

01

Les activités nucléaires et les principes de sûreté nucléaire et de radioprotection



1. L'état des connaissances sur les dangers et les risques liés aux rayonnements ionisants P—108

1.1 Les effets biologiques et les effets sanitaires

1.2 L'évaluation des risques liés aux rayonnements ionisants

1.3 Les incertitudes scientifiques et la vigilance

1.3.1 La réponse individuelle aux rayonnements ionisants

1.3.2 Les effets des faibles doses

1.3.3 La signature moléculaire dans les cancers radio-induits

2. Les différentes sources de rayonnements ionisants P—112

2.1 Les rayonnements ionisants d'origine naturelle

2.1.1 Les rayonnements cosmiques

2.1.2 Les rayonnements d'origine terrestre (hors radon)

2.1.3 Le radon

2.2 Les rayonnements ionisants liés aux activités humaines

2.2.1 Les installations nucléaires de base

2.2.2 Le transport de substances radioactives

2.2.3 Les activités nucléaires de proximité

2.2.4 La gestion des déchets radioactifs

2.2.5 La gestion des sites contaminés

2.2.6 Les activités utilisant des substances radioactives d'origine naturelle

3. Les principes de la sûreté nucléaire et de la radioprotection P—115

3.1 Les principes fondamentaux

3.1.1 Le principe de responsabilité de l'exploitant

3.1.2 Le principe du « pollueur-payeur »

3.1.3 Le principe de précaution

3.1.4 Le principe de participation

3.1.5 Le principe de justification

3.1.6 Le principe d'optimisation

3.1.7 Le principe de limitation

3.1.8 Le principe de prévention

3.2 Quelques aspects de la démarche de sûreté

3.2.1 La culture de sûreté

3.2.2 Le concept de défense en profondeur

3.2.3 L'interposition de barrières

3.2.4 La démarche déterministe et la démarche probabiliste

3.2.5 Le retour d'expérience

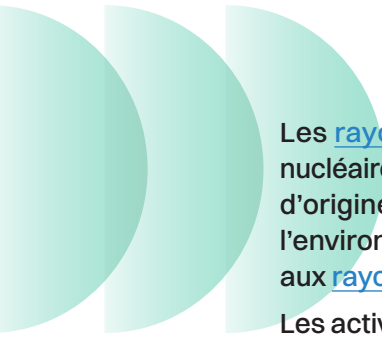
3.2.6 Les facteurs sociaux, organisationnels et humains

3.2.7 La prise en compte de la complexité

3.2.8 L'application en France des principes de sûreté

3.3 L'accès aux informations des exploitants





Les **rayonnements ionisants** peuvent être d'origine naturelle ou provenir d'activités nucléaires d'origine humaine. Les expositions de la population aux rayonnements ionisants d'origine naturelle résultent de la présence de radionucléides d'origine terrestre dans l'environnement, de l'émanation de **radon** en provenance du sous-sol et de l'exposition aux **rayonnements cosmiques**.

Les activités nucléaires sont définies par le code de la santé publique (CSP) comme « *les activités comportant un risque d'exposition des personnes aux rayonnements ionisants lié à la mise en œuvre soit d'une source artificielle, qu'il s'agisse de substances ou de dispositifs, soit d'une source naturelle, qu'il s'agisse de substances radioactives naturelles ou de matériaux contenant des radionucléides naturels [...]* ».

Ces activités nucléaires incluent celles qui sont menées dans les installations nucléaires de base (INB) et dans le cadre du transport de substances radioactives, ainsi que dans les domaines médical, vétérinaire, industriel et de recherche.

Les dangers et les risques liés aux rayonnements ionisants, que ces derniers soient d'origine naturelle ou produits par les activités nucléaires, sont étroitement surveillés et contrôlés.

La sûreté nucléaire est définie dans le code de l'environnement comme « *l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires de base ainsi qu'au transport de substances radioactives, prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets* ». La radioprotection est, quant à elle, définie comme « *la protection contre les rayonnements ionisants, c'est-à-dire l'ensemble des règles, des procédures et des moyens de prévention et de surveillance visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants produits sur les personnes, directement ou indirectement, y compris par les atteintes portées à l'environnement* ».

La sûreté nucléaire et la radioprotection obéissent à des principes et des démarches mis en place progressivement et enrichis continuellement du retour d'expérience. Les principes fondamentaux qui les guident sont promus au plan international par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Ils ont été inscrits en France dans la Constitution ou dans la loi et figurent désormais dans des directives européennes.

1 — L'état des connaissances sur les dangers et les risques liés aux rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants sont définis comme étant capables de produire directement ou indirectement des ions lors de leur passage à travers la matière. Parmi eux, on distingue les rayons X, les rayonnements gamma, alpha et bêta, ainsi que les rayonnements neutroniques, chacun d'entre eux étant caractérisé par des énergies et des pouvoirs de pénétration différents.

1.1 Les effets biologiques et les effets sanitaires

Qu'ils soient le fait de particules chargées, par exemple électron ou positon (rayonnements bêta) ou un noyau d'hélium (rayonnement alpha), ou de photons (rayons X ou rayons gamma), les rayonnements ionisants peuvent interagir avec les molécules constitutives des cellules de la matière vivante et les transformer chimiquement. Parmi les lésions ainsi créées, les plus importantes concernent l'ADN des cellules ; elles ne sont pas fondamentalement

différentes de celles provoquées par certaines substances chimiques toxiques, exogènes (extérieures à l'organisme) ou endogènes (résultant du métabolisme cellulaire).

Lorsqu'elles ne sont pas réparées par les cellules elles-mêmes, ces lésions peuvent conduire soit à la mort cellulaire soit à l'apparition d'effets biologiques néfastes, dès lors que le tissu ne peut plus assurer ses fonctions.

De tels effets, appelés « **effets déterministes** », sont connus de longue date puisque les premiers effets ont été décrits assez tôt après la découverte des rayons X par W. Röntgen (début des années 1900). Ils dépendent de la nature du tissu exposé et apparaissent de façon certaine dès que la quantité de rayonnements absorbée dépasse un certain niveau de dose. Parmi ces effets, on peut citer par exemple l'érythème, la radiodermite, la radionécrose et la cataracte. Les effets sont d'autant plus graves que la dose de rayonnements reçue par le tissu est importante.

Les cellules peuvent aussi réparer, mais de façon imparfaite ou erronée, les lésions ainsi provoquées. Parmi les lésions qui subsistent, celles de l'ADN revêtent un caractère particulier, car des anomalies résiduelles au niveau des chromosomes peuvent être transmises par divisions cellulaires successives à de nouvelles cellules. Une seule mutation est loin d'être suffisante pour la transformation en cellule cancéreuse, mais cette lésion due aux rayonnements ionisants peut constituer une première étape vers la cancérisation qui apparaît après un temps variable, jusqu'à plusieurs années après l'exposition.

La suspicion d'un lien de causalité entre une exposition aux rayonnements ionisants et la survenue d'un cancer remonte à 1902 (observation d'un cancer de la peau sur une radiodermite). On parle alors de « cancer radio-induit ».

Par la suite, plusieurs types de cancer ont été observés en milieu professionnel, dont certains types de leucémie, des cancers bronchopulmonaires et des ostéosarcomes de la mâchoire. Hors du domaine professionnel, le suivi pendant plus de soixante ans d'une cohorte⁽¹⁾ d'environ 85 000 personnes irradiées lors des bombardements nucléaires d'Hiroshima et de Nagasaki (Japon) a permis de réunir des données sur la morbidité et la mortalité par cancer après exposition aux rayonnements ionisants, et de décrire les relations dose-effets, qui sont à la base de la réglementation actuelle. D'autres travaux épidémiologiques ont permis de mettre en évidence, chez les patients traités par irradiation médicale, une augmentation statistiquement significative des cancers (effets secondaires) imputables aux rayonnements ionisants. Citons également l'[accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl \(Ukraine\)](#) qui, du fait de l'iode radioactif rejeté, a provoqué dans les régions proches du lieu de l'accident un excès de cancers de la thyroïde chez des sujets jeunes exposés pendant leur croissance.

Les conséquences sanitaires de l'[accident de la centrale nucléaire de Fukushima](#) (Japon) pour les populations avoisinantes ont également fait l'objet de travaux et d'analyses, dont certains sont encore en cours, afin d'en tirer les enseignements au plan épidémiologique.

Le risque de cancer radio-induit se caractérise par un accroissement de la probabilité de cancer en fonction de la dose de rayonnements reçus, et dépend également de l'âge et du sexe. On parle alors d'effets probabilistes, stochastiques (dont l'apparition, à la suite d'une exposition, dépend du hasard) ou aléatoires. Toutefois, l'impact des faibles doses sur l'apparition d'un cancer fait l'objet de débats scientifiques ([voir point 1.2](#)).

Établis au plan international, les objectifs de santé publique de la radioprotection visent à éviter l'apparition des effets déterministes et à réduire la probabilité d'apparition de cancers radio-induits.

1.2 L'évaluation des risques liés aux rayonnements ionisants

En France, la surveillance de l'épidémiologie des cancers est fondée sur des registres de maladies, sur la surveillance des causes de décès et, plus récemment, s'appuie également sur l'exploitation des données du programme médicalisé des systèmes d'information des établissements de santé et sur les déclarations d'affection de longue durée. Les registres sont des structures qui réalisent « *un recueil continu et exhaustif de données nominatives intéressant un ou plusieurs événements de santé dans une population géographiquement définie, à des fins de recherche et de santé publique, par une équipe ayant les compétences appropriées* ». Certains dits « généraux » s'intéressent à tous les types de cancer,

leur périmètre est départemental ou interdépartemental ; d'autres, dits « spécialisés », se focalisent sur un cancer particulier. Leur portée est un périmètre géographique variable (agglomération, département, région, voire national). Les trois registres nationaux concernent pour le premier le mésothéliome de la plèvre dans le cadre d'exposition principalement aux fibres d'amiante, les deux autres couvrent l'ensemble des pathologies cancéreuses de l'enfant et de l'adolescent jusqu'à 18 ans (source : INCa).

Dans une zone couverte par un registre, l'objectif est de mettre en évidence des différences de répartition spatiale, de dégager des évolutions temporelles en matière d'augmentation ou de diminution du taux d'incidence des différentes localisations cancéreuses, ou encore de repérer un agrégat de cas.

En fonction de la qualité de leur base de données populationnelle et de leur ancienneté, certains registres participent à de nombreuses études explorant les facteurs de risque des cancers (dont les risques environnementaux).

L'investigation épidémiologique est une tâche complémentaire de la surveillance. Elle a pour vocation de mettre en évidence une association entre un facteur de risque et la survenue d'une maladie, entre une cause possible et un effet, ou tout au moins de permettre d'affirmer que l'existence d'une telle relation causale présente une forte probabilité. La difficulté intrinsèque à mener ces études est à rappeler, de même que la difficulté à conclure de façon convaincante lorsque le délai d'apparition de la maladie est long ou encore lorsque le nombre de cas attendus est faible, ce qui est notamment le cas pour des expositions faibles de quelques dizaines de [millisieverts](#) (mSv).

Les cohortes comme celles d'Hiroshima et de Nagasaki ont clairement mis en évidence un excès de cancers, pour une exposition moyenne de l'ordre de 200 mSv. En raison de données insuffisantes sur l'impact des faibles doses sur l'apparition d'un cancer, des estimations sont fournies en extrapolant de façon linéaire et sans seuil ([voir point 1.3.2](#)) les effets observés décrits aux fortes doses. C'est ce qu'on appelle la relation linéaire sans seuil. Ces modélisations, qui permettent une estimation des risques encourus lors d'une exposition aux faibles doses de rayonnements ionisants, restent cependant controversées au niveau scientifique. Des études sur de très larges populations sont actuellement menées pour mieux caractériser ces risques. Des études épidémiologiques récentes sur des travailleurs de l'industrie du nucléaire⁽²⁾ et sur des enfants et adolescents exposés à des rayonnements ionisants lors d'examen scanners⁽³⁾ retrouvent ainsi une augmentation du risque de cancers proportionnelle à la dose reçue qui reste significative, y compris lorsque l'intervalle étudié est restreint à des doses cumulées faibles inférieures à 100 milligrays (mGy), confortant ainsi ce qui jusqu'alors n'était qu'une hypothèse.

Ces résultats confirment l'importance des principes d'optimisation et de justification pour la protection radiologique des populations exposées quelle qu'en soit l'origine (rayonnement naturel, exposition médicale, industrie nucléaire, etc.).

Sur la base des synthèses scientifiques du Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants ([UNSCEAR](#)), la [CIPR](#) ([voir focus n°1](#)) a publié les coefficients de risque de décès par cancer dus aux rayonnements ionisants, soit 4,1 % d'excès de risque par sievert pour les travailleurs et 5,5 % par sievert pour la population générale (voir [publication 103](#) de la CIPR).

L'évaluation du risque de cancer du poumon dû au radon⁽⁴⁾ repose sur un grand nombre d'études épidémiologiques, réalisées directement dans l'habitat, en France et à l'échelle internationale.

1. Cohorte : groupe d'individus considérés comme un ensemble et participant à une étude statistique des circonstances d'apparition des maladies.

2. Source : [étude Inworks - IRSN, note d'information du 3 octobre 2023](#)

3. Source : [étude EPI CT - IRSN](#)

4. Le radon est un gaz radioactif naturel, descendant de l'uranium et du thorium, émetteur de particules alpha et classé cancérigène pulmonaire certain par le Centre international de recherche contre le cancer (CIRC) depuis 1987.

Elles ont permis de décrire une relation linéaire, même pour une exposition faible (200 becquerels par mètre cube - Bq/m³) sur une durée de vingt à trente ans. En 2009, l'[OMS](#) a recommandé un niveau de référence de 100 Bq/m³, et dans tous les cas de rester en deçà de 300 Bq/m³. La [publication 115](#) de la CIPR a comparé les risques de cancer du poumon observés dans le cadre des études sur les mineurs d'uranium avec ceux observés en population générale et a conclu à une très bonne concordance des risques observés dans ces deux conditions d'exposition au radon. Les recommandations de la CIPR confortent celles émises par l'OMS, qui considère que le radon constitue, loin après le tabac, le deuxième facteur de risque de cancer du poumon. Par ailleurs, pour des expositions au radon égales, le risque de cancer du poumon est beaucoup plus élevé chez les fumeurs : trois quarts des décès par cancer du poumon attribuables au radon surviendraient chez des fumeurs.

En France métropolitaine, environ 12 millions de personnes, réparties dans près de 7 000 communes, sont potentiellement exposées à des concentrations élevées en radon. Selon l'[Agence nationale de santé publique](#) (2018), le nombre de nouveaux cas de cancer du poumon attribuables au radon en France métropolitaine est estimé à environ 4 000 par an, loin derrière celui dû au tabac (estimé à 46 000 par an). À l'initiative de l'ASN, un [plan national d'action pour la gestion du risque lié au radon](#) a été mis en place depuis 2004. Il est périodiquement réactualisé. Le 4^e plan a été publié début 2021 et s'achèvera fin 2026 (*voir chapitre 3, point 4.2.2*).

1.3 Les incertitudes scientifiques et la vigilance

Malgré les avancées scientifiques menées dans les domaines de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, de nombreuses incertitudes subsistent ; l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR) reste attentive aux résultats des travaux scientifiques en cours, en radiobiologie et en radiopathologie par exemple, ainsi qu'à leurs conséquences possibles en radioprotection, notamment en ce qui concerne la gestion des risques liés aux faibles doses.

Parmi ces zones d'incertitudes, on peut citer la radiosensibilité individuelle, les effets en fonction de l'âge, l'existence de signatures (mutations spécifiques de l'ADN) qui pourraient être observées dans des cancers radio-induits et certaines maladies non cancéreuses observées dans les suites de radiothérapie.

FOCUS N°1

Rôle et principale actualité de la CIPR

La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) est une organisation internationale qui rédige et publie des recommandations visant à améliorer la radioprotection des personnes (public, travailleurs, patients) et de l'environnement, dans toutes ses dimensions (évaluation du risque sanitaire, dosimétrie, applications médicales, système de protection). Ses recommandations s'appuient principalement sur les résultats des travaux de recherche les plus récents et représentent un socle important sur lequel repose la grande majorité des réglementations nationales et internationales

en matière de radioprotection. Au-delà des évaluations relatives à des éléments précis de son système de radioprotection, la CIPR publie, à intervalles réguliers, des recommandations générales qui constituent le cadre de ce système. La dernière édition est la Publication 103 parue fin 2007 (CIPR 103). En 2021, la CIPR a lancé le chantier de révision de ce document avec un objectif de publication pour le début de la prochaine décennie. Parmi les travaux en cours, un nombre important concerne les effets des rayonnements ionisants, parmi lesquels la clarification de la

classification des effets des rayonnements ionisants sur la santé, en particulier les effets non cancérogènes à long terme (ex : maladies cardiovasculaires), la mise à jour du calcul du détrimement radiologique (c'est-à-dire la relation entre l'exposition et le risque de cancer qui en résulte) et la clarification de la méthode d'évaluation du risque pour les espèces vivantes non-humaines. Une quinzaine d'experts de l'ASN est impliquée dans ces travaux de révision.

1.3.1 — La réponse individuelle aux rayonnements ionisants

Les effets des rayonnements ionisants sur la santé varient d'un individu à l'autre. La variabilité de la radiosensibilité individuelle est observée aux fortes doses de rayonnements ionisants, notamment en matière de réponses tissulaires. Elle a été bien documentée par les radiothérapeutes et les radiobiologistes. Une radiosensibilité à un niveau de dose n'implique pas nécessairement une radiosensibilité à d'autres niveaux de doses. Aux doses faibles et modérées, cette variabilité de la radiosensibilité, à l'échelle cellulaire notamment, est de plus en plus documentée.

Les recherches, comme les travaux du Groupe de recherche européen sur les faibles doses ([MELODI](#)) et pour le domaine médical ([Euramed](#)), se poursuivent sur ce sujet et devront être validées en clinique avant d'être intégrées dans les pratiques médicales. Le groupe de travail ([TG111](#)) de la CIPR dédié à ce sujet a publié une revue de l'état des connaissances sur la radiosensibilité individuelle et des possibilités de la prédire en vue d'élaborer des recommandations internationales de radioprotection. Toutefois, à ce stade, aucun biomarqueur valide ne permet cette prédiction. La réponse individuelle aux rayonnements ionisants demeure un sujet important de recherche et d'application en radiobiologie et en radioprotection (Euratom 2021-2022).

1.3.2 — Les effets des faibles doses

La relation linéaire sans seuil

La modèle de la relation linéaire sans seuil est utilisé en radioprotection pour estimer la probabilité de risque liée à une exposition à des rayonnements ionisants, en appliquant le principe de précaution. Selon ce modèle, le risque est présent dès qu'une exposition se produit, et il est proportionnel à la dose de rayonnements reçue.

Toutefois, de nombreuses incertitudes existent. Certains estiment que les effets des faibles doses pourraient être supérieurs, d'autres pensent que ces faibles doses pourraient n'avoir aucun effet en deçà d'un certain seuil ; certains affirment même que des faibles doses ont un effet bénéfique. La recherche en biologie moléculaire et cellulaire progresse, les études épidémiologiques menées sur des cohortes importantes aussi. La CIPR considère que l'hypothèse de cette relation, retenue pour modéliser l'effet des faibles doses sur la santé (*voir point 1.2*), constitue une base prudente en radioprotection pour

la gestion du risque dû à l'exposition aux rayonnements ionisants. Elle permet aux décideurs d'établir un cadre de radioprotection adapté et prudent, tout en restant raisonnable compte tenu des incertitudes liées à la complexité des phénomènes de réparation et de mutation de l'ADN et aux limites méthodologiques de l'épidémiologie, malgré les progrès de la recherche en biologie moléculaire et cellulaire.

La dose, le débit de dose et la durée de l'exposition

Les études épidémiologiques réalisées sur les personnes exposées aux bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki ont permis de mieux connaître les effets des rayonnements sur la santé, pour des expositions dues à une irradiation externe (exposition externe) en quelques fractions de seconde, à forte dose et fort débit de dose⁽⁵⁾ de rayonnements ionisants. Les études menées dans les pays les plus touchés par l'accident de Tchernobyl (la Biélorussie, l'Ukraine et la Russie) ont aussi fait avancer les connaissances sur l'effet des rayonnements sur la santé pour des expositions dues à une contamination interne (exposition interne), notamment à l'iode radioactif. Les études sur les travailleurs de l'industrie nucléaire ont permis de mieux préciser le risque pour des expositions chroniques à faibles doses établies sur de nombreuses années, qu'il résulte d'expositions externes ou de contaminations internes.



Manipulateur en électroradiologie médicale portant sur la poitrine un dosimètre passif.

Les effets héréditaires

Les effets héréditaires ont été documentés dans des travaux expérimentaux chez l'animal ; en particulier, les mutations induites par les rayonnements ionisants dans les cellules germinales (cellules à l'origine des cellules reproductrices : spermatozoïdes ou ovules) sont transmissibles à la descendance. La survenue d'éventuels effets héréditaires des rayonnements ionisants n'a pas été démontrée chez l'homme. De tels effets n'ont pas été observés chez les survivants des bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki. Un groupe de travail de la CIPR, le [TG121](#), travaille actuellement sur ce sujet.

La protection de l'environnement

La radioprotection a pour but de prévenir, réduire et limiter l'exposition aux rayonnements ionisants sur les personnes, directement ou indirectement, y compris par des effets délétères portés à l'environnement. Au-delà de la protection de l'environnement orientée vers la protection de l'homme et des générations présentes ou futures, la protection des espèces non humaines fait partie en tant que telle de la protection de l'environnement prescrite en France par la [Charte constitutionnelle de l'environnement](#). La protection de la nature au nom de l'intérêt propre des espèces animales et végétales (**voir chapitre 3, point 4.2.4**) a fait l'objet de plusieurs publications depuis 2008 ([CIPR 108](#), [114](#), [124](#) et [148](#)).

Les situations post-accidentelles, caractérisées par une contamination durable de l'environnement, constituent des terrains privilégiés pour comprendre les effets des rayonnements ionisants sur le vivant, au travers de l'étude de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes. Ces connaissances

sont indispensables pour évaluer la robustesse des données mobilisées par le système de radioprotection de l'environnement, historiquement fondé sur des expérimentations en laboratoire. Pourtant, les effets des rayonnements ionisants sur les espèces non humaines restent peu documentés, alors même que les accidents majeurs, notamment celui de Fukushima, ont fait émerger de fortes attentes sociétales et scientifiques sur cette question.

Dans ce contexte, l'ASNR pilote le [programme de recherche BEERAD](#), en collaboration avec l'INRAE et l'IER, qui vise à étudier l'impact des rayonnements ionisants sur les abeilles. Le projet BEERAD combine des expériences menées en laboratoire et sur le terrain autour de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Les premiers résultats montrent un effet négatif des rayonnements ionisants sur la reproduction de reines abeilles exposées au laboratoire pendant deux semaines. Les expériences de terrain montrent que des ruches installées à proximité de la centrale pendant cinq mois présentent des niveaux de césium dans le miel qui dépassent les valeurs limites de consommation de la nourriture au Japon. De nombreux autres résultats sont en cours d'analyse. Ce projet offre des perspectives pour mieux modéliser les impacts post-accidentels sur des fonctions écologiques majeures.

1.3.3 – La signature moléculaire dans les cancers radio-induits

Il est actuellement impossible de distinguer un cancer radio-induit d'un cancer non lié aux rayonnements ionisants. Les lésions provoquées par les rayonnements ionisants semblent similaires à celles du métabolisme cellulaire normal, avec l'implication dans les deux cas de radicaux libres, en particulier oxygénés. De plus, ni l'examen anatomopathologique ni la recherche de mutations spécifiques n'ont permis de différencier les tumeurs radio-induites des tumeurs sporadiques.

Lors des premières étapes de la carcinogenèse (processus de formation du cancer) une cellule présente une combinaison particulière de lésions de l'ADN lui permettant d'échapper au contrôle habituel de la division cellulaire. Plusieurs dizaines à une centaine de lésions de l'ADN (mutations, cassures, etc.) sont nécessaires. Tous les agents capables de léser l'ADN cellulaire (tabac, alcool, produits chimiques variés, rayonnements ionisants, température élevée, autres facteurs d'environnement notamment nutritionnels, radicaux libres du métabolisme cellulaire normal, etc.) contribuent au vieillissement cellulaire et à la carcinogenèse.

Dans une approche multirisque de la carcinogenèse, peut-on alors continuer à parler de cancers radio-induits ? Oui, compte tenu des nombreuses données épidémiologiques qui indiquent que la fréquence des cancers augmente lorsque la dose augmente, une fois tenu compte des autres principaux facteurs de risque. Cependant, l'événement radio-induit peut aussi être le seul en cause dans certains cas (cancers radio-induits chez les enfants).

La mise en évidence d'une signature radiologique des cancers, c'est-à-dire la découverte de marqueurs permettant de signer l'éventuelle composante radio-induite d'une tumeur, serait d'un apport considérable dans l'évaluation des risques liés aux expositions aux rayonnements ionisants, mais reste à ce jour non démontrée.

Le caractère multifactoriel de la carcinogenèse plaide pour une approche de précaution vis-à-vis de tous les facteurs de risque. Ceci est particulièrement important chez les personnes présentant une radiosensibilité individuelle élevée et pour les organes les plus sensibles comme le sein et la moelle osseuse, et ce d'autant plus que les personnes sont jeunes. Les principes de justification et d'optimisation trouvent là toute leur pertinence (**voir point 3.1**).

5. Le débit de dose radioactive détermine la dose absorbée (énergie absorbée par la matière) par unité de masse et de temps. Il se mesure en gray par seconde (Gy/s) dans le système international. Il est utilisé en physique et en radioprotection.

2 — Les différentes sources de rayonnements ionisants

2.1 Les rayonnements ionisants d'origine naturelle

En France, l'exposition à la radioactivité naturelle, sous ses différents modes (exposition aux rayonnements cosmiques, rayonnements telluriques, celle liée à l'incorporation de radionucléides naturels contenus dans les denrées et l'eau de boisson et celle associée à la présence de radon dans l'habitat) représente en moyenne 76% de l'exposition totale annuelle⁽⁶⁾.

2.1.1 — Les rayonnements cosmiques

Les rayonnements cosmiques sont composés essentiellement d'ions. Ils possèdent une composante directement ionisante et une composante indirectement ionisante due aux neutrons (dite « composante neutronique »), variables en fonction de l'altitude et de la longitude.

En prenant en compte l'altitude de chaque commune, le temps moyen passé à l'intérieur des habitations et un facteur de protection d'habitat de 0,8 (l'habitat atténue la composante ionique des rayonnements cosmiques), l'ASNR évalue la [dose efficace individuelle moyenne](#) par habitant en France à 0,31 mSv avec une variation de 0,3 à 1,1 mSv/an selon les communes.

Les voyageurs et le personnel navigant sont exposés lors de vols aériens, en fonction de l'altitude du vol et du trajet, à une exposition qui varie de quelques microsieverts (µSv) pour un vol Paris-province à près de 80 µSv pour un vol Paris-Ottawa. La dose efficace moyenne annuelle reçue par la population est en France de 14 µSv.

Du fait d'une exposition accrue aux rayonnements cosmiques en raison de séjours prolongés en altitude, une surveillance dosimétrique est nécessaire pour le personnel navigant ([voir chapitre 3, point 4.1.2](#)).

2.1.2 — Les rayonnements d'origine terrestre (hors radon)

Les radionucléides naturels d'origine terrestre sont présents à des teneurs diverses dans tous les milieux constitutifs de notre environnement et de l'organisme humain. Ils conduisent à une exposition externe de la population du fait des rayonnements gamma émis par les produits de filiation de l'uranium-238 et du thorium-232, et par le potassium-40 présents dans les sols.

Exposition externe aux rayons gamma d'origine tellurique

À partir de résultats de mesures du débit de dose gamma ambiant sur le territoire à l'intérieur des bâtiments, de la cartographie du potentiel uranium des formations géologiques, d'une corrélation entre le débit de dose gamma d'origine tellurique à l'extérieur de l'habitat et celui à l'intérieur de l'habitat et d'hypothèses sur le temps passé par la population à l'intérieur et à l'extérieur des habitations (respectivement 92% et 8%), la dose efficace annuelle moyenne due à l'exposition externe aux rayonnements gamma d'origine tellurique est estimée en France par l'ASNR à environ 0,63 mSv par personne et par an. Elle varie de 0,30 mSv/an à 2,0 mSv/an selon les communes.

Exposition liée à l'incorporation de radionucléides d'origine naturelle

La moyenne de l'exposition interne due à l'incorporation de radionucléides d'origine naturelle est estimée à 0,55 mSv/an. Les deux principales composantes de cette exposition sont l'incorporation par

l'alimentation et les eaux de boisson de potassium-40 (0,18 mSv) et des descendants des chaînes de l'uranium et du thorium (0,32 mSv).

En fonction des habitudes de consommation de chacun, en particulier de la consommation de poissons, de fruits de mer et de tabac, cette exposition peut fortement varier : de 0,4 mSv/an jusqu'à plus de 3,1 mSv/an pour, respectivement, les personnes ne consommant pas ces produits et celles en consommant de façon importante.

Les eaux destinées à la consommation humaine, notamment celles d'origine souterraine, ainsi que les eaux minérales, se chargent en radionucléides naturels du fait de la nature des couches géologiques dans lesquelles elles séjournent. La concentration en descendants de l'uranium et du thorium, mais aussi en potassium-40, varie selon les ressources exploitées, compte tenu de la nature géologique du sous-sol. La dose efficace moyenne liée aux descendants des chaînes U-Th dans les eaux de boisson est estimée par l'ASNR à 0,01 mSv/an. Une valeur haute de 0,30 mSv/an est retenue pour illustrer la variabilité de cette exposition.

2.1.3 — Le radon

Certaines zones géographiques présentent un potentiel élevé d'exhalation de radon du fait des caractéristiques géologiques des terrains (sous-sol granitique par exemple). La concentration mesurée à l'intérieur des habitations dépend également de l'étanchéité du bâtiment (soubassements), de la ventilation des pièces et du mode de vie des occupants.

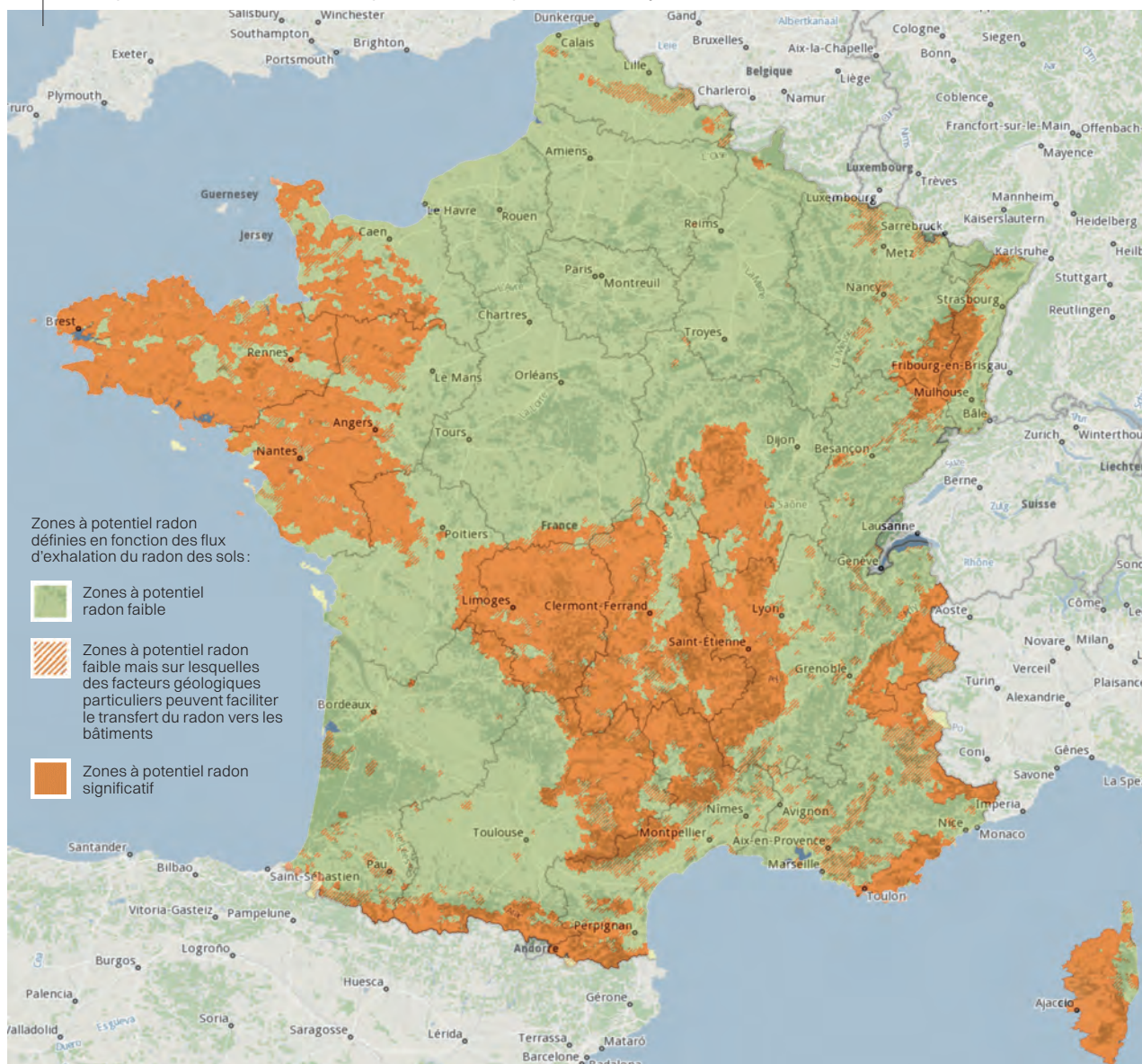


Pose de détecteurs radon dans une cave viticole.

Des campagnes nationales de mesurages avaient permis de classer les départements en fonction du potentiel d'exhalation de radon des terrains. En 2011, l'IRSN a publié une cartographie du territoire national en considérant le potentiel d'exhalation de radon dans le sol, à partir des données du Bureau de recherches géologiques et minières ([BRGM](#)).

Sur cette base, une classification plus fine, par commune, a été publiée par l'arrêté interministériel du 27 juin 2018 ([voir le moteur de recherche par commune et cartographie disponible sur le site de l'ASNR](#), ou la [carte interactive Géorisques](#), développée par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et qui répertorie l'ensemble des risques naturels et technologiques sur le territoire français).

6. Exposition de la population française aux rayonnements ionisants - [Bilan 2014-2019](#), IRSN, 2021.



Source : ASNR.

À partir des résultats de mesures disponibles et de la cartographie du potentiel radon géogénique du territoire, du temps moyen passé à l'intérieur des habitations et d'hypothèses sur les habitats concernés (collectifs ou individuels), l'IRSN a estimé la concentration moyenne en radon pour chaque commune : la concentration moyenne en radon 222 à l'intérieur de l'habitat en France métropolitaine, pondérée par la population et le type d'habitat, est de $60,8 \text{ Bq/m}^3$. Avec le facteur de dose en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2024, la dose efficace moyenne par habitant est estimée à $3,5 \text{ mSv/an}$. En fonction des communes, cette dose efficace varie de $0,75 \text{ mSv/an}$ à 47 mSv/an .

La nouvelle obligation faite aux laboratoires d'analyse des détecteurs radon de transmettre à l'ASNR les résultats des mesurages et les résultats attendus de l'action 7 du 4^e plan national d'action de gestion du risque lié au radon (*voir chapitre 3, point 4.2.2*), relative à la définition des modalités d'organisation pour la collecte des données de mesure du radon, doit permettre d'améliorer la connaissance des expositions au radon en France.

2.2 Les rayonnements ionisants liés aux activités humaines

Les activités humaines impliquant des risques d'exposition aux rayonnements ionisants, appelées activités nucléaires, peuvent être regroupées selon la nomenclature suivante :

- l'exploitation des installations nucléaires de base (INB) ;
- les activités nucléaires de proximité ;
- l'élimination des déchets radioactifs ;
- la gestion des sites contaminés ;
- le transport de substances radioactives ;
- les activités générant un renforcement des rayonnements ionisants d'origine naturelle.

2.2.1 – Les installations nucléaires de base

Les activités nucléaires sont de natures très diverses et couvrent toute activité touchant à la mise en œuvre ou à l'utilisation de substances radioactives ou de rayonnements ionisants. Ces activités sont soumises à des dispositions générales du code de la santé publique et, selon leur nature et les risques qu'elles présentent,

à un régime juridique spécifique. Les INB sont définies à l'[article L. 593-2 du code de l'environnement](#) :

- 1° Les réacteurs nucléaires ;
- 2° Les installations répondant à des caractéristiques définies par décret en Conseil d'État, de préparation, d'enrichissement, de fabrication, de traitement ou d'entreposage de combustibles nucléaires ou de traitement, d'entreposage ou de stockage de déchets radioactifs ;
- 3° Les installations contenant des substances radioactives ou fissiles et répondant à des caractéristiques définies par décret en Conseil d'État ;
- 4° Les accélérateurs de particules répondant à des caractéristiques définies par décret en Conseil d'État ;
- 5° Les centres de stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs mentionnés à l'[article L. 542-10-1 du code de l'environnement](#).

Les installations relèvent du [régime des INB](#), régi par les chapitres III et VI du titre IX du livre V du [code de l'environnement](#) et les textes pris pour leur application.

La liste des INB au 31 décembre 2025 figure dans la partie qui précède le chapitre 1 de ce rapport.

La prévention des risques accidentels et la sûreté nucléaire

Le principe fondamental adopté internationalement sur lequel repose le système d'organisation et de réglementation spécifique de la [sûreté nucléaire](#) est celui de la responsabilité de l'exploitant (*voir point 3.1*). Les pouvoirs publics veillent à ce que cette responsabilité soit pleinement assumée dans le respect des prescriptions réglementaires. Pour ce qui concerne la prévention des risques pour les travailleurs, l'exploitant d'une INB est tenu de mettre en œuvre tous les moyens nécessaires pour assurer la protection contre les dangers des rayonnements ionisants. Il doit en particulier s'assurer du respect des règles générales applicables à l'ensemble des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants (organisation du travail, prévention des accidents, suivi médical des travailleurs, y compris ceux des entreprises extérieures, etc.).

Pour les questions relevant de la protection de la population et de l'environnement, l'exploitant de l'INB doit également mettre en œuvre les moyens nécessaires pour atteindre et maintenir un niveau optimal de protection. Plus particulièrement, les rejets d'effluents liquides et gazeux, radioactifs ou non radioactifs, sont strictement réglementés (*voir point 5.1 du chapitre 3*).

2.2.2 — Le transport de substances radioactives

Lors du [transport de substances radioactives](#), les risques essentiels sont ceux d'exposition interne ou externe, de criticité ainsi que ceux de nature chimique. La sûreté du transport de substances radioactives s'appuie sur une logique de défense en profondeur :

- la robustesse de l'emballage est la première ligne de défense. L'emballage joue un rôle essentiel et doit résister aux conditions de transport envisageables, ainsi qu'aux effets des accidents susceptibles de se produire ;
- la fiabilité des opérations de transport constitue la deuxième ligne de défense ;
- enfin, la troisième ligne de défense est constituée par les moyens d'intervention mis en œuvre en cas d'incident ou d'accident.

2.2.3 — Les activités nucléaires de proximité

Les rayonnements ionisants, qu'ils soient émis par des radionucléides ou générés par des appareils électriques, sont utilisés dans de très nombreux domaines dont la [médecine](#) (radiologie, radiothérapie, médecine nucléaire et pratiques interventionnelles radioguidées - PIR), la biologie, [la recherche](#),

[l'industrie](#), mais aussi les applications vétérinaires, la stérilisation de nombreux produits, ou la conservation des denrées alimentaires.

L'employeur est tenu de mettre en œuvre tous les moyens nécessaires pour assurer la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants. L'exploitant de l'installation doit également mettre en place les dispositions prévues par le code de la santé publique pour assurer la gestion des sources de rayonnements ionisants qu'il détient (notamment les sources radioactives), assurer, le cas échéant, la gestion des déchets produits et limiter les rejets des effluents liquides et gazeux. Dans le cas d'utilisation à des fins médicales, les questions concernant la protection des patients sont également prises en compte.

2.2.4 — La gestion des déchets radioactifs

Comme toutes les activités industrielles, les activités nucléaires peuvent créer des [déchets](#) dont certains sont radioactifs. Les trois principes fondamentaux sur lesquels s'appuie une gestion rigoureuse des déchets radioactifs sont la responsabilité du producteur de déchets, la traçabilité des déchets et l'information du public.

Les dispositions techniques de gestion à mettre en œuvre doivent être adaptées au risque présenté par les déchets radioactifs. Ce risque peut être estimé principalement au travers de deux paramètres : l'activité, qui contribue à la toxicité du déchet, et la période, durée au bout de laquelle l'activité est divisée par deux.

Enfin, la gestion des déchets radioactifs doit être déterminée préalablement à toute création d'activité nouvelle ou modification d'activité existante afin de :

- s'assurer de la disponibilité de filières de traitement des différentes catégories de déchets susceptibles d'être produits, depuis la phase amont (production de déchets et conditionnement sous forme de colis) jusqu'à la phase aval (entreposage, transport, stockage) ;
- optimiser les filières de gestion de déchets.

2.2.5 — La gestion des sites contaminés

La gestion des [sites contaminés](#) du fait d'une radioactivité résiduelle résultant d'une activité nucléaire passée ou d'une activité ayant produit des dépôts de radionucléides naturels justifie des actions spécifiques de radioprotection, notamment dans le cas où une réhabilitation du site est envisagée.

Compte tenu des usages actuels ou futurs du site, des objectifs de décontamination doivent être établis. L'élimination des déchets produits lors de l'assainissement des locaux ainsi que des terres contaminées doit être maîtrisée, depuis le site jusqu'à l'entreposage ou le stockage.

2.2.6 — Les activités utilisant des substances radioactives d'origine naturelle

Les expositions aux rayonnements ionisants d'origine naturelle, lorsqu'elles sont renforcées du fait des activités humaines, justifient des actions de contrôle, si elles sont susceptibles de générer un risque pour les travailleurs exposés et, le cas échéant, pour la population.

Ainsi, certaines activités incluses dans la définition des « activités nucléaires » peuvent avoir recours à l'utilisation de matériaux contenant des substances radioactives d'origine naturelle à des niveaux de concentration susceptibles d'accroître, de manière significative, l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs et, dans une moindre mesure, des populations proches des lieux où sont exercées ces activités.

Les familles naturelles de l'uranium et du thorium sont les principaux radionucléides rencontrés dans ces industries ; on peut citer :

- la production de composés de thorium, la fabrication de produits contenant du thorium et le travail mécanique de produits contenant du thorium ;
- la production pétrolière et gazière d'énergie géothermique, de dioxyde de titane, d'engrais phosphatés et de ciment ;
- l'extraction de terres rares et de granits ;
- les activités de fonderie d'étain, de plomb ou de cuivre.

Les actions de radioprotection à mener dans ce domaine visent les travailleurs (risque d'irradiation externe et de contamination interne, radon) mais aussi la population, par exemple, dans le cas de rejets d'effluents dans l'environnement ou de production de résidus susceptibles d'être réutilisés, notamment, dans les matériaux de construction. Depuis 2018, ces activités sont soumises au régime des installations classées pour la protection de l'environnement.

3 — Les principes de la sûreté nucléaire et de la radioprotection

3.1 Les principes fondamentaux

Les activités nucléaires doivent s'exercer dans le respect de principes fondamentaux inscrits dans des textes juridiques ou des normes internationales.

Il s'agit notamment :

- au niveau national, des principes inscrits dans la [Charte de l'environnement](#) – qui a valeur constitutionnelle – et dans différents codes ([code de l'environnement](#), [code du travail](#), [code de la santé publique](#)) ;
- sur le plan européen, des règles définies par les directives établissant un [cadre communautaire](#) pour la sûreté des installations nucléaires et pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs ;
- au niveau international, des dix principes fondamentaux de sûreté établis par l'[AIEA \(voir focus n°2\)](#) mis en application par la [Convention sur la sûreté nucléaire](#), qui établit le cadre international du contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection.

Ces diverses dispositions d'origines différentes se recoupent largement. Elles peuvent être regroupées sous la forme des huit principes présentés ci-après.

3.1.1 — Le principe de responsabilité de l'exploitant

Ce principe, défini à l'article 9 de la [Convention de la sûreté nucléaire](#), est le premier des principes fondamentaux de sûreté de l'AIEA. Il prévoit que la responsabilité en matière de sûreté des activités nucléaires à risques incombe à ceux qui les entreprennent ou les exercent.

Il trouve directement son application dans l'ensemble des activités nucléaires.

3.1.2 — Le principe du « pollueur-payeur »

Le principe du « pollueur-payeur », figurant à l'[article 110-1 du code de l'environnement](#), dispose que les frais résultant des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur.

3.1.3 — Le principe de précaution

Le principe de précaution, défini à l'article 5 de la Charte de l'environnement, énonce que « *l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement* ».

Ce principe se traduit, par exemple, en ce qui concerne les effets biologiques des rayonnements ionisants à faibles doses, par l'adoption d'une relation linéaire et sans seuil entre la dose et l'effet ([voir point 1.3.2](#)).

3.1.4 — Le principe de participation

Le principe de participation prévoit la participation des populations à l'élaboration des décisions des pouvoirs publics. S'inscrivant dans la ligne de la [Convention d'Aarhus](#), l'article 7 de la Charte de l'environnement le définit en ces termes : « *Toute personne a le droit, dans les conditions et les limites définies par la loi, d'accéder aux informations relatives à l'environnement détenues par les autorités publiques et de participer à l'élaboration des décisions publiques ayant une incidence sur l'environnement.* »

Dans le domaine nucléaire, ce principe se traduit notamment par l'organisation de débats publics nationaux, obligatoires avant la construction d'une centrale nucléaire, par exemple, ou bien désormais de certains plans et programmes soumis à une évaluation

Responsabilité des exploitants et mission de contrôle de l'ASNR



Les principes fondamentaux de sûreté

L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) définit les dix principes suivants dans sa publication *Principes fondamentaux de sûreté*, collection Normes de sûreté de l'AIEA - n° SF-1 :

1. La responsabilité en matière de sûreté doit incomber à la personne ou à l'organisme responsable des installations et activités entraînant des risques radiologiques ;
2. Un cadre juridique et gouvernemental efficace pour la sûreté, y compris un organisme de réglementation indépendant, doit être établi et maintenu ;
3. Une capacité de direction et de gestion efficace de la sûreté doit être mise en place et maintenue dans les organismes qui s'occupent des risques radiologiques et dans les installations et activités qui entraînent de tels risques ;
4. Les installations et activités qui entraînent des risques radiologiques doivent être globalement utiles ;
5. La protection doit être optimisée de façon à apporter le plus haut niveau de sûreté que l'on puisse raisonnablement atteindre ;
6. Les mesures de contrôle des risques radiologiques doivent protéger contre tout risque de dommage inacceptable ;
7. Les générations et l'environnement actuels et futurs doivent être protégés contre les risques radiologiques ;
8. Tout doit être concrètement mis en œuvre pour prévenir les accidents nucléaires ou radiologiques et en atténuer les conséquences ;
9. Des dispositions doivent être prises pour la préparation et la conduite des interventions d'urgence en cas d'incidents nucléaires ou radiologiques ;
10. Les actions protectrices visant à réduire les risques radiologiques existants ou non réglementés doivent être justifiées et optimisées.

environnementale stratégique comme le Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR). Il faut aussi citer les enquêtes publiques, notamment au cours de l'instruction des dossiers relatifs à la création ou au démantèlement d'installations nucléaires, la consultation du public sur les projets de décision ayant une incidence sur l'environnement ou encore la mise à disposition, par un exploitant d'INB, de son dossier portant sur une modification de son installation susceptible de provoquer un accroissement significatif des prélèvements d'eau ou des rejets dans l'environnement de l'installation.

3.1.5 — Le principe de justification

Le principe de justification, défini par l'article L. 1333-2 du code de la santé publique, dispose que : « Une activité nucléaire ne peut être entreprise ou exercée que si elle est justifiée par les avantages qu'elle procure sur le plan individuel ou collectif, notamment en matière sanitaire, sociale, économique ou scientifique, rapportés aux risques inhérents à l'exposition aux rayonnements ionisants auxquels elle est susceptible de soumettre les personnes. »

L'évaluation du bénéfice attendu d'une activité nucléaire et des inconvénients associés peut conduire à interdire une activité pour laquelle le bénéfice apparaît insuffisant au regard du risque sanitaire. Pour les activités existantes, une réévaluation de la justification peut être réalisée si l'état des connaissances et des techniques le justifie.

7. Le principe ALARA (As Low As Reasonably Achievable - au plus faible niveau que l'on peut raisonnablement atteindre) est apparu pour la première fois dans la publication 26 de 1977 de la Commission internationale de protection radiologique. Il était l'aboutissement d'une réflexion autour du principe d'optimisation de la radioprotection. Au cours des trente dernières années, l'acceptation et la mise en œuvre du principe ALARA ont évolué de manière significative en Europe avec une implication forte de la Commission européenne qui a abouti, en 1991, à la création d'un réseau ALARA européen.

3.1.6 — Le principe d'optimisation

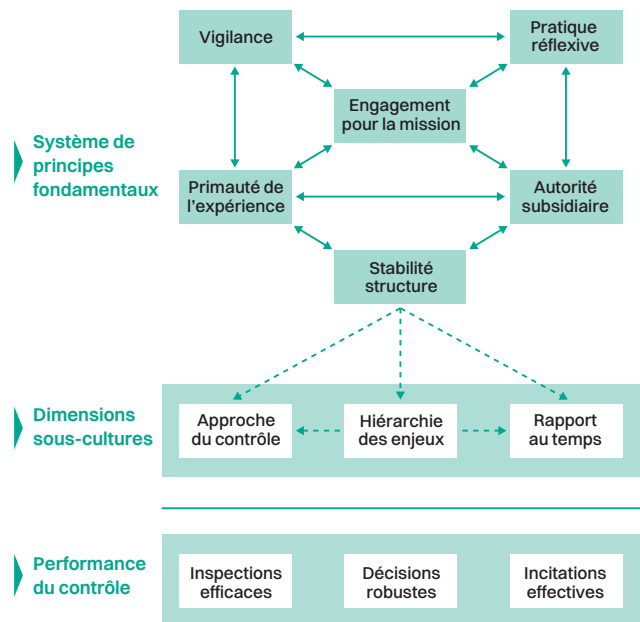
Le principe d'optimisation, défini par l'article L. 1333-2 du code de la santé publique, dispose que : « Le niveau de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants [...], la probabilité de la survenue de cette exposition et le nombre de personnes exposées doivent être maintenus au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu de l'état des connaissances techniques, des facteurs économiques et sociétaux et, le cas échéant, de l'objectif médical recherché. »

Ce principe, connu sous le nom de principe ALARA⁽⁷⁾, demande de maintenir les expositions et les rejets aussi bas qu'il est raisonnablement possible de le faire, en appliquant les meilleures techniques disponibles sans compromettre ni l'activité, ni le niveau de sûreté ou de radioprotection. Concrètement, il conduit par exemple à réduire, dans les autorisations de rejets, les quantités de radionucléides présents dans les effluents radioactifs issus des installations nucléaires, à imposer une surveillance des expositions professionnelles afin de les limiter au strict nécessaire ou encore à veiller à ce que les expositions médicales à visée diagnostique se situent dans la zone attendue au regard d'un niveau de référence, qui sert de repère pour l'optimisation, sauf justification liée aux bénéfices attendus ou aux contraintes techniques.

3.1.7 — Le principe de limitation

Le principe de limitation, défini par l'article L. 1333-2 du code de la santé publique dispose que « [...] l'exposition d'une personne aux rayonnements ionisants [...] ne peut porter la somme des doses reçues au-delà des limites fixées par voie réglementaire, sauf lorsque cette personne est l'objet d'une exposition à des fins médicales ou dans le cadre d'une recherche mentionnée au 1° de l'article L. 1121-1. »

Système de principes fondamentaux interdépendants, les trois dimensions des sous-cultures du système organisationnel de l'ASNR et les trois critères de performance du contrôle



Les expositions induites par les activités nucléaires pour la population générale ou les travailleurs font l'objet de limites strictes. Ces limites intègrent des marges de sécurité importantes pour prévenir l'apparition des **effets déterministes** ; elles ont également pour but de réduire, au niveau le plus bas possible, l'apparition des effets probabilistes à long terme.

Le dépassement de ces limites traduit une situation anormale, qui peut d'ailleurs donner lieu à des sanctions administratives ou pénales.

Dans le cas des expositions médicales des patients, aucune limite de dose n'est fixée dans la mesure où cette exposition doit être justifiée par le bénéfice attendu pour la personne exposée.

3.1.8 — Le principe de prévention

Pour anticiper toute atteinte à l'environnement, le principe de prévention, défini à l'**article 3 de la Charte de l'environnement**, prévoit la mise en œuvre de règles et d'actions qui doivent tenir compte des « *meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable* ».

Dans le domaine nucléaire, ce principe se décline par le concept de défense en profondeur présenté ci-après.

3.2 Quelques aspects de la démarche de sûreté

Les principes et démarches de la sûreté présentés ci-après ont été mis en place progressivement et intègrent le retour d'expérience des accidents. La sûreté n'est jamais définitivement acquise. Malgré les précautions prises pour la conception, la construction et le fonctionnement des installations nucléaires, un accident ne peut jamais être exclu. Il faut donc avoir la volonté de progresser et de mettre en place une démarche d'amélioration continue pour réduire les risques.

3.2.1 — La culture de sûreté

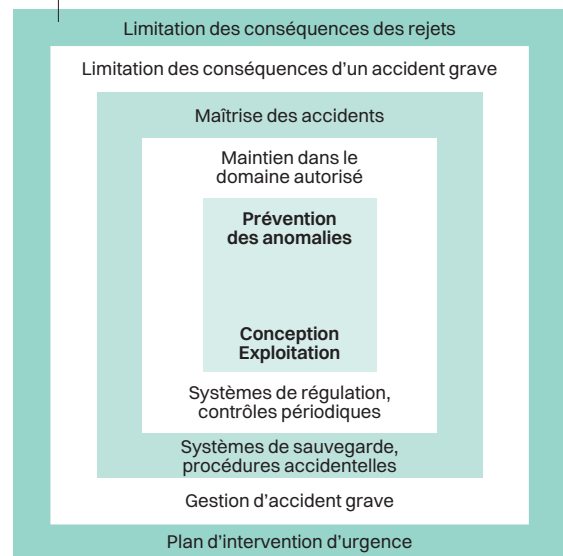
La culture de sûreté est définie par l'**INSAG**, groupe consultatif international pour la sûreté nucléaire placé auprès du directeur général de l'AIEA, comme l'ensemble des caractéristiques et des attitudes qui, dans les organismes et chez les individus, font que les questions relatives à la sûreté des installations nucléaires bénéficient, en priorité, de l'attention qu'elles méritent en raison de leur importance.

La culture de sûreté traduit donc la façon dont l'organisation et les individus remplissent leurs rôles et assument leurs responsabilités vis-à-vis de la sûreté. Elle constitue un des fondements indispensables au maintien et à l'amélioration de la sûreté. Elle engage les organismes et chaque individu à prêter une attention particulière et appropriée à la sûreté. L'organisation doit mettre en place des dispositions (formation, compagnonnage, préparation et planification des interventions, etc.) permettant une expression de la culture de sûreté à tous les niveaux de l'organisation au travers d'une approche rigoureuse et prudente et une attitude interrogative qui permet le respect des règles et l'initiative. Elle trouve une déclinaison opérationnelle dans les décisions et les actions quotidiennes liées aux activités.

3.2.2 — Le concept de défense en profondeur

Le concept de défense en profondeur consiste en la mise en place d'une série de niveaux de défense reposant sur les caractéristiques intrinsèques de l'installation, des dispositions matérielles, organisationnelles et humaines ainsi que des procédures destinées

Les 5 niveaux de la défense en profondeur



à prévenir les accidents puis, en cas d'échec de la prévention, à en limiter les conséquences. La défense en profondeur est un concept qui s'applique à tous les stades de la vie d'une installation, de la conception au démantèlement.

Ces niveaux de défense sont consécutifs et indépendants afin de s'opposer au développement d'un accident.

Un élément important pour l'indépendance des niveaux de défense est la mise en œuvre de technologies de natures différentes (systèmes « diversifiés »).

La conception d'une installation nucléaire est fondée sur une démarche de défense en profondeur. Par exemple, pour les réacteurs nucléaires, on définit les cinq niveaux suivants :

Premier niveau : prévention des anomalies de fonctionnement et des défaillances des systèmes

Il s'agit en premier lieu de concevoir et de réaliser l'installation de manière robuste et prudente, en intégrant des marges de sûreté et en prévoyant une résistance à l'égard de ses propres défaillances ou des agressions. Cela implique de mener une étude aussi complète que possible des conditions de fonctionnement normal, pour déterminer les contraintes les plus sévères auxquelles les systèmes seront soumis. Un premier dimensionnement de l'installation intégrant des marges de sûreté peut alors être établi. L'installation doit ensuite être maintenue dans un état au moins équivalent à celui prévu à sa conception par une maintenance adéquate. L'installation doit être exploitée de manière éclairée et prudente.

Deuxième niveau : maintien de l'installation dans le domaine autorisé

Il s'agit de concevoir, d'installer et de faire fonctionner des systèmes de régulation et de limitation qui maintiennent l'installation dans un domaine très éloigné des limites de sûreté. Par exemple, si la température d'un circuit augmente, un système de refroidissement se met en route avant que la température n'atteigne la limite autorisée. La surveillance du bon état des matériels et du bon fonctionnement des systèmes fait partie de ce niveau de défense.

Troisième niveau : maîtrise des accidents sans fusion du cœur

Il s'agit ici de postuler que certains accidents, choisis pour leur caractère « enveloppe », c'est-à-dire les plus pénalisants d'une même famille, peuvent se produire et de dimensionner des systèmes de sauvegarde permettant d'y faire face.

Ces accidents sont, en général, étudiés avec des hypothèses pessimistes, c'est-à-dire en supposant que les différents paramètres gouvernant l'accident sont les plus défavorables possible. En outre, on applique le critère de défaillance unique, c'est-à-dire que, dans la situation accidentelle, on postule en plus de l'accident la défaillance la plus défavorable de l'un des composants qui servent à gérer cette situation. Cela conduit à ce que les systèmes intervenant en cas d'accident (systèmes dits « de sauvegarde », assurant l'arrêt d'urgence, l'injection d'eau de refroidissement dans le réacteur, etc.) soient constitués d'au moins deux voies redondantes et indépendantes.

Quatrième niveau : maîtrise des accidents avec fusion du cœur

Ces accidents ont été étudiés à la suite de l'accident de Three Mile Island aux États-Unis (1979) et sont désormais pris en compte dès la conception des nouveaux réacteurs tels que le réacteur européen à eau pressurisée (EPR). Il s'agit soit d'exclure ces accidents, soit de concevoir des systèmes permettant d'y faire face.

Cinquième niveau : limitation des conséquences radiologiques en cas de rejets importants

Il s'agit là de la mise en œuvre de mesures prévues dans les [plans d'urgence](#) incluant des mesures de protection des populations : mise à l'abri, ingestion de comprimés d'iode stable pour saturer la thyroïde avant qu'elle puisse fixer l'iode radioactif rejeté, évacuation, restrictions de consommation d'eau ou de produits agricoles, etc.

3.2.3 — L'interposition de barrières

Pour limiter le risque de rejets, plusieurs barrières sont interposées entre les substances radioactives et l'environnement. Ces barrières doivent être conçues avec un haut degré de fiabilité et bénéficier d'une surveillance permettant d'en détecter les éventuelles faiblesses avant une défaillance. Pour les réacteurs à eau sous pression (REP), ces barrières sont au nombre de trois : la gaine du combustible, l'enveloppe du circuit primaire et l'enceinte de confinement (*voir chapitre 8*).

3.2.4 — La démarche déterministe et la démarche probabiliste

Le fait de postuler la survenue de certains accidents et de vérifier que, grâce au fonctionnement prévu des matériels, les conséquences de ces accidents resteront limitées est une démarche dite « déterministe ». Cette démarche est simple à mettre en œuvre dans son principe et permet de concevoir une installation (en particulier de dimensionner ses systèmes) avec de bonnes marges de sûreté, en utilisant des cas dits « enveloppes ». La démarche déterministe ne permet cependant pas d'identifier quels sont les scénarios les plus probables car elle focalise l'attention sur des accidents étudiés avec des hypothèses pessimistes.

Il convient donc de compléter l'approche déterministe par une approche reflétant mieux les divers scénarios possibles d'accidents en fonction de leur probabilité d'occurrence, à savoir une approche probabiliste, utilisée dans les « analyses probabilistes de sûreté ».

Ainsi, pour les centrales nucléaires, les études probabilistes de sûreté de niveau 1 consistent à construire, pour chaque événement (dit « déclencheur ») conduisant à l'activation d'un système de sauvegarde (troisième niveau de la défense en profondeur), des arbres d'événements, définis par les défaillances – ou le succès – des actions prévues par les procédures de conduite du réacteur et les défaillances – ou le bon fonctionnement – des matériels du réacteur. Grâce à des statistiques sur la fiabilité des systèmes et sur le taux de succès des actions (ce qui inclut donc des données de « fiabilité humaine »), la probabilité de chaque séquence est calculée. Les séquences similaires correspondant à un même événement déclencheur sont regroupées en familles, ce qui permet de déterminer la contribution de chaque famille à la probabilité de fusion du cœur du réacteur.

Les études probabilistes de sûreté, bien que limitées par les incertitudes sur les données de fiabilité et les approximations de modélisation de l'installation, prennent en compte un ensemble d'accidents plus large que les études déterministes et permettent de vérifier et éventuellement de compléter la conception résultant de l'approche déterministe. Elles doivent donc être un complément aux études déterministes, sans toutefois s'y substituer.

Les études déterministes et les analyses probabilistes constituent un élément essentiel de la démonstration de sûreté nucléaire, qui traite des défaillances internes d'équipements, des agressions internes et externes, ainsi que des cumuls plausibles entre ces événements.

Plus précisément, les défaillances internes correspondent à des dysfonctionnements, pannes ou endommagements d'équipements de l'installation, y compris résultant d'actions humaines inappropriées. Les agressions internes et externes correspondent quant à elles à des événements trouvant leur origine respectivement à l'intérieur ou à l'extérieur de l'installation et pouvant remettre en cause la sûreté de l'installation.

Les défaillances internes incluent par exemple :

- la perte des alimentations électriques ou des moyens de refroidissement ;
- l'éjection d'une grappe de commande ;
- la rupture d'une tuyauterie du circuit primaire ou secondaire d'un réacteur nucléaire ;
- la défaillance de l'arrêt d'urgence du réacteur.

S'agissant des agressions internes, il est notamment nécessaire de prendre en considération :

- les émissions de projectiles, notamment celles induites par la défaillance de matériels tournants ;
- les défaillances d'équipements sous pression ;
- les collisions et chutes de charges ;
- les explosions ;
- les incendies ;
- les émissions de substances dangereuses ;
- les inondations trouvant leur origine dans le périmètre de l'installation ;
- les interférences électromagnétiques ;
- les actes de malveillance.

Enfin, les agressions externes comprennent notamment :

- les risques induits par les activités industrielles et les voies de communication, dont les explosions, les émissions de substances dangereuses et les chutes d'aéronefs ;
- les séismes ;
- la foudre et les interférences électromagnétiques ;
- les conditions météorologiques ou climatiques extrêmes ;
- les incendies ;
- les inondations trouvant leur origine à l'extérieur du périmètre de l'installation ;
- les actes de malveillance.

3.2.5 — Le retour d'expérience

Le [retour d'expérience](#), qui participe de la défense en profondeur, est l'un des outils essentiels du management de la sûreté. Il repose sur une démarche organisée et systématique de recueil et d'exploitation des signaux que donne un système. Il doit permettre de partager l'expérience acquise pour un apprentissage organisationnel (soit la mise en œuvre, dans une structure apprenante, de dispositifs de prévention s'appuyant sur l'expérience passée). Le premier objectif du retour d'expérience est de comprendre et ainsi de progresser sur la connaissance technologique et celle des pratiques réelles d'exploitation pour, lorsque cela est pertinent, réinterroger la conception (technique et documentaire). L'enjeu du retour d'expérience étant collectif, le deuxième objectif est de partager la connaissance qui en est issue à travers la date de détection et l'enregistrement de l'écart, de ses enseignements et de son traitement. Le troisième objectif du retour d'expérience est d'agir sur

les organisations et les processus de travail, les pratiques de travail (individuelles et collectives) et la performance du système technique.

Le retour d'expérience englobe donc les événements, incidents et accidents qui se produisent en France et à l'étranger dès lors qu'il est pertinent de les prendre en compte pour renforcer la sûreté nucléaire ou la radioprotection.

3.2.6 — Les facteurs sociaux, organisationnels et humains

L'importance des facteurs sociaux, organisationnels et humains pour la sûreté nucléaire, la radioprotection et la protection de l'environnement

La contribution des personnes et des organisations à la sûreté, la radioprotection et la protection de l'environnement est déterminante lors de la conception, de la construction, de la mise en service, du fonctionnement et du démantèlement des installations ainsi que lors du transport de substances radioactives. De même, la façon dont les personnes et les organisations gèrent les écarts à la réglementation, aux référentiels et aux règles de l'art, ainsi que les enseignements qu'ils en tirent, est déterminante. Par conséquent, tous les intervenants, quels que soient leur positionnement hiérarchique et leur fonction, contribuent à la sûreté, la radioprotection et la protection de l'environnement, du fait de leurs capacités à s'adapter, à détecter et à corriger des défauts, à redresser des situations dégradées et à pallier certaines difficultés d'application des procédures.

On définit les facteurs sociaux, organisationnels et humains (FSOH) comme l'ensemble des éléments des situations de travail et de l'organisation qui ont une influence sur l'activité de travail des intervenants. Les éléments considérés relèvent de l'individu (acquis de formation, fatigue ou stress, etc.) et de l'organisation du travail dans laquelle il s'inscrit (liens fonctionnels et hiérarchiques, coactivités, etc.), des dispositifs techniques (outils, logiciels, etc.) et, plus largement, de l'environnement de travail, avec lesquels l'individu interagit.

L'environnement de travail concerne, par exemple, l'ambiance thermique, sonore ou lumineuse du poste de travail ainsi que l'accessibilité des locaux.

La variabilité des caractéristiques des intervenants (la vigilance qui diffère en fonction du moment de la journée, le niveau d'expertise qui varie selon l'ancienneté au poste) et des situations rencontrées (une panne imprévue, des tensions sociales) explique que ces intervenants aient perpétuellement à adapter leurs modes opératoires pour réaliser leur travail de manière performante. Cet objectif doit être atteint à un coût acceptable pour les intervenants (en matière de fatigue, de stress) et leur apporter des bénéfices (le sentiment du travail bien fait, la reconnaissance par les pairs et la hiérarchie, le développement de nouvelles compétences). Ainsi, une situation d'exploitation ou une tâche obtenue au prix d'un coût très élevé pour les intervenants est une source de risques : une petite variation du contexte de travail, de l'environnement humain ou de l'organisation du travail peut empêcher les intervenants d'accomplir leurs tâches conformément à ce qui est attendu.

L'intégration des FSOH

L'ASNR considère que les FSOH doivent être pris en compte de manière adaptée aux enjeux de sûreté des installations et de radioprotection des travailleurs lors :

- de la conception d'une nouvelle installation, d'un matériel, d'un logiciel, d'un colis de transport ou de la modification d'une installation existante. En particulier, l'ASNR attend que la conception soit centrée sur l'opérateur humain, à travers un processus itératif comprenant une phase d'analyse, une phase de conception et une phase d'évaluation ;
- des opérations ou des activités effectuées par des intervenants lors de la mise en service, du fonctionnement et du démantèlement des installations nucléaires, ainsi qu'au moment des transports de substances radioactives.

En outre, l'ASNR considère que les exploitants doivent analyser les causes profondes (souvent organisationnelles) des événements significatifs et identifier, mettre en œuvre et évaluer l'efficacité des actions correctives associées, cela dans la durée.

Les exigences de l'ASNR sur les FSOH

L'[arrêté du 7 février 2012](#) fixant les règles générales relatives aux INB prévoit que l'exploitant définit et met en œuvre un système de gestion intégré (SGI) permettant d'assurer que les exigences relatives à la sûreté, la radioprotection et la protection de l'environnement sont systématiquement prises en compte dans toute décision concernant l'installation. Le SGI précise les dispositions prises en matière d'organisation et de ressources de tout ordre, en particulier celles retenues pour maîtriser les activités importantes. C'est pourquoi l'ASNR demande à l'exploitant de mettre en place un SGI qui permet le maintien et l'amélioration continue de la sûreté à travers, notamment, le développement d'une culture de sûreté.

3.2.7 — La prise en compte de la complexité

La mise en œuvre des principes de sûreté évoqués précédemment ne constitue pas, à elle seule, une condition suffisante pour atteindre le niveau de sûreté recherché.

En particulier, les exploitants et les responsables d'activités nucléaires font part d'une complexité croissante dans leurs activités pouvant provoquer, dans certaines situations, des effets néfastes sur la sûreté en faisant perdre le sens des exigences et en générant des risques d'erreurs. Si cette complexité a de multiples origines, en premier lieu internes aux exploitants, certaines peuvent être attribuées directement ou indirectement aux modalités du contrôle exercé par l'ASNR. Aussi, exploitants et ASNR doivent œuvrer conjointement pour y remédier.

Le Comité d'orientation sur les facteurs organisationnels et humains (Cofsoh) a organisé deux journées de réflexion consacrées à cette thématique en 2024, permettant aux participants de définir un vocabulaire commun, d'analyser les différentes formes et dynamiques de la complexité ainsi que les moyens d'y faire face, puis d'illustrer ces notions au travers de cas vécus dans les installations nucléaires. Une [synthèse de ces journées](#) a été publiée en 2025 et le Cofsoh prévoit de revenir, en 2026, sur les travaux engagés depuis sur ce sujet.

Par ailleurs, l'ASNR finance actuellement des travaux, dont les résultats sont attendus pour 2026, sur les paramètres et les dynamiques de la complexité dans la gouvernance de la sûreté des réacteurs en France.

L'ASNR poursuit actuellement ses réflexions afin de contribuer à la réduction de la complexité. Elle agit d'une part sur ses propres travaux pour éviter de générer davantage de complexité. Elle souhaite par ailleurs développer les inspections destinées à analyser, au plus près des activités, les situations dans lesquelles la complexité pourrait être réduite.

De plus, l'ASNR suit les initiatives lancées par les exploitants et responsables d'activités, comme les travaux d'EDF de refonte globale des règles générales d'exploitation de ses réacteurs, afin de les simplifier et d'en faciliter la lisibilité et l'utilisation par les opérateurs de conduite ([voir focus n°4 du chapitre 8](#)).

Enfin, l'ASNR contribuera en 2026 à l'analyse stratégique « maîtriser le chantier de la simplification » du programme « [FONCSI 4](#) » (2023-2027). Ce programme vise à questionner la relation entre le management de la sécurité et sa procéduralisation (règles formelles, documentation, enregistrement, rapports, certification, audits, etc.). La première réunion sera notamment consacrée à la définition d'une première ligne de travail à partir des questions suivantes : comment faire la part entre la formalisation utile et la bureaucratie excessive, générant des surcoûts, des tâches non pertinentes et des contraintes inutiles voire néfastes ? Comment justifier la simplification auprès des parties prenantes externes ? Quel serait l'impact de cette simplification sur le rôle des responsables sécurité ? La simplification est-elle la seule manière de répondre à la complexité croissante des organisations ?

3.2.8 — L'application en France des principes de sûreté

En France, la gestion de la sûreté nucléaire et de la radioprotection est confiée depuis le 1^{er} janvier 2025 à l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR), issue de la fusion de l'ASN (Autorité de sûreté nucléaire) et de l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire). Cette nouvelle autorité ainsi que les autres acteurs du contrôle sont présentés dans le chapitre 2 du présent rapport. Ses activités de contrôle sont détaillées dans le chapitre 3, et la gestion des situations d'urgence radiologique et post-accidentelles dans le chapitre 4.

3.3 L'accès aux informations des exploitants

La transparence de l'information est un élément clé de la sûreté. Les principaux exploitants d'activités nucléaires mettent en œuvre des politiques volontaires d'information du public. Ils sont, en outre, soumis à des obligations légales générales, comme le rapport sur l'environnement prévu par le [code du commerce](#) pour les sociétés par actions, ou à des obligations spécifiques au domaine nucléaire précisées ci-après.

Le rapport annuel d'information du public établi par les exploitants d'INB

Tout exploitant d'INB doit établir chaque année un rapport portant notamment sur sa situation et les actions qu'il mène en matière de prévention des risques pour la santé publique et l'environnement, conformément à l'article L. 125-15 du code de l'environnement. Ces rapports sont rendus publics et transmis à la commission locale d'information ([CLI](#)) auprès de l'installation concernée, ainsi qu'au Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire ([HCTISN](#) - article L. 125-16).

L'accès aux informations détenues par les exploitants

Le domaine nucléaire bénéficie d'un dispositif favorisant l'accès du public aux informations. En application de l'article L. 125-10 du code de l'environnement, les exploitants doivent communiquer à toute personne qui en fait la demande les informations qu'ils détiennent sur les risques que leur activité présente pour la santé publique et l'environnement et sur les actions menées pour prévenir ou réduire ces risques. Ce droit à l'information sur les risques concerne également les responsables du transport de substances radioactives dès lors que les quantités sont supérieures aux seuils fixés dans la loi.

La Commission d'accès aux documents administratifs

En cas de refus de l'exploitant de communication d'un document, le demandeur peut saisir la Commission d'accès aux documents administratifs ([CADA](#)), autorité administrative indépendante. La CADA rend un avis sur ce refus. Si cet avis n'est pas suivi, le litige peut être porté devant la juridiction administrative, qui statuera sur la communicabilité de l'information en cause. La communication de l'information demandée ne doit notamment pas porter atteinte au secret de la défense nationale, à la sûreté de l'État, à la sécurité publique, à la recherche et à la prévention par les services compétents d'infractions de toute nature ou au secret des affaires qui comprend le secret des procédés, des informations économiques et financières et des stratégies commerciales ou industrielles. L'ASNR est particulièrement attentive à l'application de ce droit à l'information, dans le respect de la protection des intérêts prévue par la loi.