                                                         | 56 |
| 6 Three Mile Island : un paradoxe non résolu . . . . .                       | 59 |
| Résumé Points . . . . .                                                      | 69 |
| Références . . . . .                                                         | 69 |
| 7 Les expositions prolongées peuvent être mal comprises . . . . .            | 71 |
| L'analogie postale . . . . .                                                 | 71 |

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Remise en cause du modèle .....                                                                                 | 75  |
| linéaire Preuves expérimentales de l'hypothèse du bruit de<br>grenaille dans les systèmes radiobiologiques..... | 78  |
| Le rayonnement de fond peut ne pas être bien compris .....                                                      | 80  |
| Rejets dans l'environnement provenant des centrales nucléaires en exploitation .....                            | 82  |
| Résumé Points .....                                                                                             | 84  |
| Références .....                                                                                                | 84  |
| <br>8 La nouvelle énergie nucléaire : coûteuse, lente et de qualité inférieure .....                            | 87  |
| L'adoption initiale de l'énergie nucléaire .....                                                                | 87  |
| La renaissance du nucléaire domestique .....                                                                    | 90  |
| La renaissance du nucléaire en voie de disparition dans son contexte historique .....                           | 92  |
| Coût et durée de la construction .....                                                                          | 93  |
| Coût actualisé de l'énergie .....                                                                               | 95  |
| Le coût d'opportunité immédiat de Plant Vogtle .....                                                            | 96  |
| La situation actuelle .....                                                                                     | 97  |
| L'avenir est offshore .....                                                                                     | 98  |
| Le coût d'opportunité à long terme .....                                                                        | 100 |
| Résumé Points .....                                                                                             | 102 |
| Références .....                                                                                                | 102 |
| <br>Rectificatif à : Changement climatique : fonte des glaces et modèles statistiques. ....                     | C1  |
| <br>Postface .....                                                                                              | 105 |
| <br>Index .....                                                                                                 | 107 |

# Chapitre 1

## Changement climatique : fonte des glaces et modèles statistiques



Le but de cet ouvrage n'est pas de débattre des questions liées au changement climatique lui-même. Nous acceptons plutôt que le changement climatique est une réalité et qu'il est principalement causé par l'activité humaine, même si son rythme et sa gravité peuvent être sujets à débat. Néanmoins, un bref aperçu de l'état du changement climatique et des données scientifiques qui le sous-tendent s'impose avant de nous pencher sur les questions épineuses entourant le rôle possible de l'énergie nucléaire pour éviter les pires conséquences.

Au moment où nous écrivons ces lignes, un débat public intense et souvent frustrant se poursuit sur la réalité et la nature du changement climatique et sur la question de savoir s'il est provoqué ou non par les processus de la société industrielle moderne. Le débat, si l'on peut l'appeler ainsi, est déséquilibré car les preuves penchent fortement en faveur de la confirmation du forçage climatique anthropique. Le discours public parvient encore à être, par moments, assez acrimonieux.

Cette controverse n'est pas sans rappeler d'autres problèmes environnementaux qui reposent en grande partie sur des preuves scientifiques. La lutte contre les preuves scientifiques établissant les effets nocifs des produits de l'industrie a été lancée il y a longtemps par les fabricants de tabac. Ils ont affiné leur approche pour d'abord résister aux preuves des effets nocifs du tabagisme, puis pour supprimer ou retarder les inquiétudes concernant le tabagisme passif, en se concentrant sur le fait que les preuves étaient loin d'être parfaites (Brugge, 2018).

Aujourd'hui, ce sont les entreprises de combustibles fossiles qui ont intérêt à générer ce que David Michaels a appelé « le triomphe du doute » sur la science de l'énergie.

---

La version originale du chapitre a été révisée. Une correction de ce chapitre est disponible à l'adresse [https://doi.org/10.1007/978-3-031-59595-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-59595-0_9)

---

Doug Brugge est l'auteur principal de ce chapitre.

Le changement climatique (Michaels, 2020). De ce fait, la compréhension du changement climatique par le public est complexe à plusieurs niveaux. L'une des motivations de l'écriture de ce livre est de chercher à transmettre la science et les preuves de manière claire, à un niveau accessible et sans distorsion, en reconnaissant les limites des preuves, mais en fixant une barre raisonnable (plutôt qu'impossible) pour la prise de décisions.

L'un des problèmes majeurs des controverses publiques autour de questions scientifiques est que la science peut être difficile à comprendre pour des personnes non formées, elle peut être manipulée par des acteurs politiques puis dramatisée par les médias pour attirer l'attention. Il peut être difficile d'engager une conversation sobre, réfléchie et sérieuse au milieu du tourbillon de messages en colère sur les réseaux sociaux et d'informations scientifiques mal traduites ou mal comprises.

Les enjeux liés au changement climatique peuvent être décomposés en trois parties. Premièrement, le climat se réchauffe-t-il ? Deuxièmement, si c'est le cas, le réchauffement est-il principalement dû aux activités humaines, et en particulier à la combustion des combustibles fossiles ? Troisièmement, si c'est nous, les humains, qui en sommes la cause sous-jacente, à quelle vitesse se produit le changement et, en fonction de cela, de combien de temps disposons-nous pour nous adapter afin d'éviter de graves conséquences ?

Nous ne pouvons pas approfondir ici suffisamment pour avoir une discussion nuancée sur la science du changement climatique. Nous cherchons plutôt à défendre notre position avant d'explorer plus en détail le rôle possible de l'énergie nucléaire dans le ralentissement du changement climatique. Si le lecteur a, à ce stade, besoin d'être convaincu que le changement climatique est réel, anthropique et qu'il a des conséquences dans les décennies à venir, nous lui suggérons de rechercher cette littérature et de l'assimiler avant de lire ce livre (PCC SAR SYR, 1995 ; Trenberth & Cheng, 2022).

Nous considérons d'abord la fonte des glaces. Bien que la fonte des glaces ne soit pas aussi rigoureuse scientifiquement que la modélisation, elle présente quelques avantages. Tout d'abord, elle est très visible, ce qui la rend plus convaincante que des chiffres sur une page ou même un graphique très clair. Ensuite, bien que les processus par lesquels le changement climatique fait fondre la glace soient complexes, la fonte elle-même est une mesure légitime des changements intégrés de la température de l'air et de l'eau. En outre, la fonte des glaces est un indicateur plus stable que la météo, qui varie tellement d'un jour à l'autre et d'une saison à l'autre. (Sengupta, 2023)

Une figure clé dans la documentation de la fonte des glaces est le travail sous-estimé de Bruce Molnia. Après 42 ans de service au US Geological Survey, le Dr. Molnia a pris sa retraite en 2019 de son poste de conseiller scientifique principal pour les applications civiles nationales au Centre national des applications civiles. Le cœur de sa carrière de chercheur a été l'étude des glaciers de l'Alaska. Le titre de son article solo de 2007, « Comportement des glaciers de l'Alaska de la fin du XIXe au début du XXIe siècle comme indicateurs de l'évolution du climat régional »,

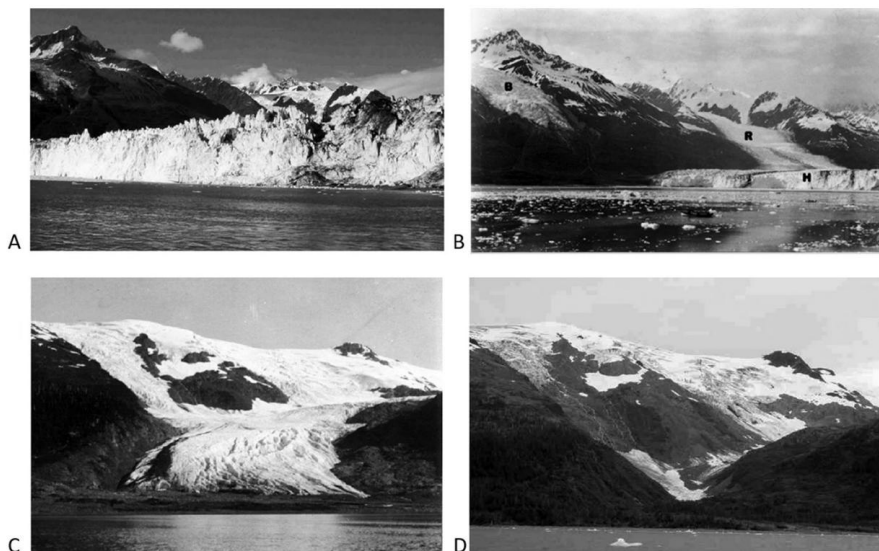


Fig. 1.1 Deux paires de photographies montrant l'évolution des glaciers au fil du temps. (a) Glacier Toboggan, 29 juin 1909; et (b) le 4 septembre 2000. Les deux ont été prises au même endroit dans le fjord Harriman, Prince William Sound. (c) White Thunder Ridge, Muir Inlet, parc national et réserve de la baie des Glaciers, 13 août 1941, par William O. Field, et (d) le 31 août 2004, par Sidney Paige. Il n'y a pas de végétation sur la photographie de 1941. Les photographies documentent le recul significatif des glaciers sur plusieurs décennies. (Reproduit avec la permission de Molnia, [2007](#))

explique pourquoi ses recherches ont contribué à donner au changement climatique des manifestations physiques.

Les changements, et plus précisément le « recul », ce que l'on pourrait communément appeler la fonte des glaciers, ont été l'un des premiers signes tangibles du changement climatique. En 1999, le secrétaire d'État américain à l'Intérieur, Bruce Babbitt, a demandé à Molnia de trouver des preuves « sans équivoque » du changement climatique. Il lui a fourni une paire de photographies de glaciers du passé et du présent (Fig. 1.1 ; Molnia, [2007](#)).

La science qui sous-tend la fonte des glaciers n'est pas simple, car d'autres facteurs que le réchauffement climatique entrent en jeu. Cependant, dans la plupart des cas, il semble que le recul des glaciers soit effectivement dû au changement climatique. Il existe quelques cas de glaciers en expansion, mais cela est rare et s'explique par les circonstances particulières de ces glaciers. En fait, on peut considérer les glaciers comme le canari dans la mine de charbon, car, comme les oiseaux que les mineurs emmenaient avec eux dans les puits de mine, ils sont des indicateurs précoces des effets physiques de la hausse des températures.

Contrairement aux calottes glaciaires polaires, qui sont massives, les glaciers sont relativement petits et souvent adjacents à des régions plus chaudes du globe. Ainsi, leur fonte est plus facilement apparente. La fonte des glaciers est facilement visible,

un avantage par rapport aux modèles statistiques qui sont complexes et pas si faciles à restituer sous forme d'images faciles à comprendre.

Bien que moins visibles et, à certains égards, moins spectaculaires, les tendances au réchauffement ont également commencé à ronger les bords les plus vulnérables de la banquise en Antarctique au cours de la même période où Molina documentait la transformation des extrémités glaciaires en lacs. Entre 1995 et 2002, de larges sections de la plate-forme de glace Larsen B se sont effondrées (Fig. 1.2 ; NASA Observatory, 2002). Peu de temps après, la plate-forme de glace Wilkens a également commencé à se détériorer. Ces deux zones se trouvent sur la péninsule Antarctique, la glace la plus exposée et la plus vulnérable du continent.

Il existe une autre réserve massive de glace, plus difficile à observer que les glaciers et la glace polaire. Il s'agit du pergélisol, qui est en fait un sol gelé. Le pergélisol se trouve principalement dans l'Arctique, mais aussi à haute altitude, notamment dans les montagnes de l'Himalaya en Asie du Sud, parfois appelées le « troisième pôle » en raison de sa teneur en glace plus faible, mais néanmoins considérable. La fonte du pergélisol a révélé des restes anciens d'animaux et de plantes qui ont été préservés à l'état gelé pendant des millénaires (Fig. 1.3 ; Plotnikov, 2020).

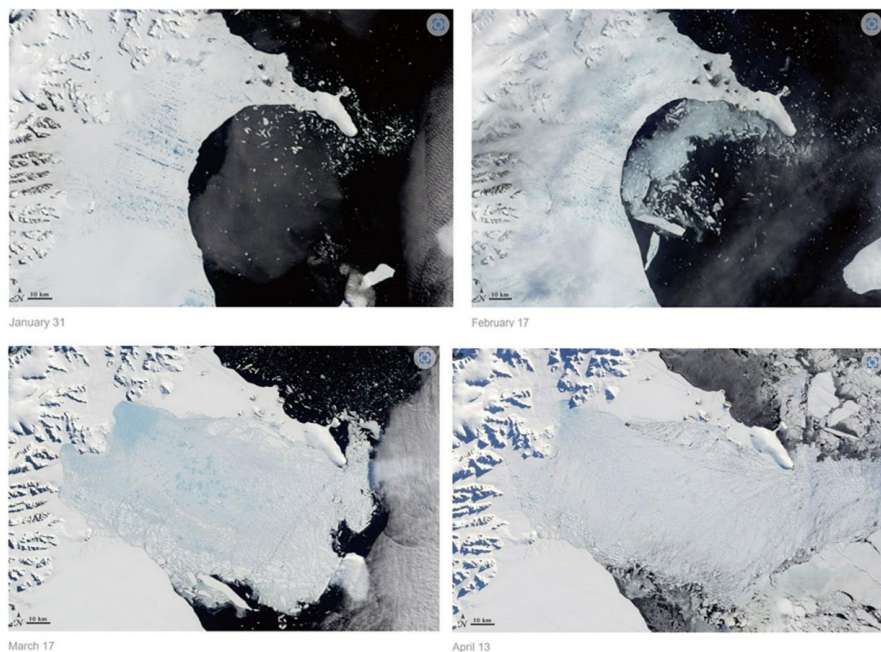


Fig. 1.2 Effondrement de la plate-forme de glace Larsen B sur la péninsule Antarctique de janvier à avril 2002.

La banquise est constituée de glace de mer et est donc plus vulnérable au réchauffement que la glace terrestre. De plus, comme il s'agit de glace de mer, elle ne contribue pas à l'élévation du niveau de la mer. (Reproduit de l'observatoire de la NASA, 2002)



Fig. 1.3 Photographie d'une carcasse en grande partie préservée d'un rhinocéros laineux qui a émergé de la fonte du pergélisol en août 2020 en Iakoutie, en Russie. (Reproduit avec la permission de l'Associated Press (Plotnikov, 2020))

Les températures augmentent plus vite dans l'Arctique qu'au troisième pôle, en grande partie parce que la vaste couche de glace blanche réfléchit la lumière du soleil avant qu'elle ne soit absorbée et réchauffe la surface. Contre toute attente, la glace fond plus vite au troisième pôle, en partie parce que l'Arctique possède des forêts boréales et une couverture de mousse que le troisième pôle n'a pas.

La fonte de la glace souterraine libère du méthane et du dioxyde de carbone. On estime que la quantité de carbone organique dans le sol de l'hémisphère nord est de 1 700 Pg, soit à peu près la masse de toute l'eau du lac Ontario. La fonte du pergélisol crée une boucle de rétroaction positive dans laquelle une fonte plus importante libère davantage de carbone dans l'atmosphère, ce qui entraîne une nouvelle augmentation des températures, puis un réchauffement plus important de la glace souterraine et une libération accrue de carbone (Nisbet et al., 2023).

À l'automne 2013, un énorme cratère cylindrique s'est formé dans le pergélisol sibérien. Des scientifiques venus de Moscou pour examiner cette nouvelle formation terrestre ont observé que ce cratère, comme d'autres découverts par la suite, s'était formé soudainement suite à de violentes explosions qui ont poussé le sol et la glace sur des centaines de mètres. Des signes de brûlures ont été observés sur les bords restants des cratères. (Gris, 2020).

Il est désormais établi que ces cratères sont créés par des explosions de gaz méthane. Il semble qu'un climat plus chaud libère du méthane emprisonné dans le sol gelé qui s'accumule et forme un monticule. Lorsque la pression dans le monticule devient trop forte, le méthane est libéré dans une explosion qui laisse un cratère cylindrique, presque comme si un emporte-pièce rond avait excisé un morceau de terre (Fig. 1.4 ; Pushkarev, 2014).



Fig. 1.4 Cette image montre un cratère situé au nord-ouest de la Sibérie, sur la péninsule de Yamal, d'une profondeur de 50 mètres. Le trou s'est formé en 2013 et a apparemment été créé par l'explosion de gaz méthane. (Utilisé avec la permission de Reuters (Alaska Public Media, [2022](#)))

Si la fonte des glaces fournit une indication tangible de l'impact du changement climatique sur notre planète jusqu'à présent, elle ne peut pas nous dire ce qui se passera dans le futur. Pour cela, nous avons besoin de modélisation. De par sa nature, la modélisation est un exercice hautement technique qui, dans ses moindres détails, est pratiquement impénétrable pour le non-scientifique. Toutes les modélisations partagent ces caractéristiques, mais la modélisation du climat, en raison de ses conséquences et de sa complexité inhérente, est encore plus difficile à expliquer et à évaluer.

Il serait peut-être utile de faire une comparaison avec les modèles que nous connaissons le mieux. Nous dépendons tous de ces modèles car ils prédisent le temps. Les modèles météorologiques, comme nous le savons tous, se sont améliorés au fil du temps (ils étaient trop souvent erronés il y a 40 ans), mais ils conservent encore un certain degré d'erreur. Ils sont généralement assez précis, mais ils ont des limites. Si l'on regarde les prévisions une semaine à l'avance et que l'on y prête attention à mesure que le jour approche, les prévisions changent et deviennent généralement plus précises.

Les modèles météorologiques sont à la fois utiles et problématiques lorsqu'il s'agit d'expliquer la modélisation du changement climatique. D'un point de vue empirique, ils peuvent donner au lecteur une idée générale de ce que sont les modèles et de leur fonctionnement. Cependant, contrairement à la fonte des glaces, la météo est une mauvaise mesure pour observer le changement climatique. En effet, dans de nombreux endroits, la météo est très variable. La météo peut sembler, à tort, confirmer le changement climatique pendant une vague de chaleur et le remettre en cause pendant une tempête de neige.

Les modèles de changement climatique utilisent de nombreuses variables comme données d'entrée (température, estimations des rejets de dioxyde de carbone, couverture nuageuse, géographie, etc.) pour prédire les changements des variables climatiques, tout comme les modèles météorologiques prédisent la température, les précipitations et le vent. Les modèles climatiques sont généralement comparés aux données du passé pour tester leur précision. Il existe de nombreuses

des modèles climatiques, chacun avec des approches et des données d'entrée légèrement différentes, développés par des équipes de chercheurs qui produisent une gamme de résultats et d'ampleurs d'erreur.

Trop souvent, les débats populaires sur le changement climatique tournent autour de la question de savoir s'il est réel, un absolutisme en noir et blanc qui ne reflète pas la science sous-jacente. Au lieu de cela, nous invitons le lecteur à considérer que le principal débat porte sur la vitesse à laquelle le changement climatique se produit, car c'est elle qui affecte l'ampleur et le calendrier des réponses nécessaires.

Nous voyons que le changement climatique est une crise imminente, mais comparé à l'accident nucléaire de Fukushima, par exemple, il s'agit d'une catastrophe à évolution lente, qui se déroule sur plusieurs décennies. Le changement climatique étant une accumulation progressive de gaz dans l'atmosphère qui contribuent au réchauffement et ces gaz ayant une longue durée de vie, l'inversion du changement climatique sera également lente. Il existe déjà une dynamique importante qui entraîne une hausse des températures et qui ne pourra pas être inversée rapidement.

Bien que le suivi des changements de température mondiale et l'observation de leurs impacts les plus évidents, notamment les changements dans la glace, présentent certains défis, ils sont relativement simples à réaliser par rapport à la prévision de l'avenir du changement climatique.

Dans le contexte du changement climatique, les données d'entrée et l'échelle temporelle et spatiale de la modélisation sont bien plus vastes que celles des modèles qui tentent de prédire le temps qu'il fera dans un jour ou une semaine. Les modèles climatiques peuvent avoir une portée mondiale et chercher à prédire ce qui se passera dans des décennies. Ainsi, les modèles climatiques nécessitent une énorme capacité informatique pour effectuer des calculs basés sur d'immenses codes informatiques. Les données d'entrée de ces modèles comprennent le rayonnement solaire, les concentrations de gaz dans l'atmosphère qui augmentent la température (comme le dioxyde de carbone et le méthane) et les concentrations de particules dans l'air qui réduisent la température.

Aucun modèle n'est parfait. C'est là que réside la véritable controverse potentielle autour du changement climatique. Différents modèles proposent des prévisions différentes de la trajectoire du changement climatique. Certains prédisent que nous avons plus de temps, d'autres que nous en avons moins. Si les modèles qui prédisent un changement plus lent sont plus précis, nous avons plus de temps pour nous adapter. Cependant, comme nous ne pouvons pas en être certains, nous pensons que ce serait une erreur de supposer que le scénario le plus optimiste est correct (Fig. 1.5). Si nous nous trompons dans notre hypothèse optimiste, nous aurons encore moins de temps pour réagir une fois que nous aurons compris cela et les coûts seront plus importants et les dommages plus importants.

Il est préférable de se préparer au pire et si cette prudence est excessive, la réduction de la consommation de combustibles fossiles aura de nombreux avantages annexes. Le principal sera la réduction de la pollution de l'air ambiant. La pollution de l'air par les particules fines, qui provient en grande partie des sources de combustion, est responsable de millions de décès dans le monde chaque année et de maladies chroniques encore plus graves (Chang et al., 2022). Franchement, le bilan de la pollution de l'air qui en découle est sans précédent.

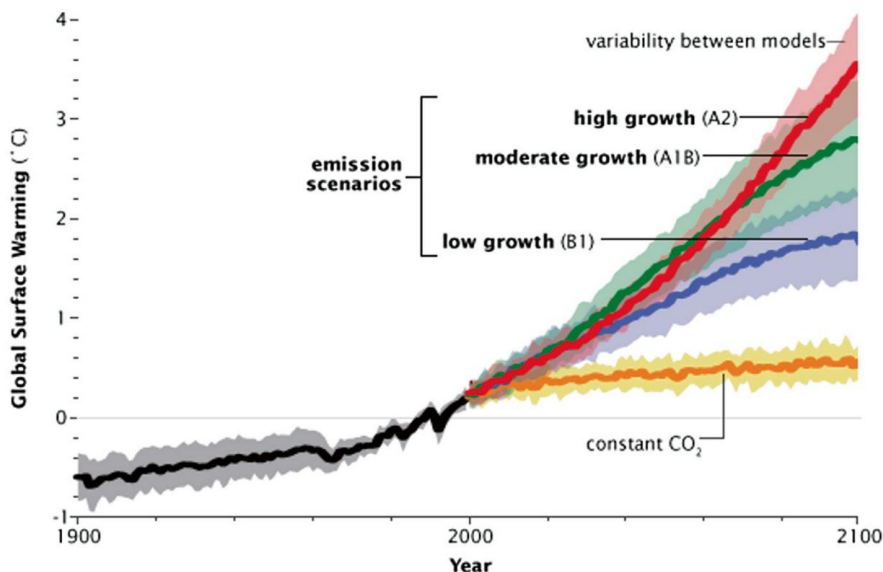


Fig. 1.5 Prévision de la NASA concernant l'augmentation de la température mondiale en fonction des changements dans les émissions de CO<sub>2</sub>. (NASA Earth Observatory, [sd](#))

Les mêmes sources que le changement climatique devraient, à elles seules, justifier l'abandon des émissions liées à la combustion et au forçage climatique.

Dans le cadre de cet ouvrage, le temps est un facteur important lorsqu'il s'agit d'envisager l'énergie nucléaire comme une réponse au changement climatique. Le problème pour les partisans de l'énergie nucléaire est que dans le contexte actuel, du moins dans les pays hautement développés, l'approbation, le financement et la construction de centrales nucléaires prennent un temps démesurément long. Nous aborderons ce sujet en détail au chapitre 8.

Étant donné que nous devons réagir rapidement à la menace du changement climatique, une source d'énergie qui tarde à être mise en service est peu susceptible de constituer un élément viable de notre économie. réponse.

## Points récapitulatifs

1. La fonte des glaciers et des glaces polaires sont des indicateurs très visibles et relativement précis du changement climatique.
2. Les modèles statistiques de changement de température globale montrent des augmentations constantes, même si la vitesse à laquelle le réchauffement se produit varie en fonction des hypothèses du modèle.
3. La nécessité de s'éloigner des combustibles fossiles soulève la question de savoir quelles sont les meilleures sources d'énergie, y compris le rôle éventuel de l'énergie nucléaire.

## Références

- Alaska Public Media. (2022). Le dégel du pergélisol en Alaska est un indice du mystère des explosions de méthamphétamine dans l'Arctique. <https://alaskapublic.org/2022/02/03/alaska-permafrost-thaw-is-clue-in-mystery-of-arctic-methane-explosions/>
- Brugge, D. (2018). Particules dans l'air : le polluant le plus mortel est celui que vous respirez tous les jours. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-89587-1>
- Chang, AY, Chatterji, S., Abedi, A., Afarideh, M., Ahmadi, M., Almadi, M. AH, Amit, A. ML, Andrei, T., Asadi-Pooya, A., Balachandran, A., Banach, M., Bedi, N., Bell, ML, Bhattarai, S., Bhutta, ZA, Bibi, S., Bolla, SR, Briggs, AM, Cámara, LA et al. (2022). Charge mondiale, régionale et nationale des maladies et des blessures chez les adultes de 70 ans et plus : analyse systématique de l'étude sur la charge mondiale de morbidité 2019. *Bmj*, 376, e068208. <https://est-ce-que-je.org/10.1136/bmj-2021-068208>
- Gray, R. (2020). Le mystère des cratères explosifs de Sibérie. BBC.com <https://www.bbc.com/futur/article/20201130-changement-climatique-le-mystere-des-crateres-explosifs-en-siberie>
- Michaels, D. (2020). Le triomphe du doute : l'argent noir et la science de la tromperie. Oxford Presses universitaires.
- Molnia, B. F. (2007). Comportement des glaciers d'Alaska de la fin du XIXe au début du XXe siècle comme indicateurs de l'évolution du climat régional. *Global and Planetary Change*, 56(1–2), 23–56. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.011>
- Observatoire de la Terre de la NASA. (nd). Réchauffement climatique. Observatoire de la Terre de la NASA. Récupéré le 10 octobre 2023 sur <https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalWarming/page5.php>
- Observatoire de la NASA. (2002). Un monde en mutation : l'effondrement de la plate-forme de glace de Larsen-B. NASA Observatoire. <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/LarsenB>
- Nisbet, E. G., Manning, M. R., Dlugokencky, E. J., Michel, S. E., Lan, X., Röckmann, T., van der Gon, D., Hugo, A. C., Schmitt, J., Palmer, P. I., Dyonisius, M. N., Oh, Y., Fisher, R. E., Lowry, D., France, J. L., White, J. WC, Brailsford, G., & Bromley, T. (2023). Méthane atmosphérique : comparaison entre les relevés de méthane en 2006-2022 et pendant les fins de glaciers. *Global Biogeochemical Cycles*, 37(8), n/a. <https://doi.org/10.1029/2023GB007875>
- PCC SAR SYR. (1995). Changement climatique 1995 ; impacts, adaptations et atténuation. Contribution du groupe de travail II au deuxième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ; résumé à l'intention des décideurs.
- Plotnikov, V. (2020). Rhinocéros laineux ? Une carcasse de l'ère glaciaire récupérée dans le pergélisol en Sibérie. The Associated Press. <https://www.oregonlive.com/environment/2020/12/woolly-rhino-ice-age-carass-recovered-from-permafrost-in-siberia.html>
- Pushkarev, V. (2014). Les cratères massifs du pergélisol en Sibérie pourraient être le résultat d'une accumulation de méthane due au changement climatique. Reuters. <https://www.news18.com/news/buzz/siberias-massive-permafrost-craters-may-be-result-accumulation-of-methane-gas-due-to-climate-change-3446924.html>
- Sengupta, S. (13 septembre 2023). Le changement climatique fait fondre les glaciers du mont Rainier. The New York Times <https://www.nytimes.com/2023/09/12/climate/mount-rainier-glaciers-climate-change.html?smid=nytcore-ios-share&referringSource=articleShare>
- Trenberth, K. E., & Cheng, L. (2022). Une perspective sur le changement climatique à partir du déséquilibre énergétique de la Terre. *Environmental Research: Climate*, 1(1), 13001. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac6f74>

Accès libre Ce chapitre est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou format, à condition de créditer l'auteur(s) d'origine et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été apportées.

Les images ou autres éléments tiers de ce chapitre sont inclus dans la licence Creative Commons du chapitre, sauf indication contraire dans une ligne de crédit du contenu. Si le contenu n'est pas inclus dans la licence Creative Commons du chapitre et que votre utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation légale ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement du détenteur des droits d'auteur.



## Chapitre 2

# Le sale problème de la classe ouvrière



Quand on pense à l'énergie nucléaire, on l'associe généralement à des réacteurs nucléaires sophistiqués et à leurs tours de refroidissement adjacentes. Bien qu'elle ait plus de 70 ans, la technologie nucléaire reste un parfait exemple d'ingénierie moderne de pointe et un signe de l'état avancé de notre civilisation. Mais les barres de combustible d'uranium qui sont au centre de la réaction nucléaire contrôlée qui fait bouillir l'eau pour en faire de la vapeur, sont au départ constituées de minerai, de terre et de roche. Enfoui dans le sol, l'uranium doit être extrait et traité avant de devenir le combustible capable d'entretenir une réaction nucléaire.

L'extraction et le broyage du minerai d'uranium en yellow cake et la conversion de ce dernier en une forme pouvant être enrichie pour être utilisée comme combustible étaient, et sont toujours, dans la plupart des pays du monde, un processus sale et dangereux pour les travailleurs. Il contamine également les terres et les eaux adjacentes, mettant en danger les familles des travailleurs et les communautés locales. L'ampleur de ce problème est modeste par rapport au changement climatique, mais comme le montrera ce chapitre, l'impact sur de nombreuses communautés locales, en particulier les communautés autochtones, peut être dévastateur.

Pour illustrer ce point, nous nous concentrerons ici sur les États-Unis, puis nous nous étendrons brièvement au contexte mondial. L'extraction d'uranium aux États-Unis a repris après 1948, lorsque le gouvernement américain a garanti un prix pour le minerai et s'est désigné comme l'unique acheteur. À la fin des années 1950, l'extraction d'uranium était une industrie en pleine croissance (Fig. 2.1), concentrée dans le sud-ouest des États-Unis, sur le plateau du Colorado, où elle est restée active jusque dans les années 1980.

Selon un schéma qui s'est répété dans de nombreux autres pays et qui se répète aujourd'hui dans d'autres parties du monde, l'exploitation minière a considérablement empiété sur les communautés autochtones. Aux États-Unis, ce sont surtout les Navajos qui ont été attirés par l'exploitation minière. Pour beaucoup d'entre eux, c'était leur première expérience avec le travail salarié.

---

Doug Brugge est l'auteur principal de ce chapitre.

Fig. 2.1 Mineurs d'uranium Navajo dans les années 1950 dans le sud-ouest des États-Unis. (Source : [Utah.gov](http://Utah.gov))



Le travail était peu rémunéré, mais pour les personnes qui n'avaient pas eu accès auparavant à l'argent, l'accès à l'argent liquide était attrayant (Brugge & Goble, 2002).

George Tutt, un Navajo qui avait travaillé dans les mines d'uranium, a décrit les méthodes et les conditions rudimentaires qui ont constitué la première étape du processus qui a conduit à la bombe et à l'énergie nucléaires : « ... nous avons construit des tunnels et nous avons transporté l'uranium. Nous avons utilisé des brouettes, des pelles et des pioches. »

« C'étaient les seuls outils que nous utilisions. »

Ils n'ont pas non plus été informés des risques pour la santé. Il poursuit : « Nous pensions avoir eu beaucoup de chance, mais on ne nous a pas dit : « Plus tard, cela vous affectera de telle manière. » Il est vrai que les hommes travaillaient. Lorsque le travail s'arrêtait à la fin de la journée, ils sortaient simplement des mines et rentraient directement chez eux.

« On ne leur a pas dit de se laver ou quoi que ce soit de ce genre » (Miller, 2007). Bien sûr, le danger le plus important dans les mines souterraines était le gaz radon et ses dérivés radioactifs, qui étaient invisibles et inodores, suivis par la poussière de silice, qui était facilement visible.

Comme dans d'autres pays qui se sont lancés dans l'extraction de l'uranium après la Seconde Guerre mondiale, les États-Unis, sous la direction de leur Service de santé publique, ont mené une étude épidémiologique longitudinale sur les mineurs. L'objectif de l'étude n'était pas de déterminer si le radon pouvait provoquer un cancer du poumon, comme cela avait été fermement établi à la fin des années 1940, mais plutôt d'estimer la relation dose-réponse. Les mineurs participant à l'étude n'ont pas été informés des risques qu'ils prenaient sans le savoir (Brugge & Goble, 2002).

L'ensemble de l'opération minière a été masqué par des préoccupations de sécurité nationale qui ont supplanté la prise en compte de la santé des mineurs ou des dommages causés à l'environnement.

Les mineurs ont été exposés à des risques pour leur environnement et pour leur famille et leur communauté. En 1959, l'étude du PHS avait montré une association statistiquement significative entre l'exposition au radon et le cancer du poumon, comme prévu, mais une norme fédérale limitant l'exposition au radon n'est entrée en vigueur qu'en 1969, bien trop tard pour protéger des milliers de mineurs.

Les mineurs ont pris conscience des préjudices qu'ils subissaient, notamment des cancers du poumon dès leur plus jeune âge, y compris parmi les non-fumeurs. Ils ont commencé à poser des questions et, après avoir surmonté une courbe d'apprentissage abrupte, ils se sont organisés pour demander réparation. Les Navajos ont pris la tête de la campagne, en essayant d'abord de poursuivre le gouvernement américain en justice. Lorsque cette action a été bloquée par les tribunaux, ils ont cherché réparation au Congrès.

L'injustice initiale de l'exploitation minière a été aggravée par ce qui est devenu une campagne de deux décennies avant que le Congrès américain n'adopte la loi sur l'indemnisation des victimes d'exposition aux radiations en 1990. La RECA a étendu l'indemnisation monétaire aux anciens mineurs et à leurs familles. Malheureusement, la RECA contenait encore plus d'injustices. Les critères d'éligibilité de la RECA de 1990 étaient si stricts qu'ils excluaient de nombreux mineurs méritants et leurs familles. En substance, la loi, et avec elle le gouvernement américain, ont remué le couteau dans les plaies encore ouvertes de nombreux anciens mineurs et de leurs familles.

Une décennie supplémentaire de plaidoyer a été nécessaire pour corriger la plupart des défauts de la législation RECA initiale, mais pas tous. La nouvelle loi RECA, entrée en vigueur en 2000, a abaissé le seuil d'éligibilité à un risque de cancer du poumon multiplié par deux et a élargi la liste des travailleurs éligibles aux ouvriers des usines et aux mineurs de surface. Elle a également transféré la surveillance du ministère de la Justice, perçu comme indifférent aux travailleurs, au ministère du Travail.

Le décompte des indemnités versées par la RECA permet de mesurer le nombre de décès et de maladies causés par l'extraction de l'uranium aux États-Unis. Selon le ministère américain du Travail, en 2024, des indemnités ont été versées à plus de 9 000 travailleurs de l'uranium pour un total de plus de 900 millions de dollars (tableau 2.1). Le nombre de travailleurs indemnisés est une valeur importante car il s'agit d'une estimation prudente des dommages causés par l'extraction de l'uranium dans un pays.

Cette estimation des conséquences sur la santé est prudente, car les critères d'indemnisation sont stricts et précis. Le candidat retenu doit avoir reçu un diagnostic d'une des maladies suivantes : cancer primitif du poumon ; fibrose pulmonaire ; cœur pulmonaire lié à la fibrose pulmonaire ; silicose ; ou pneumoconiose (également maladies rénales pour les ouvriers d'usine).

De plus, leurs antécédents professionnels doivent être calculés de manière à dépasser le double du risque de cancer du poumon ou ils doivent avoir travaillé pendant au moins 1 an.

Tableau 2.1 Indemnisation pour exposition aux rayonnements : résumé des demandes reçues à ce jour 30/01/2024

| Type de réclamation     | En attente | Approuvé | % d'approuvés/<br>d'éliminés | \$ approuvé       | refusé | Total  |
|-------------------------|------------|----------|------------------------------|-------------------|--------|--------|
| Sous le vent            | 115        | 26 463   | 84.1                         | 1 323 120 000 .\$ | 5 013  | 31 591 |
|                         | 34         | 5 569    | 58,9                         | 407 111 952 \$    | 3 881  | 9 484  |
| Participant sur place   |            |          |                              |                   |        |        |
| Mineur d'uranium        | 33         | 6 961    | 62,6                         | 695 374 560 \$    | 4 165  | 11 159 |
| Uranium Miller          | 7          | 1 945    | 74,4                         | 194 500 000 \$    | 671    | 2 623  |
| Transporteur de minerai | 4          | 416      | 71,0                         | 600 000 \$ 2      | 170    | 590    |
| Total                   | 193        | 41 354   | 74,8                         | 661 706 512 \$    | 13 900 | 55 447 |

Source : Division civile (2024). Prix accordés à ce jour au 31/01/2024. [www.justice.gov](http://www.justice.gov). Récupéré le 2 février 2024 sur <https://www.justice.gov/civil/awards-date-01312024>

Ces critères sous-estiment probablement le nombre de victimes pour deux raisons principales. Premièrement, le cancer du poumon est probabiliste, ce qui signifie que de nombreux travailleurs ont développé un cancer du poumon dans les mines d'uranium à des expositions inférieures au doublement du seuil de risque. Autrement dit, à la moitié du doublement du risque d'exposition, un tiers des cancers du poumon devraient être causés par le radon dans les mines. Les travailleurs à ce niveau d'exposition ne sont pas admissibles à une indemnisation. Il est même possible que la plupart des cancers du poumon aient été causés par des expositions inférieures au seuil, car de nombreux travailleurs ont été faiblement exposés. Deuxièmement, l'attribution de l'exposition comporte une erreur considérable car elle est basée sur la surveillance de l'air dans une infime fraction des mines.

Les humains ne sont pas autant touchés par les statistiques que par les histoires personnelles. Minnie Tsosie, une Navajo devenue veuve lorsque son mari, qui avait travaillé dans les mines, raconte la maladie de son mari :

Quelques années plus tard [il a travaillé à un autre poste après avoir travaillé dans la mine], il a soudainement commencé à avoir de la fièvre assez fréquemment. La nuit, il avait de la fièvre, il disait qu'il pensait que ses os lui feraient mal... cela a continué comme ça pendant de nombreuses années. Il y a eu une période où c'était comme ça et je n'y ai jamais vraiment prêté attention, jusqu'à ce qu'un jour je lui dise de consulter un médecin... Il est alors allé voir un médecin et on lui a dit que la douleur qu'il ressentait était due au travail qu'il avait fait dans la mine. On lui a donné des pilules et il les a ensuite prises. Cela a amélioré les choses pendant un certain temps, puis il s'est senti de nouveau mal. Puis son état s'est aggravé et cela n'a pas pris longtemps après cela, pas plusieurs années, cela a immédiatement mis fin à sa vie. À partir du moment où il était au plus bas, il s'est écoulé moins d'un an et il est mort. Cela n'a pas pris longtemps. (Brugge & Goble, 2002)

L'exemple américain est déjà assez grave en soi, mais il n'est malheureusement qu'un exemple parmi tant d'autres dans le monde. Dans son rapport de 1996 sur les risques d'exposition au radon, l'Académie nationale des sciences cite des études de cohorte sur le cancer du poumon chez les mineurs d'uranium de sept pays : les États-Unis, la France, la Chine, la Suède, la Tchécoslovaquie, le Canada et la France (NRC, 1999). L'exploitation de l'uranium a par le passé affecté les mineurs de nombreux autres pays, notamment ceux de l'ex-Allemagne de l'Est, pour lesquels il n'est pas aussi facile de connaître les conséquences de cette situation.

Ainsi, les décès et les maladies des travailleurs américains ne représentent qu'une petite fraction de la charge sanitaire mondiale causée par l'extraction de l'uranium. On a parfois prétendu que l'énergie nucléaire n'avait tué personne ou très peu de personnes. La seule façon de rendre cette affirmation crédible est d'ignorer l'extraction, le broyage et le traitement de l'uranium et les dizaines de milliers de décès et de maladies qui en ont résulté.

Aujourd'hui, l'exploitation minière a pratiquement cessé dans les pays à revenu élevé, à l'exception de l'Australie et du Canada. Aux États-Unis et dans l'Union européenne, l'exploitation de l'uranium est actuellement rare, voire inexistante, même si des efforts occasionnels, en grande partie infructueux, sont déployés pour la relancer. Cependant, le déclin de l'exploitation minière active n'a pas été la fin de l'histoire, car la plupart des mines et usines inactives sont devenues des sites de déchets dangereux qui ont nécessité une réhabilitation.

Des décennies plus tard, ces sites continuent de représenter une menace pour la santé des personnes qui y vivent ou y passent du temps. Tout comme l'impact de l'extraction d'uranium sur la santé des mineurs eux-mêmes, l'héritage des mines et usines abandonnées est une préoccupation mondiale, et des histoires similaires se sont répandues dans de nombreux pays qui se sont engagés dans l'extraction d'uranium. Il est inquiétant de constater que l'association avec les peuples autochtones et tribaux se reproduit également dans de nombreux pays, notamment les Premières Nations au Canada et les peuples autochtones en Australie.

Alors que la réhabilitation des mines abandonnées progresse lentement aux États-Unis, la réhabilitation des usines a été entreprise par la loi Uranium Mill Tailings Radiation Control Act de 1978 (UMTRCA), ce qui a permis de contrôler en grande partie les anciens sites d'usines (Lohmann, 2022). « En août 1999, des mesures de réhabilitation ont été achevées sur 18 sites. Ces sites sont désormais soumis à des soins et à une maintenance à long terme dans le cadre de la licence générale de la NRC (USNRC, 2017). Le coût de ces travaux pour les contribuables américains s'est élevé à plus de 2 milliards de dollars et nécessitera une surveillance et une maintenance continues du site pratiquement pour toujours (Fig. 2.2).

Fig. 2.2 Un site de remise en état des résidus d'une usine d'uranium.  
(Source : Doug Brugge)



Pour ceux qui ont vécu la mort de nombreux hommes qui travaillaient dans les mines, voire de la majorité dans certaines petites communautés, il était tout à fait raisonnable de craindre que les familles aient également été exposées et donc en danger. George Lapahie, un Navajo et ancien mineur, a déclaré dans une interview en 1995 :

Aujourd'hui, nous sommes confrontés à de nombreux problèmes. C'est ce qui est arrivé à mes enfants. Ils ont des problèmes de tumeur. D'où vient-elle ? Grâce à leurs recherches, ils ont découvert que c'était dû à l'uranium. L'un d'eux a subi une intervention chirurgicale importante sur la tête. On lui a coupé le crâne et on lui a administré des radiations. Voilà comment ça se passe. Un autre a été atteint au niveau des organes internes. Mes fils et ma fille sont comme ça. D'où vient cette histoire ? Dans le passé, on n'entendait jamais parler de cela. Aujourd'hui, ceux d'entre nous qui ont travaillé avec de l'uranium, nos enfants en sont affectés. À Shiprock, il y avait un gros tas de déchets. [Les enfants] avaient l'habitude d'aller là-bas parce que nous [vivions] à proximité. Les maisons qui se trouvaient de ce côté-ci, j'en ai acheté une là-bas. De là, je suis allé travailler. Ils avaient l'habitude de faire du vélo sur le tas de déchets pour jouer et c'est comme ça aujourd'hui. (Brugge & Goble, 2002)

Il est peu probable que le radon soit l'agent causal des cancers chez les personnes exposées dans la communauté, par opposition à leur lieu de travail, car le radon se disperse facilement à l'extérieur. En revanche, la principale préoccupation concerne les radio-isotopes solides, comme l'uranium et le radium, et les éléments non radioactifs comme l'arsenic, qui se trouvent tous en concentrations élevées dans le minerai d'uranium et peuvent être ingérés dans l'eau potable ou les aliments ou inhalés dans la poussière.

Bien entendu, les observations de M. Tutt ne constituent pas une preuve scientifique que l'exploitation minière était la cause des maladies de ses enfants. Les soupçons de M. Tutt contribuent plutôt à une hypothèse qui méritait, et mérite toujours, d'être étudiée. Heureusement, au fil des décennies qui ont suivi l'entretien avec M. Tutt, la recherche a lentement progressé dans ce domaine.

L'Université du Nouveau-Mexique, en collaboration avec des organisations communautaires, a mené plusieurs recherches majeures sur les effets possibles de l'exposition environnementale (non professionnelle) aux déchets des mines d'uranium. L'une des principales conclusions de leurs recherches est que parmi plus de 1 300 Navajos, ceux qui vivaient à proximité des mines d'uranium souffraient davantage de maladies rénales, de diabète et d'hypertension (Hund et al., 2015).

La proximité est une mesure relativement grossière de l'exposition, des recherches supplémentaires sont donc nécessaires, mais leurs conclusions confirment qu'il existe effectivement une raison pour cela. préoccupation.

Une étude de 2007 menée par une femme Navajo de la Northern Arizona University, un autre centre de recherche de ce type, a exposé des souris à des concentrations d'uranium réalistes sur le plan environnemental dans leur eau potable. Elle a découvert que l'exposition entraînait « une réduction des follicules primaires, une augmentation du poids de l'utérus, une augmentation de la hauteur des cellules épithéliales lumineuses utérines, une ouverture vaginale accélérée et une présence persistante de cellules vaginales cornées », tous indicateurs d'une exposition à des composés imitant l'hormone œstrogène. De plus, l'ajout d'une molécule qui bloque l'activité des œstrogènes a empêché les changements induits par l'uranium

(Brown, 2007). Les études sur les animaux ne sont pas des études sur les humains, mais les résultats étaient, et restent à notre avis, inquiétants. À notre connaissance, ce résultat n'a fait l'objet que de peu de suivi.

La surveillance de l'eau potable dans la région Navajo a également documenté à plusieurs reprises une contamination non seulement par l'uranium, mais aussi par l'arsenic, que l'on trouve souvent dans le même minerai (Blake et al., 2015). Étant donné que de nombreux habitants de la nation Navajo utilisent des sources d'eau non réglementées, initialement destinées uniquement au bétail, le risque d'ingestion et d'exposition élevée est accru.

Bien que le niveau d'impact sur la santé des membres de la communauté ne soit pas aussi dramatique ou facile à documenter que les maladies pulmonaires chez les mineurs souterrains, les preuves jusqu'à présent sont inquiétantes et suggèrent que davantage d'efforts doivent être faits pour les réduire. expositions.

Au cours de la dernière décennie, l'extraction d'uranium en Asie centrale et en Afrique, en particulier au Kazakhstan et en Namibie, mais aussi en Ouzbékistan et au Niger, a éclipsé la production du Canada et de l'Australie (World Population Review, 2023). Ce changement n'est guère surprenant. Les coûts et les conséquences de l'extraction d'uranium étant devenus plus évidents dans les pays à revenu élevé, en partie parce que les réglementations sont plus strictes, les sociétés minières ont cherché des sites plus favorables, moins coûteux et moins restrictifs.

L'un d'entre nous (Brugge) s'est rendu trois fois en Afrique pour participer à des conférences sur l'extraction de l'uranium. Au cours des présentations, des conversations et des visites de sites, il est apparu évident que l'exploitation minière sur le continent africain reproduit en grande partie l'approche de laisser-faire en vigueur aux États-Unis et dans d'autres pays développés dans les décennies qui ont suivi la Seconde Guerre mondiale. Les travailleurs sont peu protégés et n'ont que peu de connaissances sur les risques. Le contrôle de la contamination environnementale est limité, ce qui expose les communautés voisines. En Afrique du Sud, nous avons visité un établissement informel qui reposait sur des déchets miniers. Il est clair pour nous que les sociétés minières profitent des pays à faible revenu en Afrique et que cette tendance est plus susceptible de se poursuivre, voire de s'étendre, dans les années à venir (Winde et al., 2017 ; Fig. 2.3).

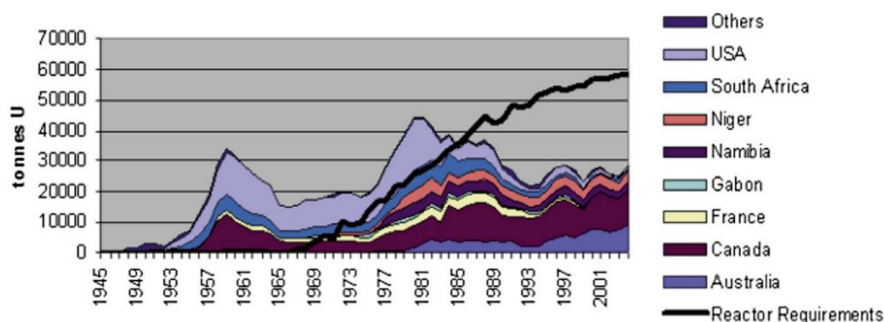


Fig. 2.3 Production et utilisation d'uranium de 1945 à 2004. (Source : Winde et al., 2017)

De même, une ville du Tadjikistan adjacente à une mine d'uranium abandonnée a également révélé des amas incontrôlés de débris miniers et une radioactivité élevée dans le sol et l'eau (Dustov et al., 2013). Compte tenu de la facilité avec laquelle ces sites ont été identifiés, il y a tout lieu de croire que des situations similaires existent dans de nombreux endroits d'Asie centrale et d'Afrique et, selon toute vraisemblance, ailleurs dans les pays en développement.

Le peu d'efforts déployés pour remédier à la tragédie actuelle de l'extraction de l'uranium est une triste illustration de la primauté du profit sur la santé et le bien-être des populations. Pour nous, il y a deux besoins urgents. Tout d'abord, et c'est le plus urgent, il faut étendre les réglementations environnementales et de sécurité au travail du premier monde à l'extraction de l'uranium dans les pays en développement. Cela augmentera le coût de l'extraction de l'uranium, mais ce coût ne représente qu'une infime fraction du coût de production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire.

Deuxièmement, nous devons terminer les recherches en cours pour établir plus précisément le risque lié aux expositions environnementales, tant dues à l'exploitation minière en cours qu'à l'exploitation minière traditionnelle dans des pays comme les États-Unis, où l'exploitation minière est en grande partie terminée.

L'objectif à plus long terme est d'intégrer les coûts externalisés de l'extraction de l'uranium dans les coûts supportés par les sociétés minières. Malgré certains accords qui ont évalué les coûts pour les sociétés responsables, aux États-Unis, nous, les contribuables, avons dû assumer une trop grande partie des coûts de remise en état des sites contaminés et de maintenance à long terme des déchets d'uranium stockés.

## Points récapitulatifs

1. Les premières étapes de l'industrie nucléaire, notamment l'extraction, le broyage et le traitement du minerai d'uranium, sont souvent ignorées lorsque l'on considère les impacts de l'énergie nucléaire sur la santé et l'environnement.
2. L'impact sanitaire et social de l'extraction et du traitement de l'uranium est considérable et a souvent des effets disproportionnés sur les communautés autochtones.
3. Bien que l'extraction de l'uranium soit en déclin dans la plupart des pays à revenu élevé, elle continue d'être réalisée de manière peu réglementée et dangereuse dans les pays à faible revenu, en particulier en Afrique et en Asie centrale.

## Références

Blake, J. M., Avasarala, S., Artyushkova, K., Ali, A. S., Brearley, A. J., Shuey, C., Robinson, W. P., Nez, C., Bill, S., Lewis, J., Hirani, C., Pacheco, J. SL, & Cerrato, J. M. (2015). Concentrations élevées d'uranium et de métaux co-occurents dans les déchets miniers abandonnés d'une communauté amérindienne du nord-est de l'Arizona. *Environmental Science & Technology*, 49(14), 8506–8514. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01408>

- Brown, V. J. (2007). L'uranium dans l'eau potable : une faible dose agit comme un imitateur endocrinien. *Environnement Perspectives de santé*, 115(12), A595. <https://doi.org/10.1289/ehp.115-a595a>
- Brugge, D. et Goble, R. (2002). L'histoire de l'extraction de l'uranium et du peuple Navajo. *American Journal of Public Health*, 92(9), 1410–1419. <https://doi.org/10.2105/AJPH.92.9.1410>
- Dustov, A., Mirojov, G., Yakubova, M., Umarov, S., Ishankulova, D., Eliasziw, M., & Brugge, D. (2013). Proximité des mines d'uranium, fonction immunitaire et infection à *Helicobacter pylori* au Tadjikistan. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Partie A*, 76(22), 1261–1268. <https://doi.org/10.1080/15287394.2013.836694>
- Hund, L., Bedrick, E. J., Miller, C., Huerta, G., Nez, T., Ramone, S., Shuey, C., Cajero, M., et Lewis, J. (2015). Un cadre bayésien pour estimer le risque de maladie dû à l'exposition aux déchets des mines et usines d'uranium dans la nation Navajo. *Journal of the Royal Statistical Society. Série A (Statistiques dans la société)*, 178(4), 1069–1091. <http://www.jstor.org/stable/43965784>
- Lohmann, P. (2022). Programme fédéral – sans financement – créé pour s'attaquer au nettoyage des mines d'uranium. Source Nouveau-Mexique. <https://sourcennm.com/2022/03/08/programme-federal-sans-financement-cree-pour-s-attaquer-au-nettoyage-des-mines-d-uranium/>
- Miller, A. C. (2007). Le peuple Navajo et l'exploitation minière de l'uranium. Institut national des sciences de la santé environnementale. Instituts nationaux de la santé. Département de la santé, de l'éducation et de la protection sociale. <https://doi.org/10.1289/ehp.115-a224a>
- NRC. (1999). Effets sur la santé de l'exposition au radon : BEIR VI, comité sur les risques pour la santé liés à l'exposition au radon (BEIR VI). (). National Academy Press.
- USNRC. (2017). Titre, programme I. Commission de réglementation nucléaire des États-Unis. USNRC. <https://www.nrc.gov/materials/uranium-recovery/regs-guides-comm/title-i-programme.html>
- Winde, F., Brugge, D., Nidecker, A., & Ruegg, U. (2017). Uranium d'Afrique : aperçu des activités minières passées et actuelles : réévaluation des risques et des opportunités associés dans un contexte mondial. *Journal of African Earth Sciences*, 129, 759–778. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.12.004>
- Revue de la population mondiale. (2023). Production d'uranium par pays 2023. Revue de la population mondiale. Récupéré le 19 juillet 2023 sur <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/Production-d-uranium-par-pays>

Accès libre Ce chapitre est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou format, à condition de créditer l'auteur(s) d'origine et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été apportées.

Les images ou autres éléments tiers de ce chapitre sont inclus dans la licence Creative Commons du chapitre, sauf indication contraire dans une ligne de crédit du contenu. Si le contenu n'est pas inclus dans la licence Creative Commons du chapitre et que votre utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation légale ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement du détenteur des droits d'auteur.



## Chapitre 3

### Déchets nucléaires



Vous ne disposez que d'une production d'énergie de courte durée, mais les générations futures devront lutter contre le gaspillage pour toujours.

– Gordon Edwards, président du Regroupement pour la surveillance du nucléaire

La Finlande est l'un des rares pays à avoir adopté l'énergie nucléaire et pourrait être le premier à achever un site de stockage de déchets nucléaires de haut niveau et à long terme (El-Showk, 2022). Le dépôt, dont l'ouverture est prévue, si tout se passe comme prévu, en 2024 ou 2025, se trouve sur l'île d'Olkiluoto, près de la côte ouest de la Finlande, face au golfe de Botnie. Sedeer El-Showk, écrivant dans Science (El-Showk, 2022), suggère que le succès de la Finlande en matière d'implantation et de construction repose principalement sur le contexte sociopolitique du pays. La Finlande est un pays qui produit rarement des dissidents. De plus, des avantages économiques considérables ont été offerts à la communauté hôte. La figure 3.1 montre un schéma de la conception.

Ce qui est le plus frappant à l'échelle mondiale, c'est à quel point le succès de la Finlande est tardif et inhabituel. La première centrale nucléaire commerciale au monde a commencé à fonctionner il y a bien longtemps, en décembre 1957, à Shippingport, en Pennsylvanie. Cela fait donc plus de 60 ans que nous attendons des solutions pour l'élimination des déchets de haute activité.

Pendant ce temps, les déchets nucléaires se sont accumulés dans des fûts secs dans les centrales nucléaires des États-Unis et du monde entier. Ne nous trompons pas sur la dangerosité de ces déchets et sur le temps qu'il leur faudra pour se désintégrer à des niveaux de radiation acceptables. La Commission de réglementation nucléaire des États-Unis, loin d'être la plus alarmiste au sujet des risques liés à l'énergie nucléaire, rapporte que « 10 ans après le retrait d'un réacteur, le débit de dose de surface pour un réacteur nucléaire est de 100 % inférieur à celui d'un réacteur nucléaire conventionnel ».

---

Doug Brugge est l'auteur principal de ce chapitre.

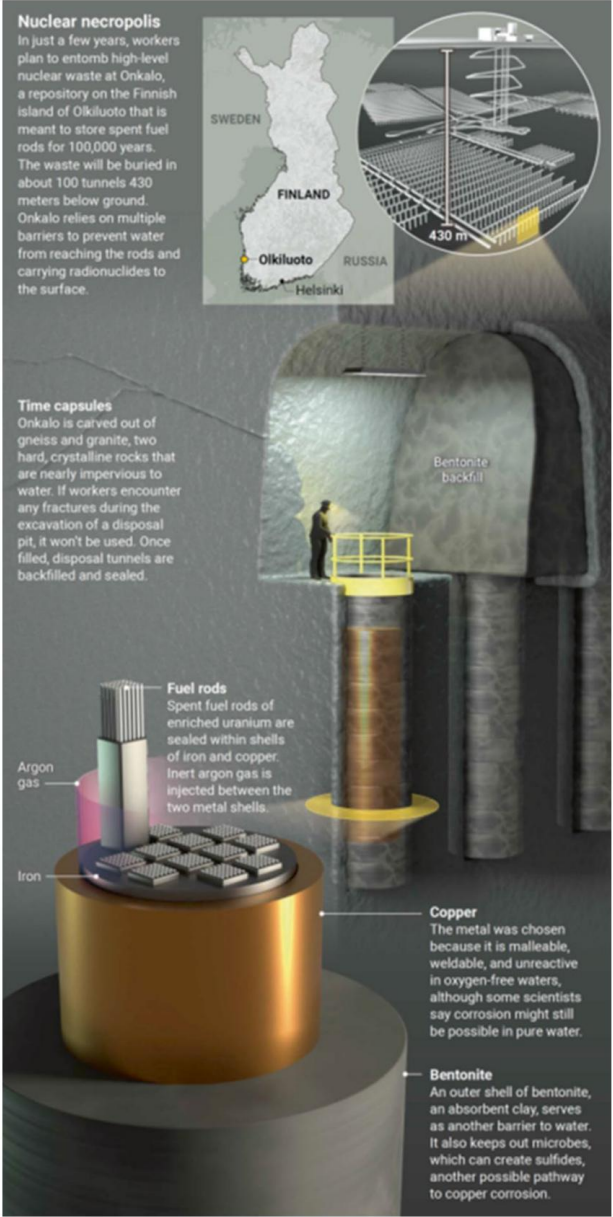


Fig. 3.1 Schéma du dépôt de déchets nucléaires de haute activité en Finlande. GRAPHIQUE : V. ALTOUNIAN/SCIENCE

« Un assemblage de combustible usé typique dépasse 10 000 rems/heure, soit bien plus que la dose mortelle pour l'être humain, qui est d'environ 500 rems reçue en une seule fois. » (El-Showk, 2022).

Il faudra finalement trouver des méthodes efficaces pour stocker ces déchets pendant des siècles. Ces déchets ne disparaîtront pas et il leur faudra du temps pour se décomposer à des niveaux qui ne présentent pas de danger immédiat pour la santé. Il est important de reconnaître que la science ne dispose d'aucun moyen d'empêcher une substance radioactive de continuer à l'être. En d'autres termes, nous ne pouvons pas arrêter la radioactivité une fois que nous avons produit des éléments radioactifs dans un réacteur.

Il peut être utile d'expliquer pourquoi l'énergie nucléaire produit ces déchets dangereux. La plupart des sous-produits radioactifs proviennent d'une particule subatomique appelée neutron qui frappe un atome d'uranium 235. L'U 235 est l'isotope rare de l'uranium nécessaire à la fission nucléaire. Lorsque l'U 235 absorbe un neutron lent, il se divise en deux morceaux. Ces morceaux sont appelés produits de fission. Il existe des centaines de types différents de produits de fission produits dans un réacteur nucléaire lorsque l'atome d'uranium se divise de différentes manières. La fission produit également davantage de neutrons qui, à leur tour, divisent davantage d'atomes d'uranium, ce qui conduit à une réaction en chaîne nucléaire de plus en plus intense.

En plus des atomes radioactifs lourds, les réacteurs nucléaires produisent également du tritium, une forme radioactive de l'hydrogène dont la demi-vie est de 12 ans. L'élimination du tritium est un problème en soi, car il est très difficile et coûteux de le séparer de l'eau dans laquelle il se forme. C'est pourquoi des propositions ont été avancées pour le rejeter dans l'océan ou l'évaporer dans l'atmosphère. Une meilleure approche consisterait à le stocker pendant 100 ans dans des conteneurs en verre jusqu'à ce que sa radioactivité soit réduite de 99 %.

Le plutonium est sans doute le radio-isotope le plus important des déchets nucléaires. Le plutonium n'est pas un produit de fission car il est plus lourd que l'uranium et se forme par un processus différent. Le plutonium se forme lorsqu'un atome d'U-238 (l'isotope de l'uranium le plus courant après l'U-235) absorbe un neutron, plutôt que de se diviser. Ce faisant, il se transforme en Pu-239. Le plutonium est un sous-produit essentiel car il peut être utilisé pour fabriquer des armes nucléaires. C'était l'ingrédient de la bombe qui a détruit Nagasaki et a été largement utilisé dans les armes nucléaires depuis lors.

Gordon Edwards, cité au début de ce chapitre et dont les travaux ont largement contribué à éclairer ce chapitre, est président du Regroupement canadien pour la surveillance du nucléaire (Gordon 2023). Il a traduit en termes clairs et compréhensibles de nombreuses questions entourant les déchets nucléaires, notamment en disant : « En échange de, disons, trois générations d'électricité, nous avons 300 000 générations de déchets nucléaires. » De ce point de vue, il note que

Les déchets nucléaires sont le principal produit de l'énergie nucléaire et l'électricité n'en est qu'une petite partie au début (Gordon 2023).

L'Association de gestion des déchets nucléaires, qui a une vision plus optimiste de l'énergie nucléaire, décrit sur son site Web (NMWO, 2023) l'état d'avancement de l'élimination des déchets nucléaires de haute activité dans certains pays notables. Elle note que la Suède semble proche de disposer d'un site pouvant être développé pour l'élimination des déchets nucléaires. En effet, en janvier 2022, la Suède a annoncé qu'elle avait approuvé des plans pour une installation à Forsmark, à 130 kilomètres au nord de Stockholm. Le plan suédois est très similaire à celui de son voisin, la Finlande. L'approbation a peut-être bénéficié de niveaux de confiance similaires entre le gouvernement et sa population.

D'autres pays ont eu du mal à obtenir l'approbation des communautés d'accueil. La France, pays fortement nucléarisé, a proposé d'utiliser un site à l'extérieur d'un village appelé Bure dans la région Champagne-Ardenne, à l'est du pays. Si elle est approuvée, et elle fait toujours face à une opposition politique, la construction pourrait commencer en 2027, bien que cette date soit plus tardive que ce qui avait été estimé auparavant (Mallet Benjamin, 2023).

En 2021, le Royaume-Uni, un autre pays dont la production d'énergie nucléaire est importante, a formé des partenariats avec deux communautés de Copeland, dans le comté de Cumbria, qui porteront sur l'éventuelle élimination de déchets nucléaires hautement radioactifs et à vie longue. Ce projet semble en être à un stade précoce, et il est encore impossible d'en prédire l'issue.

Le Japon, qui dépendait déjà largement de l'énergie nucléaire avant la catastrophe de Fukushima qui a conduit à la fermeture de la plupart des réacteurs nucléaires du pays, est également confronté à des défis pour l'élimination de ses déchets nucléaires. Le risque de tremblements de terre et de tsunamis est élevé sur les îles japonaises. Le choix d'un site se poursuit au Japon, avec la volonté d'en choisir un d'ici 2025 et de commencer l'exploitation d'ici 2035. Cela semble optimiste au vu de l'expérience acquise jusqu'à présent dans d'autres pays.

Les États-Unis ont peut-être le bilan le plus lamentable de tous les pays dotés d'armes nucléaires en termes d'identification de sites d'élimination de déchets nucléaires de haute activité. Les États-Unis disposent d'un site souterrain d'élimination des déchets de faible activité dans le sud du Nouveau-Mexique. Mais ce site a connu un incendie et une évacuation d'urgence en 2014 (Gordon 2023). La cause de l'incendie était une réaction chimique entre des déchets radioactifs de faible activité et de la litière pour chat qui a provoqué l'explosion d'un fût et la poussière de plutonium s'est déplacée sur plus de 700 mètres jusqu'à la surface, contaminant 22 travailleurs.

Aux États-Unis, le processus de sélection et de démarrage de la construction d'un site de stockage de déchets de haute activité a coûté des milliards de dollars au fil des décennies.

Malgré l'investissement, les efforts pour trouver une option viable ont échoué et aucune solution n'est susceptible d'être trouvée avant de nombreuses années.

Yucca Mountain, dans le Nevada, était l'emplacement de choix aux États-Unis.

Le projet de stockage de déchets nucléaires à Yucca Mountain s'est heurté à l'opposition de l'État du Nevada et de son puissant député, Harry Reid, chef de la majorité au Sénat de 2007 à 2015. Il a peut-être aussi échoué en affectant les terres voisines des Indiens Shoshone et Païute de l'Ouest, qui tentaient une fois de plus (voir chap. 2) d'imposer des risques nucléaires aux Amérindiens.

Aujourd'hui, le processus d'identification et de développement d'un site aux États-Unis est pratiquement au point mort. Il est plutôt étonnant et inquiétant qu'un pays qui compte 92 réacteurs nucléaires abritant 88 tonnes de déchets de haute activité ait bouclé la boucle et soit revenu à la case départ. Le processus de sélection du site le plus récent a été annulé sous l'administration du président Trump. Apparemment, le gouvernement américain est en train, à partir de 2023, « d'examiner les options et d'élaborer un nouveau plan » (NMWO, 2023).

Les rapports sur la désintégration des déchets nucléaires de haut niveau sont souvent présentés comme des rapports chronologiques. pour atteindre un niveau de radiation « sûr ». Mais « sûr » signifie soit une élimination absolue, Il s'agit d'une mesure relative du risque, qui est rarement, voire jamais, possible, ou d'un indicateur relatif basé sur nos valeurs, c'est-à-dire un risque faible que nous considérons comme acceptable. En pratique, de nombreuses évaluations utilisent le rayonnement naturel du minerai d'uranium comme référence pour le niveau auquel les déchets nucléaires ne nécessiteraient plus de mesures de confinement rigoureuses.

Selon cette norme, il faudrait environ 100 000 ans pour que les déchets soient comparables à l'uranium naturel (Fig. 3.2), car l'uranium naturel libère un faible niveau de rayonnement, résultant de sa longue demi-vie (Corkhill & Hyatt, 2018). Cette échelle de temps devrait inquiéter le lecteur car elle dépasse d'un ordre de grandeur la civilisation humaine et de près de deux ordres de grandeur nos progrès technologiques modernes avec les machines, l'industrie, les véhicules à moteur et les fusées. Nous avons souvent échoué à prévoir les problèmes dramatiques de notre technologie, y compris l'impact sur le climat, qui ne sont apparus qu'au cours des dernières décennies.

Pour replacer les choses dans leur contexte, il y a cent mille ans, les humains avaient récemment quitté l'Afrique et les Néandertaliens parcouraient encore ce qui est aujourd'hui l'Europe. Les déplacements se faisaient à pied et les outils étaient simples et faits de pierre. Nos ancêtres vivaient dans des grottes et d'autres habitations rudimentaires. Et le changement était lent, très lent, comparé aux développements technologiques parfois déroutants que nous observons aujourd'hui. Les innovations modestes ont pris des milliers d'années.

Maintenant, essayez d'extrapoler dans le temps et d'imaginer à quoi pourraient ressembler nos dépôts nucléaires, comment ils résisteraient et s'ils

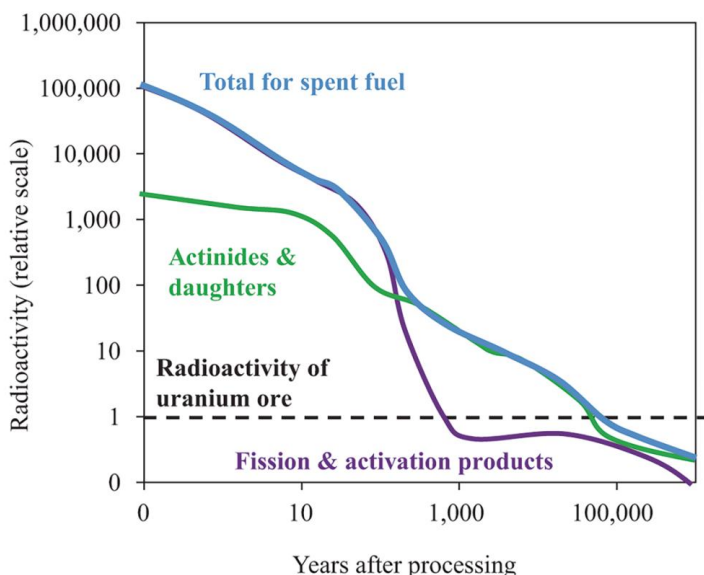


Fig. 3.2 Graphique montrant le temps nécessaire pour que le combustible nucléaire usé se désintègre radioactivement à des niveaux acceptables

Les oiseaux resteraient suivis et marqués. Pourrions-nous développer de meilleures façons de les gérer grâce aux technologies futures ? Le changement technologique s'accélère. Prédire comment cela se passera dans plusieurs siècles est impossible. Nous ne le savons tout simplement pas et c'est là que réside le problème central.

Une question importante se pose : les déchets peuvent-ils remonter à la surface après avoir été stockés dans des couches géologiques profondes ? Edwards fait remarquer à juste titre qu'il est impossible de stocker des déchets dans un site géologique non perturbé, car l'ouvrir pour y stocker les déchets perturbe la géologie ! Une fois le site créé, il existe désormais un chemin vers la surface qui n'existait pas auparavant.

Il note en outre que les déchets nucléaires sont actifs. Ils génèrent une chaleur croissante au fil du temps, avec une chaleur maximale à 4 000 ans et ne reviennent pas à la normale avant 50 000 ans. Le rayonnement génère également des ions chimiquement actifs (ils ont conduit à l'incendie dans le dépôt de faible activité du Nouveau-Mexique mentionné ci-dessus). Théoriquement, des conséquences encore pires pourraient être possibles, y compris une criticité accidentelle (Gordon 2023).

Les considérations actuelles pour prévenir les effets indésirables tournent autour de la meilleure façon d'enfermer les déchets nucléaires de haut niveau afin de les contenir pendant de très longues périodes. Une approche de longue date est appelée vitrification, dans laquelle les déchets sont intégrés dans du verre. Cette approche est intéressante car le verre résiste à la détérioration pendant des périodes de temps comparables au temps nécessaire aux déchets nucléaires pour atteindre des niveaux de radiation similaires à ceux du minerai d'uranium. La céramique est une autre option qui a une persistance comparable. Par exemple, la céramique

Des artefacts, tels que des morceaux de bols, fabriqués il y a des milliers d'années, peuvent aujourd'hui être récupérés sur des sites archéologiques.

Enfin, un dernier point très inquiétant est que les déchets contiennent, comme nous l'avons déjà dit, du plutonium. Le plutonium peut être utilisé et est fréquemment utilisé pour fabriquer des bombes atomiques. Il a également une demi-vie de 24 000 ans, ce qui signifie qu'il sera présent dans les déchets en concentrations importantes pendant des dizaines de milliers d'années. L'un des obstacles actuels à l'utilisation de ce plutonium est que son extraction du reste des déchets est extrêmement dangereuse.

Les autres éléments hautement radioactifs dont il faut séparer le plutonium sont la source de radiations qui pourraient tuer une personne rapidement (le plutonium lui-même ne dégage que de faibles quantités de radiations). Avec la technologie actuelle, il faut une installation contrôlée par des robots appelée usine de retraitement pour isoler le plutonium des déchets nucléaires. C'est ainsi que le Pakistan a obtenu du plutonium pour sa première bombe atomique, en l'isolant des déchets produits par un réacteur qui lui avait été donné par le Canada. Sera-t-il plus facile ou plus sûr d'extraire du plutonium dans mille ans ? Cela semble possible, mais personne ne le sait.

Si la Finlande, avec laquelle nous avons commencé ce chapitre, est un exemple de réussite en termes de négociation avec la population vivant à proximité de son site de stockage de déchets nucléaires, l'approche adoptée par Taiwan il y a plusieurs décennies est un avertissement quant aux dangers de la tromperie. Dans les années 1970, la Commission de l'énergie atomique de Taiwan avait choisi l'île Orchidée pour y installer son installation « temporaire » de stockage de déchets nucléaires de faible et moyenne activité.

Comme pour d'autres installations nucléaires indésirables et potentiellement dangereuses, il semble que le site ait été choisi en raison de la faible densité de population et du faible niveau d'alphabétisation du peuple indigène Yami qui habite l'île.

Bien qu'un article récent du New York Times dise que « personne n'a pris la peine d'informer les résidents », des documents antérieurs suggèrent que le gouvernement taïwanais était délibérément trompeur (Qin et al., 2023). Le commissaire du district de Yami a été informé à l'époque que l'installation serait un centre de pêche conserverie.

Finalement, les Yami ont compris ce qui se passait et, « à l'approche du Nouvel An chinois en 1991, les Yami se sont soulevés dans des manifestations qui ont attiré l'attention des médias et du public dans tout Taiwan. Sous la conduite de Kuo Jian-ping, un missionnaire presbytérien Yami, et avec le soutien de groupes antinucléaires de Taiwan comme l'Union de protection de l'environnement de Taiwan et l'Association verte, le groupe antinucléaire Yami a organisé des manifestations sur l'île Orchidée et à Taipei (Fig. 3.3), où ils ont remis une lettre de protestation directement à la Taiwan Power Company » (Marsh et al., 1993).

L'expérience des Yami, qui continuent de vivre avec des dizaines de milliers de conteneurs de déchets nucléaires, malgré l'arrêt des nouvelles livraisons en raison de leurs protestations, rappelle les nombreux cas de tromperie et d'imposition de risques aux communautés autochtones aux États-Unis et ailleurs dans le monde.



Fig. 3.3 Projection des cyclistes contre la construction d'une centrale nucléaire à Taiwan (Greenpeace, 2021)

Quelle que soit la solution à l'élimination des déchets des centrales nucléaires, convenons que toute exploitation supplémentaire des terres autochtones doit être interdite.

## Points récapitulatifs

1. Les déchets radioactifs doivent être confinés et gérés pendant une durée plus longue que l'âge de la civilisation.
2. Aux États-Unis, il n'existe actuellement aucun plan de stockage à long terme des déchets produits par la production d'énergie nucléaire civile.
3. Tout comme l'extraction et le traitement de l'uranium, l'élimination des déchets nucléaires de haute activité a également affecté les communautés autochtones.

## Références

- Benjamin, M. (2023). Focus : La France cherche une stratégie alors que les sites de déchets nucléaires risquent d'atteindre le point de saturation. Reuters <https://www.reuters.com/business/environment/la-france-cherche-une-strategie-pour-un-site-de-dechets-nucleaires-risque-un-point-de-saturation-le-3-02-2023/>
- Corkhill, C. L., et Hyatt, N. C. (2018). Gestion des déchets nucléaires. Research Gate. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1638-5>
- El-Showk, S. (2022). Lieu de repos final. Science (Association américaine pour l'avancement des sciences), 375(6583), 806–810. <https://doi.org/10.1126/science.ada1392>

- Gordon, E. (Producteur), & Gordon, E. (Réalisateur). (2023). Déchets nucléaires : les questions se multiplient. [Vidéo/DVD] YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=uEG3pS0bUvk>
- Greenpeace. (2021). Non au nucléaire. Taïwan : Taipei Times. <https://www.taipeitimes.com/News/taiwan/archives/2021/08/29/2003763432>.
- Marsh, D. R., Lin, E. et Lin, P. (1993). Orchid Island : la décharge nucléaire de Taïwan. World Information Service Energy. <https://www.wiseinternational.org/nuclear-monitor/387-388/Orchid-Island-Taïwans-dépotoir-nucléaire>
- NMWO. (2023). Ce que font les autres pays. [www.nwmo.ca](http://www.nwmo.ca). Récupéré le 24 juillet 2023 à partir de <https://www.nwmo.ca/Canadas-Plan/What-Other-Countries-Are-Doing>
- Qin, A., Chien, A. C., et Fei, L. Y. (2023). La décharge nucléaire qui a créé une génération d'activistes autochtones. Le New York Times. <https://www.nytimes.com/2023/01/05/world/asia/lanyu-taiwan-dechets-nucleaires.html>

Accès libre Ce chapitre est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou format, à condition de créditer l'auteur(s) d'origine et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été apportées.

Les images ou autres éléments tiers de ce chapitre sont inclus dans la licence Creative Commons du chapitre, sauf indication contraire dans une ligne de crédit du contenu. Si le contenu n'est pas inclus dans la licence Creative Commons du chapitre et que votre utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation légale ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement du détenteur des droits d'auteur.



## Chapitre 4

# Prolifération nucléaire



Le 29 mars 1976, d'anciens responsables du gouvernement américain ayant travaillé sur les armes nucléaires ont publié des déclarations conjointes sous le titre « L'atome pacifique entre en guerre ». Ces responsables étaient :

Dr George Kistiakowsky, chef de la division des explosifs du projet Manhattan et assistant spécial du président Eisenhower ;

Le Dr Theodore Taylor, qui avait été concepteur d'armes nucléaires aux laboratoires de Los Alamos et directeur adjoint de l'Agence de soutien atomique du ministère de la Défense ;

Herbert Scoville, ancien directeur technique du projet d'armes spéciales des forces armées et chef du renseignement scientifique à la CIA ;

Dr. George Rathjens, ancien directeur de l'évaluation des systèmes d'armes et ancien scientifique en chef de l'Agence des projets de recherche avancée du ministère de la Défense ; et

Dr. Bernard Feld, chef adjoint du groupe d'assemblage critique, projet de bombe atomique de la Seconde Guerre mondiale, ancien secrétaire général des conférences scientifiques internationales de Pugwash, vice-président de l'Académie américaine des sciences, rédacteur en chef du Bulletin of the Atomic Scientists.

Scoville a commencé par exposer le thème général de sa mission :

Nous sommes tous les quatre réunis aujourd'hui à Princeton, dans le bureau qu'utilisait le professeur Albert Einstein lorsque les terribles possibilités d'une explosion nucléaire furent reconnues pour la première fois. A la suite de discussions dans ce même bureau, Einstein écrivit au président Roosevelt pour lui demander de mettre en place un programme visant à garantir que cette arme dangereuse ne tombe pas entre les mains des nazis. C'est ainsi que naquit la bombe atomique.

---

Doug Brugge est l'auteur principal de ce chapitre.

« Aujourd'hui, trente ans plus tard, nous sommes réunis ici parce que nous craignons que ces armes ne tombent bientôt entre de nombreuses mains dans de nombreux coins du monde – entre les mains de gouvernements nationaux instables, de cliques militaires agressives ou de groupes terroristes irresponsables, avec des conséquences incalculables pour nous tous. Ce danger est le résultat direct de la croissance incontrôlée de l'industrie nucléaire, qui rend largement disponibles les matières nécessaires à la fabrication de ces armes » (CCNR, 1976).

Ce qui est remarquable dans cette citation, c'est le lien sans ambiguïté qui existait entre cette technologie et l'énergie nucléaire, comme l'ont constaté ces quarante dernières années cet expert et ses collègues. Malgré la certitude de ce lien au fil des décennies, on continue aujourd'hui à tenter de brouiller et de brouiller la question aux yeux du public.

Dans un article paru dans le New York Times, Joshua S. Goldstein et Staffan A. Qvist, auteurs de « A Bright Future: How Some Countries Have Solved Climate Change and the Rest Can Follow » avec Steven Pinker, professeur de psychologie à l'Université de Harvard, affirment que l'énergie nucléaire « n'a pas contribué à la prolifération des armes, grâce à des contrôles internationaux rigoureux : 24 pays disposent de l'énergie nucléaire mais pas d'armes, tandis qu'Israël et la Corée du Nord disposent d'armes nucléaires mais pas de puissance » (Goldstein et al., 2019).

Les auteurs avancent cette affirmation en incluant 16 pays qui ont développé l'énergie nucléaire sous l'égide de l'OTAN ou de l'Union soviétique. Ils affirment également que la Corée du Nord et Israël ont développé des armes nucléaires sans énergie nucléaire, mais cela est également trompeur car tous deux disposent de réacteurs nucléaires, mais pas d'utilisation commerciale de l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité.

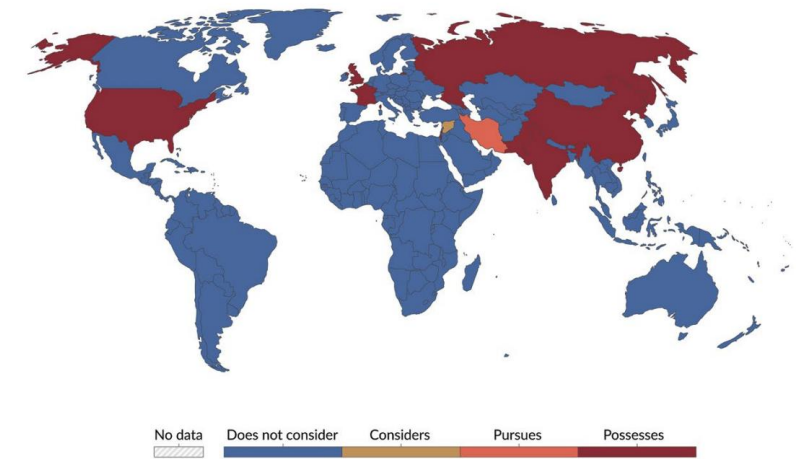
Avec les cinq grandes puissances nucléaires (États-Unis, Royaume-Uni, Russie, France et Chine), il reste un certain nombre de pays qui ont été, sont ou pourraient devenir des menaces d'acquisition d'armes nucléaires. Ces pays sont : l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Bangladesh, l'Égypte, l'Iran et les Émirats arabes unis. Cela laisse également de côté l'Inde et le Pakistan, qui ont développé des armes nucléaires en dehors de l'accord de non-prolifération (Fig. 4.1).

Le principal défi pour fabriquer une arme nucléaire est d'obtenir des matériaux fissiles. Il existe deux types de matériaux fissiles qui peuvent être utilisés, soit de l'uranium hautement enrichi, soit du plutonium. L'uranium naturel se présente sous la forme de deux « isotopes » qui ont des poids moléculaires différents, 235 et 238. Seul l'uranium 235 peut être utilisé dans un réacteur nucléaire ou une bombe.

L'uranium 235 n'est présent qu'en quantité infime dans l'uranium naturel. Plusieurs procédés industriels permettent d'enrichir l'uranium 235. Il s'agit de la diffusion gazeuse, de la centrifugation gazeuse et de l'utilisation de lasers. Un faible enrichissement de l'uranium à 3,5-5,0 % d'uranium 235 est nécessaire pour produire du combustible nucléaire.

a Country position on nuclear weapons, 2023

Our World in Data



Data source: Bleek (2017); Nuclear Threat Initiative (2024) OurWorldInData.org/nuclear-weapons | CC BY  
Note: The Chart tab uses numeric values, ranging from 0 for not considering nuclear weapons, to 3 for possessing them.  
Source: Our World in Data



Source: Carbon Brief

Fig. 4.1 Les cartes des pays (a) possédant ou cherchant à se doter d'armes nucléaires et (b) dont l'emplacement des centrales nucléaires coïncide largement, à l'exception notable du Japon et de l'Allemagne, tous deux démilitarisés après la Seconde Guerre mondiale et fonctionnant effectivement sous la protection des armes nucléaires américaines. ((a) Source : Our World in Data (nd), (b) Source : Carbon Brief (2016))

réacteurs. Plus de 90 % d'uranium 235, ou uranium hautement enrichi, est nécessaire pour être utilisé dans les bombes.

Les mêmes procédés peuvent être utilisés pour enrichir l'uranium à des niveaux permettant son utilisation dans des centrales nucléaires ou pour la production de matériaux de qualité militaire. C'est là que réside le problème de l'extension de la technologie nucléaire à des fins pacifiques de production d'énergie à des pays qui pourraient vouloir fabriquer des armes. Ils peuvent prétendre, comme l'a fait l'Iran ces dernières années, qu'ils enrichissent l'uranium à des fins pacifiques, même s'ils visent probablement à l'enrichir à un niveau supérieur pour l'utiliser dans des armes (Crowley et al., 2023).

La plupart des gens pensent que l'uranium et le plutonium sont dangereux. Cependant, leur crainte se concentre souvent sur les conséquences pour la santé de l'exposition aux radiations, ce qui n'est pas leur principale préoccupation, car ces deux éléments ne libèrent que de faibles niveaux de radiations. Le risque le plus sérieux est plutôt que de très petites quantités d'uranium enrichi et des quantités encore plus petites de plutonium puissent déclencher une réaction de fission nucléaire en chaîne. Un événement non intentionnel de cette nature est appelé criticité.

Un exemple historique peu connu en dehors de ceux qui ont une connaissance approfondie des événements nucléaires aux États-Unis permet d'illustrer ce danger. Karl Z. Morgan était un physicien et l'un des fondateurs de la discipline de la physique de la santé. Vers la fin de sa vie, il s'est montré critique à l'égard de l'énergie nucléaire et des armes nucléaires. Dans son autobiographie, « The Angry Genie: One Man's Walk Through the Nuclear Age », il raconte l'histoire d'une criticité à la centrale nucléaire Y-12 de l'Union Carbide Nuclear Company à Oak Ridge, Tennessee (Crowley et al., 2023).

En raison du risque de criticité, l'installation interdisait d'introduire même des conteneurs relativement petits qui pourraient, d'une manière ou d'une autre, contenir suffisamment d'uranium enrichi pour déclencher une réaction en chaîne. Si la plupart des personnes qui y travaillaient avaient été formées, elles n'avaient apparemment pas pensé à former le concierge, un homme noir, qui avait peut-être aussi été négligé en raison de sa race.

Morgan écrit :

Un matin, le concierge commença ses tâches matinales dans le bâtiment Y-12 avant l'arrivée des opérateurs. Agacé par le fait qu'une flaque de solution jaunâtre et sale s'était accumulée à plusieurs reprises sur le sol, il « résout » le problème. Il récupère un tonneau de 200 litres d'eau de pluie à l'extérieur du bâtiment et le place sous le tuyau où il recueillera le liquide qui s'égoutte lentement. Jour après jour et semaine après semaine, ce tonneau restait dans un endroit discret derrière une machine.

Jusqu'à la fin, selon les mots de Morgan :

J'étais dans mon bureau à X-10 ce matin-là lorsque le téléphone a sonné. J'ai décroché le combiné et j'ai entendu quelqu'un crier : « Nous avons un accident critique à Y-12 et des milliers d'employés évacuent la centrale ! »

J'ai pris ma trousse d'urgence et me suis précipité vers la porte. Mon assistant, Hubert Yockey, a également pris sa trousse et nous avons couru vers une voiture de société. J'ai parcouru les dix miles sur une route sinueuse et accidentée jusqu'à Y-12 en huit minutes. Des centaines de personnes se pressaient devant la porte.

Seule notre voiture a pu passer devant les gardes et pénétrer dans la zone où, quelques minutes auparavant, des milliers de personnes travaillaient. Lorsque Yockey et moi sommes entrés dans le bâtiment sans fenêtre qui contenait le problème, l'obscurité nous a engloutis. Je me suis murmuré : « Mon royaume pour une lampe de poche. » ...

Une faible lumière brillait provenant d'une lampe de secours fonctionnant sur batterie à l'extrémité du bâtiment, et nous nous sommes « dirigés » vers le canon qui mettait nos vies en danger du mieux que nous pouvions. Incapables de lire les échelles du compteur Geiger, nous pouvions entendre les clics de plus en plus rapides à mesure que nous approchions de l'extrémité du bâtiment.

Chaque fois que l'aiguille du compteur Geiger touchait le bout de l'échelle, nous passions à une échelle supérieure à mesure que nous nous approchions de la source radioactive. Plus important encore, nous écoutions les clics sur notre dosimètre à neutrons Hurst. Heureusement, nous n'en entendions aucun. La présence de neutrons signifiait qu'un assemblage critique potentiellement mortel existait toujours.

Les clics de notre compteur Geiger ont saturé ou se sont conjugués à l'échelle la plus élevée, de sorte que le compteur a cessé de cliquer. .... Nous avons fui le bâtiment. » Après avoir fait leur rapport, une équipe « a mis des vêtements de protection et des masques, s'est précipitée dans le bâtiment et a versé dans le baril une forte concentration de borax, qui absorbe les neutrons et « tue » toute possibilité d'assemblage critique du fluide.

Des échantillons de sang prélevés peu après ont révélé que de nombreux employés avaient reçu « des doses de neutrons et de rayons gamma inadmissibles ». « Cinq des travailleurs de Y-12 ont souffert de maladies dues aux radiations et [de perte de cheveux]. Ceux qui ont reçu [de fortes doses] de radiations ont eu des [saignements]... »

« Même la personne qui a reçu [une dose plus faible] a montré certains symptômes de lésion due aux radiations. » (Crowley et al., 2023).

Le fait est que les matières fissiles sont très dangereuses, même en petites quantités. montants.

L'autre source de matière fissionnable est le plutonium. Cependant, la source du plutonium est différente de celle de l'uranium fissionnable. Le plutonium n'existe qu'en quantités infimes dans les gisements d'uranium naturel, mais il est produit par fission dans les réacteurs nucléaires. Pour en obtenir suffisamment pour l'utilisation dans l'énergie nucléaire ou les armes, il faut l'extraire chimiquement des autres sous-produits hautement radioactifs de la fission nucléaire.

L'extraction et la purification du plutonium des déchets de réacteurs nucléaires de haute activité constituent une opération industrielle dangereuse (Fig. 4.2), mais un pays qui espère acquérir la capacité de fabriquer des armes nucléaires n'a pas besoin de s'engager lui-même dans cette opération s'il peut trouver un autre pays disposé à lui vendre du plutonium. L'Inde en est un exemple révélateur. En 1974, l'Inde a utilisé du plutonium provenant d'un réacteur canadien pour construire et faire exploser sa première bombe atomique lors d'un essai souterrain.

L'octroi du statut d'arme nucléaire à l'Inde a donc été motivé par des décisions politiques et économiques. L'obtention d'uranium enrichi ou de plutonium reste le principal obstacle à la fabrication d'un explosif nucléaire. Le reste de la conception et de la construction consiste en des questions d'ingénierie simples. Moins de 5 kilos de plutonium suffisent pour une bombe.

Il est inquiétant qu'il y ait aujourd'hui 1 000 tonnes de plutonium produites, stockées ou utilisées dans des armes (Wikipedia, 2023b). Bien que la sécurité soit stricte, il faudrait la libération, le déplacement ou la vente d'une petite quantité pour que cela soit possible.



Fig. 4.2 Une usine de retraitement qui extrait le plutonium des déchets nucléaires de haute activité des réacteurs nucléaires. Le plutonium ainsi obtenu peut être utilisé dans les centrales nucléaires et dans les armes nucléaires. (Source : Vue aérienne de Sellafield, Cumbria (2020), © Simon Ledingham : Géographie Grande-Bretagne et Irlande)

Un pays non nucléaire est assez fort pour acquérir des armes nucléaires. Il convient de mentionner la quantité de Pu et d'U-235 que les États-Unis ont perdue, appelée, de manière euphémique, Material Unaccounted For (MUF). En 2012, la quantité était de 6 tonnes.

Le Canada est considéré comme un pays pacifique, mais il est toujours possible qu'il contribue à la prolifération nucléaire. Le Dr Gordon Edwards, président du Regroupement canadien pour la surveillance du nucléaire, a joué un rôle actif dans l'opposition aux propositions canadiennes de développer un réacteur nucléaire qui dépend de la production et de l'extraction de plutonium comme combustible (appelé réacteur surgénérateur parce qu'il augmente la quantité de plutonium). L'intention est de vendre ces réacteurs à d'autres pays du monde, ce qui permettrait d'avoir accès à la technologie nécessaire pour produire des armes nucléaires.

Un comité de la Chambre des communes du Canada a recommandé au gouvernement de « travailler avec des partenaires internationaux et scientifiques pour examiner le retraitement des déchets nucléaires et ses implications pour la gestion des déchets et la vulnérabilité à la prolifération [des armes nucléaires] ». Cette recommandation fait suite à une subvention de 50,5 millions de dollars accordée à la société Moltex en mars 2021 pour « développer une installation de retraitement du plutonium sur le site nucléaire de Point Lepreau, dans la baie de Fundy » (CRED-NB, 2023).

Le Dr Edwards a déclaré dans un communiqué de presse : « En soutenant la mise en œuvre d'une technologie de retraitement destinée à l'exportation, en lien avec un réacteur nucléaire alimenté au plutonium, sans tenir compte des implications en matière d'armes, le Canada pourrait une fois de plus propager la bombe à l'étranger » (CRED-NB, 2023).

Lorsque l'Inde a obtenu le statut d'arme nucléaire, elle a exercé une pression sur le Pakistan, son ennemi juré, pour qu'il lui emboîte le pas. Mais cela n'a pas eu lieu immédiatement, car le chemin vers un Pakistan doté de l'arme nucléaire était tortueux et impliquait un transfert de technologie de la part des États-Unis et de la Chine. Selon le New York Times, la Chine a fourni au Pakistan le modèle d'une arme nucléaire ainsi que de l'uranium hautement enrichi (Weiner, 1998).

Les États-Unis ont également aidé le Pakistan en se fondant sur un calcul géopolitique selon lequel le Pakistan était un ennemi de l'Inde et l'Inde était plus proche de l'Union soviétique, rivale stratégique des États-Unis. Suivant cette logique, les États-Unis ont fourni au Pakistan son premier réacteur nucléaire de recherche, lui donnant les compétences technologiques nécessaires, mais pas suffisantes, pour fabriquer des armes. À l'époque où les États-Unis soutenaient les rebelles musulmans contre le gouvernement afghan aligné sur les Soviétiques, les États-Unis, selon les termes du New York Times, « fermaient les yeux » sur le programme d'armement nucléaire du Pakistan (Weiner, 1998).

Contrairement au Pakistan, pour qui l'obtention d'un réacteur nucléaire a joué un rôle mineur dans le développement de l'arme nucléaire, la construction d'un réacteur nucléaire a été essentielle à la transformation d'Israël en puissance nucléaire. Bien qu'Israël ne confirme ni ne nie sa capacité nucléaire, il est bien établi qu'il possède des centaines d'ogives nucléaires, bien que leur nombre exact et leur nature – tactiques ou de grande taille – ainsi que leurs mécanismes de lancement restent flous.

L'incapacité à séparer « l'atome pour la paix », le programme d'Eisenhower visant à diffuser l'énergie nucléaire sans militariser, est inhérente au programme nucléaire israélien. Israël a adhéré avec empressement à l'initiative « l'atome pour la paix », tout en utilisant secrètement des intentions pacifiques comme couverture pour développer des armes nucléaires, une approche répétée par d'autres acteurs nucléaires potentiels au cours des années suivantes.

Sous couvert d'une énergie nucléaire pacifique destinée à dessaler l'eau de mer qui irriguerait le désert, la France a aidé Israël à construire son premier réacteur nucléaire à Dimona (Fig. 4.3). Pour notre propos, l'essentiel est que ce réacteur a été utilisé pour produire du plutonium, séparé du reste des déchets dans un centre de retraitement, puis utilisé dans des armes nucléaires. Pour être clair, le plutonium extrait des barres de combustible du réacteur était essentiel, mais il n'était pas suffisant à lui seul. Des technologies et des compétences supplémentaires ont également été acquises, notamment de l'eau lourde expédiée secrètement du Royaume-Uni via la Norvège et du yellow cake, de l'uranium concentré à partir de minerai, fourni par l'Argentine (Burr & Cohen, [sd](#) ; Wikipedia, 2023a).

Comme d'autres puissances nucléaires et celles qui cherchent à rejoindre le club, Israël a cherché à se doter d'armes nucléaires à des fins stratégiques et géopolitiques, principalement pour dissuader les attaques des États voisins. Cette motivation reste convaincante pour de nombreux autres pays, y compris ceux du Moyen-Orient. Compte tenu de sa propre trajectoire, Israël comprend mieux que quiconque que la technologie de l'énergie nucléaire est une étape vers l'obtention de la bombe.



Fig. 4.3 Une photo prise le 8 mars 2014 montre une vue partielle du Dimona. (Photo d'actualité – Getty Images)

C'est précisément pour cette raison qu'Israël a détruit des réacteurs nucléaires en Syrie et en Irak et, avec l'aide des États-Unis, a endommagé une technologie nucléaire que l'Iran, sans surprise, prétend être destinée à des fins pacifiques (Burr & Battle, 2021 ; Farrel, 2018 ; News Wires, 2021 ; The Iran Primer, 2021). Les inspections en Iran se sont concentrées sur le niveau d'enrichissement de l'uranium : est-ce de l'uranium de faible qualité pour des fins médicales ou de l'uranium de haute qualité pour la fabrication de bombes ? Il n'est pas si facile de voir à travers le voile du secret pour discerner de quoi il s'agit. Récemment, cependant, il est devenu évident que l'Iran est très proche de disposer de l'uranium enrichi dont il a besoin pour une arme.

De nombreux autres pays ont commencé à emprunter la voie du nucléaire avant de l'abandonner. Parmi ces pays, on trouve la Corée du Sud, Taïwan, l'Argentine et le Brésil. Seule l'Afrique du Sud a réussi à développer l'arme nucléaire avant de l'abandonner.

Au cœur du programme sud-africain, présenté comme un programme de développement d'« explosifs nucléaires pacifiques », se trouvait, comme partout ailleurs, un réacteur nucléaire, dans ce cas fourni par les États-Unis (Albright, 2001).

Certains ont affirmé que les réacteurs au thorium étaient une solution car ce type de réacteur ne constituait pas une menace pour la prolifération. Cette affirmation est fausse car le thorium n'est pas un combustible nucléaire puisqu'il ne peut pas entretenir une réaction nucléaire en chaîne. Lorsque le thorium est mélangé au plutonium, notre vieil ami, le « combustible mixte » qui en résulte peut entretenir une réaction en chaîne grâce au plutonium fissile. Le bombardement de neutrons qui en résulte convertit une partie du thorium inerte en uranium 233 fissile. (Gordon, 2023).

Il devrait être particulièrement troublant pour quiconque soutient la non-prolifération que la Corée du Nord, un pays à faible revenu, économiquement sous-développé, secret et isolé, ait pu se doter d'armes nucléaires. La Corée du Nord a obtenu son premier petit réacteur de recherche de l'Union soviétique et a ensuite eu accès à la technologie nucléaire du Pakistan. Bien que le pays soit entouré de secret, au moins certaines de ses armes utilisent du plutonium retraité de ses réacteurs nucléaires (NTI, 2021).

Aujourd'hui, à l'exception de la Corée du Nord et de l'Iran, les tentatives actives de contourner la non-prolifération sont rares. Cela reflète peut-être un certain succès dans la tentative de convaincre les pays candidats de renoncer aux armes nucléaires ou peut-être que certains pays ont commencé à voir les inconvénients d'être une puissance nucléaire. Quelle que soit la raison, il n'est pas certain que l'accalmie se poursuive. On peut se demander si la possibilité d'étendre la capacité nucléaire à l'Arabie saoudite, un élément apparent des négociations en cours au moment où ces lignes sont écrites, pourrait ouvrir la porte à une deuxième puissance nucléaire au Moyen-Orient. (Murphy et al., 2023 ; Wilkins Brett, 2023).

Il semble que la possession d'armes nucléaires demeure une motivation puissante, en particulier au Moyen-Orient. L'énergie nucléaire est un bon prétexte pour acquérir la technologie nécessaire à la fabrication d'armes nucléaires. Voulons-nous que de plus en plus d'États, même s'ils s'accumulent progressivement, possèdent ces armes ? Combien de paires d'ennemis, comme l'Inde et le Pakistan, voulons-nous voir se défier mutuellement avec des armes nucléaires ? Le risque d'une guerre nucléaire n'augmente-t-il pas à mesure que le monde compte de plus en plus d'ennemis en position de destruction mutuelle assurée ?

## Points récapitulatifs

1. L'énergie nucléaire ne peut être dissociée de la possibilité de développer des armes nucléaires.
2. Le Pakistan et Israël ont utilisé des réacteurs nucléaires pour développer des armes nucléaires.
3. Étant donné qu'une petite quantité suffit pour créer une arme, le plutonium constitue une préoccupation particulière.

## Références

- Vue aérienne de Sellafield, Cumbria. (2020). <https://www.geograph.org.uk/photo/50827>
- Albright, D. (2001). Institut pour la science et la sécurité internationale. Programme d'armement nucléaire de l'Afrique du Sud. [http://web.mit.edu/SSP/seminars/wed\\_archives01spring/albright.htm](http://web.mit.edu/SSP/seminars/wed_archives01spring/albright.htm)

- Burr, W., & Battle, J. (2021). L'attaque israélienne contre la base irakienne Osirak 1981 : revers ou impulsion pour les armes nucléaires ? Iran Irak Nuclear Vault from National Security Archive: 767. <https://nsarchive.gwu.edu/briefing-book/iraq-nuclear-vault/2021-06-07/osirak-israels-strike-iraqs-nuclear-reactor-40-years-later>
- Burr, W., & Cohen, A. (nd). Kennedy, Dimona et le problème de la prolifération nucléaire : 1961-1962. Centre Wilson <https://www.wilsoncenter.org/publication/kennedy-dimona-and-the-nuclear-proliferation-problem-1961-1962>
- Carbon Brief. (2016). Cartographie : le monde et les centrales nucléaires. Carbon Brief, <https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants/>
- CCNR. (1976). La menace de la guerre nucléaire. Coalition canadienne pour la surveillance du nucléaire (CCNR). Granada Television Ltd, Manchester M60 9EA36 Golden Square, Londres W1R 4AH : Granada Independent Television/le réseau britannique de télévision indépendante. [https://ccnr.org/Atome\\_pacifique.html](https://ccnr.org/Atome_pacifique.html)
- CRED-NB. (2023). La bombe à retardement – Ottawa va-t-il revoir son soutien au retraitement du plutonium? Coalition pour un développement énergétique responsable au Nouveau-Brunswick (CRED-NB). <https://crednb.ca/2023/02/22/la-bombe-a-revoir-le-soutien-du-canada-au-retraitement-du-plutonium/>
- Crowley, M., Fassihi, F., et Bergman, R. (2023). Espérant éviter une crise nucléaire, les États-Unis cherchent un accord informel avec l'Iran. Le New York Times. <https://www.nytimes.com/2023/06/14/us/politics/biden-iran-nuclear-program.html?smid=nytcore-ios-share&referringSource=articleShare>
- Farrel, S. (2018). Israël admet avoir bombardé un réacteur nucléaire syrien présumé en 2007, prévient l'Iran. Reuters. <https://www.reuters.com/article/us-israel-syria-nuclear-idUSKBN1GX09K>
- Goldstein, J. S., Qvist, S. A. et Pinker, S. (2019). L'énergie nucléaire peut sauver le monde. The New York Times <https://www.nytimes.com/2019/04/06/opinion/sunday/climate-change-nuclear-power.html>
- Gordon, E. (2023). Déchets nucléaires : les questions se multiplient. YouTube. <https://www.youtube.com/regarder?v=uEG3pS0bUvk>
- Murphy S. C, Hollen Van, C., Durbin J. R., Welch, P., Schatz, B., Carper, R. T., Duckworth, T., Murray, P., Baldwin, T., Sanders, B., Fetterman, J., Warren, E., Ossoff, J., Shaheen, J., Kaine, T., Merkley A. J., Warnock, R., Markey, J. E., & Lujan Ray, B. (2023). Dans l'honorable Joseph R. Biden, Jr. Président des États-Unis (éd.), Efforts soutenus par les États-Unis pour faciliter la normalisation des relations entre l'Arabie saoudite et Israël. [https://www.murphy.senate.gov/imo/media/doc/lettre\\_de\\_normalisation\\_entre\\_israel\\_et\\_saoudite.pdf](https://www.murphy.senate.gov/imo/media/doc/lettre_de_normalisation_entre_israel_et_saoudite.pdf)
- Fils d'actualité. (2021). Israël frappe des cibles en Syrie après l'atterrissage d' un missile près d'un réacteur nucléaire . France 24. <https://www.france24.com/fr/moyen-orient/20210422-israel-frappe-des-cibles-en-syrie-apres-l-atterrissage-d-un-missile-pres-d-un-reacteur-nucleaire>
- NTI. (2021). Aperçu du nucléaire nord-coréen. The Nuclear Threat Initiative (NTI). Récupéré en août 4, 2023, de <https://www.nti.org/analysis/articles/north-korea-nuclear/>
- Our World in Data. (nd). Position des pays sur les armes nucléaires. Armes nucléaires. Our World in Data. Récupéré le 8 août 2023 sur <https://ourworldindata.org/nuclear-weapons>
- L'Iran Primer. (2021). Sabotage israélien du programme nucléaire iranien. [www.iranprimer.usip.org](http://www.iranprimer.usip.org). Récupéré le 4 août 2023 sur <https://iranprimer.usip.org/blog/2021/apr/12/sabotage-israelien-du-programme-nucleaire-iranien>
- Weiner, T. (1998). Angoisse nucléaire : le savoir-faire ; les États-Unis et la Chine ont aidé le Pakistan à construire sa bombe. Le New York Times. <https://www.nytimes.com/1998/06/01/world/nuclear-anxiety-the-know-how-us-and-china-helped-pakistan-build-its-bomb.html>
- Wikipédia. (2023a). Les armes nucléaires et Israël. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). Récupéré le 4 août 2023, de [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_weapons\\_and\\_Israel](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_weapons_and_Israel)
- Wikipédia. (2023b). Plutonium. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). Récupéré le 4 août 2023 à partir de <https://en.wikipedia.org/wiki/Plutonium>
- Wilkins Brett. (2023). Les sénateurs s'inquiètent des projets d'armement nucléaire saoudiens. Beyond Nuclear International <https://beyondnuclearinternational.org/2023/10/08/senators-worry-about-saudi-nuclear-arms-plans/>

Accès libre Ce chapitre est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou format, à condition de créditer l'auteur(s) d'origine et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été apportées.

Les images ou autres éléments tiers de ce chapitre sont inclus dans la licence Creative Commons du chapitre, sauf indication contraire dans une ligne de crédit du contenu. Si le contenu n'est pas inclus dans la licence Creative Commons du chapitre et que votre utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation légale ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement du détenteur des droits d'auteur.



## Chapitre 5

### Les fardeaux sociétaux imposés par le nucléaire Accidents



Les centrales nucléaires sont comme des étoiles qui brillent toute la journée ! Nous allons les semer partout dans le pays. Elles sont parfaitement sûres ! (Medvedev, 1991)

– Académicien MA Stryikovitch, ingénieur énergétique soviétique

La catastrophe nucléaire de Tchernobyl, il y a 20 ans ce mois-ci, fut peut-être, plus encore que mon lancement de la perestroïka, la véritable cause de l'effondrement de l'Union soviétique cinq ans plus tard.

La catastrophe de Tchernobyl a été un tournant historique : il y a eu l'époque qui a précédé la catastrophe, et il y a eu l'époque très différente qui a suivi... Tchernobyl m'a ouvert les yeux comme rien d'autre : elle a montré les conséquences horribles de l'énergie nucléaire, même lorsqu'elle est utilisée à des fins non militaires. (Gorbatchev, 2006)

– Mikhaïl Gorbatchev, dirigeant de l'Union soviétique en 1986

## La crise canadienne

Bien que la technologie ait été inventée aux États-Unis, la première fusion d'un réacteur nucléaire s'est produite en Ontario, au Canada, lorsque le réacteur NRX des laboratoires de Chalk River a subi un grave accident en décembre 1952. Le réacteur NRX était une installation de recherche, de petite taille par rapport aux normes d'une centrale nucléaire commerciale moderne. En plus des gaz radioactifs qui ont pu être évacués dans l'atmosphère en l'absence de surveillance, l'accident aurait libéré 10 000 curies de radioactivité contenue dans 1,2 million de gallons d'eau contaminée qui ont arrosé le sous-sol du bâtiment du réacteur.

---

Aaron Datesman est l'auteur principal de ce chapitre.

Le Curie (Ci), nommé en l'honneur de Marie Curie, est une unité d'activité indiquant une quantité de matière radioactive. Un Curie représente le nombre de désintégrations qui se produisent par seconde dans un gramme de radium. C'est une grande unité : un Curie indique une activité de 37 milliards de désintégrations par seconde. Souvent, le Becquerel (Bq), qui ne représente qu'une désintégration par seconde, est une description plus utile. Il n'existe pas de conversion directe et universelle entre l'activité et la dose. Chaque situation impliquant une exposition aux rayonnements ionisants nécessite une description et une analyse minutieuses.

Il a fallu plus d'un millier de personnes pour nettoyer le réacteur endommagé, qui a été remis en service quelques années plus tard. Une équipe du programme Naval Reactors des États-Unis a été dépêchée sur place pour diriger les travaux de réparation. Le responsable de cette unité de vingt-trois personnes était un lieutenant de Géorgie de 28 ans nommé James E. Carter. Le trente-neuvième président des États-Unis est représenté en tenue de cérémonie sur la figure 5.1. Le président Carter a partagé le souvenir suivant avec un journaliste canadien en 2011 :

C'était au début des années 50... Je n'avais que quelques secondes pour me rendre moi-même dans le réacteur. Nous sommes tous allés sur le court de tennis, et ils avaient une réplique exacte du réacteur sur le court. Nous courrions là-bas avec nos clés et vérifions un certain nombre de boulons et d'écrous et ils les remettaient en place... Et finalement, lorsque nous sommes descendus dans le réacteur lui-même, qui était extrêmement radioactif, nous nous précipitions là-dedans aussi vite que possible et décollions.

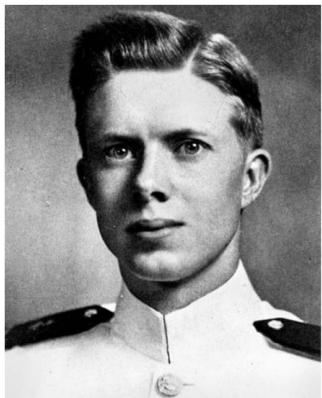


Fig. 5.1 (à gauche) Le lieutenant James Carter, qui a servi dans la branche des réacteurs navals de la Commission américaine de l'énergie atomique, dirigée par le capitaine Hyman Rickover. (à droite) Le président Jimmy Carter visitant la centrale nucléaire sinistrée de Three Mile Island Unité 2, en avril 1979

autant de boulons que nous pouvions, les mêmes boulons sur lesquels nous venions de nous entraîner. Chaque fois que nos hommes parvenaient à retirer un boulon ou un raccord du noyau, la pièce équivalente était retirée sur la maquette. (Milnes, 2011)

L'atmosphère à l'intérieur du réacteur NRX était très dangereuse, et les membres de l'équipage n'étaient autorisés à y entrer que par équipes de 90 secondes. Même en portant des équipements de protection, les membres de l'équipage ont reçu une dose équivalente à une année d'exposition autorisée au cours de chaque brève période de travail. La dose totale reçue par le lieutenant Carter dépassait d'un facteur d'environ mille les limites considérées comme acceptables aujourd'hui. On lui a dit qu'il était probable qu'il n'aurait jamais d'enfants. (Heureusement, la prédiction était fausse : le président et Rosalynn Carter ont eu quatre enfants.) L'urine du lieutenant Carter est restée radioactive pendant six mois après l'accident.

Vingt-sept ans plus tard, le président Jimmy Carter se rendit en Pennsylvanie centrale à la suite d'un grave accident survenu à la centrale nucléaire de Three Mile Island Unit 2 à Middletown, en Pennsylvanie, près de la capitale de l'État, Harrisburg. L'accident commença tôt le matin du mercredi 28 mars 1979. Carter est photographié dans la salle de contrôle de TMI-2, le dimanche 1er avril 1979, sur la photo de droite de la figure 5.1.

## Toutes les technologies sont sujettes aux accidents

Les accidents sont la façon dont les ingénieurs apprennent. Cette idée simple n'a rien de surprenant. Par exemple, si l'on souhaite connaître la résistance à la rupture d'un matériau, il faut prendre un morceau et le casser. « L'ingénierie est une forme d'art qui fait appel à des principes scientifiques », écrivaient le journaliste Ira Rosen et l'ingénieur Mike Gray, « et cette association déroute beaucoup de gens. Nous avons tendance à penser que l'ingénierie elle-même est une science, mais ce n'est rien d'autre qu'une menuiserie avancée. Les praticiens apprennent en faisant. » (Gray & Rosen, 1982) Leur intuition correcte apparaît dans l'introduction de leur livre sur l'accident de Three Mile Island, intitulé *The Warning*.

Les accidents arrivent, point final : toute autre position est une fantaisie au niveau de celle exposée par l'académicien dans la première citation. Malgré les assurances publiques de sécurité et de compétence, en fait, les autorités comprennent la réalité de la situation. Par exemple, la Commission de réglementation nucléaire a affirmé en 1985 comme objectif qu'il ne devrait pas y avoir plus d'un incident de dommage au cœur du réacteur pour 10 000 ans de fonctionnement du réacteur. Il y a eu au moins dix incidents de dommage au cœur au cours de l'histoire de la technologie de l'énergie nucléaire dans les pays occidentaux.

Bien que l'on puisse débattre de la question de savoir si certains cas doivent être exclus sur la base d'un double usage (à la fois militaire et civil) ou d'une conception expérimentale, il est incontestable que quatre centrales nucléaires commerciales conçues par des entreprises américaines ont fondu, entraînant des rejets massifs.

de rayonnements ionisants. Il s'agit de l'unité 2 de Three Mile Island (TMI), en Pennsylvanie en 1979, et des unités 1, 2 et 3 de Fukushima Daiichi, au Japon, le 11 mars 2011. De plus, un réacteur commercial de conception soviétique a fondu<sup>1</sup> en Ukraine, le 26 avril 1986. Il s'agissait de l'unité 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl, un réacteur RMBK modéré au graphite et dépourvu de structure de confinement.

En 2019, l'expérience cumulée d'exploitation des réacteurs dans le monde dépassait 18 000 années-réacteurs. Par conséquent, en ne prenant en compte que ces cinq accidents graves, la fréquence des fusions (beaucoup plus graves que les « dommages au cœur ») accompagnées d'une libération radiologique grave a été d'une pour 3 600 années-réacteurs. Les performances historiques des centrales nucléaires n'ont pas atteint l'objectif déclaré de la NRC en matière de sûreté opérationnelle.

## Sujets communs

Les catastrophes nucléaires en Ukraine et au Japon ont été des événements vastes et complexes, qui ont fondamentalement perturbé les sociétés dans lesquelles elles se sont produites. Par exemple, comme indiqué dans la deuxième citation qui ouvre ce chapitre, la catastrophe de Tchernobyl a peut-être été le facteur le plus important ayant contribué à la dissolution de l'Union soviétique. Il n'est pas utile de faire ici un effort utile pour fournir une description complète de l'un ou l'autre accident. Les auteurs souhaitent plutôt examiner la dynamique sociétale entourant les accidents de centrales nucléaires dans le contexte de l'accident de Three Mile Island, avec lequel ils ont un lien grâce à des travaux scientifiques en cours. Il existe quelques points communs : la contamination des denrées alimentaires, la dispersion à longue distance, le secret gouvernemental et commercial, ainsi que les populations déplacées et les besoins massifs en personnel pour le nettoyage et la remise en état.

La position consensuelle des milieux scientifiques (telle qu'exprimée par le comité BEIR VII de l'Académie nationale des sciences) est qu'il n'existe pas de dose sûre de rayonnement ionisant. Toute exposition comporte un risque de dommage, d'autant plus grand que le degré d'exposition est élevé. Néanmoins, il existe des expositions qui sont « autorisées », notamment des niveaux de contamination de l'eau potable et des denrées alimentaires.<sup>2</sup> Aux États-Unis, les doses de rayonnement ionisant sont limitées.

---

<sup>1</sup>Il existe des preuves raisonnablement convaincantes, fondées sur la sismologie et l'analyse isotopique, qu'une explosion nucléaire de faible puissance a eu lieu dans l'unité 4 de Tchernobyl, en plus de l'explosion de vapeur qui a détruit le réacteur.

<sup>2</sup>Parce que la composante environnementale du rayonnement de fond ne peut être évitée, l'idée d'imposer une réglementation raisonnable quelque part au-dessus des niveaux de contamination zéro semble très raisonnable. Par exemple, quel sens aurait-il de limiter le strontium 90 ou l'iode 131 à des niveaux inférieurs au niveau naturel de potassium 40 (K-40) ? Les bananes contiennent du K-40 à un niveau d'environ 120 Bq/

Les niveaux de radioactivité autorisés dans les aliments sont fixés par la Food and Drug Administration (FDA). Les radio-isotopes césium-134 et césium-137 sont autorisés à des niveaux allant jusqu'à 1200 Bq/kg. La réglementation limitant les radio-isotopes de césium dans l'Union européenne est fixée à 600 Bq/kg. En revanche, selon la loi japonaise sur l'hygiène alimentaire adoptée en 2012, le niveau autorisé de radio-césium dans les aliments généraux est bien inférieur : seulement 100 Bq/kg. Il faut donc comprendre que les niveaux de contamination autorisés sont une question juridique – en fait, une détermination sociale et politique. Ils ne sont pas scientifiques.

Les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ne sont pas des événements localisés. Comme c'était également le cas à l'époque des essais d'armes nucléaires<sup>3</sup>, les retombées radioactives dues à ces accidents ont été mondiales. La communauté internationale a pris connaissance de la catastrophe de Tchernobyl pour la première fois lorsque la radioactivité a été détectée en Suède ; la revue scientifique *Health Physics* a choisi comme mot-clé « thé turc » en raison de la contamination causée par l'accident. Les radiations de Fukushima ont également été observées sur la côte ouest des États-Unis peu de temps après l'accident. Des chercheurs du département de génie nucléaire de l'université de Californie à Berkeley ont découvert une contamination radioactive dans des produits cultivés en Californie.

Le secret et la méfiance sont un dernier élément commun. Par exemple, le *New York Times* a rapporté ce qui suit à propos des enquêtes sur la catastrophe de Tchernobyl menées en 1991, l'année de la dissolution de l'Union soviétique :

La possibilité de poser des questions, aussi limitée soit-elle, a néanmoins permis à la commission du Soviet suprême chargée d'enquêter sur Tchernobyl de découvrir deux ordres gouvernementaux secrets de haut niveau : l'un datant de 1987 classant comme secret toute information sur l'étendue de la contamination radioactive, et l'autre datant de 1988 décrétant qu'aucun diagnostic médical ne peut relier une maladie à une exposition aux radiations. (Barringer, 1991)

Les accidents des centrales nucléaires de Tchernobyl, de Fukushima et de Three Mile Island ont été des événements monumentaux aux conséquences immenses, pour lesquels les autorités gouvernementales ont une part de responsabilité importante. Les informations fournies par ces mêmes gouvernements ne doivent pas nécessairement être considérées comme fiables, faisant autorité ou complètes, même en l'absence d'autres sources d'informations fiables. Le fait que l'on ne puisse pas faire entièrement confiance à son gouvernement est l'un des fardeaux sociétaux coûteux imposés par la technologie de l'énergie nucléaire.

---

kg. Étant donné que la concentration de potassium dans le corps humain est contrôlée de manière homéostatique dans une plage étroite, la comparaison est malheureusement fautive.

<sup>3</sup>Selon l'UNSCEAR, les dépôts mondiaux de Cs-137 et d'I-131 dus aux essais d'armes nucléaires se sont élevés respectivement à 26 MCi et 18 200 MCi. Ces quantités dépassent largement les retombées dues aux accidents de réacteurs, bien que dispersées sur une zone beaucoup plus vaste.

## Tchernobyl et Fukushima

On estime que les deux radio-isotopes les plus importants libérés par les accidents de centrales nucléaires sont le césium 137 (Cs-137) et l'iode 131 (I-131).

Selon une évaluation publiée par l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire, l'accident de Tchernobyl a libéré dans l'environnement environ 2 millions de curies (2 MCi) de Cs-137 et 27 MCi d'I-131. La totalité du stock de xénon-133, un gaz noble radioactif, a également été libérée dans le réacteur, bien que l'impact de cette libération soit généralement négligé en raison de sa dispersion importante. Environ 3 % du combustible s'est échappé sous forme de particules, ce qui représente jusqu'à six tonnes de matière hautement radioactive.

Les 49 000 habitants de la ville de Pripjat, une cité atomique bénéficiant de privilèges particuliers et d'une qualité de vie élevée, ont été évacués en toute hâte à bord de 1 100 bus le lendemain de l'accident. Bien que la plupart d'entre eux pensaient pouvoir rentrer chez eux au bout de quelques jours, Pripjat a en fait été abandonnée après l'accident. Au total, environ 200 000 personnes ont été déplacées des zones contaminées après la catastrophe de Tchernobyl. Le critère de relogement était un niveau de Cs-137 supérieur à 40 curies par kilomètre carré.

Répartis uniformément, les 2 MCi de radiocésium libérés par l'accident rendraient inhabitable une zone de 45 000 km<sup>2</sup>, soit les trois quarts de la superficie de l'État de Virginie-Occidentale. La zone réellement interdite s'étend sur environ 15 000 km<sup>2</sup>, soit à peu près la taille de l'État du Connecticut.

La question des niveaux de contamination admissibles était une question urgente pour les autorités de l'Union soviétique après la catastrophe de Tchernobyl, d'autant plus que les régions touchées étaient d'importantes zones agricoles. Par exemple, les entreprises de conditionnement de viande ont reçu des instructions spéciales sur la manière de traiter la viande radioactive.

Les instructions ordonnaient aux bouchers de classer la viande en fonction de sa radioactivité. Les emballeurs devaient broyer la chair radioactive et la mélanger avec des proportions appropriées de viande propre pour la fabrication de saucisses. Les experts en logistique des accidents pensaient selon la croyance communément admise selon laquelle la diffusion<sup>4</sup> était la solution. Il fallait répandre la viande contaminée à grande échelle afin que chaque personne à travers la vaste URSS ingère sans le savoir sa propre petite part de la tragédie. Lors de la préparation des marchandises pour la vente, les emballeurs devaient « étiqueter les saucisses comme vous le feriez normalement ».

(Brun, 2019)

Pendant ce temps, des secteurs privilégiés de la société, y compris des employés du KGB, prenaient des mesures pour s'assurer qu'ils recevaient des aliments exempts de substances radioactives.

---

<sup>4</sup>Cette idée est souvent exprimée par l'expression plus accrocheuse « La dilution est la solution à la pollution ».

Malheureusement, la dilution de l'exposition est une autre forme de prolongation. Si l'hypothèse du bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques est correcte, le mélange de viande contaminée avec de la viande propre de cette manière a augmenté la dose équivalente reçue par la population.

contamination. Lorsque de la viande radioactive a été retrouvée à Moscou, des messages ont été envoyés à Kiev exigeant que de telles expéditions ne se reproduisent pas.<sup>5</sup>

Tout en s'efforçant de gérer la catastrophe, il était également nécessaire pour l'auteur-Il fallait apprendre ce qui se passait et essayer de le comprendre.

Les chercheurs de Kiev ont surveillé de près le bétail dans les fermes des régions de Narodychi et de Tchernobyl, des zones fortement contaminées et facilement accessibles depuis Kiev... « En fait », résumaient les chercheurs en 1988, « les dommages sur une période prolongée ne correspondent pas à la dose [non aiguë ou faible], mais ressemblent à des symptômes de rayonnement aigu. » Les chercheurs ont suggéré la nécessité de recalculer la méthode d'extrapolation des effets des fortes doses aux petites doses. (Brown, 2019)

L'idée selon laquelle les expositions prolongées peuvent être beaucoup plus dangereuses qu'on ne le pense généralement est un thème abordé dans d'autres chapitres de ce livre.

La « liquidation »<sup>6</sup> de la catastrophe de Tchernobyl « était une tâche d'une ampleur sans précédent dans l'histoire de l'humanité, et pour laquelle personne en URSS – ou, en fait, n'importe où ailleurs sur terre – n'avait jamais pris la peine de se préparer. (Higginbotham, 2019) Au moins sept cent mille personnes – dont beaucoup étaient mal équipées, mal formées et inconscientes des risques – ont contribué aux efforts de liquidation. L'une des liquidatrices, une biologiste spécialiste des radiations nommée Natalia Manzurova, a travaillé dans la zone d'exclusion pendant plus de quatre ans.

Elle a enregistré le souvenir suivant de son expérience, relatif au jardin d'enfants abandonné illustré dans la figure 5.2.

J'ai été impressionnée par le luxe de ce jardin d'enfants lorsque je l'ai visité pour chercher des meubles que je pourrais utiliser dans le nouveau laboratoire et le nouveau bureau. Il y avait des tapis chinois et des couleurs différentes pour les rideaux et les couvre-lits dans chaque chambre à coucher et une mer de jouets rangés, d'aides visuelles et de jeux. Du linge de lit neuf, des serviettes, des tabliers et des robes de chambre blanches étaient soigneusement empilés et suspendus. En regardant les rangées de pantoufles d'enfants et les photos de leurs propriétaires sur le mur, je me suis demandée où ils pouvaient bien être maintenant et comment ils allaient...

Un jour, alors que je touchais une table à l'école maternelle, j'ai ressenti une douleur dans le pouce. J'avais probablement touché une « particule brûlante », le même type de grosse particule radioactive qui avait blessé les premiers liquidateurs de Tchernobyl par inhalation et brûlures cutanées. J'ai eu mal immédiatement et mon doigt a enflé, est devenu bleu-lilas et plus tard la peau s'est détachée. (Manzurova & Sullivan, 2006)

Étant donné que les réacteurs à eau bouillante de GE qui ont fondu étaient dotés de cuves de confinement et que la plupart des retombées de la catastrophe ont été soufflées vers l'est, dans l'océan Pacifique, l'accident de 2011 au Japon semble avoir été moins grave que celui de Tchernobyl. Selon la modélisation réalisée par l'Agence japonaise de l'énergie atomique, les rejets de la catastrophe de Fukushima

<sup>5</sup>Les auteurs s'appuient largement sur l'excellent ouvrage *Manual for Survival*, de Kate Brown, historienne des sciences au MIT. Nous avons fait ce choix parce que la professeure Brown a fait ce qu'un chercheur exceptionnel doit faire : elle a passé des années dans les archives d'État d'Ukraine et de Biélorussie, à examiner des documents primaires. Dans de nombreux cas, a-t-elle déclaré, elle a été la première personne à avoir fait cela.

<sup>6</sup>L'expression curieuse de « liquidation » est due à Mikhaïl Gorbatchev, dans son premier discours télévisé après l'accident.

Fig. 5.2 L'école maternelle abandonnée de Pripjat décrite par la liquidatrice Natalia Manzurova. (D'après Manzurova et Sullivan, 2006)



Les concentrations de Cs-137 et d'I-131 ont été environ dix fois moins élevées que celles de Tchernobyl : 0,3 MCi et 3,2 MCi. Étant donné que seulement 20 % de la radioactivité libérée a contaminé les terres, la zone d'exclusion près de Fukushima n'a qu'une superficie de 365 km<sup>2</sup>. Cependant, comme lors de l'accident de Tchernobyl, la contamination radioactive libérée par l'accident s'est répandue dans le monde entier. Le réseau de surveillance sensible géré par l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires a mesuré les retombées de l'accident de Fukushima même dans l'hémisphère sud.

sphère dans le mois qui a suivi le tsunami et la triple fusion.

Neuf jours après l'accident, le nuage radioactif avait déjà traversé l'Amérique du Nord. Trois jours plus tard, lorsqu'une station en Islande a détecté des matières radioactives, il était clair que le nuage avait atteint l'Europe.

Au 13 avril 2011, la radioactivité s'était propagée dans l'hémisphère sud de la région Asie-Pacifique et avait été détectée dans des stations situées notamment en Australie, aux Fidji, en Malaisie et en Papouasie-Nouvelle-Guinée. (CTBTO, 2011)

Le nombre de personnes déplacées des zones contaminées près de Fukushima Daiichi au Japon est de près de 120 000. Bien qu'aucun effort de liquidation à l'échelle de Tchernobyl n'ait été mis en œuvre en 2011, plus de 77 000 personnes ont travaillé aux efforts de décontamination de Fukushima au cours des cinq premières années qui ont suivi

L'accident. Des experts des droits de l'homme travaillant pour les Nations Unies ont exprimé leur inquiétude face à l'exploitation et à la coercition de ces personnes, dont la santé pourrait également avoir été affectée négativement. En 2016, 46 000 personnes étaient employées à Fukushima. Les efforts de nettoyage se poursuivent en 2023 et se poursuivront pendant de nombreuses années encore.

L'idée selon laquelle des expositions prolongées à de faibles concentrations pourraient être plus nocives que ce que prétendent les autorités est cohérente avec l'observation suivante faite au Japon à la suite de l'accident de Fukushima Daiichi :

L'un des médecins les plus virulents du Japon, Shuntaro Hida, âgé de 95 ans, a déclaré à l'été 2012 que les Japonais commençaient déjà à développer des symptômes d'intoxication interne par radiation, notamment de la fatigue, de la diarrhée et une perte de cheveux, résultant de l'ingestion et/ou de la consommation de ces substances, ou l'inhalation de radio-isotopes. Le Dr Hida est originaire d'Hiroshima. Après le bombardement, il a traité des patients exposés aux retombées radioactives. Hida a déclaré au Japan Times : « Je suis inquiet parce que j'ai reçu des appels beaucoup plus tôt que prévu. » (Nadesan, 2013)

Un test scientifique rigoureux de l'hypothèse, décrit plus en détail dans un chapitre séparé, reste à réaliser dans le futur.

## Une bataille impossible contre la poussière

L'un des auteurs (AD) a occupé un emploi dans un département de génie chimique pendant un certain temps. Son travail portait sur les aérosols de combustion. Il se souvient du protocole de sécurité en cas de déversement de mercure liquide (il faut saupoudrer du soufre en poudre dessus) et de l'éclairage offert par le mentor étudiant diplômé. « Plus on en sait sur la poussière, moins on a envie de la respirer », lui a dit le mentor.

L'uranium pur est métallique, mais pour être utilisé dans un réacteur nucléaire, il est transformé en une poudre céramique d'oxyde d'uranium, pressée en pastilles d'environ 3/8" de diamètre et 5/8" de long. Le matériau est cassant, se fracturant le long des joints de grains en raison de la contrainte thermique. La contrainte de fracture diminue à mesure que les produits de fission s'accumulent pendant le fonctionnement du réacteur ; c'est-à-dire que l'intégrité du matériau se dégrade à mesure que le réacteur fonctionne. Les pastilles de combustible (il peut y en avoir jusqu'à dix millions dans un réacteur) sont enfermées dans de longues et fines barres de combustible en métal zirconium.<sup>7</sup> Les alliages de zirconium sont choisis pour cette application en raison de leur faible section transversale neutronique et de leur excellente résistance à la corrosion. Cependant, le matériau devient cassant pendant le fonctionnement du réacteur en raison de la corrosion et de l'irradiation. Dans certaines circonstances,

---

<sup>7</sup>L'un des plus grands obstacles surmontés par le programme Naval Reactors sur la voie du développement du réacteur du sous-marin Nautilus, et par la suite de l'énergie nucléaire commerciale, a été la création d'une chaîne d'approvisionnement industrielle pour la production de métal zirconium pur.

il peut même brûler. Le réacteur RMBK de Tchernobyl a également utilisé un modérateur en graphite, ajoutant un autre matériau céramique cassant au mélange.

L'apparition de termes tels que « céramique », « cassant » et « fracture » (sans parler de l'idée que le revêtement et le modérateur pourraient brûler) devrait évoquer une préoccupation importante, bien que prosaïque, : la poussière. Les accidents de perte de confinement de Tchernobyl et de Fukushima ont libéré d'énormes nuages de poussière radioactive dans l'environnement. La poussière radioactive créée par la fusion et l'explosion de l'unité 4 de Tchernobyl s'est notamment retrouvée dans le pelage pelucheux des moutons.

En chœur, les femmes ont décrit la lente prise de conscience, à l'été 1986, que l'accident nucléaire lointain était entré dans leur vie... À la fin du mois de mai, de nombreuses travailleuses ont souffert de mystérieux saignements de nez. Elles se sont plaintes de maux de gorge, de nausées et de fatigue. Les registres syndicaux montrent que quelques chauffeurs, après avoir aidé dans les champs, ont cherché à se faire soigner. Dans l'atelier de tri, les balles de foin mesuraient jusqu'à 30  $\mu\text{Sv/h}$ . Les travailleuses de la laine ne savaient pas que ramasser les balles les plus radioactives était comme serrer dans leurs bras une machine à rayons X alors qu'elle était allumée. (Brown, 2019)

Les réacteurs de Fukushima Daiichi au Japon étaient dotés de structures de confinement qui faisaient défaut au réacteur RMBK de Tchernobyl. Par conséquent, pour des raisons technologiques, sociologiques, culturelles et politiques, la situation au Japon n'est pas la même qu'en Ukraine et en Biélorussie. (Il serait peut-être plus juste de faire une comparaison entre certaines régions du Japon et des régions d'Europe fortement contaminées par les retombées de Tchernobyl. Ce sujet n'entre pas dans le cadre de cette discussion.) Il existe cependant des similitudes. Le sol est un autre endroit où se retrouve la poussière radioactive. Les particules de césium radioactif se lient chimiquement à de petites particules d'argile.

La seule solution possible est de gratter et d'enfouir les sols contaminés. Dans le centre de stockage provisoire situé entre les villes d'Okuma et de Futaba, près de Fukushima Daiichi, les efforts de dépollution ont permis d'enfouir 14 millions de mètres cubes de sol, soit suffisamment de sol radioactif pour remplir onze fois le Tokyo Dome. Le gouvernement japonais s'est engagé à déplacer à nouveau cette énorme quantité de matériaux vers un site d'élimination définitif avant 2045. Même si le plan décrit peut être exécuté avec succès, l'environnement local ne sera pas propre, car les forêts voisines resteront fortement contaminées.

La situation au Japon est peut-être moins urgente, mais elle est certainement similaire à l'élimination d'urgence de laine, de viande et de peaux d'animaux hautement radioactives qui a été nécessaire dans les régions agricoles entourant Tchernobyl il y a quelques décennies.

Il peut être difficile de visualiser de minuscules particules de poussière radioactive contaminant une grande quantité de terre végétale enfouie, mais le problème a un impact plus immédiat si ces particules menacent de s'accumuler dans les voies respiratoires et le corps d'une personne. Le 15 mars 2011, alors que l'accident de Fukushima it

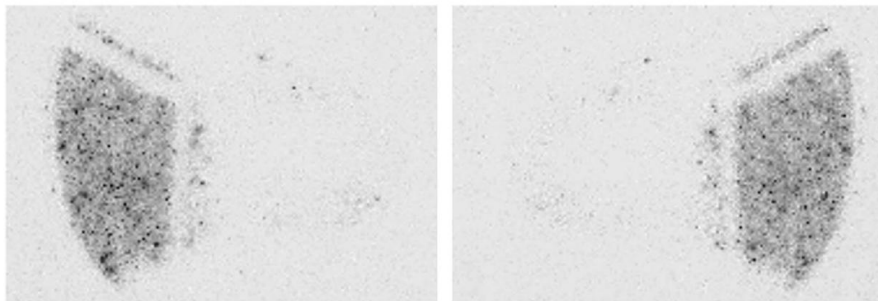


Fig. 5.3 Matières radioactives piégées sur un masque respiratoire porté par une personne à Tokyo, à 220 km de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, en 2011. Les côtés gauche et droit du même masque sont représentés. (Image de Higaki, 2023)

L'expérience se poursuit<sup>8</sup>. Un scientifique employé par l'Université de Tokyo portait un masque facial pendant dix-huit heures, la plupart du temps à l'extérieur. À ce moment-là, un panache de matières radioactives provenant de l'unité 2 de Fukushima Daiichi est passé au-dessus de la région de Kanto à Tokyo, à environ 210 kilomètres de là. Il a été possible de créer une image des matières radioactives capturées par le masque en plaçant simplement une plaque sur laquelle était posée une émulsion photographique, comme le montre la figure 5.3.

Le masque présenté sur la figure 5.3, placé dans un sac scellé, a ensuite été entreposé. Il n'a cependant pas été oublié. À l'aide d'une technique perfectionnée, l'enquêteur a récemment examiné à nouveau le masque, à la recherche de microparticules localisées contenant du radiocésium d'une taille d'environ un micron. Vingt-deux particules<sup>9</sup> ont été trouvées, avec une activité combinée d'environ 8 Becquerels. Le résultat a été publié dans la revue scientifique *Health Physics*.

Le diable est dans les détails. Une vaste collection de particules dangereuses trop petites pour être visibles, qui se retrouvent pratiquement partout et peuvent être recyclées dans l'environnement à l'infini, peut constituer une vérité importante, cachée ou négligée sur les risques de l'énergie nucléaire. La poussière radioactive pose un problème pour lequel il n'existe pas de solution vraiment sensée.

---

<sup>8</sup>Étant donné que les noyaux en fusion des unités 1 à 3 n'ont jamais été localisés avec précision (en 2023), l'auteur estime que l'accident est toujours en cours aujourd'hui.

<sup>9</sup>La dose absorbée due à l'une de ces microparticules de césium est de l'ordre de 10 nGy. Cependant, si la situation n'est pas identique à celle d'un radionucléide uniformément dispersé comme le potassium-40, l'hypothèse du bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques s'applique. L'auteur trouve un débit de dose dû à la microparticule inhalée de l'ordre de 10 mSv/h, significativement supérieur au « plancher de bruit » du K-40. Le lecteur doit noter que l'hypothèse reste non confirmée.

## Centrale de Pennsylvanie, 1979

L'accident de Three Mile Island Unit 2 n'a pas été aussi grave que les événements ultérieurs de Tchernobyl et de Fukushima. Par exemple, comme il n'y a pas eu de fusion<sup>10</sup> de l'enveloppe de confinement, il n'y a pas eu de contamination généralisée des aliments par le radiocésium. Néanmoins, les conséquences de l'accident sont diverses. Les mêmes préoccupations que celles identifiées pour les accidents plus graves de perte de confinement ont également été soulevées dans le centre de la Pennsylvanie. Identifier des thèmes communs dans le contexte d'un événement moins cataclysmique est donc un exercice utile pour comprendre les fardeaux sociétaux imposés par les accidents de centrale nucléaire.

Tout comme la contamination au césium des légumes-racines en Ukraine ou l'accumulation de tritium dans les fruits de mer de l'océan Pacifique près de Fukushima, la contamination du lait par l'iode radioactif était une préoccupation majeure en Pennsylvanie centrale. La célèbre usine de chocolat Hershey's se trouve dans la région, qui est depuis longtemps connue pour la qualité de ses produits laitiers. Une dispersion à longue distance de la contamination a également été observée. Le seul endroit où le xénon-133 libéré pendant la phase initiale de l'accident a été directement mesuré était un laboratoire exploité par le département de la Santé de l'État de New York à Albany, NY, à 375 kilomètres de Three Mile Island. Le nettoyage a nécessité plus d'une décennie et 2 milliards de dollars (en dollars de 2022).

Le secret et la méfiance, à l'égard de l'autorité gouvernementale et de l'exploitant de la centrale nucléaire, sont les derniers éléments de la discussion. Ces deux aspects ont été des aspects importants de l'accident de Three Mile Island et de ses conséquences. Par exemple, bien qu'aucun ordre général d'évacuation n'ait été donné, le gouverneur de Pennsylvanie a recommandé aux femmes enceintes et aux jeunes enfants d'évacuer une zone limitée le vendredi 30 mars (deux jours après le début de l'accident). Pas moins de 150 000 personnes ont quitté la zone, très souvent dans un état de panique considérable. Bill Peters, un habitant de la région (photographié dans la figure 5.4), a partagé le souvenir suivant de sa propre décision d'évacuer :

(Vendredi après-midi) alors qu'il était en train de partir, la police de Fairview Township est arrivée sur la route et il a crié : « Bill, rentre à l'intérieur ! Je le pense vraiment. Entre. Ne respire pas l'air ! Ferme tes portes et tes fenêtres ! » Alors je lui ai fait signe et j'ai dit : « Ouais... continue ! »  
(Rires) « Je m'en vais ! Je ne reste pas ! » (Smith Katagiri, 1989)

La décision du gouverneur a été prise dans un contexte d'informations contradictoires et d'absence de directives claires. La situation est décrite par l'historien du NRC :

---

<sup>10</sup>Les autorités ont affirmé pendant plusieurs années (contre toute évidence) que le carburant n'avait pas fondu, et ont donc mis du temps à reconnaître qu'il y avait eu une véritable fusion. Aujourd'hui encore, ce fait fondamental concernant l'accident est systématiquement nié ou ignoré.

Fig. 5.4 Bill Peters chez lui, près de la centrale nucléaire de

Three Mile Island, en

1986. M. Peters a quitté la zone le vendredi 30 mars 1979, deux

jours après le début de

l'accident. Sur cette image, il

tient dans sa main gauche une feuille de pissenlit ordinaire. Dans

sa main droite, il montre une

feuille de pissenlit mutante,

récoltée sur sa propriété. Le

gigantisme est connu

pour être l'un des effets de

l'exposition aux rayonnements

ionisants sur la vie végétale.



La principale préoccupation de la Maison Blanche, comme de la NRC et du bureau du gouverneur, était l'opportunité et la faisabilité de l'évacuation. William Odom, du personnel du Conseil de sécurité nationale, a informé Zbigniew Brzezinski samedi matin [31 mars, trois jours après le début de l'accident] qu'une « crise majeure de déplacement de population » allait probablement se produire « dans le courant de la journée ». D'autres responsables fédéraux ont exhorté la Maison Blanche à envisager sérieusement de recommander au gouverneur de Pennsylvanie Thornburgh d'ordonner une évacuation immédiate. (Walker, 2004)

C'est dans ce contexte qu'il faut comprendre, selon l'auteur, la visite du président Carter à Middletown le 1er avril. L'accident de Three Mile Island a précipité une crise de sécurité nationale, exactement comme les catastrophes de Fukushima et de Tchernobyl. La technologie de l'énergie nucléaire est si dangereuse que son échec est une question de sécurité nationale. Le risque d'une crise grave est le coût que cette technologie impose à la société.

Cette crise de sécurité nationale a été traumatisante pour la communauté touchée. La situation est bien résumée, quoique de manière un peu sèche, dans une étude récente publiée dans la revue *Risks, Hazards, & Crisis in Public Policy* :

En 1981, la prévalence de la dépression majeure et/ou de l'anxiété généralisée était estimée à 29 %, et la moitié des mères interrogées exprimaient leur inquiétude quant à l'impact sur la santé de leurs enfants... Certaines femmes, classées comme déprimées immédiatement après le TMI, ont continué à présenter des symptômes pendant une décennie après... dans les décennies qui ont suivi le TMI (1979-1998), les décès par maladie cardiaque étaient 67,2 % plus élevés chez les femmes et 32,1 % plus élevés chez les hommes exposés au niveau de rayonnement le plus faible (< 8 mrem) dans le rayon de 5 miles du TMI par rapport aux communautés environnantes... (Wilson et al., 2022)

Les terribles conséquences de cette catastrophe sur la communauté étaient évidentes pour les personnes présentes sur place à l'époque. L'un des experts chargés de gérer la bulle d'hydrogène dans le réacteur TMI était un membre du personnel de la NRC nommé Victor Stello.

Stello était originaire de Pennsylvanie et avait servi dans l'armée, où il avait perdu un œil. Il avait commencé sa carrière en aidant à développer un avion à propulsion nucléaire avec Pratt et Whitney.

Ayant résolu le problème de la bulle à sa satisfaction, Stello, qui était « un bon catholique », a décidé d'assister à la messe du dimanche à Middletown. Le service a été peu fréquenté et Stello a été surpris lorsque le prêtre a offert l'absolution générale à la congrégation. Ce rite était donné dans les rares cas où une perte de vies humaines à grande échelle semblait imminente. Ce fut un moment émouvant pour les paroissiens. « Tout le monde s'est mis à pleurer, et j'ai commencé à pleurer », se souvient Stello. Il est revenu de la messe dans un état d'esprit très ému et a fait remarquer avec mécontentement à Joe Fouchard [le responsable des affaires publiques du NRC] : « Regardez ce que nous avons fait à ces braves gens ! » (Walker, 2004)

## Points récapitulatifs

1. Les accidents dans les centrales nucléaires commerciales sont des incidents de sécurité nationale. Le fardeau imposé par une crise sociétale de ce type est énorme et probablement incommensurable.
2. On ne peut pas faire confiance aux gouvernements et aux gestionnaires/propriétaires d'entreprises d'installations nucléaires pour fournir, ou même posséder, des informations exactes, correctes et opportunes sur l'état d'accident des centrales nucléaires et sur les conséquences de ces accidents. conséquences.
3. Les conséquences des accidents ne respectent pas les frontières régionales, ni même nationales. Les retombées radioactives des accidents de Tchernobyl et de Fukushima se sont propagées dans le monde entier. Les retombées radioactives de Three Mile Island ont été mesurées avec certitude à des centaines de kilomètres de distance.

## Références

- Barringer, F. (1991). Tchernobyl : cinq ans après, le danger persiste. New York Times Magazine.
- Brown, K. (2019). Manuel de survie : Un guide de Tchernobyl pour l'avenir. WW Norton et Entreprise.
- CTBTO. (2011). Mesures liées à Fukushima par le CTBTO. Récupéré de <https://www.ctbto.org/news-and-events/news/fukushima-rated-measurements-ctbto>
- Gorbachev, M. (2006). Le tournant de Tchernobyl. Récupéré de [https://www.gorby.ru/en/centre\\_de\\_presse/publication/show\\_25057/](https://www.gorby.ru/en/centre_de_presse/publication/show_25057/)
- Gray, M. et Rosen, I. (1982). L'avertissement : accident à Three Mile Island. WW Norton and Co.
- Higaki, S. (2023). Découverte de microparticules contenant du radiocésium administrées directement à une personne à Tokyo à la suite de la catastrophe nucléaire de Fukushima Daiichi. Health Physics, 125(5), 325–331. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001719>

- Higginbotham, A. (2019). Minuit à Tchernobyl : l'histoire méconnue de la plus grande catastrophe nucléaire du monde. Simon & Schuster.
- Manzurova, N., & Sullivan, C. L. (2006). Un dur devoir : l'expérience d'une femme à Tchernobyl.
- Medvedev, G. (1991). La vérité sur Tchernobyl. Basic Books.
- Milnes, A. (5 avril 2011). L'exposition de Jimmy Carter au danger nucléaire. Récupéré de [https://www.cnn.com/2011/OPINION/04/05/milnes.carter.nuclear/index.html?fbclid=IwAR1\\_ix\\_OSZRZOfgUVLpJ7kKv5P6sPwlyiQb0MdwDelnPgOBGORnx28TDKU1w](https://www.cnn.com/2011/OPINION/04/05/milnes.carter.nuclear/index.html?fbclid=IwAR1_ix_OSZRZOfgUVLpJ7kKv5P6sPwlyiQb0MdwDelnPgOBGORnx28TDKU1w)
- Nadesan, M. H. (2013). Fukushima et la privatisation du risque. Palgrave Macmillan.
- Smith Katagiri, A. M. (1989). Three Mile Island : Le testament du peuple. En libre accès avec l'auteur.
- Également disponible sur le Web à l'adresse <https://www.tmia.com/node/118>
- Walker, J. S. (2004). Three Mile Island : une crise nucléaire dans une perspective historique. Université de Presses de Californie.
- Wilson, R. T., LaBarge, B. L., Stahl, L. E., Goldenberg, D., Lyamzina, Y., et Talbott, E. O. (2022). Qu'avons-nous appris sur les effets sur la santé plus de 40 ans après l'accident nucléaire de Three Mile Island ? Une étude de la portée et des processus. Risk, Hazards & Crisis in Public Policy, 14(2), 129–158. <https://doi.org/10.1002/rhc3.12258>

Accès libre Ce chapitre est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou format, à condition de créditer l'auteur(s) d'origine et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été apportées.

Les images ou autres éléments tiers de ce chapitre sont inclus dans la licence Creative Commons du chapitre, sauf indication contraire dans une ligne de crédit du contenu. Si le contenu n'est pas inclus dans la licence Creative Commons du chapitre et que votre utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation légale ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement du détenteur des droits d'auteur.



## Chapitre 6

### Three Mile Island : un paradoxe non résolu



Le 7 mai, quelques semaines après l'accident de Three-Mile Island, j'étais à Washington. J'étais là pour réfuter une partie de la propagande que Ralph Nader, Jane Fonda et leurs semblables diffusent dans les médias pour tenter de dissuader les gens de recourir à l'énergie nucléaire. J'ai 71 ans et je travaillais 20 heures par jour. La tension était trop forte. Le lendemain, j'ai eu une crise cardiaque. On pourrait dire que j'étais le seul dont la santé a été affectée par ce réacteur près de Harrisburg. Non, ce serait faux. Ce n'était pas le réacteur. C'était Jane Fonda. Les réacteurs ne sont pas dangereux.

– Dr Edward Teller, père de la bombe à hydrogène, dans un article du Wall Street Journal (Teller, 1979)

Au moment de l'accident de TMI, je vivais à environ quatre milles au nord-ouest de TMI. Concernant mon expérience après l'accident de TMI : le jeudi 29 mars 1979, j'ai travaillé toute la journée avec mon fils dans notre garage. Les portes du garage étaient ouvertes. Cette nuit-là, lorsque j'ai pris une douche, mon visage, mon cou et mes mains ressemblaient à ceux d'une plage et j'ai été gravement brûlé. J'avais des nausées. Mes yeux étaient rouges et brûlants. J'avais l'impression de regarder à travers l'eau. Vendredi matin, lorsque je suis sortie du lit, j'avais des cloques sur les lèvres et le nez, et j'avais la gorge et l'intérieur de la poitrine comme du feu. Cela avait le goût de l'acier galvanisé brûlé. Mon fils a eu des expériences similaires. Il avait 22 ans à l'époque.

– Affidavit d'un résident vivant près de Three Mile Island (Aamodt & Aamodt, 1984).

M'impliquer dans la recherche TMI a certainement changé ma vie et mes choix de recherche. Bien que cela ait été un véritable défi sur le plan émotionnel, je le referais pour ce que j'ai appris sur la science, le monde universitaire, les tribunaux et les situations difficiles des personnes qui luttent pour surmonter un système qui les exploite au lieu de les servir.

– Prof. Steve Wing, Université de Caroline du Nord, Chapel Hill ; communication personnelle  
Entretien avec l'auteur, 2016.

---

Aaron Datesman est l'auteur principal de ce chapitre.

L'accident nucléaire du réacteur 2 de Three Mile Island (TMI) en Pennsylvanie, survenu le 28 mars 1979, reste le plus grand accident nucléaire et la plus grande catastrophe industrielle de l'hémisphère occidental. Le sujet est donc au cœur de toute discussion sur le rôle de l'énergie nucléaire – passé, présent et futur – dans la société américaine. Si le souvenir de l'accident s'estompe, un profond paradoxe concernant cet événement reste non résolu. La nature et la résolution de ce paradoxe devraient fortement influencer les décisions concernant l'avenir de l'énergie nucléaire dans ce pays et dans le monde.

Les deux premières citations qui ouvrent le chapitre illustrent les côtés opposés du paradoxe. Le physicien Edward Teller, inventeur de la bombe thermonucléaire et inspirateur du personnage du Docteur Folamour, affirmait que personne n'aurait pu être blessé par l'accident de Three Mile Island.<sup>1</sup>

Quelle que soit sa spécialité, le Dr Teller n'était pas présent en Pennsylvanie à la fin du mois de mars 1979. Les observations et l'opinion de quelqu'un qui était présent à ce moment-là et à cet endroit – dont la propre santé, en bref, était un indicateur de la gravité de l'accident – étaient radicalement différentes. Comment résoudre le conflit entre l'autorité et l'expérience ? Selon l'auteur, ce paradoxe met en lumière un échec profond et inquiétant de l'autorité.

Dans ce cas, l'avis des experts a privilégié les mesures physiques aux résultats biologiques, et a ainsi peut-être échoué à reconnaître et à identifier correctement les blessures (à court et à long terme) dues à l'exposition aux radiations à Three Mile Island.

Au moment où l'ordre d'évacuation des plus vulnérables fut émis, deux jours après le début de l'accident, l'installation endommagée avait déjà libéré dans l'environnement environ 20 millions de curies (20 MCi) de xénon-133 (Xe-133), un gaz noble radioactif. Comme le montre la figure 6.1, la majeure partie de l'activité libérée a été transportée par le vent dans un panache bas se déplaçant vers le nord-ouest. Bien qu'il soit courant de lire des déclarations selon lesquelles de « très faibles doses » ont résulté de l'accident (Hatch et al., 1990), le rejet contenait une activité égale à celle de 20 tonnes métriques (44 000 livres) de radium, l'élément le plus radioactif présent naturellement. Une quantité bien plus faible d'iode-131, environ 14 curies, aurait également été déposée dans la zone de 16 km entourant l'installation de TMI. Une partie de cet iode radioactif a été découverte dans le lait collecté dans les fermes laitières locales.

Bien que les rejets dus à l'accident ne doivent pas être considérés comme faibles, il n'en demeure pas moins que les doses absorbées par les individus n'étaient pas (selon les connaissances scientifiques conventionnelles) alarmantes.

---

<sup>1</sup> Il convient de mentionner que la publicité de deux pages dans le Wall Street Journal dans laquelle le Dr. Teller a fait cette déclaration en payant Dresser Industries, le fabricant de la valve défectueuse qui a été la cause immédiate de l'accident de Three Mile Island.

## Gamma Doses within 10 miles of TMI

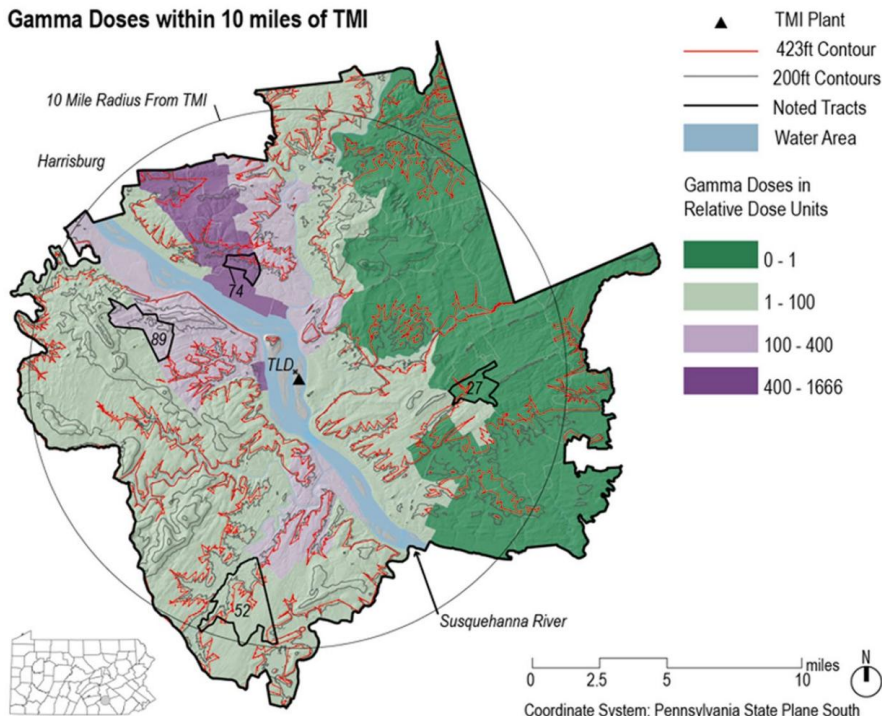


Fig. 6.1 Carte de la zone entourant la centrale nucléaire de Three Mile Island à Middletown, en Pennsylvanie. Les couleurs indiquent l'exposition au rayonnement gamma externe dû au xénon radioactif libéré par la cheminée d'aération du bâtiment auxiliaire (marquée par le triangle rempli) pendant les trente-neuf premières heures de l'accident. La partie la plus intense du panache a soufflé vers le nord-ouest dans des conditions de vent constant tard dans la soirée du mercredi 28 mars 1979. Cette image est tirée du propre travail de l'auteur (Datesman, 2020)

L'exposition individuelle due aux rayons gamma a été estimée entre 0,7 et 2 milliSieverts (mSv), ce qui est de l'ordre de la dose annuelle due au rayonnement de fond.<sup>2</sup> L'analyse a révélé que l'exposition totale des deux millions d'individus vivant dans un rayon de 50 miles s'élevait à environ 37 personnes-Sieverts. On s'attend à ce que cette dose provoque deux cas supplémentaires de mortalité par cancer au sein de la population touchée. Indépendamment de la question éthique centrée sur deux décès, à ce niveau d'impact, aucun effet indésirable de l'accident n'aurait dû être observable au moyen de l'épidémiologie.

Néanmoins, selon une étude récente, plusieurs enquêtes indépendantes ont rapporté que les émissions des accidents de TMI étaient associées à une augmentation

<sup>2</sup>La comparaison avec le rayonnement de fond est significative en raison de l'affirmation de l'auteur selon laquelle le rayonnement de fond, bien qu'universel, est mal compris.

incidence ou mortalité par cancer. Les critères d'évaluation de la santé<sup>3</sup> comprenaient à la fois l'incidence du cancer du poumon et la mortalité par cancer du sein chez les femmes (Wilson et al., 2023). Si la prédiction scientifique de l'absence de préjudice était correcte, alors les résultats épidémiologiques démontrant un préjudice doivent en quelque sorte être erronés. D'un autre côté, si les résultats épidémiologiques sont corrects, comment les résultats médicaux observés pourraient-ils résulter des expositions de faible niveau qui se sont produites ?

Il existe une blague toute faite, mais précise, qui commence par « Comment trouvez-vous cinq opinions différentes sur un sujet controversé ? » La réponse est : « Demandez à trois épidémiologistes. » Les résultats épidémiologiques du TMI ne soutiennent pas une interprétation univoque et, par conséquent (comme la blague), génèrent plus de chaleur que de lumière. Heureusement, d'autres domaines de recherche scientifique liés à l'accident pourraient apporter davantage d'éclaircissements. Il est intéressant d'examiner brièvement cette histoire.

Des dizaines de vies ont été consacrées à l'activisme à cause de l'accident de Three Mile Island. Dans certains cas, ces histoires ont été enregistrées dans des documents conservés dans les archives de la bibliothèque du Dickinson College. Malheureusement, les archives de Dickinson ne contiennent pas les documents de deux des militants les plus prolifiques impliqués dans la question de Three Mile Island, Norman et Marjorie Aamodt. Une recherche électronique dans la bibliothèque de la Nuclear Regulatory Commission en utilisant « Aamodt » comme invite, cependant, renvoie une demande d'affinage des termes de recherche pour limiter les résultats à moins d'un millier d'éléments.

Les Aamodts, qui étaient un couple marié, avaient un passé intéressant. Bien qu'ils vivaient en 1979 dans une ferme d'élevage de bétail dans le comté de Chester, en Pennsylvanie, ils avaient tous deux une formation technique. En fait, ils se sont rencontrés alors qu'ils travaillaient tous deux aux Laboratoires Bell, qui étaient à l'époque sans aucun doute le premier centre de recherche scientifique au monde. Les Aamodts se sont impliqués dans l'affaire TMI par le biais d'une petite annonce recherchant une expertise professionnelle pour déterminer la cause de l'accident. Ils ont ensuite consacré toute leur vie à l'activisme, notamment en tant qu'avocats du plaignant dans le litige devant le tribunal de district des États-Unis pour le district central de Pennsylvanie, connu sous le nom de TMI Consolidated. Les plaignants dans cette affaire étaient plus de 2000 personnes qui estimaient avoir subi un préjudice en raison de la fusion du réacteur de Three Mile Island.

S'exprimant lors de l'atelier de 1984 sur la dosimétrie de Three Mile Island, parrainé par le Fonds de santé publique de Three Mile Island, Marjorie Aamodt a fait la déclaration suivante :

---

<sup>3</sup>Entre autres recherches, les chercheurs de l'Université de Pittsburgh ont examiné les données sur l'incidence du cancer jusqu'en 1995 et les données sur la mortalité jusqu'en 1998.

...Je suis l'une des femmes qui ont mené l'étude sur les décès par cancer dans la zone au nord-ouest de la centrale. Et je voudrais simplement dire que ce n'est pas seulement une question de nombre de décès, mais de ce que nous pouvons apprendre de ces décès. Ces personnes, je crois, étaient les véritables dosimètres au moment de l'accident. (Beyea, 1985a)

L'enquête de santé initiée par Marjorie Aamodt a fait état de foyers de cancer dans des endroits distincts au nord-ouest de TMI. Entre le lieu où Marjorie Aamodt s'est exprimée (concernée par la dosimétrie, c'est-à-dire une mesure physique de l'exposition) et sa déclaration (« les gens... étaient les vrais dosimètres »), on trouve une déclaration claire du paradoxe central. Comment résoudre un conflit entre la mesure physique et les résultats biologiques ?

L'enquête Aamodt a été une motivation importante pour une enquête épidémiologique plus vaste et plus rigoureuse (incluant 130 000 personnes à une distance de 16 kilomètres) financée par le Fonds de santé publique de TMI. L'enquête a été menée par des chercheurs de l'Université de Columbia, sous la supervision de l'épidémiologiste réputé Mervyn Susser. Le professeur Susser avait un parcours remarquable. Lui et sa femme, Zena Stein, étaient des militants anti-apartheid dans leur Afrique du Sud natale, qu'ils ont quittée en 1956 en raison de leurs convictions politiques. Susser est devenu président de la division d'épidémiologie de Columbia en 1966, où il a été l'un des premiers épidémiologistes à examiner l'épidémie de sida lorsqu'elle est apparue à New York au début des années 1980. Son profil ne correspond pas à celui d'un homme prêt à jouer le rôle de loubard d'une industrie néfaste.

Les résultats de l'étude de Columbia sont souvent présentés comme n'apportant aucune preuve des effets sur la santé découlant de l'accident de TMI. Cette interprétation n'est pas tout à fait correcte. En fait, les chercheurs de Columbia ont constaté une augmentation perceptible de l'incidence du cancer du poumon parmi la population concernée. La controverse dans cette affaire ne provient pas de la découverte elle-même, mais plutôt de son interprétation. Les enquêteurs de Columbia ont affirmé que les émissions radioactives de Three Mile Island ne pouvaient pas être en cause (Hatch et al., 1990), en partie à cause de la faible dose de radiation reçue. affirment qu'aucune incidence excessive de cancer n'a été constatée.

L'impression erronée des résultats de Columbia a pris racine, notamment parce que les avocats du plaignant dans TMI Consolidated ont engagé leurs

---

4Extrait du document publié par l'équipe de Columbia :

... la possibilité que les émissions de la centrale nucléaire de Three Mile Island aient pu contribuer aux tendances observées, en particulier en ce qui concerne le cancer du poumon, doit être mise en balance avec (1) l'absence d'effets sur les cancers considérés comme les plus radiosensibles et les effets indéterminés sur les enfants.

(2) la menace de confusion due à des facteurs non mesurés ou insuffisamment contrôlés; (3) l'incohérence dans nos propres données entre les résultats relatifs aux émissions des plantes et au rayonnement gamma de fond; et (4) les faibles estimations de l'exposition aux rayonnements et le bref intervalle depuis l'exposition.

Le professeur Wing a été chargé de réévaluer les preuves. Il s'agissait d'un épidémiologiste de l'Université de Caroline du Nord (UNC) à Chapel Hill et auteur de la troisième citation qui ouvre ce chapitre. Le professeur Wing avait déjà analysé les données sur la mortalité des travailleurs exposés professionnellement au Laboratoire national d'Oak Ridge. Son expérience à Oak Ridge lui a laissé un profond scepticisme quant au lien entre le gouvernement, l'industrie et la science autour des armes nucléaires et de l'énergie nucléaire. En raison de sa précédente expérience, Wing a d'abord hésité à s'impliquer dans le litige TMI. Il a changé d'avis en raison de la qualité de l'enquête sur les groupes de cancers d'Aamodt, ainsi que de l'engagement et du bon sens dont ont fait preuve ces deux personnes remarquables.

En s'appuyant sur les données recueillies par les chercheurs de Columbia, Wing et l'équipe de l'UNC sont parvenus, pour la plupart, à des résultats similaires. Susser a écrit précisément ceci dans une lettre publiée dans la revue *Environmental Health Perspectives* après la publication de l'enquête de l'UNC :

Nos résultats et ceux de Wing et al. ne diffèrent sur aucun point important. Nos conclusions diffèrent : nous n'avons pas trouvé de preuve convaincante que l'incidence du cancer était une conséquence de l'accident nucléaire ; ils affirment qu'il existe une telle preuve. (Susser, 1997)

L'auteur estime que cette affirmation résume bien la controverse entre Columbia et UNC. Contrairement aux chercheurs de Columbia, l'équipe de l'UNC était prête à affirmer que les émissions de l'accident de TMI auraient pu être à l'origine de l'augmentation de l'incidence du cancer du poumon. Leur volonté d'avancer cette affirmation controversée semble principalement due à trois facteurs. L'équipe de l'UNC a) n'a pas supposé que les doses étaient « de faible intensité », b) a analysé les données avec plus de précision et a donc été plus fortement convaincue par la relation dose-réponse pour le cancer du poumon, et c) a accordé plus de poids aux preuves anecdotiques d'exposition aux radiations.

En bref, deux équipes d'épidémiologistes hautement qualifiés ont utilisé les mêmes données pour arriver à des résultats similaires, mais ont néanmoins interprété ces résultats de manière diamétralement opposée. On pourrait excuser le lecteur de conclure que l'épidémiologie n'est pas une discipline scientifique rigoureuse. Cependant, de l'avis de l'auteur, il y a une leçon plus subtile à tirer de l'épidémiologie. Les conclusions à tirer de l'épidémiologie ne peuvent être solides que dans la mesure où l'on comprend les mécanismes physiques et biologiques qui relient l'exposition aux effets nocifs.

L'idée exprimée par Marjorie Aamodt lors de l'atelier de 1984 est donc précieuse. Si les résultats épidémiologiques ne peuvent pas être interprétés de manière fiable en raison d'une compréhension physique éventuellement déficiente, un dosimètre biologique – c'est-à-dire un étalon permettant de mesurer directement l'impact de l'exposition sur un organisme vivant – pourrait apporter un éclairage. Un tel étalon existe ; en fait, sa nature et son utilisation avaient déjà été décrites par deux scientifiques du Oak Ridge National Laboratory en 1962. Le domaine scientifique concerné est connu sous le nom

cytogénétique, c'est-à-dire qui s'intéresse à la structure et à la fonction des chromosomes humains. Les « aberrations » chromosomiques dues à une mauvaise réparation de l'ADN sont des indicateurs de la gravité de l'exposition aux rayonnements ionisants.

Marjorie Aamodt n'était pas la seule à penser ainsi. Le comité consultatif sur les études de recherche en santé, créé par le ministère de la Santé de Pennsylvanie (DOH) en 1979, avait initialement préconisé un programme de dosage cytogénétique parmi plusieurs études recommandées. Cependant, évoquant « l'incertitude entourant les causes de rupture des brins d'ADN », le comité a ensuite reconsidéré sa position (Wilson et al., 2023). Il ne semble pas que l'étude cytogénétique recommandée par le DOH de Pennsylvanie ait jamais été menée.

Néanmoins, une étude cytogénétique (c'est-à-dire biologique) humaine fut finalement réalisée. En 1994-1995, un scientifique russe du nom de Vladimir Shevchenko se rendit à deux reprises dans le centre de la Pennsylvanie alors qu'il était engagé comme témoin expert pour les plaignants dans l'affaire TMI Consolidated. Sa participation fut motivée par Norman Aamodt, qu'il avait rencontré lors d'une conférence scientifique à Genève, en Suisse, en 1994. Le Dr Shevchenko avait suivi une formation en écologie en Union soviétique. Son domaine d'expertise spécifique impliquait l'évaluation des dommages causés aux écosystèmes forestiers par la contamination radioactive. Son travail l'avait conduit sur les sites de plusieurs catastrophes radiologiques à travers l'Union soviétique, notamment en Sibérie occidentale près du site d'essais de Semipalatinsk, dans la zone proche du site de Mayak où le plutonium était fabriqué, et à Tchernobyl en Ukraine, où un réacteur dépourvu de structure de confinement avait explosé en 1986.

Norman Aamodt a eu le privilège de passer de nombreux jours à accompagner le Dr. Shevchenko dans les environs de Harrisburg, en Pennsylvanie, regarde les arbres.

Des carottes ont été prélevées sur plus de quatre-vingts arbres de Pennsylvanie, qui ont été renvoyés en Russie pour analyse. L'opinion scientifique professionnelle de Shevchenko, transmise dans un rapport officiel déposé auprès du tribunal de district du district central de Pennsylvanie, était que les dommages causés aux arbres indiquaient des expositions de l'ordre de 2000 à 10 000 mSv dans les endroits au nord-ouest et à l'ouest de TMI où le panache de xénon avait été le plus intense. Shevchenko n'était pas le seul à faire cette évaluation. Le scientifique américain Dr James Gunckel, qui était une autorité mondiale sur les modifications de la croissance et du développement des plantes induites par les rayonnements ionisants, avait exprimé une opinion concordante une dizaine d'années plus tôt. Le Dr Gunckel avait examiné des plantes déformées telles que celles présentées dans la figure 6.2. Il a écrit ce qui suit en 1984 :

J'ai examiné attentivement quelques spécimens de plantes communes récoltés peu après l'accident à TMI et je les ai comparés à des spécimens récoltés plus récemment. Les anomalies actuelles sont probablement dues à des aberrations chromosomiques induites. ...

---

Malheureusement, le Dr Shevchenko est décédé d'un cancer de l'estomac à un âge relativement jeune, vers 2005. Lorsque l'auteur lui a parlé en 2018, M. Aamodt se souvenait encore du temps qu'il avait passé avec le Dr. Shevchenko des années auparavant avec une affection et un respect évidents.

Fig. 6.2 Exemple d'une plante mutée observée par Mary Osborne, une résidente locale. L'image ici a été incluse dans les archives de l'atelier de 1985 sur la dosimétrie de Three Mile Island. Tiré de (Beyea, 1985b)



il aurait été possible que les types d'anomalies végétales observés aient été induits par les retombées radioactives du 29 mars 1979. (Aamodt & Aamodt, 1984)

Les résultats obtenus avec les plantes sont significatifs car ils contredisent l'explication conventionnelle avancée par les autorités. Une explication psychologique de certains effets néfastes sur la santé des êtres humains, comme l'affirment les autorités, n'est pas invraisemblable. L'accident et l'évacuation qui a suivi ont été des événements très traumatisants dans la vie des personnes concernées.

L'explication psychologique est cependant incompatible avec l'observation de dommages causés aux arbres.

Le Dr Shevchenko n'a pas limité son enquête sur le terrain à la vie végétale. Il a également interrogé des personnes vivant à proximité. Aux endroits mêmes où la structure, la croissance et la santé des arbres indiquaient une exposition aux radiations ionisantes, a-t-il écrit, « les résidents de ces zones ont ressenti au moment de l'accident des événements inhabituels concernant leur santé », notamment :

...rougeurs et éruptions cutanées, nausées, inflammation des yeux, goût métallique, inflammation des voies respiratoires, diarrhée, saignement anal, perte de cheveux, interruption du cycle menstruel, douleurs articulaires, et autres. (Shevchenko, 1995)

Les symptômes observés chez l'homme, a écrit le Dr Shevchenko, étaient compatibles avec un mal des radiations résultant d'une exposition de l'ordre de 1 000 mSv.

Les doses évaluées pour les arbres sont plus élevées que les doses pour les êtres humains, à la fois parce que le panache de xénon était élevé et aussi parce que la partie vivante d'un arbre (l'écorce et les feuilles) est externe et donc non protégée.

Le Dr Shevchenko a également coordonné une vaste enquête qui a fait appel à des experts de domaines divers (notamment la botanique et l'écologie, la dosimétrie physique, l'immunologie et la cytogénétique) au sein de l'establishment scientifique russe. Le rapport final de l'enquête qu'il a supervisée est troublant et presque totalement inconnu. Voici les conclusions exprimées par Shevchenko :

Dans le rapport cytogénétique, les données sur le niveau de dicentriques<sup>6</sup> chez les résidents vivant autour de TMI sont comparées aux résultats de l'enquête cytogénétique des populations exposées aux radiations.... approximativement les mêmes fréquences de dicentriques ont été trouvées chez les résidents des zones autour de TMI et les résidents d'un certain nombre de régions de Russie les plus touchées par l'action des rayonnements ionisants. (Shevchenko, 1995)

En résumé, le Dr Shevchenko a constaté que le niveau de dommages biologiques chez les personnes examinées dans le centre de la Pennsylvanie était comparable à celui découvert chez les membres de la population de l'Altaï en Sibérie occidentale qui ont été gravement exposés aux retombées d'une bombe atomique. Ces résultats concordent avec les observations d'arbres et de plantes endommagés et déformés, avec les informations anecdotiques recueillies lors d'entretiens et avec les preuves de déficiences immunologiques (entre autres informations), mais semblent en même temps incompatibles avec l'observation selon laquelle les expositions aux TMI étaient à peu près équivalentes à la dose annuelle due au rayonnement de fond.

La comparaison ramène la discussion à son thème central, la contradiction entre les mesures physiques et les résultats biologiques. Selon l'auteur, il est probable que les deux observations suivantes soient toutes deux correctes :

1. La dose absorbée par tout individu autour de TMI était faible (moins de 2 mGy environ). La conclusion est fondée sur des mesures physiques, plus particulièrement celles réalisées à l'aide d'appareils électroniques appelés dosimètres thermoluminescents (TLD).
2. L'impact biologique sur les individus les plus exposés a été sévère (de l'ordre de 600 à 1000 mSv). Cette conclusion est appuyée par des résultats biologiques : des preuves anecdotiques compatibles avec l'exposition aux radiations, les résultats des recherches menées par des scientifiques russes et (bien que non concluants) l'épidémiologie.

Il est bien sûr légitime de considérer les résultats des enquêtes coordonnées par Chevtchenko – qui ont eu lieu dans le cadre d'une procédure judiciaire, et

---

Le dicentrique 6A est une variété d'aberration chromosomique.

Les chercheurs ont examiné ces résultats, qui n'ont jamais été publiés dans la littérature scientifique, avec un degré raisonnable de scepticisme. Pourraient-ils être erronés, mal interprétés ou manipulés d'une manière ou d'une autre ? La réponse la plus sensée à cette inquiétude est de reproduire l'enquête. Étant donné que certaines aberrations chromosomiques sont stables dans le temps, c'est-à-dire qu'elles existent pendant toute la vie de la personne exposée, cette possibilité demeure.

Conscients de cette possibilité, les auteurs de ce livre (avec d'autres collaborateurs) ont entrepris une telle enquête. Un caryogramme de notre enquête 3MILER RUN (Three Mile Island Low level Exposure to Radioxenon: a Re-assessment Using New cytogenomics) est présenté dans la figure 6.3. Les résultats de notre enquête préliminaire devraient être disponibles fin 2024.

Le paradoxe inhérent à l'histoire de l'accident de Three Mile Island, a-t-on soutenu, représente la dichotomie entre les mesures physiques et les résultats biologiques. Les partisans de la technologie de l'énergie nucléaire sont, pour la plupart, ancrés dans la communauté des ingénieurs et des physiciens.

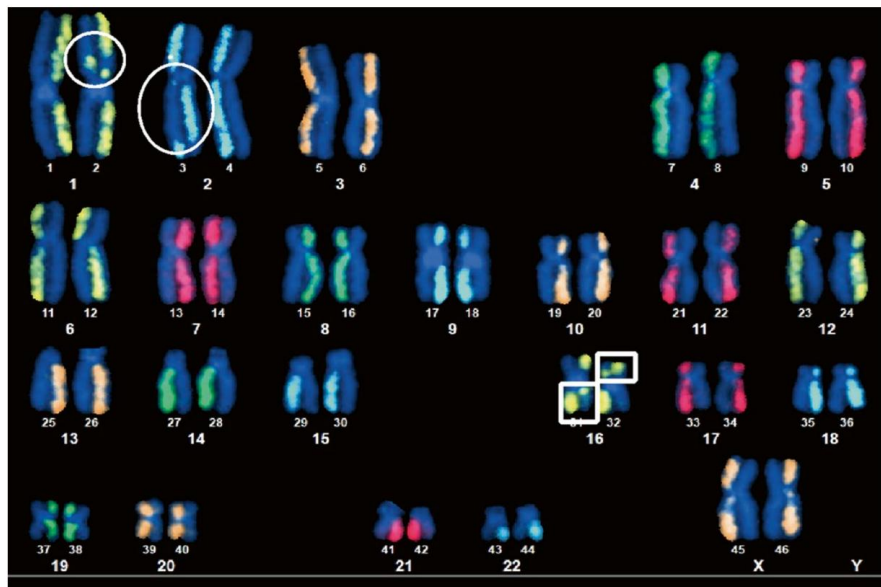


Fig. 6.3 Un caryogramme (une image de l'ensemble complet des chromosomes d'une personne) issu de l'enquête 3MILER RUN. Le participant à l'étude auquel appartient ce caryogramme vivait à moins de 16 km de TMI en 1979. Comme l'enquête reste en aveugle au moment de la mise sous presse de ce livre, les auteurs ne savent pas si cet individu a été exposé au xénon radioactif. Le nombre total d'aberrations chromosomiques (marquées par des cercles sur l'image) apparaissant dans des centaines de caryogrammes de ce type appartenant à un individu peut fournir une indication de dommages biologiques dus à l'exposition aux radiations. La technique est similaire à celle utilisée pour l'analyse cytogénétique de 1994, bien que technologiquement plus raffinée

Les sciences. Parce que la culture est technophile et souvent assez insensible aux questions de risque, et parce que le poids du pouvoir et de la richesse est du côté du gouvernement et de l'industrie, le côté de la dichotomie ancré dans la compréhension physique a dominé les perspectives officielles. Dans l'ensemble, le déséquilibre des pouvoirs agit pour exclure les observations des personnes affectées concernant leur propre santé, en faveur d'une simple théorie physique.

En ce qui concerne l'avenir de l'énergie nucléaire, la leçon à tirer de l'accident de Three Mile Island est que la question des dommages causés par une exposition de faible intensité n'est pas encore réglée. Si le degré de dommages résultant d'une exposition de « faible intensité » n'est pas négligeable, des contrôles techniques supplémentaires seront alors nécessaires pour atténuer ces risques jusqu'alors méconnus ou négligés.

Les changements nécessaires augmenteraient les coûts déjà non compétitifs de la technologie de l'énergie nucléaire.

## Points récapitulatifs

1. Les lésions causées par l'exposition aux rayonnements ionisants peuvent être évaluées à l'aide de méthodes fondées sur la compréhension physique ou biologique. Il existe des preuves biologiques significatives de dommages graves dus au faible niveau de rayonnement ionisant exposition.
2. Une étude cytogénétique nommée 3MILER RUN, menée par les auteurs, est en cours au moment de la publication.
3. Si les indications biologiques selon lesquelles les expositions au TMI étaient nocives étaient effectivement correctes, les contrôles techniques supplémentaires nécessaires pour construire de nouvelles centrales nucléaires à un niveau de sécurité acceptable seraient presque certainement d'un coût prohibitif.

## Références

- Aamodt, M. et Aamodt, N. (1984). Pétitionnaires contre Commission de réglementation nucléaire des États-Unis. Requêtes d'Aamodt pour enquête sur les rapports du titulaire de licence concernant les rejets radioactifs au cours des premiers jours de l'accident de TMI-2 et report de la décision de redémarrage en attendant la résolution de cette enquête. Numéro de dossier 50-289. Tribunal administratif, Washington, DC, 21 juin.
- Beyea, J. (1985a). Actes de l'atelier sur la dosimétrie de Three Mile Island (vol. 1, p. 124). Fonds de santé publique de Three Mile Island et Académie des sciences naturelles de Philadelphie.
- Beyea, J. (1985b). Actes de l'atelier sur la dosimétrie de Three Mile Island (vol. 2, p. B129). Fonds de santé publique de Three Mile Island et Académie des sciences naturelles de Philadelphie.
- Datesman, A. M. (2020). Le bruit de grenaille radiobiologique explique la biodosimétrie de Three Mile Island indiquant des expositions à près de 1 000 mSv. Rapports scientifiques, 10(1), 10933. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67826-5>

- Hatch, M. C., Beyea, J., Nieves, J. W. et Susser, M. (1990). Cancer à proximité de la centrale nucléaire de Three Mile Island : émissions de radiations. *American Journal of Epidemiology*, 132(3), 397–412. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a115673>
- Shevchenko V. (1995). Rapport final du Prof. Vladimir A. Shevchenko, Ph.D., Dr. Sc., concernant la dose reçue par tout individu lors de l'accident de l'unité 2 de TMI. Copie sur dossier chez l'auteur.
- Susser, M. (1997). Conséquences de l'accident de Three Mile Island en 1979 (suite) : Autres commentaires. *Environmental Health Perspectives*, 105(6), 566–567. <https://doi.org/10.2307/3433589>
- Teller, E. (1979). J'ai été la seule victime de Three Mile Island. *The Wall Street Journal*, 31, 1979.
- Wilson, R. T., LaBarge, B. L., Stahl, L. E., Goldenberg, D., Lyamzina, Y., et Talbott, E. O. (2023). Qu'avons-nous appris sur les effets sur la santé plus de 40 ans après l'accident nucléaire de Three Mile Island ? Une étude de la portée et des processus. *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy*, 14(2), 129–158. <https://doi.org/10.1002/rhc3.12258>

Accès libre Ce chapitre est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou format, à condition de créditer l'auteur(s) d'origine et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été apportées.

Les images ou autres éléments tiers de ce chapitre sont inclus dans la licence Creative Commons du chapitre, sauf indication contraire dans une ligne de crédit du contenu. Si le contenu n'est pas inclus dans la licence Creative Commons du chapitre et que votre utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation légale ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement du détenteur des droits d'auteur.



## Chapitre 7

### Des expositions prolongées peuvent Être mal compris



La source la plus importante pour évaluer les dangers des radiations pour de larges groupes de population est l'étude des survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki. Elle a fourni les meilleures données épidémiologiques disponibles sur les effets des radiations sur les humains, et les connaissances scientifiques sur les dangers des radiations se sont largement inspirées des travaux de la Commission des victimes de la bombe atomique... (Walker, 2000)

– J. Samuel Walker, historien de la Commission de réglementation nucléaire des États-Unis.

Les études sur la bombe atomique ont établi des normes qui sont manifestement fausses. (Greene, 2003)

– Dr Alice Stewart, épidémiologiste britannique pionnière, représentée sur la figure 7.1.

## L'analogie postale

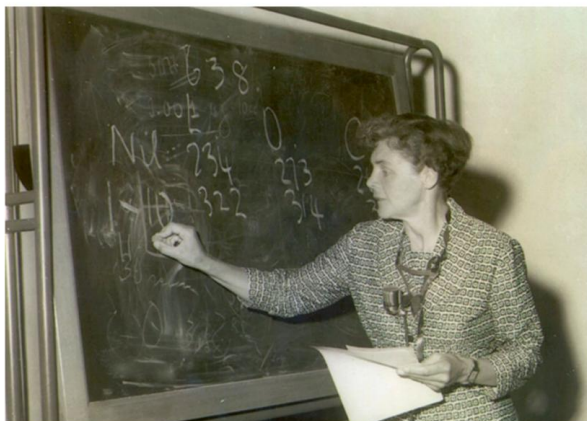
Imaginez un immense entrepôt de tri postal. Sous un même toit, s'étendant jusqu'à l'horizon, se trouve une énorme collection de bandes transporteuses, chacune remplie de bacs postaux en carton ondulé. Chaque bande transporteuse correspond peut-être à un emplacement différent, tandis que chaque bac postal est dirigé vers un certain camion partant à une heure précise. Les bacs se déplacent en continu, indépendamment, sur chaque bande, et très rapidement. L'échelle de l'ensemble de l'opération est immense. À des fins d'illustration, ne considérons qu'une petite partie de l'entrepôt en

---

Le chapitre suivant aborde des notions conceptuelles à base mathématique, qui ne présentent peut-être pas un intérêt universel. Si le lecteur saisit l'idée fondamentale selon laquelle les expositions prolongées à de faibles niveaux de rayonnements ionisants peuvent être mal comprises, il n'y aura aucun mal à passer directement aux points récapitulatifs à la fin.

Aaron Datesman est l'auteur principal de ce chapitre.

Fig. 7.1 Dr Alice Stewart,  
épidémiologiste qui a  
démontré que les rayons X in  
utero provoquent des  
leucémies chez les jeunes  
enfants. L'auteur recommande  
vivement la brillante biographie du Dr.  
Stewart écrit par Gayle Greene,  
La femme qui en savait trop  
(Greene, 2003)



illustré sur la Fig. 7.2. Dans le champ de vision, dix bandes transporteuses sont disposées. Sur chaque tapis roulant, à un instant donné, se trouvent dix bacs. Au total, cent bacs sont visibles.

Un trieur de courrier dispose de 3000 pièces de courrier à répartir entre ces 100 bacs. Le courrier est entièrement du courrier indésirable, peu importe où il va, et le trieur distribue les courriers individuels de manière aléatoire. Combien de courriers finissent dans chaque bac ? Il est évident qu'en moyenne, chaque bac contiendra 30 lettres. Cependant, comme le processus est aléatoire, certains bacs contiendront plus que le nombre moyen, et d'autres moins. Une distribution valide<sup>1</sup>

est illustré dans la grille la plus à gauche de la Fig. 7.2. Malgré la répartition aléatoire entre les bacs individuels, en moyenne, les dix bacs postaux d'une rangée (sur un tapis roulant, correspondant à un emplacement) contiennent ensemble environ 300 pièces de courrier.

Il est intéressant ensuite d'extrapoler vers le bas. Et s'il n'y avait que trente lettres à répartir dans ces cent bacs ? Ou trois ?

Comme une lettre ne peut pas être coupée en morceaux, de nombreuses poubelles, voire la plupart, sont désormais vides. (Il peut s'agir de courrier indésirable, mais il peut ne pas être livré pré-décheté !) Ces situations sont illustrées dans les grilles du milieu et de droite de la Fig. 7.2.

Le lecteur attentif pourrait se demander : qu'en est-il d'une extrapolation en dessous d'une lettre ? Existe-t-il une limite inférieure ? Étant donné que le nombre de bandes transporteuses est très important mais (en théorie) non fixe, la réponse est qu'il n'existe pas de limite inférieure. Pour extrapoler plus bas, il suffit d'élargir le champ de vision à

<sup>1</sup>L'énoncé signifie spécifiquement que la distribution entre les compartiments obéit à la « statistique de Poisson ».

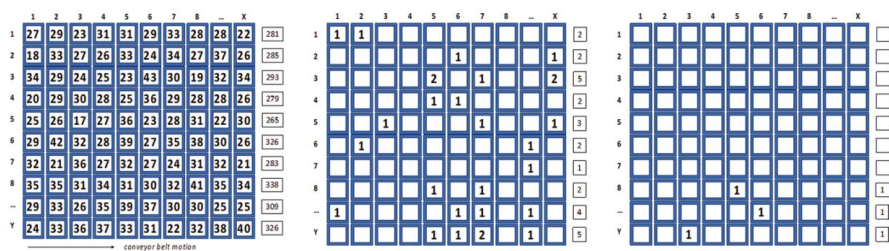


Fig. 7.2 L'entrepôt de tri postal contient un ensemble de Y bandes transporteuses, chacune contenant X bacs postaux. Des ensembles représentant des expositions à des doses élevées (à gauche), intermédiaires et faibles (à droite) sont illustrés. Le nombre de pièces de courrier distribuées est respectivement de 3 000, 30 et 3. De gauche à droite, l'image physique passe de la description du nombre d'événements contenus dans chaque bac à la description de la fréquence à laquelle un bac contient un seul événement. La colonne la plus à droite indique la somme du nombre de pièces de courrier sur la ligne. Étant donné que les bacs postaux sur un tapis roulant représentent des divisions temporelles, les ensembles illustrés passent de « temporellement homogènes » à gauche à « temporellement inhomogènes » à droite

En physique statistique, l'ensemble des boîtes postales sur un nombre infini de bandes transporteuses qui a été conjecturé est appelé un « ensemble ». Il n'est jamais nécessaire de découper un courrier pour représenter un nombre moyen souhaité de courriers sur une bande transporteuse (300, 3, 0,3, 0,0003, etc.) si l'ensemble est infini .

En allant de gauche à droite dans la figure 7.2, on observe qu'une description significative des trois différentes distributions passe de la description du « nombre » de pièces de courrier contenues dans chaque compartiment à la « fréquence » à laquelle chaque compartiment contient un événement unique. En termes techniques, la distinction est celle entre l'amplitude des événements et la fréquence à laquelle ils se produisent. Les êtres humains, en particulier en raison de leur tendance à ignorer l'occurrence d'événements improbables, raisonnent plus confortablement dans le domaine du « nombre ». La nature, cependant, intègre les deux points de vue simultanément. La construction mathématique correcte est connue sous le nom de « moyenne d'ensemble ». Le bon sens humain est malheureusement trompeur dans cette situation.

La distinction numérique entre la moyenne et la moyenne d'ensemble, illustrée par référence aux exemples présentés dans la figure 7.2, est présentée dans le tableau 7.1. Lorsque les bacs postaux sont très pleins, il y a peu de différence entre la valeur moyenne et la valeur moyenne d'ensemble. Il existe néanmoins une différence très importante entre elles : alors que la valeur moyenne s'extrapole linéairement vers le bas, la valeur moyenne d'ensemble ne le fait pas.<sup>3</sup> (Deux

2Pour prendre un exemple concret : si le nombre moyen de pièces de courrier par bac est de 0,0001, une distribution aléatoire valide résulterait du tri de 100 pièces de courrier parmi un million de bacs, disposés sur dix mille tapis roulants.

3En prenant n comme nombre moyen d'événements dans un élément de l'ensemble (représentant la dose absorbée), le nombre total d'événements dans l'ensemble est  $N = nY$ . La moyenne de l'ensemble

Tableau 7.1 Illustration de la distinction entre les valeurs moyennes et les valeurs moyennes d'ensemble à l'aide des ensembles présentés dans la Fig. 7.2

| Nombre de lettres | Moyenne | Gamme   | Moyenne d'ensemble |
|-------------------|---------|---------|--------------------|
| 3000              | 300     | 265–338 | 305                |
| 30                | 3       | 1–5     | 6.2                |
| 3                 | 0,3     | 0–1     | 1.8                |
|                   | 0,0003  | 0–1     | 0,06               |

La « moyenne » fait référence au nombre moyen de pièces de courrier dans une ligne de la grille. La moyenne est une quantité analogue à la dose absorbée. La « plage » fait référence au nombre le plus faible et le plus élevé de pièces de courrier distribuées dans une ligne. Notez que la plage ne peut pas être extrapolée vers le bas au-delà de son unité discrète d'une lettre. La ligne du bas fait référence à un ensemble distinct avec une distribution très clairsemée, qui devrait être trop grande pour être illustrée utilement

les quantités sont linéairement liées si elles sont séparées par un facteur constant ; par exemple, les colonnes « Nombre de lettres » et « Moyenne » du tableau 7.1.) Au lieu de cela, la moyenne de l'ensemble dépasse la valeur moyenne d'un facteur important qui augmente à mesure que la grille est remplie de manière plus clairsemée.

Le lecteur aura peut-être du mal à s'habituer au concept de moyenne d'ensemble, qui fait appel à des idées complexes. Le problème fondamental est cependant concret : la Poste n'est pas autorisée à déchiqueter un courrier dans le but de placer le même poids de courrier dans chaque bac postal. La distribution des lettres n'est pas uniforme. (« Inhomogène » est une description utile.) Le processus aléatoire de distribution du courrier se heurte à une limite inférieure discrète, comme on peut le voir dans les deux dernières lignes du tableau 7.1. La moyenne d'ensemble représente le compromis de la Nature entre la valeur moyenne décroissante (par exemple, 0,0003 lettre, un acte criminel selon le code postal américain) et la limite inférieure imposée par la nature discrète d'une lettre (1 courrier, indivisible).

La discussion précédente a été une tentative de construire par analogie une description simple d'un phénomène complexe. Ce phénomène est une lésion biologique due à une exposition à des rayonnements ionisants. Chaque pièce de courrier représente un événement d'ionisation unique, c'est-à-dire la libération d'un seul électron énergétique dans un tissu vivant. (La libération d'un électron est la raison pour laquelle le phénomène est appelé rayonnement « ionisant ».) Chaque événement d'ionisation peut être suivi d'une lésion biologique. La distribution des événements

nombre de événements  $\bar{n}$  pour le clairsemé CAS est

$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$  ou RMS indique le

Nombre moyen quadratique d'événements dans un bac. L'expression complète englobant les deux « points de vue » est  $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2}$ , qui a une forme linéaire si n est grand mais une forme non linéaire si

est aléatoire, à la fois dans le temps et dans l'espace. L'attribution d'événements à des bacs représente une compréhension du fait que les événements se produisent à la fois à un certain endroit (sur un tapis roulant plutôt qu'un autre) et à un certain moment (dans un certain bac postal). La vitesse à laquelle les bacs postaux défilent sur un tapis roulant représente la vitesse de la réaction chimique responsable des lésions biologiques. Le nombre total de bacs sur un tapis roulant représente la durée de l'exposition.

En additionnant les paquets d'énergie associés aux événements d'ionisation individuels sur les différentes lignes pour arriver à la « dose » totale, on peut, de manière logique, indiquer la gravité de l'exposition. Toutefois, comme l'amplitude et la fréquence des événements doivent être prises en compte, la Nature juge la situation avec plus de subtilité, en utilisant la moyenne d'ensemble. Il s'ensuit qu'une exposition prolongée et de faible intensité aux rayonnements ionisants peut être beaucoup plus nocive pour la santé qu'une exposition aiguë déposant la même dose absorbée dans les tissus.

Le Gray (Gy) est une mesure physique de la dose absorbée, indiquant la quantité d'énergie dissipée par un rayonnement ionisant dans un volume de tissu. L'unité de la dose équivalente ou de référence, qui est une mesure biologique du risque, est le Sievert (Sv). On estime qu'une dose aiguë de 1 Sv augmente de 5,5 % le risque de développer un cancer mortel.

En se référant à l'analogie de la poubelle postale, l'auteur soutient que la valeur moyenne correspond à la dose absorbée en Gray, tandis que la valeur moyenne de l'ensemble correspond à la dose équivalente en Sievert. L'hypothèse est connue sous le nom de « bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques ».

## La remise en question du modèle linéaire

En ce qui concerne la radioprotection et les effets sur la santé humaine des expositions de faible intensité aux rayonnements ionisants, les experts soutiennent le modèle dit « Linear No Threshold » (LNT). L'Académie nationale des sciences a récemment soutenu cette perspective dans son rapport de 2006 intitulé « Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation » (BEIR VII). Le modèle LNT fait valoir deux conclusions essentielles. Tout d'abord, selon le modèle LNT, il n'existe pas de dose « sûre ». Toute interaction peut être biologiquement dommageable et il n'existe en outre aucune preuve à l'appui d'un seuil d'exposition en dessous duquel aucun dommage ne peut se produire. La deuxième affirmation du modèle LNT est la linéarité : on estime qu'il est acceptable d'extrapoler les impacts de manière linéaire vers le bas, des doses élevées aux doses faibles.

L'extrapolation est nécessaire car il est difficile d'évaluer directement les impacts sur la santé résultant d'expositions inférieures à environ 0,1 Gy.

Le rapport BEIR VII justifie l'extrapolation linéaire sur la base suivante :

[T]oute particule de rayonnement ionisant peut endommager les cellules. Cependant, si une seule particule ionisante traverse l'ADN d'une cellule, les risques de dommages à l'ADN de la cellule sont proportionnellement plus faibles que si 10, 100 ou 1000 particules ionisantes de ce type le traversent. Il n'y a aucune raison de s'attendre à un effet plus important à des doses plus faibles de l'interaction physique du rayonnement avec l'ADN de la cellule. (Conseil national de recherches, 2006)

L'analogie de la poubelle postale de la section précédente a préparé le lecteur à considérer l'argument avancé par le comité BEIR VII. Bien qu'intuitivement sensé et donc très attrayant, l'argument en faveur de la linéarité n'est en fait valable que dans des circonstances très particulières. La difficulté survient parce qu'il existe des échelles de volume et de temps appropriées décrivant les phénomènes physiques/chimiques/physiques. action biologique. En bref, quelle est la taille des bacs postaux ? Oui, dix, cent, voire mille événements ou plus susceptibles de provoquer des lésions sont supposés se produire, mais dans quel intervalle de temps ? Dans quel volume de tissu ?

La nature a des réponses très précises à ces questions, mais les experts ne les identifient pas.<sup>4</sup>

Les autorités n'ayant jamais conceptualisé de manière adéquate la question implicite des échelles naturelles de temps et de volume, elles n'ont pas non plus reconnu le rôle nécessaire du calcul d'ensemble. Le langage choisi par le comité BEIR VII, qui adopte le cadre du « combien ? » d'événements tout en omettant d'aborder la question de la « fréquence ? » des événements, appuie cette interprétation. Alors que le modèle LNT permet d'extrapoler les résultats vers le bas, il n'inclut aucun mécanisme permettant d'extrapoler les expositions vers le bas en dessous du niveau d'une piste par cellule. La difficulté est sérieuse. Cependant, la résolution de cette contradiction peut être abordée comme elle l'a été dans l'analogie postale.

La nature utilise la valeur moyenne de l'ensemble, qui reflète à la fois l'amplitude et la fréquence des événements. Seule l'amplitude des événements, représentée par la valeur moyenne, est extrapolée linéairement vers le bas. Lorsque chaque compartiment est plein (exposition temporellement homogène), il arrive que la valeur moyenne coïncide à peu près avec la valeur moyenne de l'ensemble. Pour cette raison, le modèle LNT dans cette situation concorde avec la valeur moyenne de l'ensemble. Cependant, dans les ensembles clairsemés (temporellement inhomogènes) où de nombreux compartiments sont vides, le modèle LNT et la valeur moyenne de l'ensemble divergent. Le modèle LNT est donc incorrect pour les expositions prolongées à faible débit de dose.

---

<sup>4</sup>L'espèce chimique la plus responsable des lésions dues aux radiations est le radical hydroxyle, OH. Le radical hydroxyle est très réactif, avec une durée de vie très courte dans les tissus, de seulement 1 nanoseconde (0,000000 001 s). Le volume d'interaction d'environ 0,3 millilitre correspond à l'absorption photoélectrique du rayon gamma de 1,460 MeV produit par le potassium 40, un contaminant radioactif universellement présent dans les tissus vivants.

Pour résumer : dans un volume d'interaction unique pendant un intervalle de temps unique, soit un événement d'ionisation se produit (éventuellement plusieurs), soit il ne se produit pas. Chaque événement est discret, se produisant dans une seule case représentant un seul volume d'interaction pendant un très bref intervalle de temps. La représentation mathématique du processus ne traite jamais un événement comme s'il pouvait être divisé. L'héritage scientifique de cette idée remonte à plus d'un siècle, ayant d'abord été développé pour décrire l'échec des tubes à vide à fonctionner de manière optimale à de faibles niveaux d'amplification. La théorie appliquée aux lésions par radiation est connue sous le nom de « bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques » (Datesman, 2016).

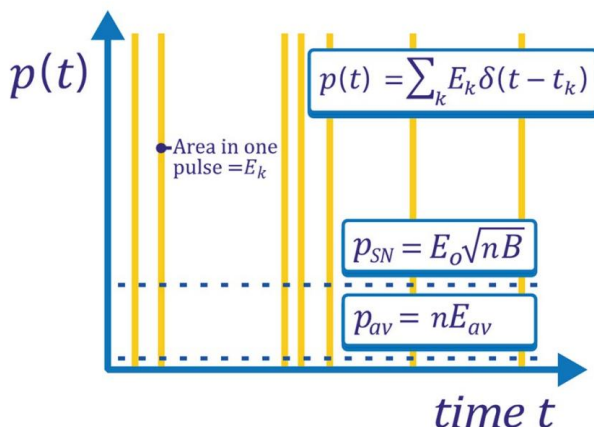
Du point de vue localisé du tissu affecté, on devrait conclure de cette description qu'il n'existe pas de « faible dose » ou « d'exposition de faible niveau ». Chaque événement d'ionisation individuel crée, dans un volume limité, une exposition à un débit de dose élevé de très courte durée. Étant donné qu'une exposition globale de durée finie est constituée d'une série d'événements discrets comme le montre la figure 7.3, toutes les expositions doivent donc être considérées comme des expositions à débit de dose élevé. Les expositions caractérisées comme « faible dose » sont constituées d'événements d'ionisation individuels à débit de dose élevé, étalés sur des intervalles de temps croissants. En conséquence, le modèle LNT sous-estime considérablement l'impact chimique, biologique et médical des expositions prolongées et diluées aux rayonnements ionisants. Le seuil de débit de dose auquel le modèle LNT commence à échouer—

car il tente d'extrapoler linéairement vers le bas au-delà du niveau d'un événement unitaire par bac, se situe dans le régime inférieur à environ 100 Gy/h.

Aucun argument n'a été avancé pour dire que les expositions à des doses/débits de dose plus faibles sont plus dommageables, bien qu'il ressorte de l'hypothèse du bruit de grenaille que les expositions prolongées sont plus dommageables par unité de dose absorbée. La vitesse de réparation de l'ADN (il faut environ 2 heures pour réparer une cassure double brin) a également des conséquences complexes sur les lésions dues aux radiations en cas d'exposition prolongée.

Fig. 7.3 Une exposition à faible dose consiste en une série d'expositions très brèves à un débit de dose élevé, schématiquement illustrées par des « impulsions » orange, étalées dans le temps.

ingénierie, une forme d'onde de ce type est connue sous le nom de « train d'impulsions »



Si le phénomène du bruit de grenaille est effectivement fermement établi, de sorte que le modèle LNT contredit la loi physique, comment se fait-il que les connaissances importantes décrites dans cette section aient été négligées pendant de nombreuses décennies ? La réponse intéressante est que ce n'est pas le cas. L'extrait ci-dessous est tiré d'une conférence importante donnée par Harald Rossi, le principal inventeur du domaine de la microdosimétrie :

Presque toutes les quantités physiques sont non stochastiques, bien que dans de nombreux cas le caractère discret de la matière et du rayonnement provoque des fluctuations statistiques. Cependant, dans la plupart des cas, celles-ci sont suffisamment petites pour être ignorées, et aucune tentative n'est faite pour prendre en compte la quantité stochastique sous-jacente ou pour lui donner un nom spécial. (Rossi, 1986)

Rossi continue de fournir une description très claire de la nature du bruit de grenaille dans les circuits électriques, qu'il n'est pas nécessaire de reproduire ici. Le point important est que, bien que Rossi ait eu une compréhension claire de l'existence, de la nature et de la pertinence du bruit de grenaille, sa conclusion était incorrecte : les fluctuations statistiques (c'est-à-dire si les bacs adjacents sont pleins ou vides) ne sont en aucun cas négligeables. Les conséquences de cette erreur sont importantes et préoccupantes.

Traditionnellement, la dose absorbée en Grays et la dose équivalente en Sieverts sont reliées par un « facteur de pondération du rayonnement », obtenu à l'aide de la microdosimétrie. Les facteurs de pondération permettent de comparer des rayonnements de différentes « qualités » – c'est-à-dire des rayons X et gamma, des particules bêta, des particules alpha et des neutrons – sur la base de lésions biologiques. L'auteur est d'avis que l'hypothèse du bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques peut invalider le concept de facteur de pondération du rayonnement.

## Preuves expérimentales de l'hypothèse du bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques

En 1972, le Dr Abram Petkau, du Centre de recherche nucléaire de Whiteshell au Canada, a publié les résultats d'une expérience intrigante dans la revue scientifique *Health Physics*. Le Dr Petkau était le chef de la division de biophysique médicale de son établissement, affilié à l'Institut canadien de l'énergie atomique. Alors qu'il étudiait des sujets liés à la chimie des radiations et aux lésions biologiques, Petkau avait déjà mis au point une méthode pour créer des membranes biologiques artificielles dans un petit appareil, dans lequel la membrane enjambait une ouverture séparant deux compartiments remplis d'eau. Grâce à cet arrangement, il était possible d'irradier l'eau avec des rayons X, tout en observant simultanément la membrane au microscope.

Il a été constaté que les membranes se rompaient de manière fiable (un résultat biologique observable) après une dose de rayons X absorbée de 35 Gray.

La dose de rupture n'a pas été reproduite lorsque l'irradiation externe de la membrane par rayons X a été remplacée par une irradiation par un radionucléide émetteur bêta, dissous dans l'eau contenue dans l'appareil. On a plutôt constaté que la rupture de la membrane se produisait à des doses absorbées beaucoup plus faibles, augmentant avec le débit de dose (Petkau, 1972). Le résultat est intrigant car l'expérience de Petkau est une interrogation directe sur le concept de différentes qualités de rayonnement ionisant. Loin de confirmer la croyance acceptée selon laquelle les rayons X et les particules bêta sont de qualité identique, quel que soit le débit de dose, l'expérience de Petkau a indiqué que l'irradiation par particules bêta était jusqu'à 3000 fois plus efficace pour la rupture de la membrane.

Dans le contexte de la discussion de ce chapitre, il convient de noter que l'expérience de Petkau a étudié de faibles débits de dose, dans tous les cas inférieurs à 0,6 Gy/h. Cette valeur se situe bien en dessous du seuil d'environ 100 Gy/h. heure à laquelle l'auteur affirme que l'extrapolation linéaire commence à s'effondrer. Pour cette raison, l'expérience de Petkau interroge directement non seulement le concept de qualité du rayonnement (qu'elle semble invalider), mais aussi l'hypothèse du bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques. Comme le montre la figure 7.4,

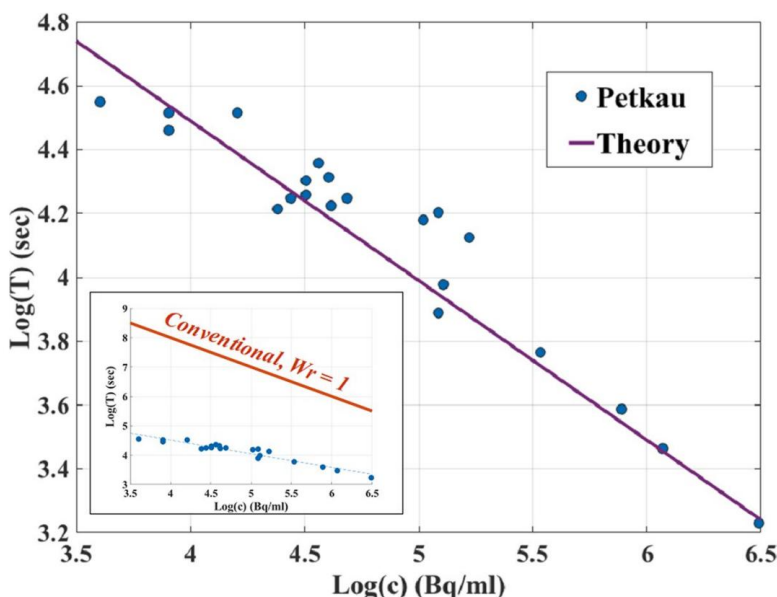


Fig. 7.4 L'effet Petkau expliqué par l'hypothèse du bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques. Le temps de rupture de la membrane est représenté sur l'axe vertical, tandis que la concentration du radionucléide émetteur bêta sodium-22 est représentée sur l'axe horizontal. D'après les propres travaux de l'auteur (Datesman, 2019)

Le résultat de Petkau concorde assez bien avec la prédiction de l'hypothèse du bruit de grenaille. La découverte selon laquelle le résultat de la rupture de membrane est cohérent avec l'hypothèse du bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques a été publiée par l'auteur dans un article paru, également dans Health Physics, en 2019.

## Le rayonnement de fond peut ne pas être bien compris

Les expositions environnementales et médicales comprennent ce que l'on appelle le « rayonnement de fond ». Les expositions environnementales, en particulier, sont généralement de nature prolongée. Actuellement, aux États-Unis, l'exposition annuelle moyenne aux sources naturelles (non médicales) de rayonnement ionisant s'élève à environ 3 mSv/an.<sup>5</sup> La contribution au rayonnement de fond due aux rayonnements médicaux (principalement les scanners et les rayons X) est d'une ampleur similaire. Il existe quatre catégories d'exposition au rayonnement de fond non médical : l'inhalation, l'ingestion d'aliments et d'eau, le rayonnement terrestre et le rayonnement cosmique. La voie d'inhalation (principalement le radon) représente 2,3 mSv/an, tandis que les autres contributions se situent toutes dans la fourchette de 0,2 à 0,3 mSv/an. Les valeurs indiquées ne sont que des moyennes, car il existe de grandes variations locales dues à la géologie, à la construction des bâtiments, à l'altitude et à des facteurs personnels.

Le potassium 40 (K-40), mentionné dans la première ligne du tableau 7.2, est un élément particulièrement intéressant de la dose de fond. Les tissus vivants et le sang sont universellement contaminés par ce radioisotope à longue durée de vie, qui est un

Tableau 7.2 Comparaison des expositions à faible dose en utilisant l'hypothèse du bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques

| Source                 | Dose (mGy) | Durée | Taux moyen (Gy/h)   | Taux moyen d'endophatogénie spongiforme bovine (Sv/h) | Dose équivalente (mSv) |
|------------------------|------------|-------|---------------------|-------------------------------------------------------|------------------------|
| Potassium-40           | 0,15       | 1 an  | 0,000000 02 0,1 s 5 | 0,0015                                                | 13 000                 |
| Radiographie           | 0,15       |       |                     | 23                                                    | 0,64                   |
| thoracique LSS bombe A | 39,6       | 10 s  | 14                  | 40                                                    | 110                    |

Les expositions aiguës obéissent au modèle LNT, mais les expositions prolongées s'écartent du modèle à partir du débit de dose seuil. « LSS » fait référence aux expositions aux rayonnements gamma retardés de l'étude sur la durée de vie des survivants japonais des bombardements atomiques. Le débit moyen correspond au débit de dose absorbée, en Grays/heure, tandis que le débit moyen d'ensemble correspond au débit de dose équivalent indiquant le degré de lésion biologique, mesuré en Sieverts/heure. La dose équivalente est le produit de la durée d'exposition et du débit moyen d'ensemble. Des valeurs de 100 Gy/h sont supposées pour le débit de dose seuil, sauf dans le cas du K-40, où il est possible de calculer une valeur de 134 Gy/h précisément.

<sup>5</sup> Dans cette discussion, l'unité utilisée est le Sievert (Sv), plutôt que la nouvelle définition reflétant la moyenne d'ensemble de la dose absorbée. Il est nécessaire de faire cette adaptation car le radon est un radionucléide émetteur alpha, avec un facteur de pondération de 20.

émetteur mixte énergétique (c'est-à-dire qu'il émet à la fois des rayons gamma et des particules bêta). Environ 4000 désintégrations du K-40 se produisent dans un corps humain de 60 kg chaque seconde. La dose absorbée due à ce contaminant s'élève à environ 0,15 mGy/ L'ensemble de la population est en effet très peu rempli. Le débit de dose moyen de l'ensemble, qui reflète le degré de lésion biologique indiqué dans la cinquième colonne du tableau 7.2, dépasse le débit de dose absorbé ou moyen d'un facteur d'environ 100 000.

Les expositions médicales à des fins de diagnostic sont généralement de durée relativement courte. Une radiographie thoracique fictive délivrant une dose de 0,15 mGy avec une durée de 0,1 s est considérée dans la deuxième ligne du tableau 7.2. Dans ce cas, encore une fois parce que le débit de dose est inférieur à la valeur seuil, le débit de dose moyen global (représentant l'impact biologique de l'exposition) est également supérieur au débit de dose absorbé, mais seulement d'un facteur d'environ quatre.

Comme l'explique l'historien officiel de la Commission de réglementation nucléaire dans la citation qui ouvre ce chapitre, l'étude sur la durée de vie (LSS) des survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki est le principal fondement sur lequel repose notre connaissance des dangers de l'exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants. Les résultats de l'étude LSS ancrent essentiellement l'échelle que la société utilise pour comprendre les dangers de l'exposition aux rayonnements ionisants. La troisième ligne du tableau 7.2 indique la dose moyenne absorbée représentée dans l'étude LSS en raison du « rayonnement gamma retardé » pour les individus à 2000 mètres de l'hypocentre d'Hiroshima.

Le tableau 7.2 révèle un résultat intéressant.<sup>6</sup> Entre les expositions à la radiographie thoracique et à la LSS, les doses absorbées diffèrent d'un facteur de 264. Les doses équivalentes (biologiques), quant à elles, diffèrent d'un facteur similaire de 172. La similitude indique que, bien que les durées d'exposition diffèrent d'un facteur important, l'échelle établie par la LSS décrit assez bien les expositions aux rayonnements médicaux diagnostiques.

Il ne faut cependant pas confondre coïncidence et sagesse. Si l'hypothèse du bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques est correcte, le cadre fondé sur les données LSS est fondamentalement inadapté en ce qui concerne les expositions environnementales. Comme le montre la première ligne du tableau 7.2, la dose équivalente due au potassium 40 s'élève à environ 13 000 mSv par an. À titre de comparaison, une dose aiguë (c'est-à-dire survenant sur une courte durée) de l'ordre de 5 000 mSv sera mortelle pour la majorité des personnes exposées dans les 30 jours.

---

<sup>6</sup>Le terme technique décrivant cette situation est « C'est correct, mais pour de mauvaises raisons », ce qui, malgré l'utilité de l'expression, ne constitue pas un bon acronyme.

Que signifie ce résultat surprenant ? La contamination par le potassium 40, parce qu'elle est à la fois universelle et essentiellement inévitable, est largement considérée comme bénigne. Ce jugement n'est peut-être pas totalement correct. Au lieu de cela, une hypothèse raisonnable est que les mécanismes de réparation cellulaire ont évolué pour agir à un rythme qui compense approximativement les dommages causés au matériel génétique par le potassium 40. (Selon le tableau 7.2, le taux auquel ces dommages s'accumulent est d'environ 1,5 mSv/heure.) Les dommages biologiques causés par des expositions exogènes (qu'elles proviennent d'une bombe atomique, d'une radiographie médicale ou du radon dans un sous-sol) ne se produisent qu'en plus de l'activité de base des dommages endogènes dus au potassium 40 et de leur réparation. La vision conventionnelle incarnée par le modèle LNT occulte malheureusement cette com

L'auteur estime qu'aucun modèle de lésion radiologique décrivant l'impact biologique des expositions à des doses environnementales ne peut être valable sans une description temporelle complète des dommages et de leur réparation. L'échelle construite sur la LSS est valable pour la simple raison que les expositions contre lesquelles elle est testée sont beaucoup plus courtes (de l'ordre de quelques secondes) que les processus responsables de la réparation des cassures double brin (qui nécessitent des heures). La nature dynamique du processus de réparation n'est donc pas un élément nécessaire de la description, par exemple, des rayons X médicaux.

Toutefois, lorsque l'exposition est continue et prolongée, une analyse plus approfondie intégrant le processus de réparation doit être entreprise. Étant donné que le modèle LNT n'intègre pas une telle analyse, l'exposition à des niveaux « de fond » de rayonnement ionisant dans l'environnement peut être un phénomène incomplètement ou incorrectement compris.

#### Rejets environnementaux liés à l'exploitation des centrales nucléaires Centrales électriques

Les émissions de pollution radioactive des centrales nucléaires se produisent de manière continue ou par « lots » de courte durée. Par exemple, pour chacune des années 1999-2003, les centrales nucléaires en exploitation dans le monde ont rejeté environ 30 000 curies (Ci) de radionucléides de manière continue et 6 000 Ci par lots (Kalinowski et Tuma, 2009).

Aux États-Unis, les services publics sont tenus de déclarer leurs émissions à la Nuclear Regulatory Commission. Une partie d'un tableau d'un de ces rapports, concernant la centrale électrique d'Oyster Creek dans le New Jersey, est présentée à la figure 7.5. Au cours de chacun des trois premiers trimestres de 2018, le service public propriétaire de l'installation a signalé que le réacteur à eau bouillante de 636 MW d'Oyster Creek a rejeté entre 20 et 40 Ci de « gaz de fission et d'activation », principalement des gaz nobles comme le krypton et le xénon. L'installation n'a signalé aucune émission

Period: January 1, 2018 through December 31, 2018

Unit: Oyster Creek

| A. Fission & Activation Gases      | Units   | Quarter 1 | Quarter 2 | Quarter 3 | Quarter 4 | Est. Total Error % |
|------------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| 1. Total Release                   | Ci      | 3.89E+01  | 2.84E+01  | 2.41E+01  | <LLD      | 24.64%             |
| 2. Average Release Rate for Period | µCi/sec | 5.00E+00  | 3.61E+00  | 3.03E+00  | <LLD      |                    |
| 3. Gamma Air Dose                  | mrad    | 4.88E-04  | 3.01E-04  | 3.95E-04  | N/A       |                    |
| 4. Beta Air Dose                   | mrad    | 1.88E-04  | 1.77E-04  | 1.99E-04  | N/A       |                    |
| 5. Percent of ODCM Limit           |         |           |           |           |           |                    |
| - Gamma Air Dose                   | %       | 9.76E-03  | 6.02E-03  | 7.90E-03  | N/A       |                    |
| - Beta Air Dose                    | %       | 1.88E-03  | 1.77E-03  | 1.99E-03  | N/A       |                    |

Fig. 7.5 Émissions de la centrale électrique d'Oyster Creek, telles que rapportées à la Nuclear Regulatory Commission par Exelon (Exelon Generation, 2018). Les doses rapportées (en millirads) sont de l'ordre de 1 à 10 µGy (microGray)

pour le quatrième trimestre de 2018, depuis l'arrêt du réacteur en septembre de la même année.<sup>7</sup>

Selon le Code of Federal Regulations, les rejets d'effluents radioactifs provenant des centrales nucléaires en exploitation sont autorisés à condition que les doses reçues par les individus dans les zones non réglementées ne dépassent pas 0,02 mSv par heure et 0,5 mSv par an.<sup>8</sup> Prenons donc l'exemple d'un rejet par lots constitué uniquement de gaz noble radioactif krypton-85, un gaz noble émetteur de rayons bêta. À une concentration ambiante très diluée mais constante de 1 µCi par litre, un individu exposé à ce rejet recevra une dose gamma corporelle totale d'environ 0,02 mSv en 1 h.

Bien que les gaz nobles ne soient pas réactifs, ils représentent un danger en cas d'inhalation. De plus, le tissu épithélial pulmonaire est perméable au krypton, qui se lie à l'hémoglobine et est distribué dans tout le corps via le système circulatoire. (Il en va de même pour le xénon, qui est important dans la mesure où il a été impliqué dans l'accident de 1979 à la centrale nucléaire de Three Mile Island en Pennsylvanie.) L'activité du krypton-85 dans le sang de l'individu exposé à ce rejet de lots serait de 1,7 Bq par millilitre. À titre de comparaison, l'activité globale du K-40 dans le corps humain est bien inférieure : seulement 0,067 Bq par millilitre.

Pour cette exposition théorique, le débit de dose absorbée dans le sang serait de 245 nGy/h. Cependant, si l'hypothèse du bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques est correcte, cette exposition autorisée au Kr-85 aurait un impact biologique supérieur à 5 mSv. Une déclaration de risque replace le résultat dans son contexte. En extrapolant la dose individuelle calculée jusqu'au niveau de la population, et

En septembre 2019, un an plus tard, le promoteur du premier parc éolien offshore de l'État du New Jersey a obtenu les droits d'interconnexion de capacité sur l'ancien site d'Oyster Creek. Il se pourrait qu'à l'avenir, l'infrastructure construite pour connecter une centrale nucléaire au réseau électrique fournisse plutôt de l'énergie électrique produite par l'énergie éolienne.

8La loi applicable est la 10 CFR 20, Normes de protection contre les radiations, section 1302.

En outre, en appliquant les directives promulguées par le comité BEIR VII pour une exposition du corps entier, il s'ensuit qu'un cancer mortel pourrait résulter de l'exposition si 3 600 personnes inhalaient du Kr-85 radioactif de la manière décrite. En résumé, il semble que la réglementation pourrait échouer – d'un facteur de plusieurs centaines – à atteindre la norme de protection qu'elle vise. Le modèle LNT avancé par les autorités n'est pas représentatif de la réalité physique des expositions de faible niveau.

## Points récapitulatifs

1. La nature évalue la probabilité d'une lésion biologique causée par une exposition à des rayonnements ionisants sur la base d'une moyenne d'ensemble. Le bon sens ne répond pas très bien à la question de la « fréquence » de survenue de ces événements.
2. Il n'existe pas d'exposition de faible intensité. Toutes les expositions sont constituées d'événements discrets à haut débit de dose et de très courte durée.
3. Notre compréhension scientifique des expositions prolongées, y compris du rayonnement de fond, peut être incomplète, voire erronée. Une hypothèse connue sous le nom de « bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques » a été proposée.

## Références

- Datesman, A. (2016). Bruit de grenaille dans les systèmes radiobiologiques. *Journal of Environmental Radioactivity*, 164, 365–368.
- Datesman, A. M. (2019). Le bruit de grenaille explique le résultat de Petkau  $^{22}\text{Na}^+$  pour la rupture d'un modèle de phospholipidique. *Health Physics*, 117, 532–540.
- Exelon Generation. (2018). Rapport annuel sur les rejets d'effluents radioactifs, 2018, centrale électrique d'Oyster Creek. Dans, 22. Nuclear Regulatory Commission.
- Greene, G. (2003). La femme qui en savait trop : Alice Stewart et les secrets des radiations. Presses de l'Université du Michigan.
- Kalinowski, M. B., et Tuma, M. P. (2009). Inventaire mondial des émissions de radon basé sur les données nucléaires Rapports sur les réacteurs de puissance. *Journal of Environmental Radioactivity*, 100, 58–70.
- Conseil national de recherches. (2006). Risques pour la santé liés à l'exposition à de faibles niveaux de rayonnements ionisants : BEIR VII phase 2. Les Presses des Académies Nationales.
- Petkau, A. (1972). Effet du  $^{22}\text{Na}^+$  sur une membrane phospholipidique. *Health Physics*, 22, 239–244.
- Rossi, H. H. (1986). Qualité du rayonnement. *Radiation Research*, 107, 1–10.
- Walker, J. S. (2000). Dose admissible : une histoire de la radioprotection au XXe siècle. Presses de l'Université de Californie.

Accès libre Ce chapitre est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou format, à condition de créditer l'auteur(s) d'origine et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été apportées.

Les images ou autres éléments tiers de ce chapitre sont inclus dans la licence Creative Commons du chapitre, sauf indication contraire dans une ligne de crédit du contenu. Si le contenu n'est pas inclus dans la licence Creative Commons du chapitre et que votre utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation légale ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement du détenteur des droits d'auteur.



## Chapitre 8

### La nouvelle énergie nucléaire : coûteuse, lente et de qualité inférieure



La grande éolienne sur une montagne du Vermont a prouvé que les hommes pouvaient construire une machine pratique qui produirait de l'électricité de manière synchrone en grandes quantités grâce à l'énergie éolienne. Elle a également prouvé que le coût de l'électricité ainsi produite est proche de celui des méthodes conventionnelles plus économiques. Elle a donc prouvé qu'à l'avenir, les maisons pourront être éclairées et les usines alimentées par ces nouveaux moyens. (Putnam, 1948)

– Vannevar Bush, architecte de l'establishment scientifique aux États-Unis

À l'ère des énergies fossiles, le soleil a été largement ignoré. Aucun pays n'inclut le soleil dans son budget énergétique officiel, même si toutes les autres sources d'énergie seraient réduites à une insignifiance relative si c'était le cas. Nous pensons chauffer nos maisons avec des énergies fossiles, oubliant que sans le soleil, ces maisons seraient à –240 degrés Celsius... Aucun pays n'utilise autant d'énergie que celle contenue dans la lumière du soleil qui frappe ses bâtiments. (Hayes, 1983)

– Denis Hayes, deuxième directeur de l'Institut de recherche sur l'énergie solaire.

## L'adoption initiale de l'énergie nucléaire

Le sujet de ce chapitre est la collision actuelle entre des technologies concurrentes pour la production d'énergie électrique : nucléaire, photovoltaïque solaire et éolien terrestre et offshore. Le conflit n'est pas apparu soudainement. En fait, son expression la plus marquante a probablement eu lieu dans les années 1970, lorsque les États-Unis se sont lancés dans la troisième grande transition énergétique de leur histoire.

Bien que l'énergie éolienne possède un héritage de plusieurs siècles (pour moulin à grain, pomper l'eau et même produire de l'électricité à l'échelle des fermes), son histoire en tant que technologie adaptée à la production d'électricité à l'échelle des services publics

---

Aaron Datesman est l'auteur principal de ce chapitre.



Fig. 8.1 (À gauche) L'éolienne Smith-Putnam construite sur Grandpa's Knob à Castleton, dans le Vermont, qui a commencé à fonctionner en octobre 1941. (Source : Putnam, 1948) (À droite) Denis Hayes, organisateur du premier Jour de la Terre en 1970. (Source : AP)

L'énergie éolienne provient d'une seule installation, illustrée dans la figure 8.1 : l'éolienne Smith-Putnam de 1,25 MW, construite au début des années 1940. Construite par l'ingénieur du MIT Palmer C. Putnam, héritier de la maison d'édition Putnam, elle était la plus grande éolienne du monde jusqu'en 1979. Pour concevoir et construire cette installation pionnière, Putnam a fait appel à des sommités scientifiques, dont l'ingénieur aéronautique Dr Theodore von Kármán de Caltech, et le Dr Vannevar Bush du MIT, le visionnaire de la domination scientifique américaine dans la seconde moitié du XXe siècle. L'énergie éolienne a commencé à contribuer au réseau électrique américain à l'échelle des services publics en 1981, avec la construction d'installations éoliennes dans le col d'Altamont, près de San Jose en Californie.

Il existe de nombreux jalons potentiels qui pourraient être retenus pour indiquer l'avènement de la technologie solaire photovoltaïque. Selon l'auteur, le meilleur choix est le brevet de la cellule solaire au silicium des laboratoires Bell de 1954.<sup>1</sup> La première centrale solaire photovoltaïque à grande échelle (c'est-à-dire supérieure à 1 MW) a été construite par la Atlantic Richfield Oil Company dans le comté de San Luis Obispo, en Californie, en 1983.

<sup>1</sup>Le brevet, accordé en 1957, porte le titre banal « Appareil de conversion d'énergie solaire ».

En matière de technologie nucléaire, on pourrait choisir comme date de référence la date à laquelle le réacteur thermique sous-marin (STR) a atteint la criticité, en mars 1953. Le STR était le prototype de la centrale électrique du sous-marin Nautilus, premier navire à avoir effectué un transit immergé du pôle Nord. Un choix plus pertinent pourrait plutôt être la première production commerciale d'électricité à l'aide de la technologie nucléaire, qui a débuté à la centrale nucléaire de Shippingport, près de Pittsburgh, en Pennsylvanie, en décembre 1957. La puissance de cette installation, qui a fonctionné jusque dans les années 1980, était de 60 MW.

La construction commerciale de grandes centrales nucléaires aux États-Unis a commencé au milieu des années 1960. Les historiens employés par la Commission de réglementation nucléaire décrivent la situation qui existait à cette époque comme un « marché en marche » :

Le marché de l'énergie nucléaire a atteint son apogée en 1966 et 1967, dépassant, selon les termes d'un responsable de General Electric, « même les estimations les plus optimistes... » [En 1967], les fournisseurs nucléaires ont vendu 31 unités, ce qui représentait 49 % de la capacité commandée.  
(Walker et Wellock, 2010).

Les raisons économiques qui sous-tendaient cette frénésie étaient toutefois défavorables. Le marché de l'énergie en marche a fait perdre des centaines de millions de dollars à Westinghouse et à General Electric, les deux entreprises se faisant concurrence à l'époque pour proposer des centrales nucléaires « clés en main » d'une ampleur sans précédent à des compagnies d'électricité sceptiques. L'effort pour percer un marché qui n'existait pas auparavant a cependant été couronné de succès : en 1980, il y avait 71 centrales nucléaires en exploitation aux États-Unis. L'inquiétude croissante concernant la pollution atmosphérique par les particules rejetées par les centrales au charbon a fortement motivé les dirigeants des compagnies d'électricité à envisager de passer à la technologie de l'énergie nucléaire.

L'apparition de l'énergie nucléaire commerciale aux États-Unis a coïncidé avec deux autres événements, distincts dans un certain sens, mais également tous liés : la crise de 1973 créée par l'embargo pétrolier de l'OPEP, ainsi que l'avènement du mouvement écologiste moderne. La première célébration du Jour de la Terre, le 22 avril 1970, a été un moment décisif pour ce dernier : on estime que 20 millions d'Américains y ont participé. Si le sénateur Gaylord Nelson du Wisconsin est reconnu comme le fondateur du Jour de la Terre, la personne la plus responsable de la concrétisation de la vision du sénateur était un jeune homme issu d'un milieu ouvrier nommé Denis Hayes, dont la photo apparaît dans la figure 8.1. Une interview du New York Times de 2020 décrit le chemin qui a conduit Hayes à sa rencontre fatidique avec le sénateur Nelson à Washington, DC, en 1969 :

[Hayes] a voyagé à travers l'Asie et une grande partie de l'Afrique, de l'Europe de l'Est et du Moyen-Orient, travaillant quand il avait besoin d'argent pour la prochaine étape et vivant de beurre de cacahuète et de flocons d'avoine,

et une tasse de café occasionnelle chargée de tout le sucre et de la crème sur la table... Lors d'une nuit méditative dans le désert, dans un état d'esprit accentué par son « régime alimentaire terrible » et le froid du désert, « il m'est venu à l'esprit que nous sommes des animaux et que nous ne respectons pas les principes qui régissent le monde naturel », a-t-il déclaré.

Il s'est réveillé le lendemain matin avec un objectif précis : « Je voulais consacrer ma vie à faire progresser les principes de l'écologie tels qu'ils s'appliquent aux êtres humains, aux communautés humaines et aux processus humains. » (Schwartz, 2020)

Le sentiment et l'activisme écologistes ont connu une série de succès remarquables sous l'administration Nixon au début des années 1970, notamment le Clean Air Act, le Clean Water Act et la création de l'Agence de protection de l'environnement. En particulier parce que les événements contemporains s'alignaient sur les préoccupations environnementales, la promotion des technologies énergétiques alternatives était une composante de la ferveur écologique de l'époque. Par exemple, le Solar Energy Research Institute (SERI) a été créé par une loi en 1974 (sous l'administration Ford). Le SERI a ouvert ses portes à Golden, dans le Colorado, en 1977. Le deuxième directeur du SERI, nommé par le président Carter en 1979, était Denis Hayes. Aujourd'hui, le SERI est connu sous le nom de National Renewable Energy Laboratory, NREL. Son budget pour 2020 était de 545 millions de dollars.

Dans les années 1970, les technologies de l'énergie éolienne et solaire n'étaient pas prêtes à être déployées à grande échelle. Cependant, grâce aux 16 milliards de dollars dépensés par le gouvernement fédéral entre 1951 et 1971 pour développer la technologie des réacteurs à eau légère, l'énergie nucléaire était alors une option viable. La leçon selon laquelle l'énergie nucléaire, bien que viable, n'était pas économique, a peut-être été oubliée. Lorsque l'approvisionnement en pétrole du versant nord de l'Alaska (le pipeline Trans-Alaska a été ouvert en 1977) a commencé, les crises énergétiques des années 1970 ont commencé à s'atténuer et l'impératif de l'énergie nucléaire aux États-Unis s'est effondré.

La thèse de ce chapitre est que, même si l'histoire ne se répète pas exactement, elle rime souvent. Les événements d'il y a quatre ou cinq décennies ont des leçons qui résonnent aujourd'hui. L'énergie nucléaire est en concurrence, sur un spectre de critères distincts, avec d'autres sources d'énergie. Par conséquent, en gardant à l'esprit le contexte approprié, ce chapitre compare les performances des technologies concurrentes – nouvelle énergie nucléaire, solaire photovoltaïque, éolienne terrestre et éolienne offshore – sur des critères de base, notamment le coût et le délai de déploiement, à l'heure actuelle. Quelle est la meilleure voie à suivre ?

## La renaissance du nucléaire domestique

L'auteur était employé dans un laboratoire de recherche soutenant la Marine nucléaire en 2005, à une époque où l'on s'intéressait beaucoup à une « renaissance nucléaire » qui semblait imminente.

L'administration Bush, bien que ses principaux dirigeants soient fermement ancrés dans le secteur des énergies fossiles, a néanmoins promu l'énergie nucléaire comme un moyen de production d'énergie zéro carbone, compatible avec les exigences des écologistes pour répondre aux préoccupations climatiques. L'enthousiasme a été stimulé par des événements marquants : par exemple, la Commission de réglementation nucléaire a accordé la certification finale de conception au nouveau réacteur à eau pressurisée (REP) Westinghouse AP1000 en décembre 2005.

Près de 18 ans plus tard, il est évident que la renaissance promise n'a pas eu lieu – du moins pas aux États-Unis. Une seule centrale nucléaire est entrée en service aux États-Unis depuis lors, celle de Watts Bar Unit 2 dans le Tennessee.

La centrale a été mise en service en juin 2016. Avant cette date, la centrale nucléaire la plus récente des États-Unis était Watts Bar Unit 1, qui a été mise en service en mai 1996. (La construction de Watts Bar Unit 2 a commencé en 1973.) Au total, le résultat matériel de la renaissance nucléaire nationale consiste en deux constructions

sites dans le sud-est des États-Unis, où la construction de quatre REP AP1000 a commencé en 2009. Les unités 2 et 3 de VC Summer en Caroline du Sud ont été annulées en juillet 2017, après une dépense de près de 11 milliards de dollars.

Plusieurs dirigeants responsables du projet ont été poursuivis pour fraude ; au moins l'un d'entre eux a purgé une peine dans un pénitencier fédéral.

En Géorgie, la construction des unités 3 et 4 de la centrale nucléaire Vogtle se poursuit depuis quatorze ans. Le gouvernement américain a fourni 12 milliards de dollars de garanties de prêts pour soutenir cet effort. Jusqu'à 35 milliards de dollars ont été dépensés pour la construction de ces installations jusqu'à la mi-2023.

La criticité initiale de l'unité 3 a été atteinte en mars 2023, et le raccordement au réseau a eu lieu le mois suivant. On s'attendait à ce que les réacteurs entrent en service en 2016, pour un coût de 14 milliards de dollars, soit moins de la moitié du montant finalement dépensé. En proie à des retards et à des dépassements de coûts massifs, la centrale Vogtle a au moins démontré qu'il était possible de construire 2 000 mégawatts de production d'électricité aux États-Unis en utilisant la technologie des centrales nucléaires de quatrième génération. Aucune autre affirmation concernant le potentiel de la technologie nucléaire de nouvelle génération aux États-Unis n'a été validée par l'expérience.

La capacité nominale, en mégawatts (MW), mesure la puissance maximale qu'une installation de production d'énergie produit à un instant donné dans des conditions idéales. Le facteur de capacité décrit la quantité d'énergie que l'installation fournit en fonctionnement sur une durée prolongée. La plupart des centrales nucléaires ont une capacité d'environ 1 000 MW, soit 1 GW (gigawatt). Bien que nous appelions l'entreprise de services publics « la compagnie d'électricité », le tarif par kWh sur une facture de services publics reflète le prix de l'énergie plutôt que de l'électricité. Un ménage américain moyen consomme environ 10 600 kWh (11 MWh) d'énergie par an.

## La renaissance du nucléaire en voie de disparition dans son contexte historique

L'éolien offshore (qui n'a pas encore été démontré à grande échelle aux États-Unis) sera proposé comme une autre alternative. Il est donc légitime de se demander si les coûts de la centrale Vogtle résultent de ce que l'on appelle les « premiers du genre » (FOAK) ou d'autres problèmes qui ont été résolus et ne devraient pas se reproduire. Un rapport du MIT estime que le « coût de construction » du prochain réacteur AP1000 sera nettement inférieur aux dépenses de la centrale Vogtle, et qu'il diminuera encore pour la dixième unité.

La prédiction d'une baisse des coûts d'investissement avec l'augmentation du déploiement de l'énergie nucléaire n'est cependant pas confirmée par l'expérience historique. Selon les données de l'Energy Information Administration (EIA) des États-Unis, pour 75 centrales nucléaires dont la construction a commencé aux États-Unis entre 1966 et 1977, les coûts de construction sont passés de 0,623 million de dollars par MW (en dollars de 1982) en 1966-1967 à 2,132 millions de dollars par MW en 1976-1977. Cette dernière valeur équivaut à 6,7 millions de dollars par MW en dollars de 2023. Comme il n'existe aucun projet de construction de réacteurs AP1000 supplémentaires, il est impossible de tenter de valider la prédiction d'une réduction des coûts d'investissement du « n-ième du genre » (NOAK) par rapport à l'expérience acquise jusqu'à présent, selon laquelle les coûts augmentent avec le temps.

La conclusion selon laquelle « le marché s'est prononcé » contre l'énergie nucléaire est quelque peu surprenante dans la culture actuelle, car il existe simultanément une campagne de relations publiques bien financée, forte, importante et souvent plutôt réussie en faveur de cette technologie.<sup>2</sup> Pourquoi « le marché » – censé être lucide, impartial et ne pas prêter attention aux inquiétudes infondées concernant la sécurité exprimées par les mères et les militants – ne répond-il pas positivement à l'impulsion technophile ? L'auteur pense que la situation est due en partie au fait que l'accident de 1979 à la centrale nucléaire de Three Mile Island (TMI) en Pennsylvanie a été mal interprété au profit de l'industrie.

L'opinion dominante est que TMI a tué l'industrie nucléaire américaine, mais ce n'est pas le cas. La montée en flèche des coûts a stoppé le développement de l'énergie nucléaire américaine au moment même où de nouvelles réserves de pétrole en provenance de l'Alaska et de la mer du Nord ont résolu les crises pétrolières des années 1970. TMI n'a fait que couvrir l'industrie de son échec économique. Un article de février 1985 du magazine Forbes – un indicateur aussi fiable que possible de ce que le marché peut croire – explique ce point de vue :

---

<sup>2</sup>L'auteur soutient qu'il existe une culture « nukebro » analogue à celle des « techbros » de la Silicon Valley – il s'agit souvent des mêmes individus ! – bien que ces dernières années, l'industrie ait fait un effort judicieux pour promouvoir les voix des femmes influentes sur les médias sociaux, des ingénieures et des cadres.

L'échec du programme nucléaire américain est considéré comme le plus grand désastre de l'histoire des affaires, un désastre d'une ampleur monumentale. Le secteur des services publics a déjà investi 125 milliards de dollars dans l'énergie nucléaire... seuls les aveugles, ou les personnes partiales, peuvent aujourd'hui penser que la majeure partie de cet argent a été bien dépensée. (Cook, 1985).

Alors que 67 projets de centrales nucléaires ont été annulés entre 1979 et 1988, de nombreuses centrales nucléaires dont le processus d'autorisation avait débuté dans les années 1970 ont continué à fonctionner jusqu'au début des années 1990. Si la NRC a renforcé la réglementation et la surveillance à la suite de l'accident de TMI, elle a continué à soutenir la mise en service de capacités supplémentaires. Les annulations ont donc été principalement motivées par des facteurs économiques défavorables. La distinction est importante et pertinente, même aujourd'hui, car les conditions qui ont fait de l'énergie nucléaire un désastre en termes de gestion dans les années 1970 n'ont pas disparu. La technologie reste dangereuse et donc coûteuse. L'accident de TMI a masqué une leçon sur l'économie de l'énergie nucléaire que, grâce à la renaissance du nucléaire, il a fallu réapprendre à grands frais en Caroline du Sud et en Géorgie.

## Coût et durée de construction

Il est souhaitable de comparer d'abord les technologies concurrentes sur la base du coût et de la durée de construction. La comparaison nécessite d'examiner des installations de taille similaire, ce qui complique la tâche car leur grande puissance de production constitue en quelque sorte un aspect positif des centrales nucléaires.

La plus grande centrale photovoltaïque des États-Unis en 2023 est l'installation Solar Star (anciennement Antelope Valley), qui occupe 3200 acres en bordure du désert de Mojave près de Rosamond, en Californie. Sa production d'énergie est de 579 MW, avec un facteur de capacité de 32,8 %. Sa construction, qui a commencé au premier trimestre 2013, a nécessité moins de 2,5 ans. Le coût de construction de l'installation photovoltaïque Solar Star n'est pas parfaitement transparent, en raison des changements de propriété et du mode de financement, mais une estimation de 2,7 milliards de dollars est raisonnable.

Le plus grand parc éolien terrestre est l'Alta Wind Energy Center (AWEC), situé au pied des montagnes Tehachapi en Californie, non loin de l'installation photovoltaïque Solar Star. L'installation AWEC comprend 600 turbines d'une capacité combinée de 1 548 MW. L'AWEC fonctionne avec un facteur de capacité de 23,5 %. Sa construction a été réalisée en 11 étapes, de 2010 à 2014.

Les différentes étapes, d'une capacité d'environ 100 MW chacune, ont nécessité moins d'un an de construction. Le coût total de la construction s'est élevé à environ 2,9 millions de dollars. milliard.

En 2023, il n'existe aux États-Unis que deux parcs éoliens offshore en exploitation, tous deux de petite taille (12 MW et 30 MW).

Les États-Unis sont à la traîne par rapport au reste du monde en matière d'énergie éolienne offshore depuis de nombreuses années. Il ne faut donc pas faire de comparaison nationale entre l'éolien offshore et les autres technologies. Néanmoins, cette technologie ne doit pas être exclue de la réflexion. Prenons donc l'exemple de l'éolien offshore de Hornsea.

Hornsea 1, la plus grande centrale nucléaire du monde, est située à 115 kilomètres au large des côtes du Royaume-Uni, dans la mer du Nord. Deux des quatre étapes proposées ont été construites et sont opérationnelles. Hornsea 1, d'une capacité de 1 200 MW, a été construite entre 2016 et 2020 pour un coût d'environ 5 milliards de dollars. Son facteur de capacité s'élève à environ 47 %.

La comparaison entre la production d'énergie nucléaire, solaire photovoltaïque et éolienne terrestre et offshore est résumée dans le tableau 8.1, qui, à un niveau élevé, fournit une comparaison assez directe entre les technologies concurrentes à une échelle similaire (mais pas identique) telle qu'elles ont été développées dans le monde réel. La production annuelle en MWavg est donnée par la capacité nominale multipliée par le facteur de capacité, qui tient compte de considérations telles que l'intermittence des ressources renouvelables, la réduction et les temps d'arrêt pour réparation et maintenance. Le facteur de capacité de la centrale Vogtle est supposé être de 90 %, ce qui correspond presque à celui de l'industrie nucléaire américaine dans son ensemble. (Il faut noter qu'il faudra peut-être de nombreuses années d'expérience opérationnelle pour atteindre ce niveau de fiabilité.)

Les coûts normalisés du tableau 8.1 représentent le coût total de construction divisé par l'énergie produite. Selon cette simple comparaison, on peut conclure que la centrale Vogtle est un peu plus chère que la technologie photovoltaïque à grande échelle il y a 8 ans, deux fois plus chère que l'éolien terrestre il y a une dizaine d'années et environ 75 % plus chère que l'éolien offshore installé en mer du Nord il y a quelques années.

Tableau 8.1 Comparaison des coûts de construction normalisés (dernière colonne) entre les technologies nucléaires et renouvelables

|                                | Technologie terminée       |      | Coût<br>(milliards \$) | Capacité<br>(MW) | Moy. Gén.<br>(MWmoyenne) | Norme.<br>Coût<br>(\$mm/<br>(MWmoyenne) |
|--------------------------------|----------------------------|------|------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| Plante Vogtle<br>Unités 3 et 4 | Génération IV<br>Nucléaire | 2023 | 35                     | 2500             | 2234                     | 15.7                                    |
| Étoile solaire                 | Solaire PV 2015            |      | 2.7                    | 579              | 190                      | 14.2                                    |
| AWEC                           | À terre<br>Vent            | 2014 | 2.9                    | 1548             | 364                      | 8                                       |
| Hornsea 1                      | Offshore<br>Vent           | 2020 | 5                      | 1200             | 564                      | 9                                       |

La distinction entre la capacité (en MW) et la production moyenne (en MWavg) est le facteur de capacité

La comparaison est incomplète car elle ne tient pas compte des coûts actuels et futurs qui incluent le combustible, l'exploitation et la maintenance (O&M), le démantèlement et le stockage sûr du combustible nucléaire usé. Cependant, comme les énergies renouvelables n'ont pas de coût de combustible (et ne laissent pas de déchets mortellement dangereux derrière elles), cette omission privilégie encore davantage les énergies renouvelables par rapport au nucléaire, ce qui ne fait que renforcer la conclusion de base. En bref, sur la base de ce qui a été démontré dans le monde réel, il apparaît que le nucléaire est plus coûteux que les technologies d'énergie renouvelable et qu'il met jusqu'à dix ans à être mis en service.

## Coût actualisé de l'énergie

Parce qu'il ne repose pas uniquement sur les frais d'installation, le paramètre connu sous le nom de coût actualisé de l'énergie (LCOE) fournit une évaluation plus complète et plus utile des technologies concurrentes. Le LCOE répond à une question fondamentale. Étant donné que le consommateur d'énergie électrique se préoccupe principalement du coût par kWh figurant sur une facture mensuelle de la compagnie d'électricité, le LCOE est défini comme le coût de fonctionnement d'une centrale électrique sur toute la durée de vie divisé par l'énergie qu'elle produit. Le calcul du LCOE donne une dépense par MWh d'énergie consommée.

Une analyse réalisée en 2022 par des chercheurs du Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) a révélé un LCOE pour le photovoltaïque à grande échelle de 33 \$ par MWh, soit presque le même que les 34 \$ par MWh pour l'énergie éolienne terrestre trouvés par les chercheurs du NREL en 2021. Le même rapport a trouvé des valeurs LCOE de 78 \$ et 133 \$ par MWh pour l'éolien offshore à fond fixe et flottant, respectivement. Parallèlement, un rapport de 2018 de l'Energy Information Administration (EIA) a estimé que le LCOE des nouvelles centrales nucléaires mises en service en 2021 s'élèverait à 90 dollars par MWh. Les informations sont résumées dans le tableau 8.2.

Les valeurs LCOE résumées dans le tableau 8.2 sont pour la plupart cohérentes avec les coûts normalisés de construction donnés dans le tableau 8.1, à l'exception peut-être de

Tableau 8.2 Comparaison du coût actualisé de l'énergie (LCOE) entre la nouvelle énergie nucléaire et les technologies renouvelables

| Ressource                    | LCOE (\$/MW-h) | Source                       |
|------------------------------|----------------|------------------------------|
| Nouvelle énergie nucléaire   | 88             | EIE (USEIA, 2022)            |
| Gaz naturel                  | 40             | Ibid                         |
| PV à grande échelle          | 33             | LBNL (Bolinger et al., 2022) |
| Éolien terrestre             | 34             | NREL (Stehly et Duffy, 2012) |
| Éolien offshore, à fond fixe | 78             | ibid                         |
| Éolien offshore, flottant    | 133            | ibid                         |

LCOE de l'éolien offshore. La construction est, bien entendu, une composante importante du coût global du cycle de vie. L'écart entre les coûts de construction et les coûts de maintenance est important.

Le LCOE de l'éolien terrestre et offshore est très probablement imputable aux coûts d'exploitation et de maintenance plus élevés des installations offshore.

Les acronymes peuvent être obscurs pour le lecteur, mais il convient de souligner que les organisations représentées dans le tableau 8.2 (EIA, LBNL et NREL) sont toutes des composantes du ministère américain de l'Énergie.<sup>3</sup> Par conséquent, le point le plus important à retenir des informations présentées dans le tableau 8.2 devrait être que le principal défenseur de la renaissance nucléaire (DOE) lui-même reconnaît que l'énergie produite par la nouvelle énergie nucléaire serait près de trois fois plus chère que l'énergie produite par des alternatives renouvelables.

## Le coût d'opportunité immédiat de Plant Vogtle

Selon les statistiques compilées par Bloomberg, les dépenses nationales totales consacrées aux technologies des énergies renouvelables (principalement l'éolien terrestre et le photovoltaïque, mais aussi les dépenses consacrées aux véhicules électriques et aux batteries) sont passées de 10 milliards de dollars en 2004 à 47 milliards de dollars en 2007, sont restées raisonnablement stables dans la fourchette de 45 à 65 milliards de dollars de 2010 à 2019, et ont encore augmenté en 2020. En 2021, les dépenses nationales consacrées aux technologies des énergies renouvelables ont dépassé les 100 milliards de dollars par an. Le coût de la centrale Vogtle peut être évalué de manière approximative, mais juste, dans le contexte de ces informations. Bien qu'étalée sur 14 ans, la construction de la centrale nucléaire en Géorgie a consommé 6 à 9 mois d'investissement national total dans le secteur des énergies renouvelables.

Cette allocation de ressources, soutenue par des garanties de prêts substantielles du gouvernement américain, n'a eu pour effet que de retarder la mise en service. L'unité 3 de la centrale Vogtle n'a pas fourni un seul kWh d'énergie au réseau avant 2023.

Et si l'argent dépensé pour construire les unités 3 et 4 de la centrale Vogtle avait été investi dans des installations d'énergie renouvelable ? Il s'agit d'un moyen raisonnable d'évaluer le coût d'opportunité associé à la centrale Vogtle.

Le coût annualisé de construction des deux réacteurs AP 1000 sur le site se situe dans la fourchette de 2,5 milliards de dollars, un montant à peu près égal au coût total des installations individuelles d'énergie photovoltaïque et éolienne répertoriées dans le tableau 8.1.

Si l'argent dépensé pour construire l'usine Vogtle avait été plutôt affecté à la construction d'installations photovoltaïques et éoliennes similaires à partir de 2014 ou 2015, il aurait été possible de déployer six installations achevées d'ici 2023.

---

<sup>3</sup>On pourrait faire une distinction en affirmant que les deux derniers sont des entités indépendantes gérées pour le compte du DOE.

Des installations telles que Solar Star ou AWECC. Dans le premier cas, la production moyenne déployée aurait été de 1 140 MW en moyenne pour un coût de 16 milliards de dollars ; dans le second, de 2 184 MW en moyenne pour un coût de 17 milliards de dollars.<sup>4</sup> Les installations d'énergie renouvelable, contrairement à la centrale Vogtle, auraient commencé à injecter de l'électricité sur le réseau électrique dès 2015, et davantage seraient mises en service chaque année suivante. Les unités 3 et 4 de la centrale Vogtle ont coûté ensemble 35 milliards de dollars, n'ont pas injecté d'énergie sur le réseau avant 2023 (date à laquelle l'unité 4 n'était toujours pas en service) et fourniront (de manière optimiste) une production moyenne de 2 234 MW<sup>avg</sup>.

Compte tenu de la rapidité de leur déploiement et de leurs coûts (à la fois les coûts d'installation et le LCOE), il est clair que les installations photovoltaïques et éoliennes terrestres sont aujourd'hui nettement plus performantes que les nouvelles installations nucléaires aux niveaux de pénétration actuels. Il est toutefois très difficile de faire des prévisions, en particulier concernant l'avenir. Pour prendre un exemple, la comparaison entre les énergies renouvelables et les nouvelles centrales nucléaires n'est pas nécessairement stationnaire à mesure que des ressources supplémentaires sont mises en service. Les meilleurs sites de production d'énergie renouvelable ont naturellement été construits en premier, de sorte que les facteurs de capacité des nouvelles installations diminueront (et le LCOE augmentera) à mesure que la pénétration augmentera. Quelle sera la situation une fois que le réseau aura été construit à 50 % alimenté par l'énergie éolienne et solaire ? La question nécessite une analyse approfondie qui dépasse le cadre de cette discussion.

## La situation actuelle

Une installation dont la construction coûte des milliards de dollars ne peut pas être simplement copiée. Parmi d'autres considérations, l'emplacement est une question importante pour le déploiement. Bien qu'il soit impossible de les copier, des installations comme AWECC et Solar Star sont en cours de construction, et à un rythme étonnant. La figure 8.2 illustre les ajouts de capacité pour les installations d'énergie éolienne et solaire aux États-Unis sur une base annuelle de 2010 à 2021.

Les installations d'énergie éolienne ont contribué à une nouvelle capacité nominale de l'ordre de 7 à 9 GW chaque année de 2015 à 2019, tandis que la capacité nominale de l'énergie solaire a augmenté de plus de 10 GW chaque année de 2016 à 2020. La nouvelle capacité éolienne en 2021 était de 13 GW, tandis qu'en 2021, la nouvelle capacité solaire photovoltaïque était de 23,6 GW. Si le facteur de capacité moyen de ces installations photovoltaïques est de 20 %, alors en une seule année récente, l'énergie solaire a ajouté au réseau une production d'énergie électrique environ équivalente à cinq réacteurs nucléaires AP1000.

---

<sup>4</sup>Les estimations sont pessimistes car, à partir des informations du tableau 8.1, les coûts sont estimés pour 2014-2015. Pour l'énergie solaire photovoltaïque en particulier, les coûts ont diminué de manière constante et substantielle.

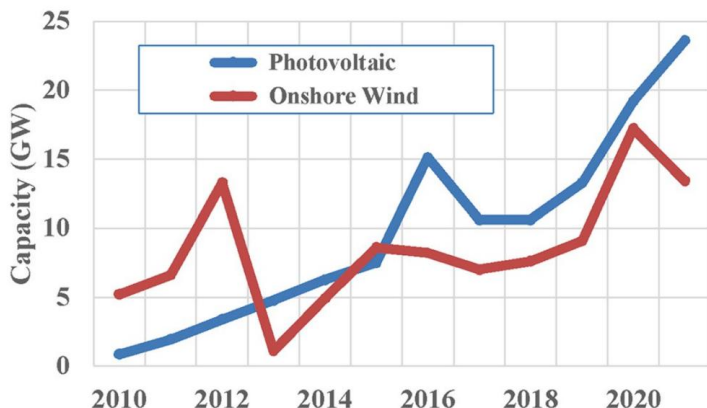


Fig. 8.2 Augmentation historique de la capacité de production par les sources renouvelables. Les données proviennent de Bloomberg. (Nathalie, 2023)

En 2023, l'EIA s'attend à ce que le réseau ajoute une capacité égale à 29,1 GW d'énergie solaire photovoltaïque à grande échelle, 9,4 GW de stockage sur batterie, 7,5 GW de gaz naturel, 6 GW d'énergie éolienne (dont 130 MW d'énergie éolienne offshore) et 2,2 GW d'énergie nucléaire (à mesure que les réacteurs de Plant Vogtle seront mis en service).

Dans l'ensemble, le solaire photovoltaïque à grande échelle représente plus de la moitié (54 %) de la capacité additionnelle prévue. En bref, la situation actuelle des énergies renouvelables fait écho à la situation favorable qui existait pour l'énergie nucléaire en 1967, lorsque la technologie nucléaire représentait 49 % des nouvelles capacités ajoutées.

Aujourd'hui, cependant, il est peu probable que des capacités supplémentaires issues de l'énergie nucléaire soient construites après l'achèvement des unités 3 et 4 de la centrale Vogtle. Le marché a envoyé un signal très clair : les technologies renouvelables sont un investissement intéressant et prometteur, tandis que l'énergie nucléaire est défavorisée.

## L'avenir est offshore<sup>5</sup>

Alors qu'en 2023, il n'y avait que deux petits parcs éoliens offshore en activité sur le territoire américain, les États-Unis possèdent un potentiel énorme pour développer l'éolien offshore. La mise à jour la plus récente disponible auprès du NREL révèle une ressource offshore de 1 476 GW accessible à l'aide de turbines à fond fixe (possible uniquement dans des eaux relativement peu profondes) et de 2 773 GW à l'aide de turbines flottantes. À titre de comparaison, selon l'EIA, la capacité totale de production d'énergie éolienne offshore de 1 476 GW pourrait être atteinte à l'aide de turbines à fond fixe (possible uniquement dans des eaux relativement peu profondes) et de 2 773 GW à l'aide de turbines flottantes.

---

Il convient de révéler que l'auteur a été employé comme entrepreneur soutenant l'Offshore Wind Initiative dans le cadre du programme d'énergie éolienne au sein du DOE pendant environ un an, vers 2012.

La capacité de production d'énergie électrique aux États-Unis à la fin de 2022 était de 1 160 GW.<sup>6</sup> C'est-à-dire que la somme de toute l'énergie électrique consommée aux États-Unis est inférieure à la ressource estimée de éolien offshore.

Dans le monde (principalement au Royaume-Uni, en Chine et en Allemagne), la capacité installée de l'éolien offshore a dépassé les 35 GW en 2020. Aux États-Unis, il semble concevable qu'une transformation remarquable soit à l'horizon. En août 2022, il existait un pipeline de construction de projets éoliens offshore de 40 GW ; vingt-quatre accords d'achat d'électricité pour l'éolien offshore, totalisant 17,6 GW, étaient déjà en vigueur.

Le déploiement pourrait s'accélérer entre 2023 et 2030, en réponse à l'objectif de l'administration Biden d'installer 30 GW d'énergie éolienne offshore d'ici 2030.

Il reste bien sûr à démontrer si cet objectif sera atteint. Le succès croissant de l'industrie éolienne terrestre aux États-Unis, l'ampleur de la ressource et l'expérience acquise avec l'éolien offshore en Europe et en Chine, pris ensemble, suggèrent que les principaux obstacles sont uniquement politiques et sociaux.

La voie vers 80%, puis 100% d'énergie renouvelable passera donc par l'éolien offshore, ce qui est déjà évident en raison de l'ampleur des accords d'achat d'électricité existants pour les installations éoliennes qui n'ont pas encore été construites. Cependant, cette technologie n'a pas de solides antécédents nationaux et n'est pas manifestement supérieure à la nouvelle énergie nucléaire en termes de coût nivelé de l'énergie. Pourquoi serait-il judicieux de poursuivre une approche plutôt qu'une autre ? En effet, même si financièrement, il n'est pas judicieux de construire de nouvelles centrales nucléaires aujourd'hui, nous pourrions souhaiter que ce soit le cas lorsque la pénétration des énergies renouvelables aura atteint 50%.

Selon l'auteur, il est peu probable que ce soit le cas. Les centrales nucléaires sont chères parce que la technologie est intrinsèquement dangereuse, qu'elles sont peu nombreuses et que les composants nécessaires doivent être conçus avec un niveau de qualité étonnant. L'histoire montre que les économies de coûts annoncées ne se matérialisent pas. Les panneaux photovoltaïques, en revanche, ont obéi à la règle de la production de masse. Le coût d'un panneau solaire a été divisé par huit en une décennie : de 2,15 \$ par watt en 2010 à 0,27 \$ par watt en 2021.

Même si les installations d'énergie éolienne ne connaîtront pas les mêmes baisses de coûts spectaculaires que celles des composants photovoltaïques, les règles de la production de masse s'appliqueront également. Le LCOE de l'éolien offshore diminuera probablement, ce qui rendra de nouveaux

---

<sup>6</sup>Les installations photovoltaïques de petite taille ont contribué à hauteur de 39,4 GW supplémentaires en 2022. En supposant un facteur de capacité de 20 %, l'énergie produite par ce moyen équivaut à près de huit centrales nucléaires. En 2023, il y avait 93 centrales nucléaires en exploitation aux États-Unis

les installations nucléaires ne sont pas économiquement compétitives face à cette ressource vaste et inexploitée.

Le ministère américain de l'Énergie prévoit que d'ici 2035, le coût de revient de l'énergie nucléaire baissera à 53 dollars par MWh pour l'éolien offshore fixe et à 64 dollars par MWh pour l'éolien offshore flottant. Ces réductions seront dues aux gains d'efficacité qui résulteront de la multiplication par neuf du déploiement mondial de l'éolien offshore, sur une période de seulement une douzaine d'années. L'horizon prévu pour réaliser ces économies de coûts est plus court que la durée de construction de la centrale Vogtle après le début des travaux en 2009. En bref, les nouvelles centrales nucléaires sont la mauvaise réponse au changement climatique : trop lentes, trop coûteuses et une mauvaise allocation des ressources financières au détriment d'alternatives supérieures.

## Le coût d'opportunité à long terme

La discussion dans ce chapitre a débuté par une perspective historique, en commençant par la construction d'une installation d'énergie éolienne à grande échelle au sommet d'une montagne dans le Vermont au début des années 1940. L'énergie nucléaire, l'énergie éolienne et les technologies solaires photovoltaïques existaient déjà toutes sous une forme naissante dans les années 1940-1955, des décennies avant que « l'énergie renouvelable » ou la « durabilité » n'apparaissent dans le discours. Le développement de l'énergie nucléaire pour créer une technologie commerciale à partir de débuts modestes a bénéficié à la fois de l'inertie institutionnelle<sup>7</sup> due à l'effort massif de guerre pour produire la bombe atomique, ainsi que des préoccupations de sécurité nationale au début de la guerre froide. La recherche et le développement (R&D) des technologies renouvelables concurrentes, en revanche, n'ont pas reçu de soutien significatif avant la création du ministère de l'Énergie en 1978. Le paysage du financement dans les années 1948-2018 est résumé dans la figure 8.3.

Il ressort clairement de la figure 8.3 que le financement des énergies nucléaire et fossile a largement dépassé celui des énergies renouvelables (et de l'efficacité énergétique) sur une échelle de temps de plusieurs décennies. Ces dernières années, les données indiquent qu'il y a eu une parité approximative. Pour les exercices 2009 à 2018, le Congressional Research Service fait état de dépenses de 9,4 milliards de dollars pour les énergies renouvelables, de 8,2 milliards de dollars pour l'efficacité énergétique, de 10 milliards de dollars pour l'énergie fossile et de 13,7 milliards de dollars pour l'énergie nucléaire. Les dépenses fédérales en R&D pour l'énergie nucléaire sur un horizon de soixante-dix ans ont été de 110 milliards de dollars.

En 1980, l'affectation budgétaire fédérale au SERI s'élevait à 130 millions de dollars, ce qui est estimé à plus que les sommes combinées consacrées à la recherche et au développement sur les énergies renouvelables.

---

L'auteur aime souligner que le projet Manhattan n'est jamais mort, il est simplement devenu le ministère de l'Énergie.

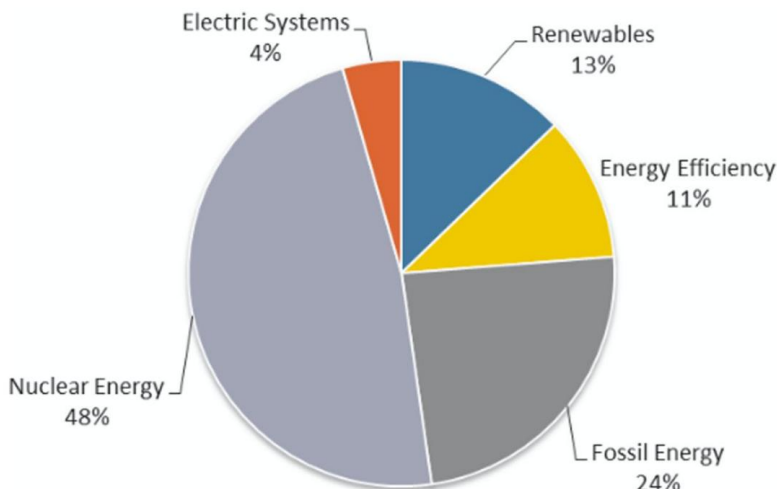


Fig. 8.3 Soutien du gouvernement fédéral à la recherche sur les technologies énergétiques de 1948 à 2018, en dollars de 2016. Les dépenses dans la catégorie des énergies renouvelables avant la création du ministère de l'Énergie en 1978 étaient plutôt faibles, moins de 2 milliards de dollars. Ces informations ont été compilées par le Congressional Research Service. (Clark, 2018)

Le développement de l'énergie solaire photovoltaïque était alors le plus important de tous les pays du monde. Le président Carter a cependant perdu les élections de 1980 et, en 1981, l'administration Reagan a réduit le financement de la nouvelle installation à seulement 30 millions de dollars. Près de la moitié du personnel a été licencié. Denis Hayes a démissionné de son poste de directeur du SERI en guise de protestation. Hayes a évoqué la situation dans une interview réalisée en 2012, à une époque où la capacité solaire photovoltaïque n'était augmentée qu'à un dixième du rythme actuel :

En tant que planète, nous évoluons aujourd'hui comme nous l'aurions fait si Carter avait été réélu. La tragédie est que les États-Unis ont laissé tomber le flambeau. La renommée a été entretenue par le Japon puis l'Allemagne avec leurs tarifs de rachat garantis. Une douzaine d'autres pays ont maintenant travaillé pour atteindre le volume dont nous avons besoin pour faire baisser les coûts. La technologie de base de ce que nous faisons aujourd'hui était à notre portée pendant les années Carter. (Masia, 2012)

Les 110 milliards de dollars de financement fédéral pour la recherche et le développement dans le domaine de l'énergie nucléaire, comme l'argent dépensé pour la construction de deux réacteurs AP1000 à la centrale Vogtle, doivent également être considérés comme une déclaration de coût d'opportunité. Sachant que le paysage concurrentiel entre le nouveau nucléaire et les énergies renouvelables favorise fortement les énergies renouvelables aujourd'hui, où serions-nous si les décennies de soutien prodigué à un « désastre managérial » avaient plutôt été consacrées au développement patient et à long terme de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire photovoltaïque ? La société ne peut évidemment pas revenir en arrière, mais des décisions plus sages peuvent (et doivent) être prises pour aller de l'avant. Le moyen le plus rapide de réduire la quantité de carbone rejetée dans l'atmosphère est de déployer l'énergie éolienne et l'énergie solaire ph

Il faut construire des installations de production d'électricité à grande échelle et dans les meilleurs délais.

L'énergie nucléaire est un obstacle à cet objectif urgent.

## Points récapitulatifs

1. Les nouvelles centrales nucléaires sont plus coûteuses que les alternatives renouvelables et leur construction et leur mise en service sont beaucoup plus lentes. Les technologies renouvelables (éoliennes terrestres et offshore, et photovoltaïque solaire) sont le meilleur moyen de réduire le plus rapidement possible la quantité de carbone rejetée dans l'atmosphère.
2. L'énergie nucléaire n'a jamais été rentable dans un contexte national. Sur une base générationnelle, ses promoteurs ont su faire progresser le déploiement de cette technologie en réponse aux crises sociétales.
3. Le gouvernement fédéral soutient depuis des décennies la recherche et le développement de la technologie de l'énergie nucléaire à grande échelle. À l'heure actuelle, la recherche et le développement dans le domaine des énergies renouvelables restent inférieurs à ceux qui soutiennent la technologie de l'énergie nucléaire.

## Références

- Bolinger, M., Seel, J., & Warner, C., Robson, D. (2022). Énergie solaire à grande échelle, édition 2022 : tendances empiriques en matière de déploiement, de technologie, de coût, de performance, de tarification PPA et de valeur aux États-Unis. Laboratoire national Lawrence Berkeley. <https://emp.lbl.gov/publications/energie-solaire-a-grande-echelle-edition-2022>
- Clark, C. E. (2018). Historique du financement de la R&D sur les énergies renouvelables : comparaison avec le financement de la R&D sur l'énergie nucléaire, l'énergie fossile, l'efficacité énergétique et les systèmes électriques. Service de recherche du Congrès (CRS). <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/RS/RS22858>
- Cook, J. (1985). Folies nucléaires. *Forbes*, 135(3), 82.
- Hayes, D. L. (1983). Les avantages environnementaux d'un monde solaire. Dans D. Rich, J. M. Veigel, A. M. Barnett et J. Byrne (dir.), *La transition vers l'énergie solaire : mise en œuvre et implications politiques* (p. 186). Avalon Publishing.
- Masia, S. (2012). Hayes : Il est à notre portée de réaliser une transition rapide. American Solar Energy Society. <https://ases.org/hayes-its-within-our-grasp-to-transition-quickly/>
- Nathalie, L. (2023). Sustainable energy in America 2023 factbook. Suivi du marché et des politiques tendances. Bloomberg Finance LP
- Putnam, P. (1948). L'énergie éolienne. Van Nostrand Reinhold.
- Schwartz, J. (2020). Le message « profondément radical » du premier organisateur de la Journée de la Terre. *New York Société Times*.
- Stehly, T. et Duffy, P. (2012). Examen du coût de l'énergie éolienne 2021. Laboratoire national des énergies renouvelables. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84774.pdf>
- US EIA. (2022). Coûts actualisés des nouvelles ressources de production dans les perspectives énergétiques annuelles 2022. Administration américaine de l'information sur l'énergie. [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity\\_generation.pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf)
- Walker, S. J., et Wellock, T. R. (2010). Une brève histoire de la réglementation nucléaire (p. 27). Commission de réglementation nucléaire des États-Unis. <https://www.nrc.gov/docs/ML1029/ML102980443.pdf>

Accès libre Ce chapitre est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou format, à condition de créditer l'auteur(s) d'origine et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été apportées.

Les images ou autres éléments tiers de ce chapitre sont inclus dans la licence Creative Commons du chapitre, sauf indication contraire dans une ligne de crédit du contenu. Si le contenu n'est pas inclus dans la licence Creative Commons du chapitre et que votre utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation légale ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement du détenteur des droits d'auteur.



# Correction à : Changement climatique : Fonte Glacée et modèles statistiques



Correction du

chapitre 1 de D. Brugge, A. Datesman, Dirty

Secrets of Nuclear Power in an Era of Climate Change, [https://doi.org/](https://doi.org/10.1007/978-3-031-59595-0_1)

[10.1007/978-3-031-59595-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-59595-0_1)

La version originale du chapitre « Changement climatique : fonte des glaces et modèles statistiques » a été publiée par inadvertance avec une disposition incorrecte des panneaux d'images dans la figure 1.1. La correction a été mise à jour dans le chapitre.

---

La version mise à jour de ce chapitre est disponible à  
l'adresse [https://doi.org/10.1007/978-3-031-59595-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-59595-0_1)

© L'auteur(e) 2024 D.

Brugge, A. Datesman, Les secrets obscurs de l'énergie nucléaire à l'ère du changement  
climatique, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-59595-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-59595-0_9)

Accès libre Ce chapitre est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou format, à condition de créditer l'auteur(s) d'origine et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été apportées.

Les images ou autres éléments tiers de ce chapitre sont inclus dans la licence Creative Commons du chapitre, sauf indication contraire dans une ligne de crédit du contenu. Si le contenu n'est pas inclus dans la licence Creative Commons du chapitre et que votre utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation légale ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement du détenteur des droits d'auteur.



## Épilogue

Cette année, les feux de forêt canadiens ont brûlé une superficie plus grande que celle de 104 des 195 pays du monde. On estime que les émissions de dioxyde de carbone qu'ils ont produites jusqu'à présent s'élèvent à près de 1,5 milliard de tonnes, soit plus de deux fois la quantité de dioxyde de carbone rejetée par le Canada dans les secteurs du transport, de la production d'électricité, de l'industrie lourde, de la construction et de l'agriculture réunis. En fait, c'est plus que les émissions totales de plus de 100 pays du monde, tous réunis.

— David Wallace-Wells

<https://www.nytimes.com/2023/09/06/opinion/columnists/forest-fires-climate-change.html>

Au cours de l'année où nous écrivions ce livre, en 2023, des incendies de forêt ont éclaté partout au Canada à une échelle jamais vue auparavant. La fumée des incendies a parcouru des centaines de kilomètres.

Les précipitations ont atteint des milliers de kilomètres, occultant le soleil dans les villes du nord des États-Unis et menaçant la santé de millions de personnes vulnérables. C'est un rappel brutal que les boucles de rétroaction qui pourraient être déclenchées par le changement climatique n'ont pas été entièrement prédites. C'est aussi une nouvelle indication de la nécessité d'agir rapidement pour éviter les pires conséquences du changement climatique.

Il est essentiel que les lecteurs de ce livre qui sont préoccupés par le climat

Les scientifiques comprennent que nous partageons leurs inquiétudes. Il se pourrait même que nous ayons une plus grande préoccupation que la science dominante sur cette question. Ainsi, lorsque nous critiquons l'énergie nucléaire et en arrivons à la conclusion qu'elle n'est pas une réponse viable ou responsable au problème du changement climatique, nous le faisons en toute connaissance de cause de la gravité de la situation.

Nous sommes favorables à une évaluation nuancée, complexe et fondée sur des données probantes des problèmes et des solutions. C'est dans cet esprit que nous avons écrit ce livre, en essayant de ne pas mettre le doigt sur la balance pour faire pencher la balance en faveur d'un résultat préconçu et souhaité, mais plutôt de l'évaluer de manière équitable. Par exemple, nous ne sommes pas favorables à une élimination rapide du nucléaire, surtout s'il est remplacé par des combustibles fossiles. Cela dit, nous sommes, comme tout le monde, des êtres humains et avons nos préjugés basés sur l'expérience et sur ce que nous avons appris et ce à quoi nous avons été exposés. Néanmoins, du mieux que nous le pouvons, nous avons cherché à être équitables envers l'énergie nucléaire par rapport aux dangers du changement climatique.

Il est donc remarquable de constater que le clou proverbial dans le cercueil d'une renaissance du nucléaire, du moins dans les pays à revenu élevé, ne réside pas dans la science et le risque en soi, mais plutôt dans le verdict du marché. Nous sommes à la fois des scientifiques et des sceptiques quant à l'idée que les marchés dictent sans entraves les décisions, mais nous sommes là, à reconnaître qu'en fin de compte, les impératifs économiques capitalistes rendent le nucléaire non viable.

Bien que ce ne soit pas le sujet de cet ouvrage, il convient de noter que l'énergie solaire et l'énergie éolienne présentent également des inconvénients, notamment les impacts locaux dévastateurs de l'exploitation des terres rares. Mais nous ne sommes pas des puristes. Bien que nous estimions que ces impacts doivent être réduits et que les populations affectées doivent être indemnisées pour tout préjudice, contrairement au nucléaire, nous pensons que les avantages nets et le potentiel de l'énergie éolienne et solaire sont positifs. Il est rare dans ce monde qu'il n'y ait pas de compromis.

En conclusion, nous implorons le lecteur de penser par lui-même, de se joindre aux efforts visant à éviter les impacts du changement climatique et d'être prêt, le cas échéant, à soutenir les ressources nécessaires pour atténuer les dommages accessoires de ce que nous devons faire pour éviter des dommages plus importants.

# Indice

## UN

Accidents, 34, 43, 45–52, 54–56, 59–66, 68, 69, 83, 92, 93

## B

Rayonnement de fond, 46, 61, 67, 80–82, 84

## C

Siècles, 2, 23, 26, 77, 88

Tchernobyl, 43, 46–52, 54–56, 65

Changement climatique, 1–8, 11, 32, 100

Modèles de changement climatique, 6

Cytogénétique, 65, 67–69

## E

Énergie, 8, 21, 24, 44, 48, 49, 64, 75, 78, 83, 87, 88, 90, 91, 93–97, 99–102

Contamination de l'environnement, 17

Épidémiologie, 12, 61, 63, 64, 67

## F

Fukushima, 7, 24, 46–56

## G

Glaciers, 2–4, 8

## H

Déchets hautement radioactifs, 24

## L

Coût actualisé de l'énergie (LCOE), 95–97, 99, 100

Linéaire sans seuil (modèle LNT), 75–78, 80, 82, 84

Faibles doses, 60, 63, 75–77, 79–81

Cancer du poumon, 12–14, 62–64

## M

Fonte des glaces, 1–8

Millénaires, 4

## N

Gaz nobles, 48, 60, 82, 83

Nucléaire, 11, 12, 21–28, 31–39, 43, 46–48, 51, 54, 60, 64, 78, 87, 89–102

Accidents nucléaires, 7, 43–56, 64

Énergie nucléaire, 1, 2, 8, 11, 15, 18, 21, 23, 24, 28, 32–37, 39, 43, 45–48, 53–56, 59–61, 68, 69, 82, 83, 87–93, 95, 96, 99–102

Armes nucléaires, 23, 31–39, 47, 64

## P

Plutonium, 23, 24, 27, 32, 34–39, 65

Prolifération, 32, 33, 36, 38

## R

Radiations, 7, 13, 14, 16, 18, 21, 25–27, 34, 35, 46, 47, 49, 51, 55, 60, 61, 63–69, 71, 74–84

Radioactivité, 23, 43, 47, 48, 50

Radon, 12–14, 16, 80, 82

## S

Bruit de grenaille, 48, 53, 77–81, 83, 84

Solaire, 7, 87, 88, 90, 93, 94, 97–102

## T

Île des Trois-Milles, 44–47, 54–56, 59–63, 66, 68,  
69, 83, 92

## Tu

Extraction d'uranium, 11, 13–15, 17, 18

## L

Vent, 6, 52, 60, 61, 72, 83, 87, 88, 90, 92–102