

Les centrales nucléaires sont-elles sûres ?

Hansruedi Völkle, Fribourg

Die Sicherheit bei der Stromgewinnung mittels Kernenergie ruht im Wesentlichen auf fünf Pfeilern: Die technische Sicherheit der Kernanlagen, die Sicherheitskultur beim Betrieb der Anlagen, die Aufsicht durch die Behörden, der Notfallschutz und schließlich die sichere Endlagerung der dabei entstehenden radioaktiven Abfälle. Der Text gibt einen Überblick über die einzelnen Elemente, die für die Sicherheit ausschlaggebend sind. Nebst der nuklearen Sicherheit sind dabei auch weitere Kriterien zu berücksichtigen, wie etwa die Auswirkungen auf Menschen und Umwelt, der Material- und Landbedarf, der Strompreis, die Energiedichte, die Nachhaltigkeit sowie, wie lang die vorfügbaren Brennstoffreserven noch reichen.

La sûreté de la production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire repose essentiellement sur cinq piliers : la sûreté technique des centrales nucléaires, la culture de sûreté lors de l'exploitation des centrales, la surveillance par les autorités, les mesures de protection pour les cas d'urgence et enfin le stockage sûr des déchets radioactifs qui en résultent. Le texte donne un aperçu des éléments individuels qui sont cruciaux pour la sûreté. Outre la sûreté nucléaire, d'autres critères doivent également être pris en compte, tels que l'impact sur l'homme et l'environnement, les besoins en matériaux et en terrains, les coûts de production de l'électricité, la densité énergétique, la durabilité et la durée des réserves de combustible disponibles.

The safety of generating electricity from nuclear energy rests essentially on five pillars: the technical safety of the nuclear plants, the safety culture when operating the plants, supervision by the authorities, emergency response and finally the safe disposal of the resulting radioactive waste. The text provides an overview of the individual elements that are crucial for safety. In addition to this, other criteria must also be considered, such as the impact on people and the environment, material and land requirements, the price of electricity, energy density, sustainability and how long the available fuel reserves will last.

1. Remarques préliminaires

La sûreté est toujours relative : voyager en avion est plus sûr que voyager en voiture ; en train, c'est encore plus sûr qu'en avion. Le plus sûr serait de toujours rester chez soi, même si des accidents s'y produisent également. À la longue, ce n'est pas praticable, car cela nous limiterait trop dans la vie quotidienne, par exemple, dans l'exercice d'une profession, pour l'école et la formation, pour les contacts sociaux, pour les achats, pour la culture, le sport, les loisirs, les vacances, entre autres.

Les installations techniques complexes, telles que les centrales nucléaires, ont un potentiel énergétique élevé, mais aussi un potentiel de danger. Leur utilisation sûre n'est possible que si les exigences de sûreté les plus élevées sont satisfaites et si toutes les personnes impliquées dans la conception, l'étude de projet, la construction, l'exploitation et la surveillance prennent leurs responsabilités au sérieux. Les avantages de l'exploitation d'une telle installation doivent donc être mis en relation avec les risques pour l'homme et l'environnement.

Dans le cadre de ces réflexions, il faut partir du principe que le risque zéro n'existe pas. Le risque posé par la production d'électricité nucléaire doit donc être comparé à celui posé par la production d'électricité à partir d'autres sources d'énergie. Outre la sûreté technique, il convient d'évaluer toute une série d'autres paramètres, notamment :

- l'impact sur les personnes et l'environnement, tant en fonctionnement normal qu'en cas d'incident ou d'accident ;
- les émissions de CO₂ lors de la construction, de la production de combustible, de l'exploitation et du démantèlement ;
- les quantités de matières premières nécessaires pour la construction, l'exploitation, le démantèlement, la gestion des déchets, ainsi que, pour les matériaux et les résidus, la possibilité ou non de les recycler ;
- l'espace et les surfaces nécessaires pour l'installation, l'exploitation d'une centrale et pour la production de combustible ;
- les coûts de l'électricité, en incluant également les dépenses liées au stockage de l'électricité, au démantèlement et à la gestion des déchets ;
- la durabilité de l'ensemble du processus de production d'électricité ;
- le temps que dureront les réserves de combustibles, disponibles aujourd'hui et dans un avenir proche ;
- la durée d'exploitation et le temps d'amortissement prévus jusqu'à la fermeture de l'installation ;
- l'acceptation politico-sociale et la faisabilité technique ;
- la dépendance vis-à-vis de l'étranger, c'est-à-dire le souhait ou la nécessité pour le pays concerné de disposer d'un approvisionnement énergétique autarcique, c'est-à-dire indépendant de l'étranger.

Du point de vue de la conception, chaque dispositif ou installation technique correspond toujours au savoir-faire et à l'état des connaissances scientifiques et techniques au moment de l'élaboration du projet et de la construction. Les progrès techniques, les nouvelles connaissances ou les évolutions ne peuvent pas être anticipés. Il est certes possible, au cours de la durée d'exploitation, de renouveler ou de remplacer la plupart des composants d'une installation à l'exception, pour les centrales nucléaires, de la cuve sous pression du réacteur. Cependant, étant donné que la conception d'une installation reste toujours au niveau technique de l'époque du projet, elle deviendra un jour obsolète et la poursuite de son exploitation ne sera plus rentable. Si, par exemple, tous les composants d'une locomotive à vapeur sont remplacés, elle redevient certes une locomotive à vapeur neuve, mais elle reste basée sur une technologie, une sûreté et une efficacité datant du début du 20^e siècle.

Afin d'en tenir compte autant que possible, les centrales nucléaires suisses de la génération II ont été, depuis leur construction, continuellement mises à niveau et modernisées, tant sur le plan de l'exploitation que de la sûreté. Cette adaptation à l'état actuel des connaissances scientifiques et techniques maintient les centrales en bon état et doit permettre de les exploiter d'une façon sûre pendant 60 à 70 ans, voire plus. On pourrait donc les qualifier de génération II+.

Un autre aspect important est que, en grande partie, les incidents et les accidents sont dus à des erreurs humaines ou à des comportements inadéquats. Pour les accidents de la route, par exemple, cette proportion atteint presque 90 %. L'erreur humaine peut survenir dès la planification, la conception et la construction d'une installation ou lors du choix des matériaux et des technologies. D'autres causes peuvent provenir de l'entretien insuffisant de l'installation, du non-respect des prescriptions de travail et des listes de contrôle, de l'absence de contrôles de sûreté ou de leur exécution incomplète, de lacunes dans la mise en œuvre de mesures de rééquipements, etc. Des erreurs humaines à différents niveaux – c'est-à-dire au niveau de l'exploitant, des autorités et du gouvernement¹ – ont été à l'origine des deux catastrophes nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima. Elles auraient pu être évitées si les règles de sûreté et de conformité les plus élémentaires avaient été respectées.

2. Les principaux éléments de sûreté des centrales nucléaires²

La sûreté des centrales nucléaires repose sur cinq piliers qui sont expliqués dans les chapitres 3 à 7 et résumés dans le tableau 1. Pour une exploitation sûre des centrales nucléaires, les objectifs de protection nucléaire énumérés ci-dessous doivent être remplis. Dans ce contexte l'application des principes des barrières multiples³ et de la défense en profondeur (*Defence in Depth*⁴) sont essentiels.

1. La réaction nucléaire en chaîne⁵ doit pouvoir être arrêtée à tout moment ; il ne doit donc pas advenir de criticité incontrôlée (*c'est-à-dire une réaction nucléaire en chaîne qui s'auto-entretient*) ou d'excursion de puissance du réacteur (*augmentation de la puissance du réacteur au-delà de la limite de dimensionnement*).
2. Le réacteur doit toujours pouvoir être refroidi⁶ ; il ne doit donc pas y avoir de surchauffe ni de destruction du réacteur (*par exemple, par la fusion du cœur par suite d'une surchauffe*).
3. La radioactivité doit toujours être confinée⁷ et tenue à l'écart de l'environnement (*étanchéité vers l'extérieur*).
4. Objectif de protection supérieur, dérivé des objectifs de protection 1 à 3 : il ne doit pas y avoir d'irradiation inadmissible des personnes (*tant du personnel de l'exploitation que de la population vivant à proximité*) et de l'environnement. En fonctionnement normal, les rejets de radioactivité par l'intermédiaire des effluents gazeux et des eaux usées doivent être surveillés et faire l'objet d'un bilan à l'intention des autorités. Un vaste programme de mesure de la radioactivité et du rayonnement doit être mis en œuvre aux alentours des installations, sous le contrôle des autorités de surveillance.

3. Sûreté technique des installations²

Toute installation technique, qu'il s'agisse d'un chemin de fer, d'un avion, d'un pont, d'un barrage ou même d'une centrale électrique entière, nécessite un entretien régulier, des contrôles de fonctionnement et de sûreté et, le cas échéant, des rééquipements, afin de garantir sa sûreté et son bon fonctionnement. Voici ce qu'il en est :

1. il convient d'éviter les incidents, mais aussi les écarts, même minimes par rapport à une utilisation conforme, provoqués, par exemple, par l'usure, l'abrasion, la fatigue des matériaux ou la défaillance d'un composant ;
2. l'installation doit être adaptée autant que possible à l'état de l'évolution technique et, le cas échéant, faire l'objet d'un rééquipement en matière de sûreté ;
3. l'expérience acquise lors de l'exploitation d'installations similaires doit être prise en compte, par exemple, par le biais d'un échange régulier d'expériences avec les exploitants d'installations similaires, ainsi qu'avec les autorités de surveillance et les fabricants de réacteurs ;
4. les perturbations et les dommages résultant d'un comportement humain erroné doivent être évités autant que possible ; cela nécessite une automatisation poussée de la surveillance et du pilotage, complétée par une tolérance élevée de l'installation envers les erreurs humaines.

Dans les centrales nucléaires, l'application systématique des barrières multiples et du principe de la sûreté inhérente (*principle of fail-safe*) est pertinente en matière de sûreté, tout comme la redondance multiple, la diversité, ainsi que la séparation spatiale de tous les composants essentiels en termes de sûreté et, finalement, un confinement en acier et un bâtiment réacteur en béton armé. La maîtrise des incidents nécessite : des systèmes de refroidissement d'urgence, des dispositifs de recombinaison catalytique des gaz détonants,⁸ un système de décompression avec filtre (*venting*) de l'enceinte de confinement ; les réacteurs de la génération III ont en outre des bacs de rétention pour recueillir le combustible nucléaire fondu (*core catcher*).

L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) à Vienne propose aux États membres des contrôles de sûreté de leurs installations nucléaires effectués par des experts neutres. De tels examens (missions OSART) fournissent aux exploitants un regard extérieur neutre et une évaluation de leurs installations par rapport à l'état international de la science et de la technique. Ils mettent en évidence d'éventuels points faibles tant au niveau technique qu'au niveau du fonctionnement de l'exploitation. Ils permettent ainsi une amélioration et un perfectionnement continus de l'installation et de l'exploitation, et donc de leur sûreté. Il incombe ensuite à l'exploitant et aux autorités concernées de veiller à ce que les améliorations proposées par les experts soient également mises en œuvre. La catastrophe du réacteur de la centrale de Fukushima-Daiichi, déclenchée le 11.3.2011 par un tsunami, aurait vraisemblablement pu être évitée si de telles missions OSART avaient été menées et si les améliorations qu'elles auraient certainement proposées, avaient

été mises en œuvre (par exemple, protection contre les hautes eaux, *venting*, recombinaison H₂, refroidissement d'urgence, ...).

Aspects de sûreté pour les nouvelles générations de réacteurs²

Le développement des réacteurs nucléaires vise à améliorer encore la sûreté. Pour ce faire, il est notamment tenu compte de l'expérience acquise au cours des quelque 20'000 années-réacteurs d'exploitation des centrales nucléaires dans le monde, ainsi que des résultats des incidents et des accidents. Citons quelques principes mis en œuvre dans ce contexte :

- *Autarcie* : il s'agit du découplage et aussi de l'indépendance d'une alimentation de secours (prête à fonctionner) et/ou de générateurs diesel de secours bunkerisés.
- *Autonomie* : il s'agit d'éliminer, dans la mesure du possible, le « facteur humain » comme source de graves erreurs.
- *Robustesse* : les dommages au cœur du réacteur et les rejets de radioactivité doivent être dissociés. Cela signifie qu'un endommagement du cœur du réacteur n'entraîne pas un rejet de radioactivité.
- Une forte *protection contre les influences externes* : par exemple, les phénomènes naturels, mais aussi contre le sabotage ou les actions terroristes; c'est le domaine de la sécurité nucléaire.
- Ces mesures doivent permettre de réduire la *probabilité d'une fusion du cœur* à 5×10^{-5} par an pour les réacteurs de génération II+ et à 5×10^{-6} par an pour les réacteurs de génération III et III+, et même jusqu'à près de 10^{-7} par an pour ceux de la génération IV et suivantes.

Les réacteurs de la génération III, en tant que développement de la génération II+, sont basés sur l'application de critères de sûreté passive et inhérente. Cela permet au réacteur de maîtriser lui-même la phase aiguë d'un accident grave sans nécessiter l'intervention du personnel et de limiter les conséquences de l'accident au périmètre de l'installation elle-même. La probabilité d'un rejet important et précoce (LERF : *Large Early Release Frequency*) de radioactivité doit être réduite à une fois tous les 10 millions d'années. Les autres éléments de sûreté sont : évacuation passive de la chaleur résiduelle, au moyen d'injections par gravité d'eau de refroidissement, soutenue par l'évaporation et la condensation, ainsi que par un grand volume de confinement, afin que les processus de réchauffement se déroulent lentement ; confinement avec double paroi pour résister aux chutes d'avion ; *core-catcher* (ou « cendrier ») pour capter de manière sûre les matières résultant d'une fusion du cœur ; séparation physique des systèmes de sécurité protégés, ainsi que d'autres caractéristiques de sûreté inhérente et passive.

Depuis quelques années, on parle de plus en plus de petits réacteurs modulaires, appelés *Small and Modular Reactors*.⁹ Leurs principaux avantages prévus, par rapport aux types de réacteurs utilisés jusqu'à présent, sont :

- la simplification de la construction ;
- l'intégration dans le réacteur de composants initialement externes ;
- la limitation des dimensions du circuit primaire, ce qui permet son montage dans l'usine de fabrication et une livraison pré-assemblée ;
- la simplification du système de sûreté, ce qui permet une plus grande sûreté passive ;
- la modularisation, qui permet une standardisation des composants et une homologation plus rapide ;
- plusieurs de ces petits réacteurs regroupés peuvent partager certains systèmes et composants, tels que l'enceinte de confinement, l'approvisionnement en combustible, les systèmes de gestion des déchets, les dispositifs de sûreté, ainsi que les systèmes auxiliaires, tels que la ventilation, les systèmes d'évacuation des gaz, le traitement de l'eau et du réfrigérant et la conversion de l'énergie (turbine, générateur et transformateur) ;
- une extension par étapes est possible, ce qui permet un financement plus avantageux et échelonné dans le temps ;
- la possibilité de transférer le combustible pendant le fonctionnement des autres réacteurs du groupe permet une gestion plus souple.

4. Culture de sûreté dans l'entreprise

Même dans les centrales nucléaires aujourd’hui hautement automatisées et tolérantes aux erreurs, l’homme reste la plus grande source d’erreurs.¹⁰ La culture de sûreté et le climat de travail revêtent donc une grande importance. Celle-ci commence dès la sélection et la formation des collaborateurs, complétée par un entraînement régulier, par exemple, pour les opérateurs de réacteurs sur des simulateurs, à l’instar des pilotes d’avions. Mais l’entretien des installations requiert également de grandes compétences et une prise de responsabilité. La culture de la sécurité exige un système de gestion de la qualité avec une certification des différents processus de travail, ainsi qu’une analyse et une documentation de tous les incidents et écarts par rapport à l’exploitation prévue. Sur cette base, des mesures peuvent être prises pour en permanence améliorer techniquement l’installation, son exploitation et la sûreté.

Dans la terminologie de la gestion de la qualité, on évite le mot « erreur », mais on parle plutôt de « non-conformités ».¹¹ Par exemple, lorsque les étapes de travail ou les contrôles sont abrégés, ou ne sont pas effectués comme le prescrivent les protocoles de certification, ou lorsque les paramètres d’analyse ne se situent pas dans la plage de valeurs pour un fonctionnement conforme aux prescriptions. L’expérience montre que trop ou trop peu de routine peut conduire à des non-conformités. Par conséquent, les processus de travail et les contrôles doivent être décrits avec précision et exécutés suivant les listes de contrôle, voire, pour les activités importantes, par deux personnes, en appliquant le principe du double contrôle. La culture de la sûreté exige de tous les collaborateurs, de la direction au personnel de nettoyage, un sens élevé de la qualité et de la responsabilité ; une culture d’entreprise respectée, la reconnaissance du travail par les supérieurs et une rémunération appropriée y contribuent largement.

L’aviation civile est citée en exemple pour la mise en œuvre d’une technologie qui a vu sa sûreté être considérablement améliorée au cours des dernières décennies, grâce à une évaluation systématique de tous les incidents, comme le montre la figure 1.

5. Le rôle des autorités d’autorisation et de surveillance

Un autre élément important de la sûreté est le rôle de l’autorité ; en général il y a un organe qui autorise la construction et l’exploitation d’une centrale nucléaire et un autre – indépendant du premier – qui surveille et contrôle son exploitation. En Suisse, ce dernier est l’IFSN, l’Inspection fédérale de la sûreté nucléaire. Elle contrôle si les conditions prescrites dans l’autorisation de construction et d’exploitation sont remplies et si les lois, ordonnances et les directives correspondantes – également en ce qui concerne la sécurité professionnelle – sont respectées et qu’ainsi une exploitation sûre soit assurée. L’autorité de surveillance effectue régulièrement des inspections et des contrôles indépendants dans et autour de l’installation, évalue entre autres les mesures de rééquipement et autorise ou refuse le démarrage de l’installation.

Pour cette tâche importante, l’autorité doit être, d’une part, professionnellement compétente et, d’autre part, indépendante sur le plan politique et économique, et, surtout, elle ne doit pas être corruptible. Il doit exister une relation de confiance ouverte et collégiale avec l’exploitant de l’installation, mais pas de « copinage ». Il est, par exemple, du devoir d’une autorité de surveillance de veiller à ce que les recommandations et les améliorations découlant des expertises d’experts de l’AIEA et des contrôles de sûreté soient mises en œuvre dans les délais.

6. La protection en cas d’urgence

Étant donné que la sûreté n’est jamais garantie à 100 % et que des pannes et des accidents ne peuvent pas être totalement exclus, une protection d’urgence appropriée est nécessaire pour les installations actuelles. Tous les acteurs importants doivent être impliqués dans la protection d’urgence. Des exercices d’urgence réguliers, aussi transfrontaliers, servent à vérifier le fonctionnement et à optimiser tous les processus de la protection d’urgence, ainsi qu’à renforcer la coopération entre tous les acteurs. Une étroite relation entre les exploitants et les autorités techniques et politiques est ici essentielle.

En cas d'urgence radiologique, des pronostics de dose sont calculés à l'aide de modèles à partir des résultats de la surveillance de l'environnement – complétés par les données de l'installation et, dans la mesure où elles sont connues, par les données sur les rejets de radioactivité par suite d'un accident. En Suisse, à l'aide du Plan de mesures à prendre en fonction des doses (*Dosismassnahmenkonzept*), les mesures adéquates sont ensuite prises pour protéger la population. Cette démarche est un processus continual qui nécessite une évaluation permanente de la situation et des mesures à prendre qui en découlent. L'objectif est de revenir à une situation normale, éventuellement provisoirement. Les prescriptions correspondantes prévoient ici des valeurs de référence (*Richtwerte*) de dose qui peuvent être adaptées en fonction de l'évolution de la situation radiologique. Il est donc concevable qu'un jour ou dans une région donnée, d'autres valeurs indicatives et d'autres mesures soient décidées, différentes de celles qui étaient en vigueur la veille ou dans une autre région. Communiquer cette procédure dynamique à la population de manière compréhensible est un défi particulier !

7. La gestion des déchets radioactifs issus de l'énergie nucléaire²

L'utilisation de l'énergie nucléaire génère des déchets et des résidus dont on doit se débarrasser s'il n'est pas possible de les recycler. Il en va de même pour de nombreux autres processus techniques ou chimiques. Les déchets radioactifs doivent être gérés de telle sorte qu'ils ne puissent mettre en danger ni l'homme ni l'environnement, et cela aussi dans un avenir lointain (*la Suisse parle ici de stockage en couches géologiques profondes*). C'est un défi de taille, tant sur le plan technique et scientifique que sur le plan politique et sociétal. Il s'agit ici de périodes qui dépassent notre horizon temporel, de l'ordre de cent mille ans, c'est-à-dire jusqu'à ce que la radioactivité des déchets ait baissé à un niveau correspondant à celui des minéraux d'uranium naturels.

Le retraitement du combustible nucléaire usé – toutefois à l'heure actuelle en raison d'une décision politique, ce n'est pas une option pour la Suisse – réduirait cette durée d'un facteur dix. La transmutation¹² des déchets à vie longue ou fortement radioactifs, si elle était mise en œuvre industriellement, apporterait un raccourcissement supplémentaire de deux à trois ordres de grandeur. Selon la procédure prévue aujourd'hui, les éléments de combustibles usés, après une phase de refroidissement de 20 à 30 ans dans le dépôt intermédiaire (*Zwilag*) situé à côté de l'Institut Paul Scherrer, devront être transférés sans retraitement dans le dépôt géologique profond de la Suisse, probablement *Nördlich Lägern*, à environ 800 mètres de profondeur dans une couche d'argile à Opalinus.

Selon le site Internet de la NAGRA (la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs), on estime que 1'500 m³ de déchets de haute activité seront produits si les centrales nucléaires suisses sont exploitées pendant 60 ans. Sur ce total, 1'400 m³ seront des combustibles usés et environ 100 m³ seront des déchets de haute activité issus du retraitement antérieur d'éléments de combustible nucléaire suisse. Conditionnés pour l'entreposage dans un dépôt en couches géologiques profondes, ces déchets hautement actifs correspondent à un volume de 9'300 m³. La composition du combustible nucléaire usé à gérer (sans retraitement) est indiquée dans la figure 2. Les 56'000 m³ de déchets de faible et moyenne activité constitueront, avec les conteneurs de stockage final, la part la plus importante en volume des déchets radioactifs – mais avec une activité radioactive nettement plus faible. Ceux-ci proviendront principalement du démantèlement d'installations nucléaires. À cela s'ajouteront 16'000 m³ de déchets provenant des domaines de la médecine, de l'industrie et de la recherche, nommés MIF.

L'argile à Opalinus prévue comme roche d'accueil est à l'origine une boue argileuse qui s'est déposée et solidifiée sur le fond marin (de l'époque) il y a environ 175 millions d'années. Elle est imperméable à l'eau et se referme d'elle-même après un cisaillement dû à un tremblement de terre, par exemple. L'arrivée d'eau fait gonfler l'argile à Opalinus et les fissures peuvent se colmater d'elles-mêmes. Un autre avantage de cette argile réside dans ses propriétés électropolaires, qui favorisent extraordinairement bien l'intégration et la fixation des substances radioactives dans la structure argileuse. La couche d'argile à Opalinus, d'une épaisseur de 100 à 120 mètres, n'est soumise qu'à des contraintes tectoniques minimales et est protégée des processus d'érosion en cours et à venir. Le principe des barrières multiples est également appliqué pour le dépôt profond :

- les éléments combustibles usés seront placés dans des conteneurs de stockage en acier pour leur entreposage final dans le dépôt en profondeur, tandis que les déchets de faible et moyenne activité seront solidifiés dans des fûts en acier ;
- les galeries autour des conteneurs de stockage en acier seront remplies de bentonite imperméable qui se gonfle au contact de l'eau ;
- le dépôt en profondeur se trouvera dans une roche (argile à Opalinus), d'au moins 100 m d'épaisseur, qui se gonfle au contact de l'eau et est donc très peu perméable ;
- le dépôt en profondeur restera hors de portée des influences humaines et climatiques.

Selon la NAGRA, le volume total des déchets radioactifs à gérer en Suisse s'élèvera à 83'000 m³, y compris ceux issus de la médecine, de l'industrie et de la recherche. Les déchets hautement radioactifs conditionnés représenteront environ 10 pour cent de ce volume, mais 99 pourcent de sa radiotoxicité. Pour le calendrier concernant l'autorisation, la construction, l'exploitation de l'entreposage des déchets et combustibles usés et la fermeture du dépôt en profondeur, on se reportera au tableau 1 ; pour la composition du combustible nucléaire ainsi que celle des déchets radioactifs à gérer, on se rapportera à la figure 2. Afin d'assurer les coûts de démantèlement et de gestion, les exploitants alimentent deux fonds pendant la période d'exploitation et la période de post-exploitation :

- un **fonds de désaffection** : l'estimation des coûts de 2016 prévoit un coût total de 3,779 milliards de CHF ; à fin 2021, le capital déjà alimenté s'élevait à 3,037 milliards de CHF ;
- un **fonds de gestion des déchets** : l'estimation des coûts de 2016 prévoit un coût total de 20,077 milliards de CHF ; à fin 2021, le capital déjà alimenté s'élevait à 6,627 milliards de CHF.¹³

Pour l'ensemble du processus de gestion, les consommateurs suisses d'électricité paient une part d'environ 1 centime par kWh via leur facture d'électricité.

Deux défis se posent pour la gestion des déchets radioactifs :

- Nous ne pouvons gérer les déchets radioactifs que de la manière dont nous savons et pouvons le faire aujourd'hui. Les générations futures – auxquelles nous transmettrons ces déchets ainsi que d'autres héritages de notre civilisation – seront peut-être capables de les gérer différemment et, espérons-le, mieux que nous ne le faisons aujourd'hui ;
- Nous nous fions aux déclarations des géologues selon lesquelles la couche sélectionnée, d'argile à Opalinus, restera tranquille, stable et hermétiquement fermée pendant les cent mille prochaines années et que les conteneurs en acier resteront intacts suffisamment longtemps.¹⁴ Enfin, nous nous attendons à ce que l'argile à Opalinus et la bentonite, qui entourent les conteneurs, empêcheront toute infiltration d'eau et toute fuite de radionucléides, donc tout danger pour la biosphère, pendant une période suffisamment longue.

Pour un dépôt en couches géologiques profondes, deux scénarios de dommages possibles sont envisageables :

- Dans quelques milliers ou dizaines de milliers d'années, sous l'effet de la corrosion, les conteneurs perdront leur étanchéité. Ceci suppose toutefois une entrée d'eau et d'oxygène, alors la radioactivité pourrait se diffuser lentement et rejoindre un jour la biosphère ;
- L'autre possibilité serait un événement géophysique majeur qui endommagerait un dépôt final de telle sorte qu'il en résulterait un dégagement de radioactivité. Les dommages causés par cet événement majeur seraient alors bien plus importants que les conséquences locales de la radioactivité libérée par le dépôt en profondeur.

Dans les deux cas, l'impact sur l'environnement dû à la radioactivité libérée serait probablement limité dans l'espace, et donc maîtrisable.

Les études menées sur les sites des réacteurs nucléaires naturels dans la région gabonaise d'Oklo¹⁵ présentent, avec certaines limites, une analogie avec cette problématique. Ces études montrent en effet que les substances radioactives, issues de la fission nucléaire réalisée au sein de ces réacteurs naturels, sont restées pratiquement immobiles sur leur lieu de production et ceci sur de très longues périodes géologiques, en l'occurrence deux milliards d'années, jusqu'à aujourd'hui. Elles permettent donc d'évaluer l'impact que de telles substances pourraient avoir sur la biosphère.

8. Autres paramètres du processus de production d'électricité

Pour évaluer l'énergie nucléaire et la comparer objectivement à d'autres technologies de production d'électricité, il convient d'évaluer d'autres critères.

8.1. Effets radiologiques en cas d'accident

En premier lieu, il y a l'impact sur la santé humaine, que ce soit dans le cadre d'une exploitation conforme aux dispositions ou en cas d'accident. Cet impact est chiffré en général par le nombre de décès attendus par quantité d'électricité produite. Parmi les études citées ici, le rapport Rasmussen des États-Unis (figure 3) est l'une des plus anciennes. Dans ce rapport, ainsi que dans des études plus récents (les figures 4 et 6 résument les résultats de trois études récentes), l'énergie nucléaire obtient presque les meilleurs résultats malgré le fait que les nouvelles analyses tiennent également compte des victimes de la catastrophe nucléaire de Tchernobyl.

En comparaison, les effets de la production d'électricité à partir du charbon sont dévastateurs : les 250 centrales à charbon européennes provoquent chaque année 22'900 décès dans l'Europe entière dus aux émissions de particules fines, de dioxyde de soufre (SO₂), d'oxydes d'azote (NO_x) et d'autres polluants, avec un intervalle de confiance de 95 % entre 14'400 et 31'900 cas/an.¹⁶ Bien que la Suisse n'exploite pas de centrales à charbon, elle est également touchée par les polluants importés par voie aérienne en provenance d'installations extérieures à notre pays.

8.2. Effets radiologiques dans le cadre d'une utilisation conforme à l'usage prévu

En fonctionnement normal, les riverains des centrales nucléaires suisses reçoivent une dose d'irradiation maximale de 0,0022 mSv (millisievert) par an (2021) en raison de leurs émissions radioactives, ce qui s'ajoute à l'exposition moyenne aux rayonnements naturels en Suisse de 4,4 mSv par an.¹⁷ Cela représente 2,2 millièmes de la limite de la dose à la population provenant de sources de rayonnement artificielles par an, qui est de 1 mSv. Les autorités de surveillance se basent sur les conditions les plus défavorables pour ce calcul des doses au voisinage des centrales nucléaires. Cela signifie que l'on suppose un séjour permanent à l'endroit où les immissions sont les plus hautes, que les denrées alimentaires proviennent de l'environnement proche de la centrale, que l'eau potable soit prélevée dans la rivière en aval de celle-ci et que les poissons de cette rivière soient consommés.

8.3. Leucémie infantile dans les environs des centrales nucléaires ?

L'étude allemande KiKK « *Kinderleukämie in der Umgebung von Kernkraftwerken* », publiée en 2008, a suscité beaucoup d'émotions.¹⁸ Bien que les auteurs aient interprété leurs données avec beaucoup de prudence, les résultats de l'étude suscitèrent des débats chargés d'émotion : les opposants à l'énergie nucléaire acquièrent la conviction que la dangerosité de l'énergie nucléaire était enfin prouvée et les experts en radioprotection furent perplexes, car les résultats contredisaient leurs connaissances scientifiques :

« Bien que des résultats antérieurs aient pu être reproduits avec l'étude actuelle, sur la base des connaissances actuelles en radiobiologie et en épidémiologie, on ne peut en tirer l'interprétation que le rayonnement ionisant émis par les centrales nucléaires allemandes en fonctionnement normal en est la cause »¹⁸ (des leucémies).

Ce n'est que des années plus tard que d'autres études internationales, telles que les rapports COMARE¹⁹, ont permis de clarifier les faits :

« En résumé, le 17^e rapport COMARE démontre une nouvelle fois, et de manière encore plus convaincante que les précédents, que les installations nucléaires, telles qu'elles sont exploitées aujourd'hui, ne présentent aucun risque de leucémie ou de cancer dans leur environnement ... L'affirmation selon laquelle la sensibilité des jeunes enfants aux effets génétiques des rayonnements ionisants serait plus de 100 fois supérieure – ce qui serait nécessaire pour expliquer l'épidémie de Sel-lafield –, ne peut-être étayée par aucune donnée expérimentale ». ²⁰

8.4. Gaz à effet de serre, besoins en matériaux et emprise au sol, réserves de combustible

D'autres paramètres entrent dans l'évaluation des technologies de production d'électricité : citons les émissions de CO₂ (figures 5 et 6), qui ont une incidence sur le climat et pour lesquelles les énergies fossiles obtiennent un résultat particulièrement mauvais, les besoins en matières premières pour la construction des installations (figures 7 et 8), l'emprise des installations au sol et le volume qui leur est nécessaire (figure 8), la densité énergétique (tableau 2), la durée optimale de fonctionnement, les réserves de combustible actuellement recensées et disponibles (tableau 2) et enfin les coûts de l'électricité produite par les installations correspondantes (tableau 3). Tous ces critères donnent un résultat à l'avantage de l'énergie nucléaire.

8.5. Prix de l'électricité

Concernant le prix de l'électricité d'origine éolienne et solaire, il faut aussi tenir compte des dépenses liées au stockage de leur production. L'électricité produite par les installations éoliennes et solaires n'est pas toujours disponible quand on en a besoin, elle doit donc être stockée. Les coûts de construction et d'exploitation de telles installations de stockage, ainsi que la perte d'efficacité de 20 à 25 % (en l'occurrence pour les centrales pompage-turbinage) du système global de production et de stockage doivent être pris en compte dans l'établissement des coûts de production de l'électricité d'origine éolienne et solaire. Les centrales d'accumulation existantes en Suisse sont principalement prévues pour équilibrer les variations de la demande, notamment jour-nuit. Utilisées à pleine puissance, les nouvelles grandes installations à accumulation de Suisse (Lindt-Limmern/GL : 1'000 MW et Nant de Drance/VS : 900 MW), verront leur bassin de retenue supérieur être vidé au bout d'un jour seulement. Pour assurer l'équilibre saisonnier, nous aurons besoin de nouvelles technologies et de plusieurs grandes installations.

8.6. Les longs délais pour obtenir une homologation, une autorisation générale, un permis de construire, ainsi que le temps de construction d'une installation sont handicapants

Les longs délais nécessaires pour homologuer de nouveaux types de réacteurs, pour recevoir les autorisations de construction et d'exploitation de nouvelles installations nucléaires, ainsi que le manque d'acceptation de la population, constituent un défi et, compte tenu de l'urgence des mesures destinées à maîtriser la crise énergétique, le plus grand handicap pour l'énergie nucléaire. Un certain espoir réside dans le fait que ces processus seront plus simples pour les futurs *petits réacteurs modulaires SML* (*Small Modular Reactors*), cela grâce à des processus de fabrication standardisés et qui pourraient ainsi accélérer leur mise en place.

9. Perspectives

Les informations rassemblées ici montrent dans quelles conditions une exploitation sûre des installations nucléaires est possible, et aussi, que ces dernières présentent, pour les différents critères discutés, de bons à très bons avantages par rapport aux autres technologies de production d'électricité. Les installations nucléaires valent donc bien mieux que leur réputation. Dans le cadre de l'objectif visant à renoncer dans une large mesure aux énergies fossiles et à fonder notre approvisionnement énergétique sur des sources

d'énergie renouvelables et des technologies nouvelles, l'énergie nucléaire peut contribuer – au minimum pendant la période de transition, voire à moyen et à long terme – à accélérer cette transition.

En cas d'abandon des énergies fossiles, les besoins en électricité augmenteront considérablement, probablement jusqu'à deux à trois fois la consommation actuelle d'électricité. L'électricité deviendra ainsi le principal vecteur d'énergie. Aujourd'hui, l'électricité représente environ un quart de la consommation totale d'énergie en Suisse. Presque tout le reste, c'est-à-dire les trois quarts, est couvert par des énergies fossiles. Nous en avons besoin notamment pour la mobilité individuelle, le chauffage, la chaleur industrielle, la production de biens et pour le transport de marchandises par la route. Mais le pétrole ou les produits pétroliers sont également nécessaires pour la fabrication de plastique, de produits chimiques et pharmaceutiques et pour de nombreux autres processus industriels.

Par ailleurs, il faut tenir compte du fait que la population de notre pays continue d'augmenter²¹ et ses exigences en matière de confort également. À l'avenir, la demande en électricité augmentera et de nouvelles applications demanderont aussi de l'électricité : En feront partie l'e-mobilité, les pompes à chaleur²², pour l'utilisation de la chaleur de l'air ou de la terre, l'utilisation de plus en plus courante de climatiseurs par les ménages privés²³, les domaines de la communication et les techniques de l'information.²⁴ L'estimation citée, qui prévoit que la consommation d'électricité doublera ou triplera par rapport à aujourd'hui en cas d'abandon des énergies fossiles, est donc tout à fait réaliste. Elle nécessitera aussi une extension massive des réseaux électriques.

Lors de la planification et de la construction de nouvelles installations énergétiques, telles que des centrales hydroélectriques, éoliennes, géothermiques ou solaires, les conflits entre la politique énergétique, d'une part, et, d'autre part, la protection de l'environnement et du paysage, sont inévitables. Il faudra alors, au cas par cas, décider à quoi donner la priorité.

Ce défi ne pourra être relevé qu'ensemble et dans le cadre d'une coopération internationale. Cela nécessitera d'évaluer sans préjugés toutes les sources d'énergie, y compris l'énergie nucléaire, et d'utiliser celles qui seront techniquement, économiquement et financièrement raisonnables et également acceptables à l'avenir sur le plan sociopolitique. Malheureusement, les nombreux conflits et guerres, qui éclatent régulièrement dans de nombreuses régions du monde, empêchent actuellement une telle approche commune et coordonnée de tous les pays et de toutes les sociétés.

Tableau 1 : les principaux facteurs de sûreté pour l'utilisation de l'énergie nucléaire (aperçu)

Sûreté technique des installations	<ul style="list-style-type: none"> - contrôle régulier de la sûreté technique et mise à niveau (c.à.d. ré-équipement) ; - confinement en acier ; bâtiment de sécurité en béton armé ; - automatisation du contrôle-commande de l'installation en introduisant un contrôle plus moderne, programmable, avec des modules de mémoire de haute fiabilité et améliorant l'identification des erreurs ; - application systématique du principe des barrières multiples ;⁶ - principe de sûreté intégrée et tolérance élevée aux pannes de l'installation ; - redondance multiple et diversifiée, avec séparation spatiale de tous les composants de l'installation importants pour la sûreté ; application du <i>principe de défense en profondeur</i> ;⁷ - dispositifs de recombinaison catalytique des gaz détonants (H₂ – O₂) ; - décompression filtrée, appelée <i>venting</i>, pour les cas d'incident ou d'accident, - bac de rétention pour le combustible nucléaire fondu (« cendrier » ou <i>core catcher</i>).
Culture de sûreté dans l'entreprise	<ul style="list-style-type: none"> - sensibilisation à une haute culture de sûreté et à la sûreté pour tous les collaborateurs ; - sélection, formation et entraînement régulier des collaborateurs ; - gestion de la qualité avec certification des processus et analyse des incidents ; - tous les écarts par rapport au fonctionnement prévu seront analysés et documentés, non pas pour sanctionner les collaborateurs fautifs, mais pour en tirer des enseignements et procéder aux améliorations correspondantes ; - culture d'entreprise, ambiance de travail, reconnaissance par la hiérarchie, rémunération.
Rôle des autorités de surveillance	<ul style="list-style-type: none"> - les autorités de contrôle et de surveillance doivent être à la fois techniquement compétentes, politiquement indépendantes et non corruptibles ; - séparation entre, d'une part, l'autorisation et, d'autre part, la surveillance et le contrôle.
Protection d'urgence	<ul style="list-style-type: none"> - la préparation de l'urgence et de la protection en cas d'urgence doit impliquer tous les acteurs ; - exercices d'urgence réguliers, y compris transfrontaliers ; - échange international de données et d'expériences ; - concept de dose et de mesure ; information de la population ; comprimés d'iode.
Gestion des déchets radioactifs	<ul style="list-style-type: none"> - le site de <i>Nördlich Lägern</i>, à 800 m de profondeur dans les argiles à Opalinus, a été proposé par la NAGRA le 12.9.22 comme étant le site le plus sûr (<i>avec les plus grandes réserves de sécurité</i>) pour y créer un dépôt en profondeur en Suisse destiné aux déchets hautement ainsi que faiblement et moyennement radioactifs de longue durée de vie. - après un stockage intermédiaire de 20 à 30 ans dans le dépôt intermédiaire ZWILAG/AG, les éléments combustibles usés seront conditionnés en surface dans des conteneurs en acier, puis seront amenés sur le site où ils seront introduits dans le dépôt en profondeur et recouverts de bentonite (celle-ci gonfle en cas d'arrivée d'eau et assure l'étanchéité) ; - étapes envisagées pour le dépôt en profondeur prévu en Suisse : 2024 soumission de la demande ; à partir de 2029/30 décision du Conseil fédéral et du Parlement ; 2031 éventuel référendum ; 2032 analyses géologiques du site ; 2045 début prévu de la construction du dépôt final ; 2055 mise en service de l'installation de conditionnement des éléments combustibles sur le site du ZWILAG ; 2050/60 mise en service du dépôt SMA/HAA et début du stockage des déchets ; 2125 fermeture définitive du dépôt.
Autres paramètres	<ul style="list-style-type: none"> - dose d'irradiation ; nombre de décès attendus par quantité d'électricité produite ; - émissions de CO₂ par quantité d'électricité produite ; - consommation de matériaux pour la construction et l'exploitation ; - emprise au sol et surface nécessaire ; respect des zones naturelles alpines importantes et des intérêts touristiques ; - coûts de production de l'électricité et densité énergétique ; - quelle est la durée des réserves de combustibles utilisables connues aujourd'hui ?
Autorisations et construction	<ul style="list-style-type: none"> - les processus d'autorisation (homologation pour les nouveaux réacteurs), de permis de construire et d'exploitation et les phases de construction durent aujourd'hui beaucoup trop longtemps.

Tableau 2 : les paramètres d'évaluation des technologies de production d'électricité

Nombre de décès attendus par électricité produite	Comme le montrent les figures 3, 4 et 6, l'énergie nucléaire obtient de bons à très bons résultats, même si, comme le montrent les figures 4 et 5, l'accident de Tchernobyl a été pris en compte.
Exposition aux rayonnements en fonctionnement normal	Celle-ci est environ 1'000 fois inférieure à la limite de dose d'irradiation de 1 millisievert (1 mSv) par an selon l'Ordonnance suisse de radioprotection, applicable à l'irradiation de la population par des sources artificielles.
Émissions de CO ₂ par électricité produite	Les figures 5 et 6 montrent à quel point les énergies fossiles contribuent au changement climatique en raison de leurs fortes émissions de CO ₂ .
Consommation de matériaux par quantité d'électricité produite	Les figures 7 et 8 montrent que l'utilisation des nouvelles énergies renouvelables nécessite une consommation importante de matières premières.
Emprise au sol par quantité d'électricité produite	En raison de sa haute densité énergétique (figure 8), l'énergie nucléaire est celle qui mobilise le moins de terrain, tandis que l'utilisation du vent et du soleil requiert beaucoup de surface, ce qui rend inévitables les conflits avec la protection du paysage et de l'environnement. Par exemple, pour les éoliennes, on calcule l'espace qui leur est nécessaire en prenant cinq fois le diamètre du rotor dans la direction du vent principal et trois fois dans la direction transversale (car les éoliennes doivent être placées à une certaine distance les unes par rapport aux autres). Ainsi pour une éolienne de 4,6 MW de puissance installée, d'une hauteur de 250 m avec un rotor de 160 m de diamètre, cela donne 0,4 km ² .
Prix de l'électricité	On entend souvent dire que l'électricité d'origine nucléaire est trop chère. Comme le montre le Tableau 3 et selon les calculs de l'Office fédéral de l'énergie, ce n'est pas le cas. L'énergie nucléaire est également la seule énergie dont les coûts de démantèlement et de gestion des déchets sont déjà pris en compte dans le prix de l'électricité produite.
Densité énergétique	Pour produire 1 TWh (soit un million de MWh) d'électricité, il faut 24 tonnes d'uranium naturel pour l'énergie nucléaire (<i>uranium qui doit toutefois être enrichi à partir de 0,7 % à environ 3 % en ²³⁵U</i>), ou 135'000 tonnes de gaz naturel pour la production d'électricité dans des centrales à cycle combiné (*) avec un rendement de 60 %, ou 210'000 tonnes de gaz naturel dans des centrales à gaz conventionnelles dont le rendement n'est que de 40 %, ou alors 400'000 tonnes de charbon dans des centrales à charbon classiques dont le rendement est également de 40 %. ²⁵
Pour combien de temps les réserves de combustible aujourd'hui disponibles ou connues sont-elles suffisantes ?	Selon l'OCDE, au niveau de consommation actuel (et avec les techniques nucléaires actuelles), les réserves d'uranium connues suffiront pour les 135 prochaines années. Pour les réserves d'uranium supposées et non encore découvertes, l'OCDE calcule qu'elles pourraient encore suffire pour une centaine d'années supplémentaire. Si l'on part du principe que la consommation d'énergie fossile restera stable, et au niveau actuel, les réserves de pétrole connues devraient encore suffire pendant 53 ans selon les statistiques de BP ; pour le gaz naturel, BP table sur environ 55 ans et pour le charbon sur plus de 100 ans. ²⁶
Le reproche est-il justifié, que les nouvelles centrales nucléaires sont trop chères ?	Les centrales nucléaires – tout comme d'autres infrastructures importantes (tunnel du Gothard, NLFA, etc.) – ne sont généralement pas rentables pour la génération de leurs constructeurs. Les centrales nucléaires, dont la durée d'exploitation sera de 80 à 100 ans, seront amorties au cours au moins des deux générations suivantes – et déployeront alors toute leur utilité économique.

(*) CCG = centrales à cycle combiné à gaz (et à vapeur) : la turbine à gaz entraîne un premier générateur ; les gaz chauds issus de la turbine à gaz chauffent alors une chaudière à vapeur, qui entraîne une deuxième turbine à vapeur également couplée à un générateur. Cela permet d'atteindre un rendement global d'environ 60 %

Tableau 3 : estimations des coûts de production de l'électricité provenant de différentes sources.

Production d'électricité (source de données : OFEN 2017) en ct/kWh	pour 2019 installations nouvellement construites	Prévisions pour après 2035
Photovoltaïque (*)	8 - 42	4 - 22
Biogaz	18 - 50	18 - 41
Énergie éolienne en Suisse (*)	13 - 21	10 - 17
Grandes centrales hydroélectriques	7 - 30	7 - 30
Petites centrales hydroélectriques	12 - 28	14 - 33
Centrales à gaz à cycle combiné	11 - 12	13 - 15
Centrales nucléaires	5 - 12	5 - 12
Géothermie profonde	---	16 - 58
Centrales à charbon (à l'étranger)	---	4 - 9

(*) pour les nouvelles énergies renouvelables, le prix du stockage de l'électricité n'est pas pris en compte. **Source des données :** Office fédéral de l'énergie : Potenzielle Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen ; **Auteurs :** CHRISTIAN BAUER et STEFAN HIRSCHBERG, PSI, novembre 2017.

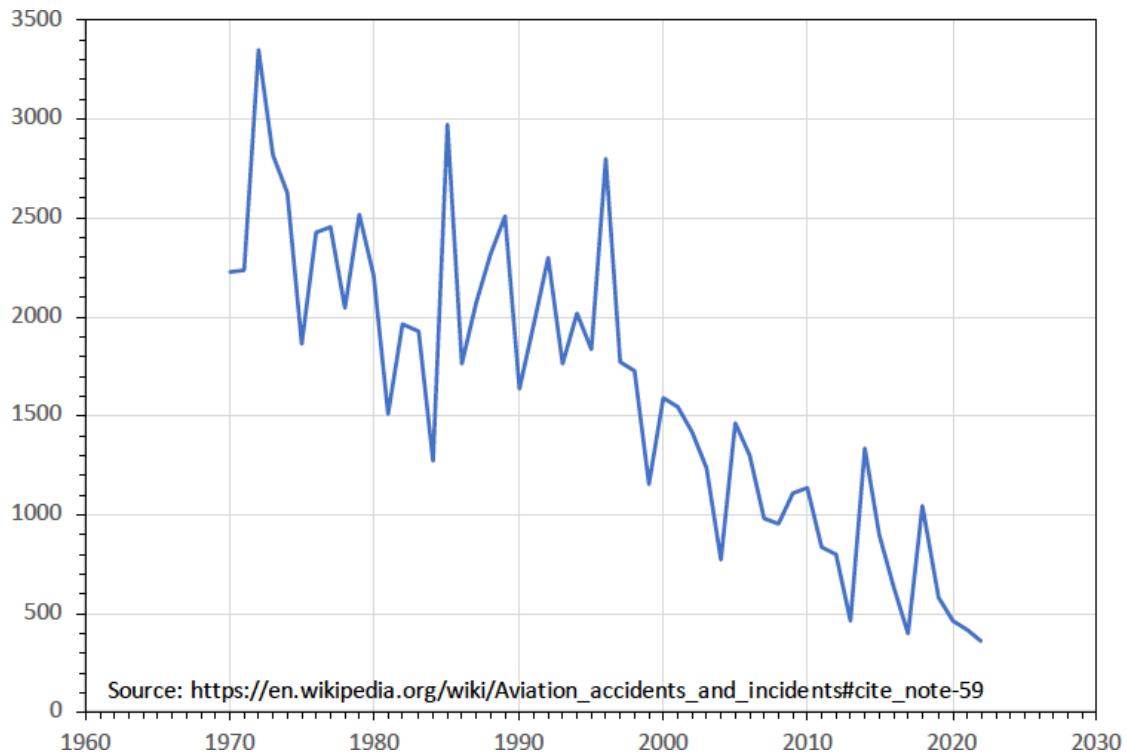


Figure 1 : nombres de décès dus à l'aviation civile dans le monde de 1970 à 2022 ; l'examen systématique de tous les accidents et incidents et la mise en œuvre des mesures et améliorations qui en découlent ont permis de réduire considérablement le nombre de décès dans l'aviation civile.

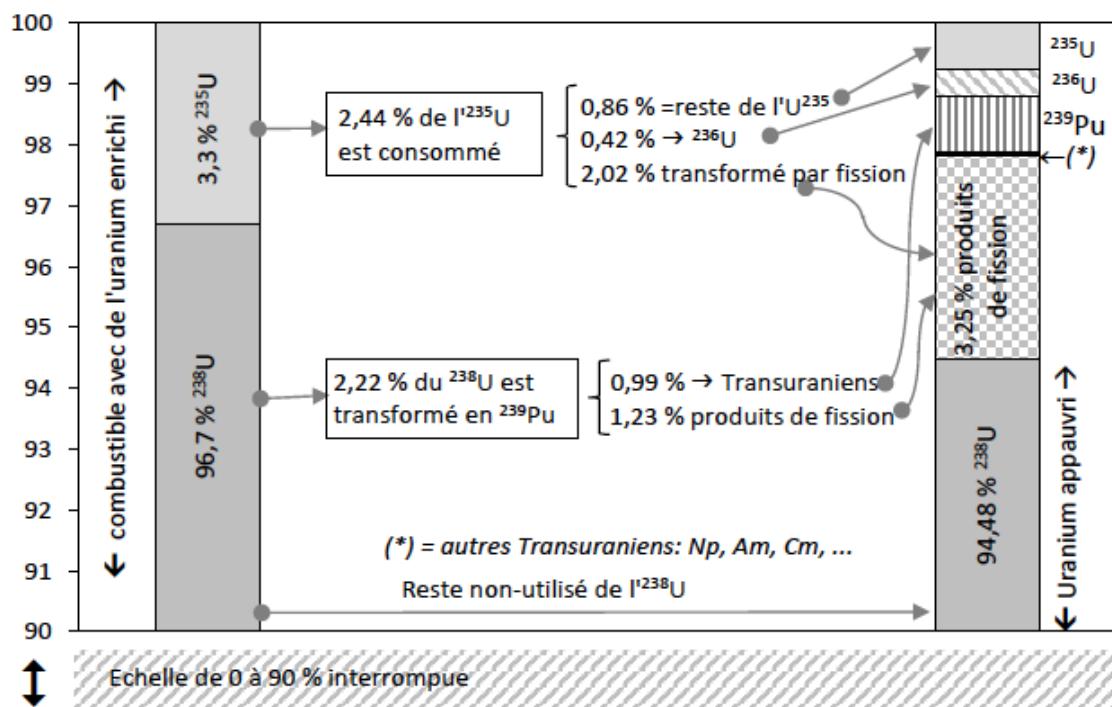


Figure 2 : à gauche : composition du combustible nucléaire avec de l' ^{235}U faiblement enrichi, tel qu'il est utilisé dans un réacteur à eau légère ; au centre-droit : la composition des déchets radioactifs à gérer si aucun retraitement du combustible nucléaire usé n'est effectué ; source de l'image : H. VÖLKL : *Kernenergie*, Springer 2020 ; source des données : WOLFGANG OSTERHAGE & HARTMUT FREY : *Radioaktiver Abfall* ; Springer, 2022.

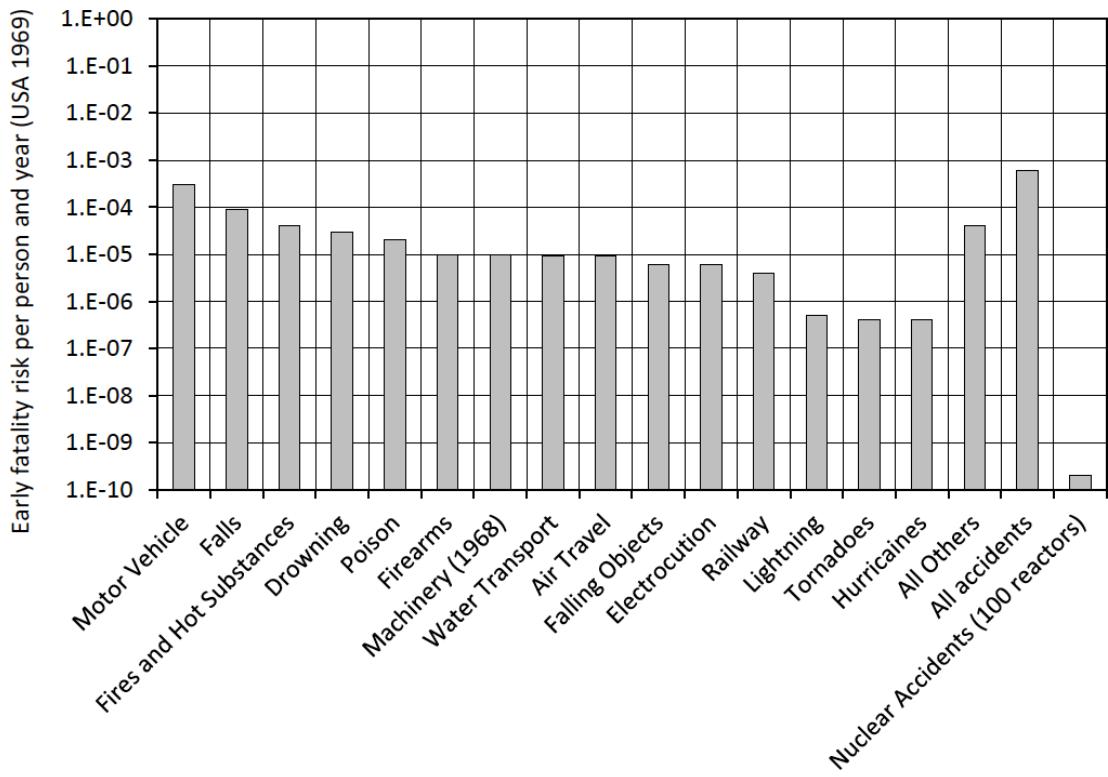


Figure 3 : le fameux rapport Rasmussen de 1975 a examiné les nombres de décès dus à différentes causes civilisationnelles aux États-Unis pour l'année 1969, en comparaison avec ceux dus à l'utilisation de l'énergie nucléaire ; **source de l'image :** H. VÖLKLE : Kernenergie, Springer 2020 ; **source des données :** WASH-1400 ; NUREG 75/014 : Reactor safety study : An assessment of accidents risk in US commercial nuclear Power Plant, US Nuclear Regulatory Commission, October 1975.

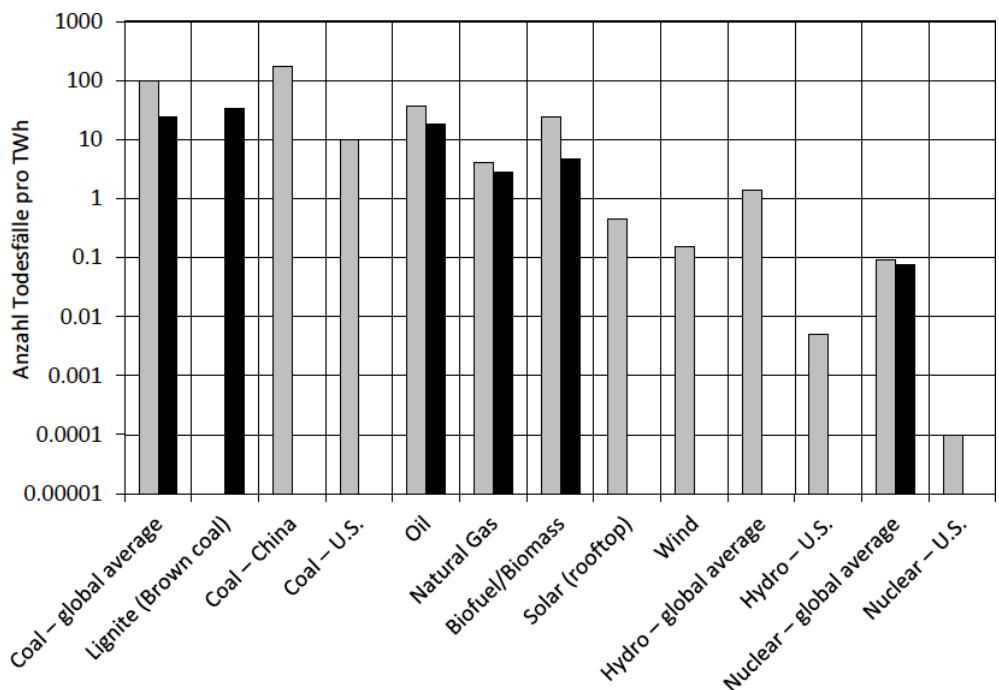


Figure 4 : nombres calculés de décès par TWh (milliards de kWh) d'énergie électrique produite par différents procédés de production d'électricité tirés de deux publications ; **source de l'image :** H. VÖLKLE : Kernenergie, Springer 2020 ; **sources des données :** barres grises : J. CONCA : How deadly is your Kilowatt ? We Rank Killer Energy Sources, Forbes, June 10th, 2013 ; barres noires : OCDE : The full costs of electricity provision. NEA n° 2798, OCDE/NEA, Boulogne-Billancourt, 2018.

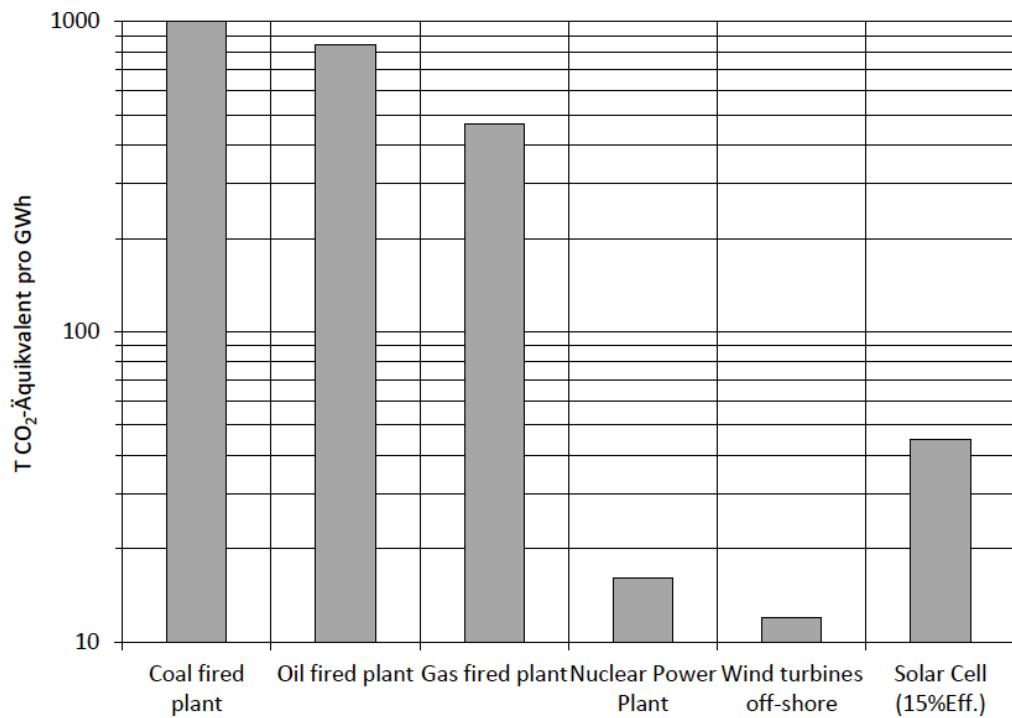


Figure 5 : émissions de CO₂ par différents procédés de production d'électricité en grammes de CO₂ équivalent par kWh (soit aussi en tonnes de CO₂ par GWh.) ; **source de l'image :** H. VÖLKLE : *Kernenergie*, Springer 2020 ; **source des données :** E. DE SANCTIS et al. : *Energy from nuclear fission*, Springer, 2016.

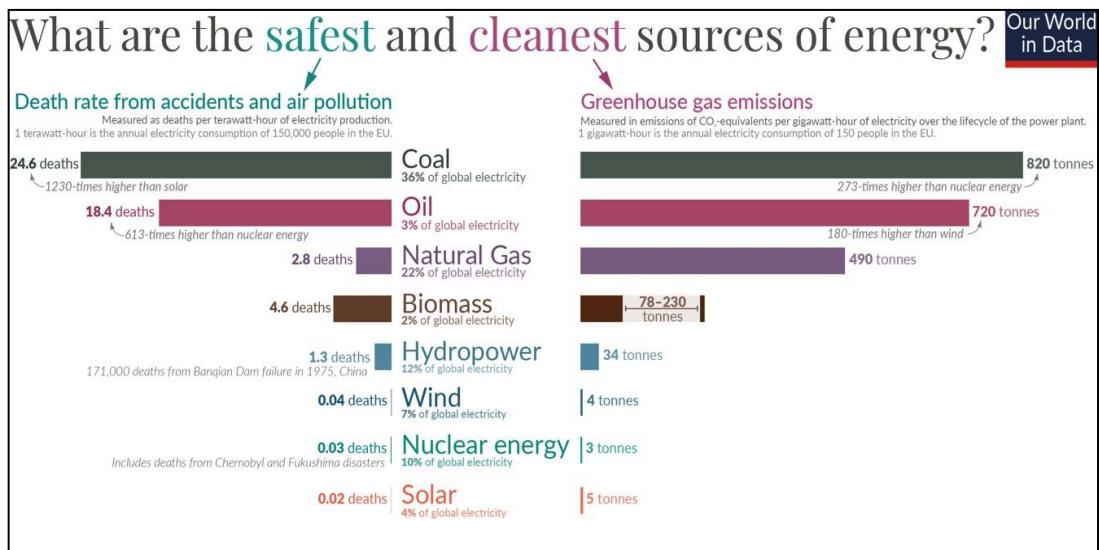


Figure 6 : les nombres de décès sont indiqués par TWh (milliards de kWh), les tonnes de CO₂ émises le sont par GWh (millions de kWh) ; **source de l'image :** exposé du professeur LINO GUZZELLA (EPFZ) lors du Forum nucléaire suisse du 25 mai 2012 au Casino de Berne sur le thème : Énergie – Conditions-cadres générales et options locales.

Commentaire des auteurs : les taux de mortalité des combustibles fossiles et de la biomasse sont basés sur des installations européennes de pointe avec des contrôles de pollution et sont basés sur des modèles plus anciens relatifs aux effets de la pollution atmosphérique sur la santé. En conséquence, ces taux de mortalité sont vraisemblablement très conservateurs. Pour une discussion plus approfondie, voir notre article : OurWorldinData.org/safest-sources-of-energy. Les données pour l'électricité sont celles de 2021. Sources des données : MARKANDYA & WILKINSON (2007) ; UNSCEAR (2008 ; 2018) ; SOVACOOL et al. (2016) ; IPCC AR5 (2014) ; PEHL et al. (2017) ; Ember Energy (2021). OurWorldinData.org – Rechercher et données pour progresser face aux plus grands problèmes du monde.

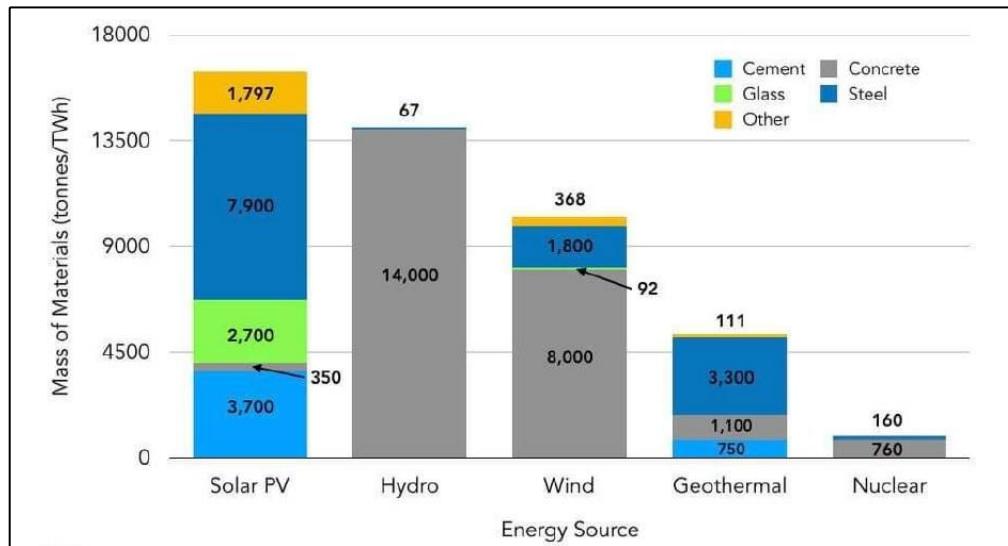


Figure 7 : la consommation de matériaux pour différents procédés de production d'électricité en tonnes par TWh (milliards de kWh) ; source : Quadrennial Technology Review : An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities, September 2015. United States Department of Energy. https://www.reddit.com/r/nuclear_memes/comments/a9gf7d/materials_throughput_by_type_of_energy_source/.

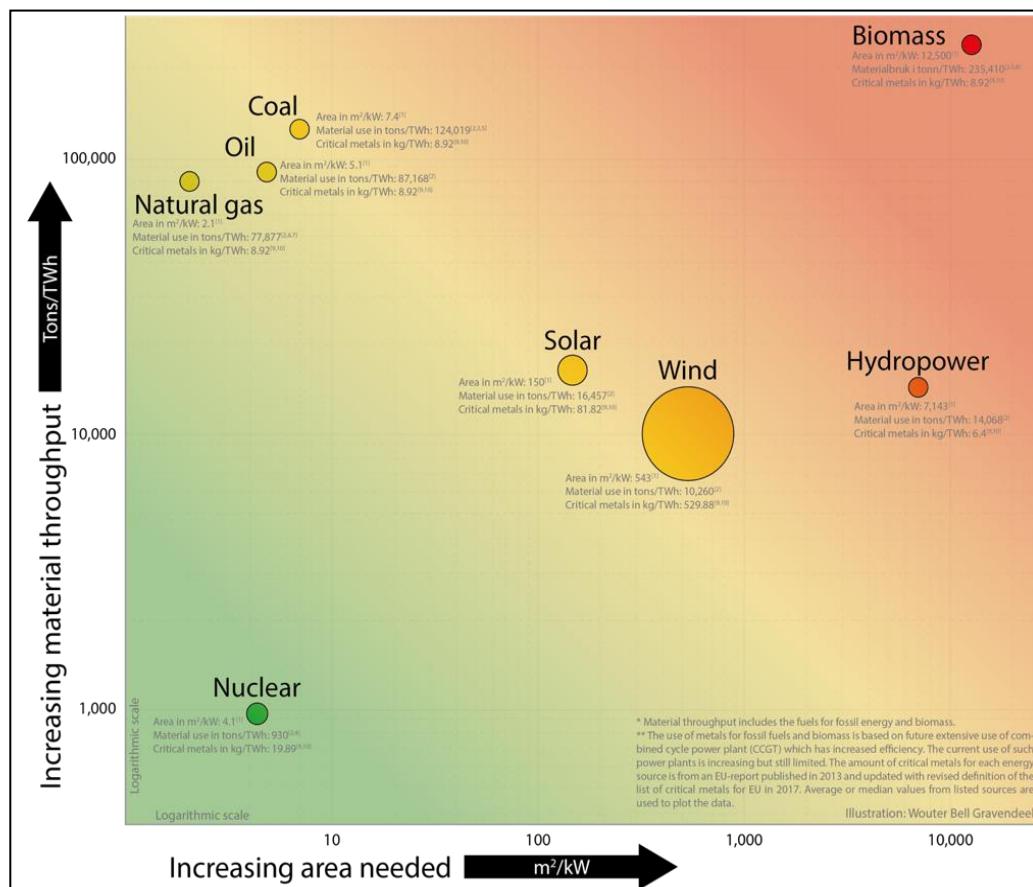


Figure 8 : consommation de matériaux en tonnes par TWh (milliards de kWh) d'électricité produite (axe Y) en comparaison avec la surface nécessaire en m² par kW (axe X) pour les différents procédés de production d'électricité. La taille des bulles correspond à la consommation de métaux critiques ; source de l'image : JONNY HESTHAMMER (October 28th, 2020), ancien professeur de géologie et de géophysique à l'Université de Bergen ; CEO M Vest Energy et Norsk Kjernekraft (Norwegian Nuclear Power). <https://energy.glex.no/feature-stories/area-and-material-consumption>.

Notes de bas de page et explications

¹ Sur l'échelle INES, *International Nuclear Event Scale*, de l'AIEA, à sept niveaux, qui classe les événements nucléaires et radiologiques civils, les deux catastrophes de réacteurs ont été évaluées au niveau le plus élevé, c'est-à-dire au niveau 7. L'accident survenu dans le cœur du réacteur expérimental de Lucens, dans le canton de Vaud, le 29 janvier 1969, a été évalué *a posteriori* au niveau 4 à 5 (voir à ce sujet le Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles n° 111 (2022), p. 32 et suivantes).

² Les informations contenues dans ces paragraphes sont tirées des présentations de l'Apéro thématique du Réseau Carnot-Cournot (CCN : <https://www.c-c-netzwerk.ch/kerntechnologie/?lang=fr>.

du 3 mai 2023 à Bâle. Celui-ci était composé de trois conférences : Prof. em. HORST-MICHAEL PRASSER : *Techniques actuelles et futures des centrales nucléaires* ; Dr JOHANNIS NÖGGERATH : *Sûreté des centrales nucléaires* et Dr MARKUS HÄRING : *Gestion des déchets radioactifs en Suisse*.

³ Pour expliquer le système multi-barrières, prenons l'exemple du combustible nucléaire : le combustible nucléaire est sous forme solide et sous la forme chimique de dioxyde d'uranium ; il se trouve dans des gaines qui sont des tubes soudés, étanches ; la cuve du réacteur est en acier spécial à paroi épaisse ; le « bouclier biologique » est une enceinte en béton ; l'enceinte de confinement résistant à la pression est en acier ; le bâtiment du réacteur est en béton armé d'un mètre d'épaisseur.

⁴ La défense en profondeur est issue de la stratégie militaire et désigne un système de défense à plusieurs niveaux et tolérant aux pannes, dans la mesure où, en cas de défaillance d'un niveau, le niveau supérieur entre en action et empêche ainsi une défaillance de l'ensemble du système.

⁵ Les réacteurs dans lesquels l'eau légère est à la fois modératrice et réfrigérante ont un coefficient de vide, ou de bulle de vapeur, négatif. Cela signifie qu'en cas de perte de réfrigérant, la fonction de modérateur de l'eau – qui freine les neutrons jusqu'à des énergies thermiques – est également réduite. La réaction nucléaire en chaîne s'arrête alors. En revanche, les réacteurs de type Tchernobyl qui utilisent le graphite comme modérateur avaient un coefficient de vide positif ; en cas de perte du réfrigérant, la puissance augmente, ce qui a conduit à la catastrophe de Tchernobyl en 1986.

⁶ Pour le refroidissement – y compris pour l'évacuation de la chaleur résiduelle ou de post-régénération lorsque le réacteur est arrêté – il est nécessaire d'avoir de l'eau, des pompes pour la faire circuler et de l'électricité pour faire fonctionner ces pompes. Si la centrale ne produit pas sa propre électricité, celle-ci doit pouvoir être obtenue à partir du réseau ou de générateurs diesel de secours.

⁷ Si une avarie provoque une augmentation de la pression dans le bâtiment de sécurité, cette surpression doit pouvoir être évacuée par le biais d'un système de décompression équipé de filtres (*venting*) afin d'éviter d'endommager le bâtiment de sécurité. Les filtres retiennent une grande partie de la radioactivité (à l'exception des gaz nobles radioactifs et de l'iode radioactif gazeux).

⁸ Les gaines des éléments de combustible sont constituées d'un alliage de zirconium. En cas d'incident grave avec fusion du cœur et des températures dépassant les 1000 °C, le zirconium réagit avec la vapeur d'eau environnante et il se forme du dihydrogène. Pour éviter une explosion de ce gaz (inflammation d'un mélange H₂ - O₂), les réacteurs modernes sont équipés de systèmes de recombinaison catalytique du dihydrogène avec le dioxygène.

⁹ L'AIEA a publié un document détaillé à ce sujet : *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. AIEA ; Vienne 2020 ; <http://aris.iaea.org>.

¹⁰ C'est dans la circulation routière que cela est le plus flagrant : près de 90 % des accidents avec dommages corporels sont dus à des erreurs humaines : non-maîtrise du véhicule ; non-respect des règles de circulation ; vitesse inadaptée à la situation ; manque d'entretien des véhicules, etc. <https://www.dekra.de/de/hohes-unfallrisiko-bei-fahrerfaengern/>. Selon l'OMS, les accidents de la route tuent chaque année 1,3 million de personnes dans le monde et en blessent 20 à 50 millions. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>.

¹¹ La non-conformité signifie le non-respect d'une exigence ; le contraire serait la conformité. La non-conformité peut se manifester aussi bien dans les processus que dans les produits. Par conséquent, des procédures non conformes, telles qu'une mauvaise gestion du contrôle qualité ou le non-respect d'une procédure, peuvent entraîner des non-conformités. <https://safetyculture.com/de/themen/nichtkonformitaet/>.

¹² Un processus qui, en combinant un réacteur nucléaire spécial avec un accélérateur de particules, transforme les déchets à longue durée de vie en déchets à demi-vie beaucoup plus courte, selon une proposition du prix Nobel italien et ancien directeur du CERN, CARLO RUBBIA.

¹³ Source : Forum nucléaire suisse : <https://www.nuklearforum.ch/fr>.

¹⁴ Selon la NAGRA, des expériences menées dans le Laboratoire de roches du Mont Terri/JU et des modélisations ont montré que la corrosion des conteneurs progressait très lentement et que les conteneurs restaient étanches pendant au moins 10'000 ans ; l'autorité de sûreté nucléaire exige 1'000 ans. Après 10'000 ans, il ne restera de la radioactivité des éléments combustibles qu'un demi pour cent (1/200) de la valeur initiale.

¹⁵ Près d'Oklo, dans la province gabonaise du Haut-Ogooué, il y a 2 milliards d'années, la nature a fait fonctionner 14 réacteurs nucléaires naturels sur une période de 500'000 ans. Ils ont fissionné 10 tonnes d'²³⁵U et généré environ 4 tonnes de ²³⁹Pu, des produits de fission et des actinides. Ces réacteurs nucléaires naturels ont été possibles parce qu'à l'époque, en raison des demi-vies différentes des deux isotopes de l'uranium, le rapport isotopique entre U²³⁵ et U²³⁸ était d'environ 3 pour cent (comme dans les réacteurs à eau légère actuels) alors qu'actuellement il est de 0,72 pour cent, et qu'en outre il y avait suffisamment d'eau pour assurer la modération de la réaction. Les études ont montré que les éléments lourds comme l'uranium, le thorium, le neptunium, le plutonium et l'américium sont tous restés pratiquement sur place et que les éléments un peu plus mobiles, comme le molybdène, le cadmium ou le césium, qui ont diffusé, ne se sont éloignés du site du réacteur que de quelques mètres au cours de deux milliards d'années, et ce malgré le fait que la nature ait laissé ces déchets en surface à l'air libre, sans aucun conditionnement (c'est-à-dire sans emballage).

¹⁶ Europe's Dark Cloud (2016) : https://env-health.org/IMG/pdf/dark_cloud-full_report_final.pdf.

¹⁷ Rapports annuels de l'Office fédéral de la santé publique : *Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnement en Suisse* ; Éditeurs OFSP, Berne.

<https://www.bag.admin.ch/bag/fr/home/das-bag/publikationen/taetigkeitsberichte/jahresberichte-umweltradioaktivitaet.html>.

¹⁸ KAATSCH P. et al. : *Childhood Leukemia in the vicinity of nuclear power plants in Germany*.

Deutsches Ärzteblatt International Vol. 105 (42), pp. 725-732.

¹⁹ COMARE : *Comité sur les aspects médicaux des rayonnements dans l'environnement*. 17^e rapport. Produit par : Public Health England of the Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment, Crown Copyright, Chilton, 2016.

²⁰ SCHÄDELIN J., NIGGLI F. et VÖLKLE H. : *Pas de leucémie infantile due aux émissions des installations nucléaires – Après une longue mise à jour et enfin une clarification*. Bulletin des médecins suisses 98/35, p. 1104 ss.

²¹ Selon l'Office fédéral de la statistique, un scénario de référence prévoit 10,4 millions d'habitants en 2050, et même 11,4 millions dans le cas d'un scénario haut.

<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/population/evolution-future/scenarios-suisse.html>.

²² Dans le cas de l'utilisation de la chaleur du sol, l'électricité utilisée par la pompe à chaleur représente environ un quart de la conversion énergétique de l'ensemble de l'installation géothermique (on parle d'un coefficient de performance, COP = 4).

²³ Le réchauffement climatique entraînera une augmentation massive des besoins en climatiseurs d'ici 2050. Au niveau mondial, il faut s'attendre à une augmentation de 250 % de la demande d'électricité d'ici 2050 par rapport à 2016.

²⁴ En Allemagne, la consommation d'électricité des technologies de l'information et de la communication était répartie comme suit en 2007 : ménages 59,6%, entreprises 12,3%, serveurs et centres de calcul 16,5% et téléphonie mobile et réseau fixe 11,6%.

https://www.post-und-telekommunikation.de/PuT/1Fundus/Dokumente/3.Nationaler_IT-Gipfel_Nov.2008/it-gipfel-stromverbrauch_property=pdf_bereich=bmwi_sprache=de_rwb=true.pdf.

Internet est à l'origine d'environ 1,5 % des émissions mondiales de CO₂ et consomme aujourd'hui environ 6 % de l'électricité produite dans le monde ; cette part pourrait atteindre 13 % d'ici 2030.

<https://www.energie-experten.ch/de/business/detail/kommunikation-und-stromverbrauch.html>.

et : <https://www.kocos.com/de/aktuelles/blog/artikel/artikel/2021/10/18/einige-fakten-zu-dem-energieverbrauch-der-digitalisierung>.

²⁵ Source : <https://www.kernenergie.ch/fr/rohstoff-uran-content---1--1085--88.html>.

²⁶ Source : <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/versorgung/fossile-energien.html>.