



LES RISQUES D'ACCIDENTS DANS LES CHOIX DE PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE : LE BON USAGE DES DONNÉES HISTORIQUES DE LONG TERME

Théo CERALINE - *Ancien chargé de mission à La Fabrique Ecologique*

Géraud GUIBERT - *Président de La Fabrique Ecologique*

Messages clés

L'énergie constitue aujourd'hui un enjeu majeur, à la fois pour la transition écologique, le niveau et le mode de vie et la souveraineté. Pourtant, les risques liés à sa production sont souvent négligés dans le débat public, au profit d'affirmations mal fondées scientifiquement.

Ce décryptage s'appuie sur une revue rigoureuse des sources scientifiques concernant l'historique des accidents énergétiques, afin d'offrir une vision claire et objectivée des risques. Il insiste sur l'importance d'intégrer ces données dans les politiques de prévention. Cette démarche conduit à prendre en compte, dans le choix de notre production d'énergie, deux éléments clés : la confiance du public dans les dispositifs de sécurité et la diversification permettant de renforcer la résilience du mix énergétique.

Introduction

L'énergie constitue aujourd'hui un enjeu majeur, à la fois pour la transition écologique, le niveau et le mode de vie et la souveraineté.

Il est indispensable de prendre en compte les risques d'accidents dans les choix de production d'énergie, sur une base objective, rigoureuse et transparente. Or, cela est rarement le cas dans le débat public aujourd'hui, où prédominent les affirmations à l'emporte-pièce, ainsi que les comparaisons hâtives et mal fondées scientifiquement.

Ce décryptage procède à cette analyse sur la base d'une revue exhaustive des sources scientifiques validées et fiables sur l'historique des accidents. Il présente donc une vue d'ensemble de ces données sur une longue période.

Ces données historiques doivent être utilisées avec précaution pour caractériser les risques, leurs impacts possibles et mettre en place des politiques de prévention avisées et efficaces.

Dans les choix de production énergétique, cette démarche conduit à prendre en compte, parmi d'autres, deux facteurs : la confiance de la population dans les dispositifs de sûreté et de prévention, et la diversification permettant de renforcer la résilience du mix énergétique.

La construction et l'exploitation des sources d'énergie sont des sources potentielles de dommages pour les personnes, les biens et l'environnement. Les risques qui en découlent s'apprécient en associant des probabilités d'occurrence à certains niveaux de dommages. Il faut ainsi prendre en compte à la fois les facteurs d'endommagement (aléas) et les facteurs de vulnérabilité (peuplement, répartition des biens, écosystèmes) aux échelles géographiques pertinentes. L'analyse des risques, c'est-à-dire des impacts possibles et des probabilités associées, est indispensable avant toute décision d'investissement. Elle l'est aussi tout au long des processus de conception et de production, afin de minimiser l'éventualité et l'ampleur des impacts possibles, permanents ou ponctuels.

Parmi les dommages possibles liés à l'exploitation des sources d'énergie, ceux liés aux accidents sont particulièrement préoccupants. Un accident majeur peut causer un nombre important de morts et/ou de blessés, produire des dégâts considérables, générer des pertes économiques significatives, voire mettre toute une filière à l'arrêt, et être source de dommages irréversibles sur la biodiversité. Nos sociétés, et cela constitue un progrès, considèrent comme de moins en moins acceptables les effets de tels accidents sur la santé et l'environnement.

Les mesures de prévention, fondées notamment sur des analyses ex ante des scénarios possibles (défaillances d'équipement ou humaines, événements extérieurs catastrophiques, etc.), y compris en tirant les enseignements d'accidents passés (retours d'expérience), visent à réduire leur probabilité et à en limiter les conséquences. Mais l'histoire a prouvé que certains événements peuvent échapper à l'analyse ou être considérés à tort comme très improbables, au point d'être exclus des scénarios. Une des difficultés est dès lors l'imprévisibilité de l'occurrence ou de l'impact de ces accidents rares.

La prise en compte des risques d'accidents est d'autant plus importante au moment des choix d'infrastructures. Dans le secteur de l'énergie, les investissements ont un impact à très long terme, compte tenu de la durée de construction et d'exploitation de nombreux équipements. L'exposition aux risques d'accidents porte ainsi souvent sur plusieurs décennies. Leur survenance peut modifier très fortement l'équilibre économique et l'acceptation des équipements en place. Le temps peut à l'inverse diminuer l'aléa et la vulnérabilité, par exemple par des mesures supplémentaires de protection.

Il est donc essentiel de ne pas se tromper de méthode pour analyser et prendre en compte les risques d'accidents dans les choix de filières énergétiques. L'historique des événements accidentels du passé est ainsi régulièrement évoqué et utilisé comme argument.

Pourtant, quand le sujet des accidents est évoqué, ce qui est assez rare, c'est malheureusement souvent avec des approximations et contrevérités, que ce soit dans l'évocation des données elles-mêmes ou leur interprétation. L'analyse historique est convoquée pour justifier des conclusions à partir de données fausses ou approximatives et de comparaisons sans base scientifique sérieuse.

Ce décryptage a l'objectif inverse, celui d'une mise à plat rigoureuse des données historiques des accidents à partir, notamment, de la littérature scientifique disponible, démarche trop rarement menée dans notre pays. Il montre l'importance d'être précis sur les événements à prendre en compte et d'utiliser une nomenclature et des sources reconnues (partie 1). Il indique les grandes tendances du passé en matière d'accidents liés à la production d'énergie (partie 2). Il montre enfin l'intérêt de ce type d'analyses et les précautions à prendre pour les utiliser (partie 3).

I. Les risques d'accidents liés aux choix de production énergétique : les exigences de méthodes incontournables

Pour prendre en compte les seuls risques d'accidents liés aux choix de production, il est bien sûr nécessaire de les distinguer précisément des autres, en évitant les confusions. Il faut aussi utiliser des données les plus fiables possibles.

A. Une délimitation précise des accidents concernés et de leurs impacts possibles

Des risques nombreux et de natures diverses affectent les choix en matière d'énergie. Il est indispensable de distinguer précisément ceux découlant des accidents liés à la production et à la distribution des différentes formes d'énergie.

a) Les risques d'accidents liés à la production et à la distribution doivent intégrer l'ensemble des étapes : la production bien sûr, mais aussi la prospection, l'extraction, le traitement, le stockage, le transport, la distribution ainsi que la gestion des déchets¹. Toutes ces étapes peuvent s'appliquer

¹ Par exemple Burgherr, Hirschberg, « Comparative risk assessment of severe accidents in energy sector », Energy Policy 74, 2014. (Désigné : Burgherr & Hirschberg, 2014)

peu ou prou pour le gaz, le pétrole, le charbon, ou l'électricité (qu'elle soit produite à partir de ces combustibles fossiles ou par le nucléaire ou des sources renouvelables).

b) Certains risques d'accidents concernent l'utilisation ou la consommation finale d'énergie, par exemple les accidents domestiques liés aux systèmes de chauffage ou aux appareils électriques ou encore les accidents de voiture. Ils sont principalement la conséquence du niveau de sécurité des équipements (par exemple pour les véhicules, la qualité des infrastructures ou les aides à la conduite en cas d'urgence) et (ou) de leur mauvais usage.

Ils découlent des choix de filières énergétiques par l'Etat (réglementation environnementale des bâtiments, promotion du véhicule électrique, décarbonation de l'industrie, etc.), en particulier pour la composition du mix énergétique. Pour ces risques, la possibilité de maîtrise par l'utilisateur n'est pas systématiquement vérifiée. Ce n'est pas toujours le cas par exemple en matière de transports (ex : accidents de transport collectif, victimes de chauffards, ...). Pour le chauffage au gaz ou au bois, ou encore l'utilisation d'appareils électriques, le citoyen peut être considéré comme responsable d'un mauvais entretien ou d'une mauvaise utilisation comportant des risques d'intoxication au monoxyde de carbone ou d'électrocution. Mais il ne l'est pas à titre individuel si son appareil souffre d'un défaut caché de fabrication.

Il reste que ces risques sont le plus souvent maîtrisables par chaque individu et sont considérés comme tels. Le consommateur garde par exemple le choix du mode de chauffage, au gaz ou électrique, et du choix de ses appareils. Ces accidents ne dépendent souvent pas du choix de production d'énergie, le risque d'accident d'une voiture électrique n'étant par exemple pas très différent de celui d'un véhicule thermique.

Ces risques ne peuvent pas être comparés avec ceux affectant la production et la distribution. Cette distinction entre les types de risque correspond d'ailleurs à la méthode suivie par la littérature scientifique. Les comparaisons faites entre les décès liés à l'exploitation minière du charbon ou au nucléaire et le nombre de morts sur les routes ont par exemple très peu de significations, les seconds dépendant largement, contrairement aux premiers, du comportement de chacun.

c) L'impact possible des risques d'accident liés à la production d'énergie doit être pris en compte de manière large, sans se limiter à ses conséquences sur la vie humaine

Il faut d'abord intégrer la possibilité d'une aggravation des effets négatifs chroniques de la production d'énergie, en considérant par exemple l'impact des accidents de production d'énergies fossiles sur le changement climatique, la pollution de l'air, de l'eau ou sur la biodiversité. Ces facteurs sont évidemment essentiels aujourd'hui compte tenu du changement climatique et de la crise de la biodiversité : un puits de forage pétrolier a un effet direct sur la biodiversité, mais qui peut être considérablement aggravé en cas d'accident. Ainsi, au-delà de l'effet continu de l'exploitation, les conséquences négatives sur l'environnement en cas d'accidents affectent la production doivent être analysées dans l'étude des risques.

Il est aussi important de prendre en compte l'impact probable d'un accident sur l'interruption de l'approvisionnement énergétique. Ce risque est particulièrement présent pour sur l'électricité pour diverses raisons : le fait que l'offre et la demande doivent s'équilibrer de manière instantanée, les possibilités de stockage restent le plus souvent limitées et coûteuses et son utilisation est parfois

vitale. Son impact dépend donc aussi des dispositifs prévus de précaution (surcapacité de production, stockage, effacement de consommations, ...).

B. Les deux principales nomenclatures pour les données historiques

La base de l'analyse doit se fonder sur l'historique des accidents, même si bien sûr d'autres facteurs doivent être pris en compte. Dans ce domaine, deux principales nomenclatures existent, avec des logiques différentes.

a) La nomenclature scientifique : la base de données « Energy-related Severe Accident Database » ENSAD

La documentation scientifique existante se concentre sur des études comparatives de risques par « système énergétique »² et par groupes de pays. La notion d'« accident sévère » est centrale et reprise dans ces diverses études.

La base de données ENSAD, qui fait référence³, définit le concept par une série de critères alternatifs : au moins 5 morts, ou au moins 10 blessés, ou au moins 200 personnes évacuées, ou une interdiction générale de consommation de nourriture, ou le rejet à l'extérieur de plus de 10 000 tonnes d'hydrocarbures, ou l'exécution d'une dépollution des sols ou de l'eau sur une superficie d'au moins 25 km², ou des pertes économiques supérieures à 5 millions de dollars.

Ces critères sont évidemment arbitraires, peuvent être cumulatifs, permettant à chacun de fournir sa propre appréciation sur leur importance respective.

b) Les nomenclatures institutionnelles

La prévention des accidents industriels au sens large fait l'objet d'encadrements réglementaires et de suivis précis au niveau national. Cependant, les accidents énergétiques font l'objet de peu d'efforts spécifiques de classification, mis à part les accidents nucléaires.

Au niveau européen, la directive « Seveso », plusieurs fois complétée depuis 1982, harmonise certaines mesures de prévention et comporte des obligations de rapportage à la Commission européenne en cas d'accident majeur lié à une activité industrielle (hors nucléaire). L'accident majeur y est défini comme « *un événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion d'importance majeure résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'un établissement couvert par la présente directive, entraînant pour la santé humaine ou pour l'environnement un danger grave, immédiat ou différé, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, et faisant intervenir une ou plusieurs substances dangereuses* ».

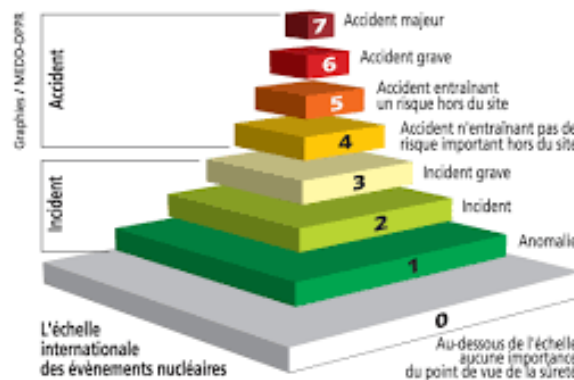
² entendu comme comportant la production et la distribution d'énergie en aval de différentes sources et en distinguant pour l'électricité les filières de production directe (hydraulique, éolien, photovoltaïque ; ...)

³ Energy-related Severe Accident Database (ENSAD) créée en 1998 par le Paul Scherrer Institut (PSI) et régulièrement alimentée et améliorée depuis.

Son annexe établit les critères-seuils à partir desquels les accidents doivent être rapportés à la Commission, mais la directive n'impose pas de classification de la gravité. L'échelle européenne des accidents industriels, créée en 1994, permet de caractériser la gravité des accidents industriels mais son utilisation n'est pas obligatoire. Seule la France s'en est inspirée pour adopter en 2003 quatre paramètres clefs de classification des accidents. Il n'y a donc pas de classification homogène de la gravité des accidents majeurs au niveau européen.

Au niveau international, seule une Convention (n° 174) sur la prévention des accidents industriels majeurs de 1993 de l'Organisation Internationale du Travail, ratifiée par 19 États, invite les pays signataires à développer une politique de prévention des accidents. La gestion des risques d'accidents industriels reste donc une prérogative très nationale, avec peu d'outils permettant une comparaison et classification des différents accidents et impacts.

Le risque d'accident nucléaire fait de son côté l'objet depuis 1991 d'une classification internationale, l'INES (International Nuclear Event Scale) créée par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) et l'Agence pour l'Énergie Nucléaire⁴ de l'OCDE.



Cette échelle permet de caractériser sur 8 niveaux de 0 à 7 la gravité d'un accident nucléaire à l'aide de trois critères : la dégradation des lignes de défense en profondeur du site (les moyens mis en place pour limiter les effets d'un incident ou accident et garantir le confinement de la radioactivité) ; les conséquences de l'évènement dans le site, sur les travailleurs ou l'installation ; et les conséquences de l'évènement hors du site, les rejets radioactifs pouvant atteindre l'environnement et la société civile.

Cette classification a le mérite d'avoir une dimension internationale. Elle sert surtout à la vulgarisation ex post des incidents nucléaires. L'échelle INES définit un évènement comme « accident » nucléaire à partir du niveau 4 lorsque le combustible nucléaire est endommagé mais que seuls des rejets mineurs hors du site se produisent. Les accidents de Tchernobyl et de Fukushima-Daiichi sont les seuls évènements à avoir été catégorisés au niveau 7 « d'accident majeur ».

⁴ Agence spécialisée créée en 1958 au sein de l'Organisation pour la coopération et le développement économique (OCDE) et regroupant 33 pays.

C. Des sources statistiques d'une qualité inégale

Les sources statistiques existantes sur l'historique des accidents et de leurs effets sont d'une rigueur scientifique inégale. Leurs limites doivent être prises en compte.

a) Les bases de données généralistes

Les données de l'ENSAD sont les seules au plan international à exister de manière systématique et sur une longue durée. Elles apportent un socle de connaissance important sur l'historique des accidents sur la base des critères d'accident sévère (cf. supra). Elles sont largement utilisées dans les analyses scientifiques et les rapports internationaux. Ces données ont fait l'objet de multiples articles scientifiques, principalement anglo-saxons, dans les revues *Energy policy* (2014)⁵, *Energy* (2015)⁶, *Journal of Cleaner Production* (2016)⁷.

Cette base de données donne des chiffres précis d'accidentologie pour les filières fossiles et pour l'énergie hydraulique. Pour le nucléaire, compte tenu du faible nombre de données historiques, les chiffres sont calculés à partir d'une étude probabiliste de sûreté. Pour les renouvelables (hors hydraulique), une approche dite « hybride » est utilisée, combinant les données disponibles sur les accidents (pour la plupart relativement rares en raison d'une expérience historique limitée) avec une modélisation spécifique et un jugement d'expert.

Au niveau institutionnel, l'UE possède une base de données « Major Accident Reporting System » (eMARS) faisant l'inventaire des accidents majeurs sur des sites classés Seveso depuis 1982, sur la base des informations données par les États-membres.

La France est un des rares États à posséder une base de données statistiques extensive sur les accidents industriels : la base ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) gérée par le ministère de la transition écologique⁸ répertorie les accidents et incidents technologiques en France et (dans une moindre mesure) à l'étranger. Le site du ministère annonçait en 2024 l'enregistrement de 57 000 événements, dont 1 239 pour le secteur énergies/énergies nouvelles et 1 807 pour les produits pétroliers, mais sans garantie d'exhaustivité.

b) Les sources spécifiques sur les accidents nucléaires

Parmi les organismes internationaux, seule l'Agence pour l'Énergie Nucléaire de l'OCDE a publié en 2010 une étude comparative, intitulée « Évaluation de risques d'accidents nucléaires comparés à ceux d'autres filières énergétiques »⁹. Cette publication datée doit être prise avec précaution. Son objectif est de comparer le risque du nucléaire à celui des fossiles, ce qui n'est plus la priorité aujourd'hui compte tenu du sujet majeur du changement climatique. Compte tenu de sa date de

⁵ Burgherr, Hirschberg « Comparative risk assessment of severe accidents in the energy sector », *Energy Policy*, 2014.

⁶ Sovacool et al, « *Profiling technological failure and disaster in the energy sector: A comparative analysis of historical energy accidents* », *Energy*, Volume 90, Part 2, October 2015. (Désigné : Sovacool, Kryman et al, 2015)

⁷ Sovacool et al, « Balancing safety with sustainability: assessing the risk of accidents for modern low-carbon energy systems », *Journal of Cleaner Production*, Volume 112, Part 5, 23 July 2015. (Désigné : Sovacool, Andersen et al, 2015).

⁸ Base tenue par le BARPI (bureau d'analyse des risques et pollutions industriels) de la direction générale de la prévention des risques

⁹ nea OCDE-evaluation-risques.pdf

rédaction, elle ne prend pas en compte l'accident de Fukushima. De plus, sa méthodologie n'est pas exempte de critiques (voir encadré ci-dessous).

Les limites de l'étude comparative de 2010 de l'agence pour l'énergie de l'OCDE

Cette étude reconnaît que les décès différés revêtent une importance particulière dans le cas de la filière du nucléaire. Elle indique ensuite que « les taux d'accidents mortels les plus élevés se rapportent au GPL et à l'hydro-électricité, suivis par le charbon, le pétrole, le gaz naturel et le nucléaire » (qui sont essentiellement des taux de décès immédiats). Elle estime certes que « le taux estimé de décès différés exclusivement lié au seul accident nucléaire (à l'époque) grave du point de vue des décès (celui de Tchernobyl) dépasse manifestement tous les taux susmentionnés de décès immédiats ». Mais elle ne donne pas de chiffres de décès différés. Elle considère en effet que, « étant donné les différences radicales de conception, d'exploitation et de procédures d'urgence de la centrale de Tchernobyl, les résultats propres à cette centrale ne sont pas applicables dans le cas des pays membres de l'OCDE ». Du coup, puisqu'il n'existait pas lors de sa rédaction de données rétrospectives sur les accidents majeurs nucléaires au sein de l'OCDE, une courbe théorique a été construite à partir de l'évaluation probabiliste de sûreté (EPS) relative à une centrale nucléaire suisse, en prenant en compte les décès différés imputables aux dommages sanitaires à long terme liés à la libération de matières radioactives.

S'agissant des deux accidents nucléaires majeurs de ces dernières décennies (Tchernobyl, Fukushima), l'enjeu de la crédibilité des sources est essentiel, compte tenu de la diversité des chiffres avancés par les différents organismes et au fil du temps.

Sur Tchernobyl, le rapport qui fait foi est celui établi en 2005 conjointement par les agences de l'ONU¹⁰. La diversité des institutions impliquées dans ce rapport, la contribution de centaines de scientifiques, d'économistes et de spécialistes de la santé, la validation par l'organisation mondiale de la santé en font un document de référence, même s'il comporte encore des incertitudes statistiques.

Sur Fukushima, l'OMS en 2013 et l'UNSCEAR en 2014 puis 2022¹¹ ont procédé à des analyses des effets directs des émissions radioactives. Depuis 2011, cinq études de suivi sanitaire et épidémiologique ont en outre été confiées à l'université de médecine de Fukushima. Cela inclut des dépistages thyroïdiens régulièrement effectués, en particulier chez les enfants âgés de 18 ans ou moins au moment de la catastrophe.

Ces différentes sources sont en principe fiables, même si on ne peut pas garantir que leurs résultats représentent à eux seuls un consensus incontestable. Par exemple, l'UNSCEAR s'est vu contesté

¹⁰ « Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts », Forum Chernobyl. composé de huit institutions spécialisées de l'ONU : l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), l'Organisation mondiale de la santé (OMS), le Programme des Nations unies pour le développement (PNUD), l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), le Bureau de la coordination des affaires humanitaires (OCHA), le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) et la Banque mondiale, ainsi que des gouvernements du Bélarus, de la Russie et de l'Ukraine : [Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, Russian Federation and Ukraine \(who.int\)](#)

¹¹ Rapports de 2014 : [The Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station Accident: An overview \(unscear.org\)](#); Scientific Annex B d'un rapport de 2022 : [UNSCEAR 2020/2021 Report Volume II](#)

par des organisations de la société civile pour des conclusions jugées hâtives sur le bilan sanitaire de Fukushima. La façon dont certains surnomment parfois l'UNSCEAR de « GIEC du nucléaire »¹² est d'ailleurs un peu abusive : l'instance ne regroupe que les experts de 31 pays, généralement bénéficiant d'installations nucléaires.

Ainsi, le cadre référentiel et méthodologique existe pour réaliser une analyse statistique ex post des accidents énergétiques, mais il est imparfait, notamment dans la perspective d'une caractérisation ex ante des risques propres aux différentes filières ou technologies. Il reflète les difficultés scientifiques à établir des consensus ou intégrer des facteurs complexes dans la grille analytique. De plus, le cadre institutionnel international ne prévoit pas, en dehors du nucléaire, de mécanismes communs de relevé et de classification d'accidents, qui dépendent de la méthodologie de chaque État.

II. L'historique des accidents de production d'énergie : la réalité des chiffres

L'analyse, dans les études académiques existantes¹³, du nombre d'accidents de production d'énergie et de leurs conséquences se fonde sur la fréquence totale des accidents, leur mortalité induite, l'ampleur des dommages économiques, ainsi qu'une standardisation de ces trois données par unité d'énergie produite (exprimée en TWh dans le tableau ci-dessous).

Elle mériterait être complétée par la prise en compte notamment de l'impact des accidents sur la biodiversité. Ce dernier aspect est en effet totalement absent, alors qu'il est essentiel dans le contexte actuel d'une diminution accélérée du nombre d'espèces.

Le tableau ci-dessous¹⁴ récapitule la fréquence et l'impact sanitaire et financier des accidents liés à la production d'énergie sur la période 1874-2014, à partir de la base de données ENSAD.

Table 3
Summary accident data for energy system accidents by reference class, 1874–2014.

Description	Coal	Oil	Natural gas	Hydro	Nuclear	Wind	Solar	Hydrogen	Biofuels	Biomass	Geothermal
Frequency (total number of accidents)	66	171	156	31	173	335	7	34	52	56	4
Severity (fatalities)											
Sum	9611	14,432	2610	178,746	4804	126	13	58	32	97	0
Mean	145.6	91.9	16.8	5766	27.8	0.4	1.9	1.7	0.6	1.7	0
Median	91.5	0.5	3	20	0	0.0	1	0	0	1	0
Standard deviation	154.1	398	41.2	30,671.2	311.2	1.1	1.6	3.2	1.1	4.6	0
Scope (property damage in millions US\$)											
Sum	1528.2	69,506.3	7922.5	21,386.2	240,854.3	793.7	20.8	1065.3	451	877.7	0.8
Mean	23.2	406.5	50.8	689.9	1408.5	2.4	3	33.3	8.7	15.7	0.2
Median	10.8	37	5.8	78	37.5	0.3	0	2.7	0.1	0.2	0.2
Standard deviation	43.6	3382.8	146.2	1720.9	12,429.6	23.1	4.9	68.8	30.8	107	0.1
Normalized risk ^a (risks per TWh)											
Frequency	0.00001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0009	0.0917	0.0136		0.0072	0.0099	
Fatalities	0.0013	0.0041	0.0018	0.0235	0.0097	0.0350	0.0190		0.0048	0.0164	
Damages	0.0001	0.056	0.007	98,453	3,035,533	235,455	35,505		40,021	150,096	

^a Applies only to a smaller subsample of 1990–2013. N = 69 for oil, 15 for coal, 52 for natural gas, 11 for hydro, 57 for nuclear, 293 for wind, 5 for solar, 48 for biofuels, and 58 for biomass and geothermal, reported as a combined sector. Hydrogen is excluded from this subsample due to lack of data.
Source: Authors.

¹² « Il se trouve que pour Tchernobyl, il existe aussi une agence onusienne qui effectue exactement le même travail que le GIEC pour le climat, et cette agence s'appelle l'UNSCEAR » Jean-Marc Jancovici, Lettre ouverte aux journalistes qui vont évoquer Tchernobyl, et surtout à ceux qui les écoutent, avril 2006 actualisée en mai 2014

¹³ Burgherr & Hirschberg, 2014. Sovacool, Kryman et al, 2015

¹⁴ Source : Sovacool, Kryman et al, 2015

A. Les combustibles fossiles

Pour ce qui est des combustibles fossiles, il existe des enjeux bien plus graves encore que les accidents, aux premiers rangs desquels le changement climatique et la protection de la biodiversité. La lutte contre le changement climatique commande à elle seule leur disparition des mix énergétiques, à planifier en fonction de leur niveau d'émissions de gaz à effet de serre (sauf développement à grande échelle, aujourd'hui peu probable, du captage et stockage géologique du CO₂¹⁵). Leur accidentologie mérite cependant d'être rappelée.

Les accidents liés à trois sources d'énergies fossiles (pétrole, gaz fossile, charbon) ont provoqué 211 529 décès entre 1874 et 2014 (Sovacool, Kryma Energy-related Severe Accident Database et al, 2015). Ce nombre très élevé porte certes sur une période très longue, presque un siècle et demi, mais il est probable qu'il soit sous-estimé du fait de l'existence historique d'installations isolées ou d'infrastructures de transport peu exposées au public.

Pour le pétrole¹⁶, la mortalité totale due aux accidents dans sa chaîne d'exploitation et celle de ses produits dérivés sur la même période est de 14 432 décès, les dommages s'élèvent à plus de 69 milliards de dollars¹⁷ (Sovacool, Kryman et al, 2015). Les phases de transport et de stockage¹⁸ concentrent 75,4% des accidents (Burgherr & Hirschberg, 2014). Les accidents de tankers avec déversements de plus de 700 tonnes sont cependant en forte diminution ces dernières années. Selon l'Organisation maritime internationale, ils sont passés de 25 par an en 1970-1979 à 3,7 en 2000-2008. L'attention principale se porte aujourd'hui sur la sécurité des plateformes pétrolières.

Ces accidents peuvent occasionner des dommages extrêmement graves sur l'environnement et la biodiversité. Le recouvrement du fonctionnement normal d'un écosystème marin touché par une marée noire dure entre 2 et 10 ans, voire plusieurs décennies dans le cas d'écosystèmes fragiles comme les mangroves ou les marais salants¹⁹. L'accident de la plate-forme Deepwater Horizon en 2010 dans le golfe du Mexique est un cas particulièrement emblématique : l'état de santé des coraux, florissant avant la marée noire, demeure inquiétant et les scientifiques estiment qu'il faudra des décennies voire des siècles pour leur rétablissement²⁰.

Pour le gaz naturel²¹, 156 accidents de production et de transport sont répertoriés entre 1874 et 2014 pour une mortalité totale de 2 610 décès et des dommages économiques d'environ 8 milliards de dollars. Les accidents relèvent majoritairement d'incendies, d'explosions de navires transportant du gaz naturel liquéfié (GNL) suite à des collisions ou d'échouages.

¹⁵ La France envisage dans sa stratégie nationale bas-carbone une utilisation du CSC dans des secteurs autres que l'énergie, comme la sidérurgie ou la fabrication du ciment.

¹⁶ Qui demeure une source d'énergie largement utilisée, atteignant environ 31% de la demande énergétique totale IEA (2020), *Global Energy Review 2019*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019>. (ci-après : IEA, 2020)

¹⁷ US\$: valeur de 2013.

¹⁸ Incendies ou explosions touchant les infrastructures de transport ou de stockage, que ce soit des pipelines, les navires pétroliers ou centres de stockage.

¹⁹ Kingston, Paul F. "Long-Term Environmental Impact of Oil Spills." *Spill Science & Technology Bulletin*, vol. 7, no. 1, 2002, pp. 53–61, [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00051-8](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00051-8).

²⁰ Rapport, publié par l'association Oceana en avril 2020 à l'occasion du dixième anniversaire de la catastrophe.

²¹ Qui pèse 23% dans la demande totale d'énergie en 2019 (IEA, 2020)

Pour le charbon²² et ses produits dérivés, les accidents liés à la chaîne d'exploitation représentent sur la période 9 611 décès pour des dommages se montant à plus d'1,5 milliards de dollars. Le profil des accidents est très différent de ceux du pétrole et du gaz. L'étape d'extraction et d'exploration occasionne le plus d'accidents graves en concentrant 99 % des incidents et 98,2 % des décès. En effet, les mines souterraines présentent toujours des risques d'inondations, d'incendies ou d'explosions liés à des percées de poches de méthanes ou à des « coups de poussières ». L'essentiel des accidents entre 1970-2008 intervient en Chine (90 %) (Burgherr & Hirschberg, 2014), tandis que le nombre d'accidents dans les pays de l'OCDE²³ est beaucoup plus limité (42 accidents représentant 1 292 blessés).

B. Le nucléaire

Un accident nucléaire peut prendre la forme d'une réaction en chaîne hors de contrôle, avec un très fort dégagement de chaleur qui ne permet plus le refroidissement. Des exemples sont l'incendie catastrophique du graphite (modérateur) à Tchernobyl, et la défaillance des systèmes de refroidissement conduisant à une fusion du cœur comme à Three Mile Island ou Fukushima. Cela peut conduire à un rejet plus ou moins massif d'éléments radioactifs dans l'environnement, produisant des rayonnements ionisants nocifs pour les populations, la faune et la flore.

Les risques associés à la production d'énergie nucléaire²⁴ donnent lieu à d'importantes controverses. 173 accidents graves sont intervenus dans la filière nucléaire entre 1950 et 2014, entraînant 4 803 décès²⁵. Trois d'entre eux ont tué plus de 100 personnes (Tchernobyl, Kychtym²⁶ et Fukushima). Pour y voir clair, il convient d'analyser successivement la littérature scientifique sur cette question et le bilan des deux accidents majeurs de Tchernobyl et de Fukushima.

L'accident de Tchernobyl a eu lieu le 26 avril 1986 en Ukraine. Le réacteur n°4 a enregistré une augmentation incontrôlée de la réaction nucléaire lors d'un essai technique, conduisant à l'incendie du graphite qui constituait l'essentiel de la masse du cœur du réacteur, émettant dans l'atmosphère une grande partie de son inventaire radioactif. La centrale a produit des rejets radioactifs atmosphériques en continu pendant dix jours. L'accident a été suivi de l'évacuation de 270 000 personnes, l'établissement d'une zone d'exclusion de 30 km, toujours valide, et un coût total sur trente ans estimé par l'IRSN entre 300 et 500 milliards de dollars²⁷. Selon le rapport de l'ONU de 2006 cité supra, qui fait foi, l'accident pourrait avoir entraîné jusqu'à 9 000 décès par cancer²⁸.

²² 26% de la demande énergétique mondiale (IEA, 2020).

²³ Avant 1970 il en allait probablement autrement

²⁴ 5% de la demande énergétique mondiale en 2019 (IEA, 2020)²⁴.

²⁵ Sovacool, Andersen et al, 2015, cf. supra.

²⁶ Contamination radioactive le 29 septembre 1957 à la suite d'une explosion au complexe nucléaire Maïak, une usine de retraitement de combustible nucléaire située près de la ville d'Oziorsk en Union soviétique.

²⁷ comprenant les travaux de réhabilitation et les traitements : <https://www.irs.fr/foire-questions/faq-accident-tchernobyl#:~:text=Combien%20la%20catastrophe%20de%20Tchernobyl,%C3%A9lectrique%20et%20les%20co%C3%BBts%20sanitaires>

²⁸ Dans la BD « Le monde sans fin » co-écrite par JM. Jancovici et publiée en 2021, l'accident de 1986 se résume pourtant à « une trentaine de morts à bref délai » et à « 6 000 personnes » qui ont développé un cancer de la thyroïde, « qui se traite bien ».

L'accident de Fukushima a eu lieu le 11 mars 2011 à la centrale Fukushima-Daiichi. Un séisme puis un tsunami ont causé la perte du système d'alimentation électrique et des circuits de refroidissement des réacteurs, entraînant la fusion du cœur de trois réacteurs. Cet enchaînement d'événements montre qu'en matière d'accident, les hypothèses extrêmes ne sont jamais à écarter. L'accident a entraîné l'évacuation de plus de 150 000 personnes, la création d'une zone d'exclusion de 20 km autour de la centrale et un coût des indemnisations et des travaux de démantèlement et de dépollution estimé à plus de 167 milliards d'euros²⁹.

Les effets sanitaires ne sont pleinement mesurables que sur longue période, ce qui constitue une des difficultés de mesure. Ainsi, pour Fukushima, malgré la multiplicité des études mentionnées supra pour mesurer les effets des émissions radioactives, de nombreuses incertitudes demeurent. Les études épidémiologiques montrent une légère recrudescence des cancers de la thyroïde, mais qui ne semble pas en première analyse très différente de celle enregistrée dans d'autres régions du Japon.

Aux effets directs des radiations, il faut ajouter les décès et les conséquences sanitaires découlant de mesures de relocalisation³⁰, c'est à dire liés à la perturbation de la vie, à la perte de logement et de moyens de subsistance, à la stigmatisation sociale. Ces aspects ne sont pas toujours intégrés dans ces rapports, alors qu'ils sont importants pour comprendre les conséquences plus larges de l'accident sur la santé³¹. Les études scientifiques évaluent à environ 2 000 jusqu'à aujourd'hui les décès attribuables à l'évacuation due aux émissions de radioactivité³² à Fukushima.

Les conséquences précises sur la faune et la flore sont difficiles à établir. La quantité totale des rejets atmosphériques est incertaine car il n'y a eu aucune mesure directe des rejets. Cependant la contamination du milieu marin a été très importante dans les premières semaines après l'accident³³. Des altérations de la taille des populations d'espèces, des capacités reproductrices, l'apparition de mutations et de déséquilibres hormonaux ont été observées, mais l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) conclut, dans une revue de la littérature scientifique publiée en 2021, au besoin de poursuivre les études pour pouvoir en établir les effets certains³⁴.

C. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables considérées ici regroupent l'hydroélectricité, l'éolien, le solaire, les biocarburants, la biomasse, le biogaz et la géothermie. Elles présentent des risques d'accidents très disparates (Sovacool, Kryman et al, 2015).

²⁹ Source: estimation du gouvernement Japonais

³⁰ Waddington et al, « J-value assessment of relocation measures following the nuclear power plant accidents at Chernobyl and Fukushima Daiichi », *Process Safety and Environmental Protection* Volume 112, Part A, November 2017.

³¹ Par exemple dans les rapports de l'UNSCEAR, qui considère qu'ils ne font pas partie de son mandat

³² J-value assessment of relocation measures following the nuclear power plant accidents at Chernobyl and Fukushima Daiichi - ScienceDirect

³³ Ensuite, une barrière hydraulique a été mise en place pour empêcher l'écoulement des eaux souterraines contaminées vers la mer et l'ensemble des eaux contaminées a été stocké. Après traitement, leur rejet progressif est aujourd'hui initié ; il durera plusieurs dizaines d'années.

³⁴ Les effets sur les écosystèmes résultant des accidents de Tchernobyl et de Fukushima (irsn.fr)

Les statistiques concernant les conséquences de ces accidents sont fortement impactées par un seul accident impliquant l'hydroélectricité, la rupture du barrage de la centrale Shimantan en Chine suite au typhon Nina le 8 août 1975, qui a entraîné la mort de 171 000 personnes et 9 milliards de dollars de dommages économiques³⁵. Sur la base de ces chiffres, l'hydroélectricité³⁶ présente un profil à haut risque, alors que les accidents impliquant des centrales hydroélectriques ne représentent que 2,9 % du nombre total d'accidents relevés entre 1874 et 2014.

Selon la même étude, l'éolien (terrestre et en mer) représente 126 morts et 793 millions de dollars de dégâts entre 1874 et 2014. Ceux-ci proviennent principalement de défaillances d'hélices, d'incendies, de tempêtes sévères, d'erreurs de maintenance ou d'intrusions civiles occasionnant des chutes mortelles. Ces accidents ne représentent qu'une faible part du total des accidents mais ils représentent un poids plus important lorsque ces données sont rapportées aux TWh produits. La visibilité et le caractère récent des parcs éoliens ont probablement permis à ces accidents d'être relevés de manière plus transparente que dans d'autres filières.

Pour la biomasse, comprenant la valorisation énergétique de déchets et de matières végétales en chaleur, biogaz ou autre (56 accidents graves au total), les principaux risques sont des incendies ou explosions, se concentrant dans les installations de stockage et de production d'énergie, par causes d'auto-échauffement des matières organiques, de surchauffe d'appareils ou de frictions. Mais le développement de la méthanisation étant limité jusqu'en 2014, la base statistique est trop limitée pour en tirer des conclusions pour l'avenir de cette filière spécifique.

Le solaire, intégrant le photovoltaïque (PV), le solaire thermique et le solaire thermodynamique à concentration, a un profil accidentel faible. Il est particulièrement faible pour le PV, où les seuls accidents répertoriés relèvent de l'étape d'installation, avant la mise en route opérationnelle des panneaux³⁷, tandis que le solaire thermique présente des risques supplémentaires en cas de fuites de certains fluides.

Enfin la géothermie n'est associée à aucun accident mortel (Sovacool, Andersen et al, 2015). Cela est dû notamment à une capacité actuelle limitée de production et au manque de données sur les zones de développement intensif de cette énergie (par exemple les Philippines et l'Indonésie). Mais la constitution récente d'une base de données internationale d'émission de sulfure d'hydrogène en contexte géothermique a permis de dénombrer en soixante ans dans le monde 32 cas qui ont fait 18 morts³⁸.

En raison de leur caractère décentralisé et de l'utilisation de matières peu dangereuses, les accidents liés aux énergies renouvelables³⁹ comme l'éolien, le solaire, la géothermie présente en général un faible impact environnemental. Ce n'est pas le cas de l'hydroélectricité, avec un risque majeur de destruction d'écosystèmes en cas de rupture d'un barrage, même si, sur le long terme, un tel évènement constituerait un retour au contexte hydrologique initial.

³⁵ C'est ce qui fait dire à Jean-Marc Jancovici que le nucléaire est largement moins mortel que l'hydroélectricité, (France 5, 2022).

³⁶ 3% de la demande énergétique mondiale en 2019, (IEA, 2020)

³⁷ Ce constat peut aussi s'expliquer par le caractère récent du développement du solaire.

³⁸ <https://www.ineris.fr/fr/note-synthese-veille-risques-induits-h2s-geothermie-profonde>

³⁹ Il est rappelé que cette note se concentre sur les risques d'accident et non sur les impacts environnementaux en continu, bien connus et documentés pour les différentes sources d'énergie

III. Du bon usage des risques d'accidents de production dans les choix énergétiques

Il est nécessaire de replacer ces données dans leur contexte en examinant les impacts non ou mal répertoriés (ex : biodiversité) et les progrès réalisés en matière de sûreté et de protection. L'objectif est d'en faire un élément explicité de manière rigoureuse au moment des arbitrages et des choix, ceux-ci relevant in fine des citoyens et de leurs représentants.

A. La nécessité de prendre plusieurs précautions

Il est utile de disposer d'une analyse historique précise, en gardant en mémoire les limites de données statistiques portant sur plus d'un siècle. Il est ainsi indispensable de prendre en compte la localisation géographique des accidents, la tendance d'évolution des dernières années et l'amélioration des mesures de prévention. C'est le cas dans tous les domaines, qu'il s'agisse des risques liés aux mines de charbon, aux grands barrages ou aux installations nucléaires.

Le nombre de décès suite à des accidents dans le passé constitue une indication, mais celle-ci doit être fortement relativisée car il n'est pas toujours connu. Comme le reconnaît la littérature scientifique, d'autres conséquences dommageables pour la société doivent aussi être prises en compte. Par exemple, même s'ils sont plus difficiles à intégrer dans une analyse comparative quantitative, des facteurs comme les effets indirects sur la santé sont importants. Les conséquences d'un accident peuvent affecter durablement la vie de personnes sans déboucher sur un décès immédiat, et nécessiter un suivi médical prolongé.

L'analyse doit désormais couvrir les risques affectant le vivant dans son ensemble, humain comme non humain. On observe de plus en plus cette interdépendance, notamment lors de la crise de la Covid 19. Lors de cet épisode, il a été facile de constater combien les atteintes portées à la nature et à la biodiversité menacent l'espèce humaine dans son mode de vie, sa santé, voire son existence même. A la manière de l'approche de Sovacool, Kryman et al, (2015) il faudrait alors systématiser la caractérisation des impacts environnementaux d'un accident dans le calcul des dommages économiques ou dans le modèle européen des risques industriels.

Il est enfin impératif de distinguer les accidents en fonction de la portée géographique et dans le temps de leurs impacts. Certains d'entre eux ont des effets locaux et ponctuels, et ne peuvent pas avoir d'autres répercussions dans l'espace ou le temps. D'autres peuvent avoir au contraire des effets à très large échelle, catastrophiques et de long terme, comme une grave marée noire ou un accident nucléaire. La grille d'analyse doit prendre en compte ces différences

B. Une utilité qui ne réside pas là où on le pense généralement

Dans le débat public, les données historiques sont généralement utilisées pour justifier des probabilités d'occurrence pour l'avenir. Puisqu'il y a eu dans le passé telles ou telles données sur le nombre d'accidents ou leur impact dans une filière énergétique, il faudrait en déduire que cette

série statistique va se prolonger et qu'il faut donc anticiper la même proportion d'accidents. Cette démarche est parfois tenue de manière particulièrement caricaturale⁴⁰.

Il est vrai que les calculs de probabilité des événements géologiques à venir comme les séismes sont bien appréhendés à partir de l'historique, de même pour les crues (même si le changement climatique rebat les cartes...). Ce qui fausse les données dans de telles extrapolations est plutôt que les installations et pratiques d'exploitation changent, elles s'améliorent et progressent en termes de sécurité.

L'analyse historique peut être utile dans une logique d'assurance. C'est un des éléments permettant de contribuer à l'équilibre des régimes de couverture des risques - Ceci ne vaut pas dans les cas où aucune régularité ne peut être observée, que ce soit pour les accidents ou leur impact -. Elle reste en tous cas indispensable en vue d'une intégration dans la démarche de sûreté, qui conduit à définir les mesures de prévention. C'est le cas par exemple pour les barrages hydroélectriques : le fait que les accidents soient très rares, mais potentiellement dévastateurs, mérite d'être intégré dans les méthodes de construction, de prévention et de contrôle. Les statistiques historiques dans ce domaine doivent nous rappeler que le risque n'est pas nul pour cette source d'énergie, et qu'il doit être pris en compte. Plus généralement, il n'existe jamais de risque zéro, la conjugaison d'événements extraordinaires pouvant toujours aboutir à des catastrophes. C'est le cas en particulier des actions liées à des conflits armés pouvant mettre en danger n'importe quelle installation.

L'utilité d'une telle analyse des événements du passé est elle aussi incontestable en matière d'énergie nucléaire. Dans les choix à faire, l'analyse des données historiques nous rappelle que, quelle que soit la vigilance dans notre pays de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR), il ne serait pas sérieux de passer sous silence les caractéristiques des risques d'accident nucléaire. Ceux-ci peuvent avoir des conséquences directes et importantes. Leurs effets peuvent être graves et sur longue durée en matière sanitaire et d'habitabilité sur une portion non négligeable du territoire, et ils sont potentiellement très coûteux. Ce facteur constitue à l'évidence un handicap par rapport à des sources décentralisées et décarbonées, avec un impact d'accidents potentiels qui resterait local et de courte durée. Il nécessite donc une attention particulière et une démarche de prévention systématique.

⁴⁰ Un « spécialiste » de ce genre d'argumentation est JM Jancovici, qui n'hésite pas par exemple à déclarer, sans autre précision, que 'Le nucléaire tue moins que les sucreries' (France 5, septembre 2022). Il est à l'origine de plusieurs déclarations du même style sans que les personnes qui l'interviewent aient les moyens d'une vérification rigoureuse. Autre exemple, cet extrait d'un article paru sur le site Slate en 2021 qui illustre bien les raccourcis aboutissant à la conclusion : « Si l'on s'en tient au bilan humain, l'exploitation du pétrole et du charbon ont causé bien davantage de victimes que le nucléaire (...). Cela ne signifie pas que le nucléaire n'est pas dangereux. Les incidents qui émaillent son exploitation depuis les années 1950 en témoignent. Mais il s'agit d'une des sources d'énergie les plus sûres au monde. »

Conclusion

Les choix de mix énergétiques et électriques dépendent aussi de nombreux autres facteurs, mais les risques d'accidents graves ne peuvent et ne doivent pas être passés sous silence et (ou) balayés d'un revers de main. Pour déterminer le contenu d'un mix énergétique et électrique décarboné, ils doivent être rigoureusement évalués, en évitant de se prêter à des comparaisons hâtives ou mal fondées. L'analyse des données historiques dans ce domaine est nécessaire, non pas pour dégager des probabilités pour l'avenir, mais pour caractériser les risques et les impacts possibles.

L'important est que cette analyse fasse partie des données à prendre en compte de manière explicite et transparente au moment des choix d'investissement et de prévention. Pour cette raison, il est crucial que la sûreté soit gérée de manière vraiment indépendante, avec une expertise qui le soit elle aussi réellement, et dans des processus garantissant vis-à-vis des citoyens la transparence et l'exhaustivité des informations données. Leur prise en compte finale relève bien sûr d'une appréciation démocratique par les citoyens et leurs représentants. Mais elle doit se fonder sur une gouvernance garantissant leur confiance.

La diversité des modalités des accidents possibles et de leurs fréquences plaide aussi pour une diversification du bilan énergétique, afin de ne pas dépendre d'une seule filière, de ses incertitudes et de ses risques, d'où l'importance d'avoir en tête le facteur de risques d'accident pour construire un mix énergétique le plus résilient possible.