



HAL
open science

Material ignorance.

Maël Goumri

► **To cite this version:**

Maël Goumri. Material ignorance.: A journey down into the complexity and uncertainties of severe nuclear accident prevention.. Revue d'Anthropologie des Connaissances, 2021, 15 (4), 10.4000/rac.25214 . hal-04384524

HAL Id: hal-04384524

<https://hal.science/hal-04384524>

Submitted on 10 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'ignorance matérielle

Descente dans la complexité et les incertitudes de la prévention des accidents nucléaires graves

Material ignorance. A journey down into the complexity and uncertainties of severe nuclear accident prevention

La ignorancia material. Descendiendo a la complejidad e incertidumbre de la prevención de accidentes nucleares graves

Maël Goumri



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rac/25214>

ISSN : 1760-5393

Éditeur

Société d'Anthropologie des Connaissances

Ce document vous est offert par Université Paris Cité



Référence électronique

Maël Goumri, « L'ignorance matérielle », *Revue d'anthropologie des connaissances* [En ligne], 15-4 | 2021, mis en ligne le 01 décembre 2021, consulté le 09 janvier 2024. URL : <http://journals.openedition.org/rac/25214> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rac.25214>

Ce document a été généré automatiquement le 16 février 2023.



Le texte seul est utilisable sous licence CC BY-NC-ND 4.0. Les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

L'ignorance matérielle

Descente dans la complexité et les incertitudes de la prévention des accidents nucléaires graves

Material ignorance. A journey down into the complexity and uncertainties of severe nuclear accident prevention

La ignorancia material. Descendiendo a la complejidad e incertidumbre de la prevención de accidentes nucleares graves

Maël Goumri

- 1 Fukushima, vendredi 21 juillet 2017. L'attention de la communauté experte du nucléaire du monde entier se porte sur un « animal » d'un genre nouveau appelé *Little Sunfish*, un petit robot télécommandé de 30 cm fait la fierté de la société Toshiba qui l'a construit. Ce véritable bijou de technologie doit répondre à une question simple mais qui s'est finalement révélée très compliquée : où est passé le combustible nucléaire de la centrale accidentée ? Le 11 mars 2011, un séisme puis un tsunami d'une ampleur sans précédent affectent la côte est du Japon sur laquelle est implantée la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. La vague qui a déferlé a noyé l'ensemble des pompes destinées à refroidir le cœur et le combustible qu'il contient. En raison de la puissance, certes faible mais suffisante pour continuer à produire une grande quantité de chaleur, le combustible s'est mis inexorablement à chauffer dans les jours qui ont suivi l'accident pour atteindre plus de 1800°C, le point de fusion des matériaux qui le compose. Ce scénario constitue, au sens des experts de la sûreté nucléaire, un accident grave (Jacquemain & IRSN, 2013), c'est-à-dire une fusion totale ou partielle du combustible. Ses conséquences peuvent être dramatiques car le combustible en fusion forme une sorte de magma radioactif, appelé « corium », susceptible non seulement de produire des explosions mais également de polluer très durablement l'environnement. En raison de sa dangerosité, le corium est aussi un risque que l'industrie nucléaire a tenté de maîtriser dès le début de son développement grâce à la constitution d'un corpus de savoirs spécifiques et de pratiques visant à rendre ce scénario accidentel d'abord hypothétique, puis techniquement gérable (Goumri, 2021a). Malgré les nombreuses investigations menées depuis l'accident de Fukushima, notamment à travers des

modélisations informatiques, les experts n'arrivent toujours pas à savoir précisément à quelle profondeur le corium s'est enfoncé dans le socle en béton de la centrale. La réponse est pourtant importante car elle permettrait de savoir si l'épaisseur des socles des différentes centrales nucléaires dans le monde est suffisante ou non pour éviter une catastrophe en cas d'accident. Il s'agit là d'une question d'expertise non résolue qui taraude les experts de la sûreté nucléaire depuis plus de 50 ans.

- 2 Ce décalage entre un investissement sans précédent de la question de l'accident grave en général (et du corium en particulier) et l'ignorance à laquelle doivent faire face les experts à Fukushima interpelle. Comment une matière créée par une technologie humaine peut-elle rester aussi mystérieuse malgré plus de 60 ans d'accumulation de savoirs produits sur la question ? Rares sont pourtant les domaines industriels à avoir fait l'objet d'autant de recherche et d'investissement à l'échelle internationale. Rares sont aussi les secteurs à disposer d'autant d'institutions d'expertise et de contrôle revendiquant un dialogue constant entre recherche scientifique et expertise pour fonder les décisions. Force est de constater que cette ignorance ne trouve pas seulement son origine dans les institutions qui prennent en charge l'accident nucléaire grave (Frickel & Vincent, 2007). La science mobilisée pour réguler l'industrie nucléaire n'est ni une « science non faite » qui occulterait volontairement ou non certaines questions défavorables aux intérêts des industriels (Hess, 2016) ni une « science impuissante » qui n'arriverait pas à imposer au système de régulation la prise en compte d'un risque scientifiquement avéré (Boudia & Jas, 2014). Les organismes et les industriels du nucléaire ont financé de nombreux programmes de recherche depuis les années 1970 pour tenter de percer le mystère du corium et ces savoirs sont directement mobilisés dans les pratiques d'expertise pour évaluer la sûreté des centrales avec l'état des savoirs le plus complet possible. À l'évidence, une autre forme d'ignorance est à l'œuvre. C'est ce que je cherche à décrire et analyser dans cet article en m'intéressant à la matérialité de l'ignorance.
- 3 L'analyse de la matérialité de l'ignorance passe par une meilleure prise en compte de la question de l'incertitude dans les situations étudiées. En effet, l'incertitude est souvent invoquée par les ingénieurs et les experts pour qualifier les zones d'ombres, celles pour lesquelles peu de savoirs sont disponibles ou alors insuffisants pour garantir une maîtrise certaine, rendant ainsi les risques imprévisibles. L'incertitude dans les situations de risque et de sécurité a fait l'objet d'une vaste littérature explorant différents aspects (Funtowicz & Ravetz, 1993 ; Anses, 2016). Ces travaux se sont particulièrement intéressés aux modalités de gestion politique et sociale de l'incertitude allant jusqu'à proposer des méthodes formelles pour le faire (Petersen *et al.*, 2013). Parmi ces travaux, la contribution de Yannick Barthe, Michel Callon et Pierre Lascoumes avec leur livre intitulé *Agir dans un monde incertain* paru en 2001, a été particulièrement influente dans la manière de cadrer et d'investir la question. Ce livre propose une réflexion particulièrement fournie sur la question du traitement de l'incertitude, parue au grand jour à travers plusieurs controverses (déchets nucléaires, OGM, ondes électromagnétiques, etc.). Ces auteurs estiment que tout développement de technologies est porteur de nouvelles incertitudes en raison de la méconnaissance des effets sur le long terme que seule une expérience sur une plus longue durée pourrait trancher. En d'autres termes, les incertitudes constitueraient un état d'ignorance momentané pouvant être comblée, soit par des savoirs nouveaux, soit par l'étude des effets sur la durée de la technologie concernée et ainsi la faire entrer dans un schéma

de risque calculable plus classique. Le présent article adopte une perspective différente dans l'approche de l'incertitude, plus proche de celle développée par Kristin Shrader-Frechette. Cette dernière, en collaboration avec plusieurs auteurs, a mené une vaste réflexion sur les questions de risque et incertitude. Dans leurs travaux sur le projet de stockage de déchet nucléaire dans la Yucca Montain aux Etats-Unis, ces auteurs montrent que les incertitudes sont inhérentes à la spécificité des déchets nucléaires et notamment en raison de leur temporalité ou de la complexité de l'environnement dans lequel ils sont amenés à évoluer (Lemons, Shrader-Frechette & Cranor, 1997, p. 216). Pour ces auteurs, ces incertitudes supposent de mobiliser un ensemble d'outils de gestion de ces problèmes complexes qui incorporent un grand nombre de « valeurs », c'est-à-dire de choix reposant sur le jugement subjectif de l'expert en l'absence de connaissances permettant de définitivement trancher la question. Ces outils reconstituent la connaissance qui semble la plus vraisemblable mais en comblant les lacunes du savoir par des jugements de valeurs ou des jugements d'experts, notamment à travers le savoir prédictif.

- 4 En croisant ces travaux avec ceux consacrés aux études de l'ignorance, présentés en introduction de ce numéro, je propose de nommer ignorance matérielle une ignorance qui s'accumule malgré le développement important de travaux scientifiques et leur prise en compte dans la production de régulations. Je souhaite montrer d'une part, que cette ignorance prend racine dans la spécificité des objet techniques (comme leur complexité ou leur caractère insaisissable par exemple) et, d'autre part, qu'elle se propage en matérialisant dans les objets techniques les différentes incertitudes présentes au moment des choix de conception industrielle. En prenant l'exemple de l'industrie nucléaire, souvent vue comme l'archétype de la complexité (Perrow, 1984), je souhaite étudier comment l'ignorance matérielle est générée par l'essor d'une technologie complexe que les savoirs produits au fil du temps n'ont pas permis de totalement maîtriser. J'examinerai dans un premier temps comment la construction historique a été productrice d'ignorance en raison de l'exclusion de scénarios catastrophiques considérés comme non crédibles. Pour cela, je décrirai comment les premières réglementations américaines adoptées dans les années 1960 ont conduit à des choix de conception, matérialisés dans les plans des réacteurs, qui ont en outre circulé dans plusieurs pays nucléarisés à la faveur de transferts technologiques. Je montrerai également que l'augmentation régulière de la puissance des réacteurs, qui a été conduite malgré les alertes de plusieurs experts, a été de nature à complexifier la conception des centrales contribuant ainsi à l'incertitude matérielle. Dans un second temps, en m'appuyant sur le cas du corium, je montrerai en quoi cette matière insaisissable est difficile à étudier en raison de sa nature-même, qui est complexe et multiple. Complexe, parce que le corium entraîne une variété de phénomènes physico-chimiques intrinsèquement couplés et multiple car sa composition et son comportement dépendent de la séquence accidentelle, de la vitesse à laquelle il s'est constitué et des éléments qu'il a fait fondre avec lui, donnant ainsi l'impression qu'il y a autant de coriums qu'il y a d'accidents. En attirant l'attention sur l'ignorance matérielle, je souhaite montrer que les objets, les artefacts, dans leur matérialité, sont producteurs d'ignorance au même titre que les institutions, singulièrement en raison de leur complexité.
- 5 Pour ce faire, je m'appuie sur un travail de terrain mené pendant trois ans, entre 2015 et 2019, au sein de l'organisme public français chargé de l'expertise de la sûreté des installations nucléaires, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) sur

la trajectoire du risque « corium » et plus généralement à travers lui, de l'accident nucléaire grave. Pour ce faire, en plus d'une formation immersive dans la sûreté nucléaire française, j'ai analysé plus de 3000 documents d'archives, pour la plupart inédits, qui ont été autant produites par l'agence d'expertise que par les exploitants ou les autorités publiques (notamment les correspondances avec le ministère de l'Industrie). J'ai complété ce travail par une observation de trois workshops internationaux de spécialistes du corium en Europe ainsi qu'une vingtaine d'entretiens avec des spécialistes du domaine venant de l'IRSN et d'autres institutions nucléaires françaises et européennes.

La construction historique d'une complexité productrice d'ignorance

- 6 Apprivoiser la complexité des centrales nucléaires et des possibles scénarios accidentels est un enjeu fort pour les industriels et institutions nucléaire qui dès le début du développement du nucléaire civil ont souhaité éviter l'accident, pour notamment éviter de tacher cette industrie prometteuse du discrédit qu'engendrerait une catastrophe. Je propose de voir ici comment ce travail aux fortes implications matérielle s'est déroulé pour la technologie des réacteurs à eau pressurisée conçue aux États-Unis et importée en France à partir de 1969 (Hecht, 1998). Aux États-Unis, et après une première phase de conception des réacteurs sur les sites militaires isolés dans les vastes déserts américains, les principaux constructeurs nucléaires, les compagnies *General Electric* et *Westinghouse*, ont souhaité développer dès les années 1950 des réacteurs commerciaux permettant de produire de l'électricité pour le public. Ces deux compagnies ont ainsi présenté à l'*Atomic Energy Commission* (AEC), alors chargée d'expertiser la sûreté des centrales, plusieurs projets à proximité de villes moyennes pour les fournir en électricité. Certains projets sont mêmes prévus pour les métropoles à l'instar du projet de réacteur nucléaire à Ravenswood, en plein cœur du quartier du Queens à New York (Mazuzan, 1986). L'AEC les a refusés faute de garanties probantes. Elle appliquait en effet, quoi que de façon un peu moins stricte que dans les années 1950, les règles d'isolement des installations nucléaires, elle-même fixées pour les activités militaires. Les réacteurs devaient être le plus loin possible des populations pour éviter une catastrophe en cas d'accident. Elle admettait cependant bien volontiers que cette stratégie était incompatible avec le développement de l'industrie électronucléaire qui a besoin d'être à proximité de centres urbains qui constituent les principaux débouchés de sa production.¹ Face à ces restrictions, l'AEC et pour permettre la construction des centrales commerciales, l'AEC a développé une stratégie de localisation dite « adéquate » des réacteurs nucléaires, c'est-à-dire ni trop près des populations pour ne pas trop les exposer excessivement en cas d'accident, ni trop loin pour qu'elles soient économiquement viables. Ce compromis pouvait être trouvé grâce à une amélioration sensible de la maîtrise technique permettant de maintenir le risque à un niveau acceptable grâce notamment au principe de « confinement » des radionucléides.² Les industriels devaient, dès lors, démontrer que dans le cas d'un accident possible, les radioéléments ne seraient pas dispersés de façon massive dans l'environnement grâce à des dispositions techniques adaptées capables de contenir la pollution, même en situation accidentelle.

- 7 C'est pourquoi l'équipe en charge de la production du cadre de régulation au sein de l'AEC, dirigée par le physicien Clifford Beck, a activement travaillé à formaliser les critères permettant d'évaluer la sûreté des projets de centrales. En 1961, l'équipe de Beck publie ces règles qui prennent pour référence non pas le scénario accidentel le plus dramatique que l'on puisse imaginer (un accident maximum) mais un « accident maximum crédible » ou *Maximum Credible Accident (MCA)* qui puisse servir de base à l'expertise de la sûreté nucléaire. Ce principe a eu une implication majeure sur la conception des réacteurs tant il devait permettre de démontrer la quasi-impossibilité de survenue d'un accident grave. En effet, Beck proposait de diviser le réacteur nucléaire en différents « systèmes » ayant chacun une fonction déterminée et de s'assurer que chaque « système » puisse assurer sa fonction même si un ou deux composants venaient à défaillir. Les experts avaient en effet considéré qu'un scénario avec une ou deux défaillances simultanées était crédible, contrairement à un scénario impliquant plus de trois ou quatre défaillances simultanées. Dès lors, la notion de redondance a pris une grande importance dans la réglementation relative à l'accident et s'affirme comme une méthode efficace pour rendre l'accident très improbable et en tous cas « non crédible », à tel point qu'il n'était pas explicitement prévu de solution pour les accidents considérés comme non crédibles impliquant plus de trois ou quatre défaillances simultanées. Beck concédait cependant bien volontiers qu'il s'agissait d'un jugement d'expert qui est, par définition, subjectif. En l'absence d'une durée de fonctionnement significative, il était impossible de savoir statistiquement si cette considération était valable.³ C'est cependant cette base qui a servi à concevoir les réacteurs qui étaient prévus, avec des dispositifs de sûreté spécifiques, pour éviter ou contenir des accidents impliquant jusque deux ou trois défaillances simultanées, mais pas au-delà comme cela s'est produit à Three Mile Island en 1979 (Wellock, 2021). Ce choix du *Maximum Credible Accident* « matérialise » dans l'infrastructure qui est alors conçue par les industriels, un choix d'évaluation de la sûreté qui trace une frontière entre le crédible et le non-crédible en ne prévoyant pas, à titre d'exemple, de solution de secours en cas de fusion du cœur comme l'ont demandé plusieurs experts à l'époque (Okrent, 1981).
- 8 Finalement, le recours au concept de « *Maximum Credible Accident* » produit une certaine forme d'ignorance qui s'ancre dans la matérialité des centrales nucléaires. La conception ne vise pas tant à rendre l'ensemble des accidents impossible, ou à réduire les vulnérabilités du réacteur, qu'à montrer la capacité de maîtriser un corpus limité de scénarios considérés comme « crédibles » au détriment d'autres « non crédibles ». Il s'agit d'une forme de matérialisation d'un choix de conception : celui d'exclure les scénarios très hautement improbables pour lesquels aucune solution technique satisfaisante ou économiquement acceptable n'existe. Face à un petit nombre de scénarios très hautement improbables, jugés non crédibles et pour lesquels aucune solution n'est disponible, ignorer le problème en fixant une évaluation de la crédibilité s'avère être un outil puissant. Les systèmes techniques embarquent, en effet, bien souvent avec eux des visions du monde (Winner, 1980), et ici l'idée d'une part que les accidents de fusion du cœur étaient non crédibles, mais aussi que l'ingénieur était capable de concevoir une machine intrinsèquement sûre. Si cela peut être associé à une forme institutionnelle de production d'ignorance avec des pratiques routinières (Frickel & Vincent, 2007), ces ignorances ne se limitent pas aux seules connaissances non produites. Elles ont des implications matérielles irréversibles. C'est singulièrement le cas pour la cuve du réacteur qui ne peut pas être modifiée. À titre d'exemple, la cuve

ne peut pas être modifiée ou changée après avoir été installée et de manière plus générale une modification structurelle d'un réacteur, en plus d'être économiquement prohibitive, peut conduire à l'apparition de nouveaux risques du fait de sa complexification (Roger, 2020). Par ailleurs, cette irréversibilité se construit également dans l'invisibilisation des incertitudes (et doutes des experts) au moment de la circulation de ces différentes conceptions au sein du « monde nucléaire » dans la mesure où si les technologies circulent, c'est généralement clé en main au détriment des débats et épistémologies qui les précèdent (Bensaude-Vincent, Boudia & Sato, 2021 ; Goumri, 2021b).

- 9 Les implications de cette complexité se sont révélées aux yeux du grand public, en 1979, les États-Unis connaissent le premier accident nucléaire grave de l'industrie électronucléaire de la technologie à eau pressurisée (PWR)⁴ dans la centrale de Three Mile Island, à une dizaine de miles au sud de la ville de Harrisburg en Pennsylvanie. Le réacteur était pratiquement neuf (quatre mois d'exploitation) et la séquence accidentelle, a consisté en un enchaînement de défaillances relativement banales. Elle a débuté le mercredi 28 mars à quatre heures du matin par la défaillance de l'alimentation normale en eau des générateurs de vapeur, une anomalie relativement habituelle pour laquelle des dispositifs de sécurité sont prévus : les pompes de secours se sont mises en route comme prévu. Seulement, à la suite d'un essai réglementaire, un agent de maintenance avait oublié de refermer une vanne importante pour le bon fonctionnement du système de secours qui a dû être réouverte manuellement une dizaine de minutes plus tard. Ce délai a suffi à faire augmenter la pression du circuit primaire du réacteur nucléaire à un niveau suffisant pour déclencher automatiquement l'ouverture de la vanne, dite de décharge du pressuriseur qui fonctionne une soupape de sécurité pour éviter la dangereuse surpression du cœur. Cependant, une fois la pression retombée, la vanne de décharge est restée en position semi-ouverte créant ainsi une brèche dans le circuit primaire alimentant le cœur d'où s'est échappé une grande quantité d'eau nécessaire au bon refroidissement du combustible. Les opérateurs en salle de commande étaient pourtant certains que cette vanne était bien fermée comme le laissaient supposer les indications du pupitre qui montraient une augmentation de la pression dans le pressuriseur. Le doute et la confusion s'installaient quand, dans le même temps, d'autres appareils indiquaient à l'inverse une baisse de la pression dans le cœur. En plus de ces signaux contradictoires, une multiplication des alarmes, lumineuses et sonores déferlait sur les tableaux de la salle des commandes, ce que les spécialistes du facteur humain appelleront par la suite le « sapin de Noël ». Dans la confusion, les opérateurs décidèrent d'arrêter le système d'injection de sécurité qui permet, lorsque le niveau d'eau dans le cœur est trop faible, d'en ajouter pour éviter la fusion du cœur tant redoutée. Privé pendant plusieurs heures de cette source d'alimentation en eau permettant de le refroidir, le combustible s'est mis à fondre et ce n'est qu'au petit matin que, constatant une augmentation de la radioactivité dans le bâtiment du réacteur, les opérateurs décidèrent *in extremis* d'ajouter de l'eau dans le cœur évitant de justesse une catastrophe majeure.
- 10 Cet accident qui a affecté une technologie supposée très sûre et a constitué un tournant dans la politique industrielle américaine, en portant le coup fatal aux programmes nucléaires américains déjà en grande difficulté économique. Il a, à ce titre, fait l'objet de nombreux travaux de sciences sociales, autant sur les causes que les conséquences techniques, politiques et sociales de l'évènement (Perrow, 1981 ; Gray & Rosen 2003 ; Walker, 2004 ; Zaretsky, 2018). Parmi ces travaux, ceux du sociologue des organisations

Charles Perrow de l'université de Yale ont pointé la complexité du réacteur nucléaire. Perrow a été mobilisé. Ce dernier, mobilisé par la commission d'enquête sur l'accident de Three Mile Island pour apporter un éclairage de sciences sociales sur les causes de l'accident. En analysant les témoignages des opérateurs qui étaient en service à Three Mile Island au moment de l'accident, Perrow a été frappé par les conditions particulièrement compliquées dans lesquelles ils devaient prendre des décisions. À l'évidence, la multiplication d'alarmes contradictoires n'a pas permis aux opérateurs de prendre le recul nécessaire en pareilles circonstances. Mais surtout, pour Perrow, l'accident était le reflet des interactions nombreuses entre les différents composants du réacteur, à l'origine d'une complexité du système technique qu'il est cognitivement impossible d'appréhender humainement. Pour Perrow, les individus ne peuvent pas avoir une vue d'ensemble suffisamment précise pour faire le lien entre plusieurs défaillances en apparence totalement dissociées. Il indique également que beaucoup de ces interactions n'étaient pas non plus anticipées par les concepteurs mêmes des centrales. Dès lors, il était impossible pour les opérateurs de déduire le lien de cause à effet entre des défaillances de systèmes différents et réputés indépendants. Perrow voit en cet accident l'archétype de « l'accident normal » trouvant ses causes dans le caractère « complexe » de l'organisation qui le rendait aussi imprévisible qu'inévitable.

⁵ En raison de la forte complexité de l'artefact, mais également du couplage des éléments, la défaillance de l'un d'entre eux peut entraîner par voie de conséquence la défaillance de l'ensemble des systèmes à la manière de l'effet papillon. Pourtant, si les interactions entre différents composants avaient été étudiées par le passé avec différentes méthodes d'évaluation des risques, force est de constater que les conséquences potentiellement catastrophiques de cette complexité avaient été sous-estimées par des concepts visant à déterminer une limite entre le risque probable et le risque non crédible.

- 11 Cette complexité des réacteurs est le fruit d'une trajectoire historique antérieure à l'accident de Three Mile Island et qui s'est poursuivi depuis. Elle tient beaucoup au choix industriel d'augmenter continuellement la puissance des réacteurs. En effet, si les premiers réacteurs construits dans les années 1950 étaient pour la plupart de puissance relativement modeste pour permettre d'expérimenter une technologie nouvelle tout en limitant les risques (Okrent, 1981 ; Foasso, 2012), les politiques industrielles qui ont suivi ont conduit à une augmentation régulière de la puissance des réacteurs pour permettre une production de masse économiquement viable. Cette augmentation de la puissance a conduit à des débats d'experts parfois vifs tant elle complexifie l'exploitation. Dès 1974, le « père de la sûreté nucléaire » en France, Jean Bourgeois, alors directeur du Département de Sûreté Nucléaire du CEA s'inquiétait de l'augmentation de la puissance des réacteurs, et ce, malgré les défauts de conception qui s'accumulaient et devenaient visibles⁶. Il s'inquiétait en particulier de la sollicitation accrue des composants nucléaires dont les défauts devenaient compliqués à résoudre tant ils étaient poussés à leurs limites matérielles. En évoquant les problèmes de soudure, il montre comment ces problèmes pouvant sembler bénins pour un réacteur de petite taille peuvent devenir critiques à grande échelle.

Il faut constater la tendance inquiétante d'augmenter de plus en plus les puissances des « chaudières nucléaires » et corrélativement de demander la construction de cuves en acier toujours à la limite des possibilités des constructeurs. Or les problèmes de la tenue de ces récipients sont nombreux et difficiles à résoudre. [Il précise en particulier que certaines zones présentent des fragilités qui sont la cause de fissures difficilement détectables.] Les soudures à ces points délicats présentant

fréquemment des fissures, [notamment] à la sortie des canalisations de l'eau de refroidissement.⁷

- 12 Ce phénomène s'est d'ailleurs, paradoxalement, accentué après l'accident de Tchernobyl. Dans un contexte de crise et de perte de nombreux marchés, mais aussi de baisse importante du cours du pétrole,⁸ l'industrie nucléaire européenne s'est trouvée face à un double défi : améliorer sensiblement la sûreté des réacteurs pour les rendre socialement acceptables, singulièrement en Allemagne, tout en affichant un coût compétitif. Les équipes de Framatome en France et de Siemens en Allemagne ont conçu un prototype de réacteur à eau pressurisée de nouvelle génération plus puissant (1650 MW) que les précédents réacteurs (900 à 1300 MW). L'EPR (*European Pressurized Reactor*) devait ainsi répondre à ces deux enjeux en promettant une amélioration de la sûreté telle qu'il n'y aurait pas à envisager de mesures importantes de protection des populations (et notamment des évacuations durables) en cas d'accident⁹. La principale innovation allant dans ce sens et souvent mobilisée pour présenter le saut technologique est le recours au « récupérateur de corium » ou « *core-catcher* » prévu pour le retenir le cœur fondu en cas d'accident.¹⁰ Le projet est plébiscité par les gouvernements des deux pays qui mettent en exergue son haut niveau de sûreté. Cette ambition d'une augmentation de la puissance des réacteurs qui s'accompagne d'une amélioration de la sûreté atteint son paroxysme au moment de l'accident de Fukushima où AREVA revendique un niveau de maîtrise sans précédent. Sa présidente de l'époque, Anne Lauvergeon, déclare publiquement dans la presse que « *s'il y avait des EPR à Fukushima, il n'y aurait pas de fuites possibles dans l'environnement, quelle que soit la situation [...] Nous allons arriver vers un nucléaire dans des conditions extrêmement fortes de sécurité* ». ¹¹
- 13 Cette affirmation, tout comme les choix techniques qui la sous-tendent, ne font pas pour autant consensus au sein de l'industrie nucléaire française, et notamment chez les experts de la sûreté nucléaire. L'IRSN en particulier a porté à plusieurs reprises un jugement sévère sur la puissance de l'EPR, estimant une telle augmentation déraisonnable. Ce fût particulièrement le cas en 2017 lorsque EDF a proposé en un nouveau projet de réacteurs EPR de 1750 MW qui puisse continuer l'élévation de la puissance proposée, notamment dans la perspective de renouvellement des réacteurs français vieillissant. L'IRSN a rendu un avis très défavorable à l'augmentation de la puissance, et ce malgré les améliorations techniques proposées pour accompagner cette augmentation.
- De manière générale, l'IRSN considère que l'augmentation de la puissance thermique du cœur va à l'encontre de l'augmentation des marges de sûreté que l'on pourrait attendre d'un nouveau modèle de réacteur. Certaines adaptations ont dû être apportées à la conception afin d'accommoder cette augmentation de puissance [...]. L'IRSN considère que certaines de ces adaptations ne sont pas favorables pour la sûreté. [...] Compte tenu de ces éléments, non exhaustifs, l'IRSN estime que l'augmentation du niveau de puissance thermique du cœur est de nature à réduire les marges de sûreté et n'y est donc pas favorable.¹²
- 14 De manière plus fondamentale encore, plusieurs experts estiment que l'EPR est un réacteur « trop compliqué » où l'augmentation de la puissance s'est accompagnée d'une complexification, notamment en raison des dispositifs de sûreté qu'une telle quantité de combustible suppose. Lors d'un entretien, un ancien haut directeur de l'IRSN estimait, à l'instar de plusieurs autres experts rencontrés, que baisser la puissance des réacteurs est la meilleure manière de maîtriser les potentielles conséquences d'un accident¹³. La présentation de la trajectoire historique du traitement des accidents graves permet de voir comment la complexité des réacteurs produit une ignorance bien

particulière, l'ignorance matérielle. En effet, en développant la technologie malgré les doutes et les incertitudes, une forme d'ignorance se constitue au sein même du réacteur, en raison de sa complexité et de l'augmentation de la puissance des réacteurs qui rend les défauts matériels plus cruciaux encore. Si la complexité des réacteurs nucléaires est source d'imprévisibilité, elle est aussi source d'ignorance dans la mesure où elle empêche de mener une étude complète des phénomènes à l'œuvre lors de l'accident, et singulièrement lorsque celui-ci conduit à une production de corium.

La matérialisation de l'ignorance dans les objets techniques : le corium

- 15 Dans cette seconde section, je souhaite montrer que la complexité ne se limite pas seulement à l'activité de prévention du déroulement de la matérialité de l'artefact nucléaire. Elle se propage par voie de conséquences à un élément plus complexe encore, la pollution produite par l'accident mais qu'elle se manifeste également dans les activités de production de savoirs utiles à sa gestion en prenant pour exemple le corium. Le corium constitue le stade ultime de l'accident nucléaire où, faute d'avoir pu éviter la fusion du cœur, le combustible fond pour constituer ce magma indescriptible (Chateauraynaud & Debaz, 2017). Si le suffixe « -um » utilisé dans le nom de la plupart des éléments chimiques suggère qu'il s'agit d'un élément chimique avec ses caractéristiques propres, il n'en est rien. Contrairement aux éléments référencés par le tableau périodique, il est impossible de connaître sa température de fusion, de solidification ni même son comportement physico-chimique de façon certaine. Sa composition et son comportement dépendent de nombreux facteurs difficilement prévisibles comme la vitesse de sa constitution ou la composition des éléments qu'il trouve sur son passage et qu'il fait fondre, puis absorbe. Ainsi, derrière l'unicité du terme de corium se trouvent en réalité une multitude de phénomènes et de situations particulièrement différentes qui supposent des réponses différentes. C'est pourquoi les ingénieurs et chercheurs ont tenté depuis les années 1970 d'étudier son comportement dans l'espoir de pouvoir le maîtriser. Les dispositifs matériels mobilisés dans le cadre de ces études influent bien entendu grandement sur ces études (Latour & Woolgar, 1989 ; Latour, 1984 ; Epstein, 1996). Ceci se joue à deux niveaux au moins. D'une part, la manière dont les connaissances sont produites dépendent des outils et expérimentations menées. D'autre part, en raison de la complexité des phénomènes à l'œuvre, leur formalisation à travers les modèles de simulation mathématique cherchant à proposer une vision globale de l'accident représente un scénario qui ne peut pas être expérimentalement entièrement vérifié. Ce sont à mon sens deux raisons très matérielles qui font du corium un objet insaisissable, que l'on ignore pour ces raisons très matérielles.
- 16 Pour appréhender le corium, une première approche très calculatoire a été mise en œuvre dans les années 1960 par les industriels américains. En réponse aux doutes concernant le bon fonctionnement du système de refroidissement d'urgence permettant d'éviter une fusion du cœur, les industriels *General Electrics* et *Westinghouse* ont menées plusieurs recherches pour comprendre les conséquences potentielles d'une fusion du cœur (Okrent, 1981 ; Ford, 1986). Ces études ont conclu au fait que même en cas de fusion totale du cœur, la masse en fusion serait retenue par le confinement¹⁴. Cependant, ces études adoptaient une méthode reposant sur les données lacunaires

dont disposaient les industriels. Leurs conclusions mettaient en évidence la nécessité de disposer de données plus robustes pour expertiser la sûreté des centrales et l'efficacité du confinement. Les États-Unis se sont dotés dans les années 1970 d'un vaste programme expérimental visant à étudier les effets d'une défaillance du refroidissement d'urgence des réacteurs nucléaires. En 1974, s'achève la construction d'un réacteur expérimental de l'Idaho National Engineering Laboratory (INL) à Idaho Falls, dans l'État du même nom, appelé LOFT (*Loos Of Flow Test*). Cette installation de 50 MW permettait de simuler un arrêt du refroidissement après une fuite dans le circuit d'alimentation du cœur.¹⁵ Si les conclusions sont plutôt rassurantes sur le fait que le système de refroidissement du cœur puisse fonctionner correctement et éviter la catastrophe, le rapport final du programme LOFT montre que les modèles de simulation sur lesquels les industriels se basaient décrivaient une réalité différente de ce que les expérimentateurs de l'INL ont observé, supposant une mise à jour sérieuse des modèles qui avaient été utilisés jusqu'alors dans les études calculatoires.¹⁶

17 Conscient de ce problème d'expertise important, le Commissariat à l'Énergie Atomique français (CEA) avait également lancé son programme expérimental dans les années 1970 et construit sur son site de Cadarache (Bouches-du-Rhône) un réacteur expérimental nommé « Phébus ». Ce réacteur de type « piscine » de 40 MW est entré en service en 1978. Il représentait un réacteur à eau pressurisée d'EDF à une échelle réduite de 1/5000^e. Les expérimentations qui se sont déroulées dans ce réacteur sont progressivement montées en puissance. Dans un premier temps, il s'agissait pour les expérimentateurs de vérifier les normes de sécurité américaines qui avaient été importées en France en même temps que la technologie des réacteurs à eau pressurisée acquise sous forme de licence en 1969 (Hecht, 1998). Malgré la volonté du CEA et de son Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) d'étudier des accidents plus graves que le *Maximum Credible Accident*, les industriels (EDF et Framatome en particulier) ont réussi à cantonner les études à la vérification de la bonne tenue des dispositifs de sécurité lors de la survenue de cet « accident maximum crédible » (Goumri, 2021a). Les industriels réclamaient une forme de stabilité des exigences réglementaires pour éviter les surcoûts qu'ils estimaient déjà trop nombreux¹⁷. Ce n'est qu'à partir de l'accident de Three Mile Island de 1979 que les programmes ont pu évoluer en France pour aller vers une étude plus ambitieuse des conditions accidentelles qui avaient été considérées comme « non crédibles », et donc ignorées, à la conception des réacteurs et que les industriels avaient refusé d'étudier. Or leur concours financier était indispensable à la réalisation du projet tant son coût était élevé.¹⁸ Le programme Phébus a ainsi pu donner des résultats auxquels les acteurs du nucléaire ne s'attendaient pas en montrant que les cœurs nucléaires fondaient à une vitesse bien plus importante et à une température bien plus basse que ce qui avait été initialement estimé par les modèles.¹⁹

18 Cependant, si la question du corium a été prise en charge par les chercheurs du CEA et des industriels, les programmes de recherche ne permettent pas pour autant d'éliminer toutes les incertitudes. Il est en effet impossible de réaliser une expérience à l'échelle réelle du réacteur en raison du danger que cela représenterait et les expérimentateurs doivent travailler à échelle réduite. De plus, pour la protection des travailleurs mais également en raison du risque de détournement de matières fissiles,²⁰ les chercheurs utilisent des matériaux qui ne sont pas exactement les mêmes que ceux qui sont utilisés dans les réacteurs nucléaires.²¹ Deux grands types de matériaux existent pour conduire des expériences sur le corium. Il y a tout d'abord les matériaux dits « prototypiques » qui permettent de constituer du corium à partir d'oxyde d'uranium appauvri, et dont la

faible radioactivité permet de limiter les problèmes liés aux rayonnements tout en restant fidèle à la composition des combustibles nucléaires. Il ne permet cependant pas de réaliser des expériences à très grande échelle qui permettraient de décrire les phénomènes d'interdépendance entre les phénomènes thermohydrauliques,²² en plus d'être techniquement compliqués à monter en température.²³ Les expérimentations à plus grande échelle doivent donc être réalisées avec des matériaux dits « simulants », c'est-à-dire des matériaux qui ne sont pas nucléaires ou radioactifs mais qui peuvent dans une certaine mesure donner une indication sur des lois générales de comportement des fluides (comme de l'eau ou de la glace par exemple).²⁴ L'utilisation de ces matériaux produit une incertitude avec laquelle les chercheurs tentent de s'accommoder notamment en utilisant les modèles de simulation informatique. Leur usage pose cependant la question de la représentativité des résultats observés, car ils ne permettent bien souvent pas d'observer expérimentalement les différents couplages qui en découleraient lors d'un accident de fusion du cœur sur un réacteur de puissance à grande échelle. Cela rappelle que l'approche expérimentale ne donne pas un résultat univoque mais qu'elle contribue, au contraire, à construire la crédibilité d'un énoncé qui est en réalité construit sur un assemblage de multiples savoirs (Shapin, 1995). À titre d'exemple, le bouillonnement qui se produit dans la masse en fusion à grande échelle redistribue les flux de chaleur au sein du corium et peut invalider des résultats obtenus à petite échelle.²⁵

D'une façon générale, la validité des logiciels de simulation pour leur application au cas d'un réacteur de puissance est limitée par les incertitudes sur les effets d'échelle, puisque les modèles implémentés dans ces logiciels n'ont pu être validés qu'à partir des résultats d'essais de taille 10 à 20 fois inférieure à celle d'un réacteur de puissance. Les solutions pour surmonter cette difficulté sont a priori, d'une part la réalisation d'essais avec des matériaux prototypiques à plus grande échelle, d'autre part le développement d'outils de simulation maillés capables de décrire la thermohydraulique et la physique des transferts de chaleur à différentes échelles afin de conforter l'extrapolation de l'échelle des essais à celle d'un réacteur de puissance. (Jacquemain *et al.*, 2013, pp. 228-229).

- 19 Un des phénomènes particulièrement révélateurs de cette complexité est le « *focusing effect* » (l'effet de concentration des flux). Il s'agit pour les chercheurs spécialistes du corium de l'une des principales incertitudes persistantes concernant le comportement du corium²⁶. En effet, dans des conditions très particulières, notamment lorsque le corium est constitué de façon rapide et brutale,²⁷ une fine couche de métal très légère se forme à la surface du magma. Elle pose de multiples problèmes aux modélisateurs qui ont du mal à anticiper le transfert de chaleur aurait tendance à se concentrer dans cette couche très mince. Cela entraîne une sollicitation mécanique très forte de la cuve à cet endroit qui, selon les simulations, pourrait conduire à une rupture rapide et certaine de la cuve du réacteur sous le fait de la forte contrainte thermique et mécanique. Or, ce type de couplage des effets physico-chimiques et mécaniques est très compliqué à prévoir du fait du caractère partiel des expérimentations.²⁸
- 20 Face à ces incertitudes, les chercheurs et experts se mobilisent cependant, car loin d'être un champ inexploré, des savoirs parcellaires et incomplets existent et sont malgré tout possibles à obtenir. C'est dans un objectif d'assemblages de ces savoirs, de façon à obtenir une vision plus générale, que les modèles se sont imposés comme la principale manière d'estimer le déroulement et les conséquences d'un accident nucléaire grave. Par la suite, le développement de savoirs spécifiques sur les accidents, notamment en réponse aux premiers incidents graves et accidents, a conduit à revoir

les modèles, avec la volonté de disposer d'une plus grande précision des descriptions. La modélisation n'est pas spécifique au nucléaire et vise à reconstituer des phénomènes complexes, avec souvent une visée prédictive, qui font intervenir des composantes très variées comme pour la modélisation du climat (Dahan, 2012 ; Edwards, 2013 ; Patinaux, 2017). Ils permettent de présenter une scénarisation tout en disposant de connaissances limitées sur les phénomènes physiques à l'œuvre lors d'un accident grave. Mais pour autant, ces modèles proposent, souvent avec des hypothèses implicites longuement débattues entre experts, une extrapolation des résultats obtenus expérimentalement. C'est alors une construction de la crédibilité des scénarios envisagés qui s'opère (Shapin, 1995) pour tenter de proposer une interprétation la plus pertinente possible, la plus vraisemblable possible, sans qu'il ne soit possible de le vérifier expérimentalement. D'ailleurs, pour les codes de calcul disponibles sur le marché, une même situation accidentelle simulée donne plusieurs résultats différents. Leur interprétation fait l'objet de très nombreux débats, parfois vifs entre experts, à la fois sur la crédibilité des résultats mais aussi, et peut-être même surtout, sur les précautions à prendre en compte dans la conception (Goumri, 2021a) et notamment dans leurs dimensions matérielles : la marge de sécurité. C'est d'ailleurs sur un scénario concernant la récupération du corium hors cuve sur les réacteurs français d'ancienne génération qu'un chercheur confie lors d'un entretien que le scénario retenu par les experts de l'IRSN comme « LE scénario » qui allait se passer en cas d'accident était finalement une configuration idéale qui n'avait que peu de chance selon lui de vraiment se produire. Avec son franc parler, il m'expliquait que la réalité était probablement plus complexe et que le corium n'aurait probablement pas le bon goût de se comporter comme les experts, ou leurs modèles, l'envisageaient.

Non, mais, je pense que, l'ironie de... de ce bordel, c'est qu'effectivement, la récupération du Corium, c'est quand même un problème très compliqué. [...] Le problème de « l'ex-vessel » [la récupération hors cuve du corium de certains nouveaux réacteurs], enfin, il y en a plusieurs, mais entre autres, il y a aussi le problème de l'interaction entre le Corium et l'eau. Donc voilà, on... on dit : « OK, on fait de l'ex-vessel », mais au moment où le Corium perce la cuve, on impose que ce soit sec en dessous. Moi, mon avis, c'est qu'on se fout de la gueule du monde quoi. Parce que le mec qui va arriver à garantir que son béton sera complètement sec à l'endroit où le Corium va se péter la gueule, il est vraiment très balaise parce que si on en arrive là, ça veut dire qu'on a eu un accident grave. Ça veut dire que l'installation, elle est pas du tout dans un état nominal. Ça veut dire qu'on a perdu de l'eau, sauf qu'on a été super balaises et qu'on a expliqué à l'eau qu'elle aille partout sauf à l'endroit où le Corium allait tomber. Alors, je suis un peu provocateur quand je dis ça.... (Entretien avec un expert de l'IRSN spécialiste des accidents graves, novembre 2018).

- 21 La seconde modalité avec laquelle les acteurs tentent de gérer cette ignorance matérielle consiste à l'assumer. Contrairement aux chercheurs que j'ai rencontrés qui, en filigrane, espéraient souvent réussir à percer tous les mystères du corium, beaucoup d'experts de l'IRSN estimaient au contraire qu'une connaissance limitée pouvait être suffisante pour trancher les questions d'expertise. Un expert a très bien résumé, lors d'un entretien, une position partagée par beaucoup : « on n'a pas besoin de tout savoir ». Selon lui, il est possible pour l'expert de se contenter d'une grande confiance en la bonne tenue des dispositifs de confinement, grâce à des marges de sécurité. Contrairement aux chercheurs qui souhaitaient bien souvent en savoir davantage et comprendre les mécanismes à l'œuvre, les savoirs permettant de trancher les sujets sont les plus valorisés chez les experts.

Et même chose sur ces mécanismes-là est-ce qu'il est nécessaire d'avoir des modèles hyper sophistiqués, où on connaît toute la physique, où on va tout modéliser, la chimie, les transferts de chaleurs, je ne pense pas. Si on a des modèles un peu simplifiés, de type corrélation, qui nous permettent de conclure qu'on est confiant sur le fait qu'on va pouvoir arrêter la progression du corium à la fois par étalement et par mélange sous eau, ça nous convient. On n'a pas besoin de tout savoir. (Entretien avec un chercheur spécialiste du corium de l'IRSN, décembre 2018).

Non on ne saura jamais tout, mais on n'a pas besoin de savoir tout. On a uniquement besoin d'avoir des marges de sûreté suffisantes. On peut se permettre de clore un sujet si on s'est donné suffisamment de conservatismes sur ce qu'on ne sait pas, et voilà c'est tout. (Entretien avec un expert sénior spécialiste du corium de l'IRSN, janvier 2019).

- 22 La complexité du corium permet de voir une autre forme d'incertitude matérielle qui s'incarne dans les pratiques mêmes de la science qui l'étudie. Elle tient autant à la radioactivité, la difficulté de chauffer l'oxyde d'uranium ou les assemblages de savoirs qui, tout en créant des savoirs crédibles, ne sont pas définitifs, ni même toujours suffisants pour trancher une question d'expertise. Ainsi les modalités pratiques et matérielles de l'étude du corium expliquent pourquoi, malgré un investissement inédit de la question par les agences d'expertise et les industriels, le corium est encore loin d'avoir livré ses secrets, laissant ingénieurs et experts dans une forme d'ignorance persistante.

Conclusion

- 23 Cet article invite à s'intéresser à la dimension matérielle de l'ignorance en montrant comment la matérialité des objets est productrice et propagatrice d'ignorances. En interrogeant le lien entre complexité et ignorance, on peut voir comment la technologie nucléaire a été développée malgré de nombreuses incertitudes, aux sources multiples. Il ne s'agit pas là d'une situation propre au nucléaire. Callon, Lascoumes et Barthe (2001) parlent de l'incertitude radicale pour désigner l'incertitude consubstantielle au développement technologique. Le développement de nouvelles technologies s'accompagne de risques qui sont méconnus et ne se révèlent, estiment-ils, que plusieurs années, voire décennies plus tard. Or, ce que montre l'étude du cas de l'accident nucléaire grave est bien la persistance de cette incertitude radicale plus d'un demi-siècle après les premiers projets commerciaux. Bien loin de s'être résolu, le problème s'est au contraire complexifié, notamment en raison de l'augmentation régulière de la puissance des réacteurs qui a contribué à renforcer la complexité des systèmes techniques. Le temps a également fait découvrir des fragilités ou des risques insoupçonnés. En mettant en évidence des couplages de phénomènes non anticipés au début de son développement, et de manière plus générale, la complexité de la technologie est susceptible de conduire à ce que Perrow appelle « l'accident normal » (Perrow, 1984), un accident inévitable qui finit par advenir quel que soit le degré de mesures de sécurité prises.
- 24 Ainsi l'approche par la matérialité de l'ignorance permet de questionner la démarcation entre incertitude et ignorance au profit de cette dernière. À l'évidence, l'avancée des savoirs et l'expérience acquise en matière d'exploitation de centrales nucléaires (autant que d'accidents) n'a permis ni de faire disparaître les incertitudes, ni de vraiment réduire un ensemble de zones d'ombre persistantes à ce jour. Le cas du corium en donne une illustration éclairante. En proposant le concept d'ignorance

matérielle pour désigner cette ignorance qui est constituée par les caractéristiques physiques des objets eux-mêmes, autant que leur capacité à incorporer et diffuser les incertitudes avec lesquelles ils ont été développés, j'espère contribuer à élargir les études de l'ignorance.

Je remercie l'IRSN et le comité d'histoire de l'électricité et de l'énergie de la fondation EDF pour leur soutien financier, de même que l'ensemble des personnes rencontrées et interviewées dans le cadre de cette enquête. Un grand merci également aux relecteurs-trice-s pour leurs commentaires utiles et constructifs.

BIBLIOGRAPHIE

- Anses, (2016). *Prise en compte de l'incertitude en évaluation des risques : revue de la littérature et recommandations pour l'Anses*. Maisons Alfort : Anses, Consulté sur <https://www.anses.fr/en/system/files/AUTRE2015SA0090Ra.pdf>
- Bensaude-Vincent, B., Boudia, S. & Sato, K. (éd.). (2021). *Living in a Nuclear World: From Fukushima to Hiroshima*. Londres: Routledge.
- Blanck, J. (2017). *Gouverner par le temps : la gestion des déchets radioactifs en France, entre changements organisationnels et construction de solutions techniques irréversibles (1950-2014)*. Thèse de doctorat, Institut d'études politiques, Paris.
- Boudia, S. & Jas, N. (éd.). (2014). *Powerless Science? Science and Politics in a Toxic World*. New York: Berghahn Books.
- Brown, R. (2015). *Nuclear Authority: The IAEA and the Absolute Weapon*. (Illustrated edition). Washington DC: Georgetown University Press.
- Callon, M. (2017). *L'emprise des marchés Comprendre leur fonctionnement pour pouvoir les changer*. Paris : La Découverte.
- Callon, M., Lascoumes, P. & Barthe, Y. (2001). *Agir dans un monde incertain : essai sur la démocratie technique*. Paris : Éditions du Seuil.
- Dahan, A. (2012). *Épistémologie de la modélisation, le cas des modèles de climat*. Versailles : Editions Quæ.
- Edwards, P. (2013). *A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*. Cambridge MA: MIT Press.
- Elliott J. & Frickel, S. (2013). The Historical Nature of Cities: A Study of Urbanization and Hazardous Waste Accumulation. *American Sociological Review*, 78(4), 521-543. <https://doi.org/10.1177/0003122413493285>.
- Epstein, S. (1996). *Impure Science: AIDS, Activism, and the Politics of Knowledge (Medicine & Society)*. Berkeley: University of California Press.
- Foasso, C. (2012). *Atomes sous surveillance : une histoire de la sûreté nucléaire en France*. Bruxelles : Peter Lang.

- Ford, D. (1986). *Meltdown*. New York: Simon & Schuster.
- Fortun, K. (2014). From Latour to Late Industrialism. *HAU: Journal of Ethnographic Theory*, 4(1), 309-329.
- Frickel, S. & Vincent, B. (2007). Hurricane Katrina, Contamination, and the Unintended Organization of Ignorance. *Technology in Society*, 29(2), 181-188.
- Funtowicz, S. & Ravetz, J. (1993). Science for the Post-Normal Age. *Futures*, 25(7), 739-755.
- Goumri, M. (2021a). *Apprivoiser le cygne noir, construction et circulation des savoirs et des ignorances dans le gouvernement de l'accident nucléaire majeur*. Thèse de doctorat, Université de Paris.
- Goumri, M. (2021b). Making the accident hypothetical? How can one deal with the potential nuclear accident? In B. Bensaude-Vincent, S. Boudia & K. Sato (eds). *Living in a nuclear world: From Fukushima to Hiroshima*. Routledge.
- Gray, M. & Rosen, I. (2003). *The Warning: Accident at Three Mile Island*. New York: Norton & Co.
- Hecht, G. (1998). *The Radiance of France: nuclear power and national identity after World War II*. Cambridge MA: The MIT Press.
- Hess, D. (2016). *Undone Science: social movements, mobilized publics, and industrial transitions*. Cambridge MA: The MIT Press
- Jacquemain, D. & IRSN. (2013). *Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance : état des connaissances*. Paris : EDP sciences.
- Jasanoff, S. & Kim, S-H. (2009). Containing the Atom: Sociotechnical Imaginaries and Nuclear Power in the United States and South Korea. *Minerva*, 47(2), 119-146. <https://doi.org/10.1007/s11024-009-9124-4>.
- Kalmbach, K. (2011). *Tschernobyl und Frankreich. Die Debatte um die Auswirkungen des Reaktorunfalls im Kontext der französischen Atompolitik und Elitenkultur*. Frankfurt am Main: Peter Lang.
- Latour, B. (1984). *Les Microbes. Guerre et paix*. Paris : Métailié.
- Latour, B. & Woolgar, S. (1986). *La vie de laboratoire, La Production des faits scientifiques*. Paris : La Découverte.
- Le Renard, C. (2015). Une analyse sociotechnique du programme français de réacteurs à neutrons rapides : les formes successives de l'évaluation. *Gérer et Comprendre*, 4(122), 21-30.
- Mangeon, M. & Pallez, F. (2017). Réguler les risques nucléaires par la souplesse : genèse d'une singularité française (1960-1985). *Gérer et Comprendre*, 4(130), 76-87. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01499002>.
- Okrent, D. (1981). *Nuclear Reactor Safety: On the History of the Regulatory Process*. Madison WS: University of Wisconsin Press.
- Patinaux, L. (2017). *Enfouir des déchets nucléaires dans un monde conflictuel. Une histoire de la démonstration de sûreté de projets de stockage géologique, en France (1982-2013)*. Thèse de doctorat, EHESS, Paris.
- Perrow, C. (1981). Normal Accident at Three Mile Island. *Society*, 18(5), 17-26. <https://doi.org/10.1007/BF02701322>.
- Perrow, C. (1984). *Normal accidents: living with high-risk technologies*. New York: Basic Books.
- Proctor, R. & Schiebinger, L. (2008). *Agnology: The Making and Unmaking of Ignorance*. Stanford: Stanford University Press.

- Roger, M. (2020). *Le séisme, la centrale et la règle : instaurer et maintenir la robustesse des installations nucléaires en France*. Thèse de doctorat, Université de Paris.
- Saint-Raymond, P. (2012). *Une longue marche vers l'indépendance et la transparence : l'histoire de l'Autorité de sûreté nucléaire française*. Paris : La documentation française.
- Schmid, S. (2015). *Producing Power: The Pre-Chernobyl History of the Soviet Nuclear Industry*. Cambridge MA: The MIT Press.
- Shapin, S. (1995). Cordelia's Love: Credibility and the Social Studies of Science. *Perspectives on Science*, (3), 255-275.
- Walker, S. (2004). *Three Mile Island. a Nuclear Crisis in Historical Perspective*. Berkeley CA: University California Press.
- Wellock, T. (2021). *Safe Enough?: A History of Nuclear Power and Accident Risk*. Oakland CA: University of California Press.
- Winner, L. (1980). Do Artifacts Have Politics? *Daedalus*, 109(1), 121-36.
- Zaretsky, N. (2018). *Radiation Nation: Three Mile Island and the Political Transformation of the 1970s*. New York: Columbia University Press.

NOTES

1. C. Rogers McCullough (ACRS), Mark M. Mills, Edward Teller (University of California), "The Safety of Nuclear Reactors, Proceedings of the international conference on the peaceful uses of Atomic Energy (8-20 August 1955), United Nations, Vol. 13, pp. 79-87
2. Okrent, D. (1978). *On the History of the Evolution of Light Water Reactor Safety in the United States*. Unpublished, pp. 2-16.
3. Beck, C.K., Mann, M. M. & Morris, P.A. (1959). Reactor Safety, Hazards Evaluation and Inspection. In Proceedings of The Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 1958, P/2407, 11. New York: United Nations, 17-20.
4. Il est à préciser que plusieurs accidents ont eu lieu avant Three Mile Island (notamment l'incendie du réacteur britannique Windscale en 1957) mais qui ne concernaient pas la technologie à eau pressurisée réputée la plus sûre. La plupart des autres accidents ont eu lieu sur des installations expérimentales.
5. « *But the accident at TMI was not a preventable one, and the amount of radiation that vented into the atmosphere could easily have been much larger, and the core might have melted, rather than just being damaged. TMI was a "normal accident"; these are bound to occur at some plant at some time, and bound to occur again, even in the best of plants.* » (Perrow, 1981, p. 17).
6. Notes manuscrites / Brouillon Jean Bourgeois sur les deux différentes technologies envisagées : 1974
Note Jean Bourgeois, DSN, « Problème de sûreté des réacteurs à eau ordinaire et recherches correspondantes », Janvier 1974, Archives IRSN, boîte 261430.
7. Note Jean Bourgeois, DSN, « Problème de sûreté des réacteurs à eau ordinaire et recherches correspondantes », Janvier 1974, Archives IRSN, boîte 261430.
8. *Ibid.*
9. OPESCT, Rapport Birraux, « Le contrôle de la sûreté de la sécurité des installations nucléaires », 1999, [en ligne], <http://www.assemblee-nationale.fr/11/rap-oecst/r0971-1.asp>, (dernière consultation le 01/01/2021).

10. Voir notamment la plaquette de présentation de l'EPR d'Areva, « *The EPR reactor the reference for new build* », [en ligne] <http://de.areva.com/mini-home/liblocal/docs/Sonstiges/EPR.pdf> (dernière consultation 13/12/2020).
11. Agence France Presse. Lauvergeon vante les vertus de l'EPR. *Le Figaro*, 16 mars 2011.
12. Avis/IRSN N°2018-000013, « Examen du Dossier d'options de sûreté du réacteur EPR Nouveau Modèle (EPR NM) » en réponse à la lettre ASN CODEP-DCN-2017-039708 du 1^{er} décembre 2017, 19 janvier 2018.
13. Entretien avec d'un ancien haut directeur de l'IRSN, Versailles, le 25/01/2019.
14. Tagami, T. (1966). Considerations on fission product release suppression factors of engineered safeguards for nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 4(2), 214-223. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(66\)90094-X](https://doi.org/10.1016/0029-5493(66)90094-X).
- Tong, L.S. (1968). Core cooling in a hypothetical loss of coolant accident. Estimate of heat transfer in core meltdown. *Nuclear Engineering and Design*, 8(2), 309-312.
15. US Nuclear Regulatory Commission, Rapport NUGENIA/IA-0028, "Review of LOFT large Break experiments, OECD LOFT Project", Octobre 1989.
16. *Ibid.*, p. 9.
17. Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire / Département de Sûreté Nucléaire, Pierre Tanguy, « Fiche valorisation de la sûreté des PWR – EDF », 4 Juillet 1977. Archives IRSN, boîte 261430.
18. Le coût d'investissement estimé au début du projet, en 1973, était de 28,83 millions de francs en Investissement et de huit millions par an de fonctionnement. Département de Sûreté Nucléaire, Pierre Tanguy, Note n° DgPSN 73-467, « Fiche à l'attention de M. l'administrateur Général (objet : Phébus) » 18/09/1973, Archives IRSN, Vrac VES.
19. Entretien avec un chercheur spécialiste du corium de l'IRSN, 17/12/2019, Centre d'Études Nucléaire de Cadarache (Bouches du Rhône).
20. Entretien avec un chercheur du CEA spécialiste du corium, 04/12/2019, Centre d'Études Nucléaire de Cadarache (Bouches du Rhône).
21. Les coûts associés à une utilisation de matériaux « réels » sont très élevés en raison de la forte protection des travailleurs à prévoir, du contrôle nécessaire des matières (pour éviter le détournement), et d'une manière générale le coût de la sûreté des installations.
22. Entretien avec un chercheur du CEA spécialiste du corium, 04/12/2019, Centre d'Études Nucléaire de Cadarache (Bouches du Rhône).
23. Entretien avec un expert spécialiste du corium de l'IRSN, 07/01/2019, Centre d'Études Nucléaire de Cadarache (Bouches du Rhône).
24. Entretien avec un chercheur du CEA, spécialiste du corium, 04/12/2019, Centre d'Études Nucléaire de Cadarache (Bouches du Rhône).
25. Laurent Saas (CEA) *et al.* « In Vessel Retention (IVR) Phénomènes en cuve), Journée Technique SFEN « Les accidents graves », 10 mai 2017, Paris.
26. Entretien avec un chercheur de l'IRSN spécialiste de la rétention en cuve du corium, 07/06/2018.
27. Entretien avec un ingénieur chercheur de l'IRSN expert du corium, 18/12/2018, Centre d'Études Nucléaire de Cadarache (Bouches du Rhône).
28. Entretien avec un chercheur de l'IRSN spécialiste de la rétention en cuve du corium, 07/06/2018, Entretien avec un chercheur spécialiste du corium au CEA, 04/12/2019.

RÉSUMÉS

La connaissance des accidents nucléaires graves constitue un enjeu important pour l'industrie nucléaire qui tente depuis plus de 60 ans de se développer tout en évitant l'accident majeur. Pourtant, si ce domaine a fait l'objet de très nombreux développements, de nombreuses zones d'incertitudes demeurent. Cet article montre comment ces incertitudes, en s'ancrant dans la matérialité même de la technologie nucléaire, constituent une forme particulière d'ignorance. Elle s'explique à la fois par la complexité de la technologie qui s'est renforcée au cours du temps et l'augmentation de la puissance des réacteurs. Elle tient également à la complexité des phénomènes physiques à l'œuvre lors de l'accident qui rend son étude très complexe et son sous-produit, le « corium » insaisissable.

Knowledge on major nuclear accidents is an important issue for the nuclear industry, which has been trying for more than 60 years to develop while avoiding major accidents. However, although this field has been the subject of many developments, many areas of uncertainty remain. This article shows how these uncertainties, by being rooted in the materiality of nuclear technology, constitute a particular form of ignorance. It is explained both by the complexity of the technology, which has increased over time, and by the increase in reactor power. It is also due to the complexity of the physical phenomena at work during the accident, which makes its study very complex and its by-product, the elusive “corium”.

El conocimiento de los accidentes nucleares graves es una cuestión importante para la industria nuclear, que lleva más de 60 años intentando desarrollarse evitando accidentes graves. Sin embargo, aunque este campo ha sido objeto de muchos desarrollos, siguen existiendo muchas áreas de incertidumbre. Este artículo muestra cómo estas incertidumbres, al estar arraigadas en la propia materialidad de la tecnología nuclear, constituyen una forma particular de ignorancia. Se explica tanto por la complejidad de la tecnología, que ha aumentado con el tiempo, como por el incremento de la potencia de los reactores. También se debe a la complejidad de los fenómenos físicos que actúan durante el accidente, lo que hace que su estudio sea muy complejo y su subproducto, el «corium», esquivo.

INDEX

Palabras claves : nuclear, accidente grave, ignorancia, incertidumbre radical, materialidad

Mots-clés : nucléaire, accident grave, ignorance, incertitude radicale, matérialité

Keywords : nuclear energy, severe accident, ignorance, radical uncertainty, materiality

AUTEUR

MAËL GOURMI

Membre du Centre de recherche médecine, science, santé et société (Cermes3) est l'auteur d'une thèse, soutenue à l'Université de Paris, sur le gouvernement de l'accident nucléaire majeur en France en s'intéressant à la constitution, la circulation et l'utilisation des savoirs, ainsi que des ignorances associées. Ses travaux actuels portent sur la transition énergétique en Europe.

ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-9104-6925>

Adresse : Université de Paris - Cermes 3, 45 rue des Saints-Pères, FR-75006 Paris (France)

Courriel : mael.goumri[at]gmail.com