

Fontenay-aux-Roses, le 21 novembre 2019

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN/2019-00233

Objet : Analyse comparée du bilan environnemental d'un cycle électronucléaire
« monorecyclage Pu » et d'un cycle ouvert

Réf. In fine

Par lettre citée en première référence, vous avez demandé l'avis de l'IRSN sur l'étude transmise par Orano par lettre citée en deuxième référence. Cette étude a été produite en réponse à l'article 9 de l'arrêté cité en troisième référence qui demandait qu'Areva, en lien avec le CEA, EDF et l'ANDRA, réalise une analyse comparée des impacts pour l'environnement d'une stratégie de retraitement des combustibles usés en comparaison de celle qui résulterait de l'absence de retraitement, en considérant l'ensemble du cycle de vie du combustible, depuis l'extraction de l'uranium jusqu'au stockage des déchets induits. Plus particulièrement, vous demandez que l'analyse de l'IRSN porte sur :

- « la pertinence des catégories d'impact retenues pour l'étude »,
- « l'exhaustivité des opérations prises en compte dans l'étude pour rendre compte de l'impact du cycle nucléaire, et en particulier la validité des justifications proposées quand certaines étapes ou activités n'ont pas été intégrées de manière complète à l'analyse »,
- « la pertinence des modèles et des hypothèses retenus pour évaluer les impacts »,
- « la validité des hypothèses retenues pour estimer les volumes de déchets produits pour chacun des deux scénarios étudiés »,
- « les paramètres qu'il serait pertinent d'étudier pour l'étude de sensibilité, outre ceux qu'Orano a déjà identifiés ».

S'agissant de la pertinence des modèles et hypothèses retenus pour évaluer l'impact de la catégorie « rayonnements ionisants », vous demandez à l'IRSN d'examiner la représentativité des valeurs de rejets d'effluents radioactifs liquides et gazeux retenues pour les installations et de se prononcer sur les « facteurs de caractérisation » (cette notion sera explicitée dans la suite de

Adresse Courrier
BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses
Cedex France

Siège social
31, av. de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
Standard +33 (0)1 58 35 88 88
RCS Nanterre 8 440 546 018

l'avis) associés aux différents radionucléides. Cet examen portera notamment sur le radon émanant des mines d'uranium ainsi que des usines et des stockages de résidus rattachés à ces mines.

Enfin, vous demandez à l'IRSN d'identifier les suites pertinentes à donner à cette étude, au-delà des perspectives d'amélioration proposées par Orano dans la conclusion de l'étude.

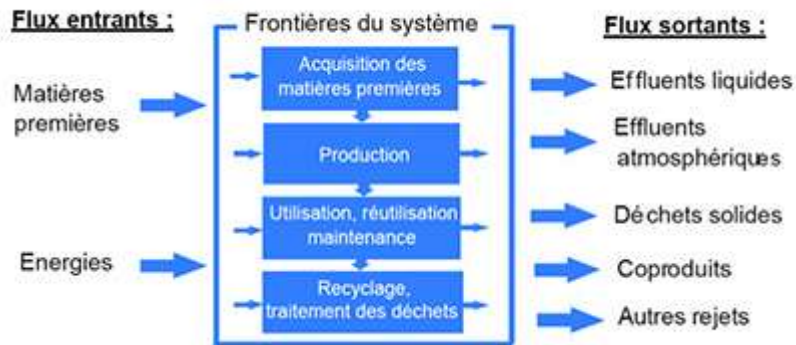
Pour comparer les bilans environnementaux du « cycle du combustible » avec recyclage partiel (recyclage unique du plutonium) et du « cycle du combustible » sans recyclage, la méthode retenue par Orano est l'analyse de cycle de vie (ACV). L'expertise par l'IRSN de ce type d'étude étant nouvelle, il paraît utile d'en présenter, en introduction, les grands principes et d'explicitier le mécanisme de traduction d'une émission d'une substance donnée en impact. Selon l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'analyse du cycle de vie est l'outil le plus abouti en matière d'évaluation globale et multicritère des impacts environnementaux. Cette méthode normalisée permet de mesurer les effets quantifiables de produits ou de services sur l'environnement. Elle recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines. Elle en évalue les impacts potentiels puis interprète les résultats obtenus en fonction de ses objectifs initiaux. Sa robustesse est fondée sur une double approche qui consiste, d'une part à prendre en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un produit, allant ainsi de l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication jusqu'à l'élimination du produit dans les filières de fin de vie, d'autre part à considérer un large éventail d'impacts environnementaux imputables aux différents flux de matières et d'énergie, consommés ou produits lors des différentes étapes du cycle de vie du produit. Toujours selon l'ADEME, l'analyse du cycle de vie est un outil d'aide à la décision dont les résultats peuvent être utilisés pour des besoins d'écoconception de produits ou de services, d'affichage ou d'étiquetage environnemental (ex : « durable », « bio », « vert ») ou encore, comme c'est le cas pour l'étude réalisée par Orano, d'orientation des politiques publiques. Elle est fréquemment utilisée de manière comparative : comparer deux options techniques pour un concepteur, comparer deux produits pour un acheteur, comparer deux orientations politiques pour un décideur. La force de l'ACV est de restituer la complexité de l'environnement et d'éviter des choix qui auraient pour conséquence de dégrader des milieux qui n'avaient pas été considérés, ou de déplacer les impacts d'une étape du cycle de vie à une autre. L'ACV rend compte de transferts de pollution potentiels dans la comparaison de deux scénarios alternatifs. Ainsi, l'ACV permet de comparer deux produits ayant la même fonction (par exemple un rasoir classique et un jetable) ou encore un bien et un service « dématérialisé » (un courrier postal et un e-mail). Dans le cas de l'étude demandée à Orano, il s'agit de comparer deux options de production d'électricité d'origine nucléaire, l'unité commune de comparaison des options retenue par Orano étant le MWh. Cette unité commune est appelée unité fonctionnelle.

Une ACV est réalisée en quatre étapes :

1/ la définition des objectifs et du champ de l'étude : c'est à cette étape que doivent notamment être définies les frontières du système étudié et l'unité fonctionnelle choisie. La finalité de l'étude (éco-conception ou analyse comparative de filière par exemple) doit également être précisée. C'est à cette étape qu'il est décidé d'intégrer ou pas les infrastructures nécessaires à la production de l'unité fonctionnelle. Dans le cas de l'étude réalisée par Orano, le choix a été fait d'intégrer les

infrastructures, ce qui permet d'intégrer dans l'analyse l'impact de la construction des différentes installations identifiées pour chacune des deux options ;

2/ l'inventaire de cycle de vie qui consiste à dresser l'inventaire des flux de matières et d'énergies entrants et sortants, associés aux étapes du cycle de vie rapporté à l'unité fonctionnelle retenue. Cet inventaire est résumé sur la figure ci-après, tirée du site internet de l'ADEME.



3/ l'évaluation des impacts : cette étape consiste à évaluer les impacts potentiels à partir des flux de matières et d'énergie recensés en fonction des indicateurs et de la méthode de caractérisation sélectionnée. Différentes façons existent pour caractériser les flux inventoriés en indicateurs d'impact environnemental de différents niveaux :

- les plus reconnues et utilisées aujourd'hui caractérisent les flux en indicateurs d'impacts potentiels (ou « midpoint ») ; un jeu d'indicateurs d'impact est présenté en annexe 2 au présent avis ; à titre d'exemple peuvent être cités les effets respiratoires et les rayonnements ionisants pour ce qui est de la santé humaine ou l'acidification et l'eutrophisation des milieux aquatiques pour ce qui est de l'atteinte à l'environnement ;

- d'autres procèdent à un second niveau de caractérisation pour obtenir des indicateurs de dommages potentiels (ou « endpoint »). Ces méthodes facilitent la compréhension et l'utilisation des résultats en raison de la moindre quantité d'indicateurs, en général au nombre de trois (le risque sur la santé humaine, le risque pour les écosystèmes, l'appauvrissement des ressources) ou quatre si l'on considère le réchauffement climatique comme une catégorie distincte, mais sont moins reconnues du fait des hypothèses qu'il est nécessaire de formuler pour traduire un impact en dommage et qui font souvent encore l'objet de débats entre scientifiques.

Les évaluations d'impact se font sans tenir compte de l'état initial de l'environnement. Seules les émissions induites par la production de l'unité fonctionnelle sont comptabilisées pour l'évaluation de l'impact, ce que l'on appelle alors impact « marginal ». C'est pourquoi les études d'ACV ne peuvent être utilisées qu'à des fins de comparaison de scénarios et non à des fins d'évaluation du caractère acceptable de l'impact environnemental et sur la santé humaine de l'un des scénarios. Depuis une vingtaine d'année, plusieurs méthodes d'évaluation des impacts sont développées par différentes équipes japonaises, européennes et nord-américaines. Au niveau européen, la méthode la plus récente est la méthode dite de « product environmental footprint » (PEF) publié par le joint research center de la commission européenne en 2019 [4].

4/ l'interprétation des résultats : cette étape est itérative avec les trois précédentes, de manière à toujours valider que les résultats obtenus répondent aux objectifs de l'étude (par exemple, il arrive que l'indisponibilité de certaines données puisse conduire, en cours d'étude, à restreindre le champ de l'étude). C'est également ici que la robustesse des résultats sera évaluée.

Ce type d'analyse est encadré par la norme NF EN ISO 14040 qui en définit le cadre et les principes, la norme NF EN ISO 14044 qui en définit les exigences et les lignes directrices et la norme XP ISO/TS 14071 qui en précise le processus de revue critique qui constitue l'une des exigences de la norme NF EN ISO 14044.

Enfin, pour la bonne compréhension de l'analyse qui suit, il est nécessaire de rappeler le mécanisme qui permet, dans une ACV, de traduire une émission de radionucléides en impact sur la santé humaine. Tout d'abord, les émissions sont caractérisées par le nombre de becquerels par radionucléide émis dans l'environnement nécessaires à la production de l'unité fonctionnelle (1 MWh dans le cas de l'étude menée par Orano). Pour les impacts sur la santé humaine, sur la base de modèles de dispersion et de transfert dans l'environnement ainsi que de scénarios d'exposition préétablis dans la méthode de caractérisation, les outils d'ACV effectuent le calcul de la dose collective reçue. Lorsque l'on veut exprimer les dommages des émissions de radionucléides sur la santé humaine, il est alors nécessaire de traduire les doses reçues en effet sur la santé, c'est-à-dire en nombre d'années de vie en bonne santé perdues du fait des conséquences sanitaires de l'exposition aux rayonnements ionisants dans la plupart des outils d'ACV. Cet indicateur final (ou endpoint), commun à l'ensemble des émissions qui se traduiront en dommages sur la santé humaine, est exprimée en DALY (disabled adjusted life years). Ce concept permet de comptabiliser le nombre d'années de vie perdues par la population exposée (qui peut être la population à l'échelle mondiale selon les modèles de dispersion utilisés) et le nombre d'années de vie dont la qualité est affectée par les conséquences de l'exposition. De plus, il est fréquent dans une ACV d'utiliser le concept de « facteurs de caractérisation ». Pour les construire, un calcul de dose est effectué pour un becquerel émis d'un radionucléide choisi comme référence, par convention, pour la catégorie d'impact « rayonnements ionisants ». Sur la base du même modèle, un calcul de dose est effectué pour un becquerel émis d'un autre radionucléide. Le rapport entre cette dose et la dose calculée pour le radionucléide de référence est appelé facteur de caractérisation. L'application des facteurs de caractérisation à l'activité des différents radionucléides émis permet ainsi d'exprimer les émissions sous la forme d'une activité équivalente du radionucléide de référence. Cette activité équivalente est qualifiée d'indicateur de catégorie d'impact ou encore d'indicateur midpoint. Ce sont le CO₂ et le pétrole qui jouent ce rôle respectivement pour la catégorie d'impact « réchauffement climatique » et pour mesurer les quantités d'énergie (la tonne équivalent pétrole-Tep). Les éléments évoqués ci-dessus sont transparents pour l'utilisateur d'un outil d'ACV. L'utilisateur fournit les émissions de radionucléides associées à l'unité fonctionnelle qu'il a retenue et choisit d'obtenir ses résultats sous la forme d'indicateur de catégorie d'impact (i.e. midpoint exprimé en activité du radionucléide de référence pour les rayonnements ionisants) spécifique à chaque catégorie d'impact et, si l'outil utilisé le permet, sous la forme d'indicateur de catégorie de dommage (i.e. endpoint exprimé en DALY pour les dommages à la santé humaine), commune à plusieurs catégories d'impact.

Pour formuler son avis, l'IRSN a consulté le groupe ELSA (Environmental Lifecycle and Sustainability Assessment) pour disposer d'un regard avisé sur certains aspects méthodologiques spécifiques aux

ACV. Ce groupe rassemble des chercheurs, des enseignants et des étudiants de plusieurs laboratoires de recherche et établissements d'enseignement supérieur du Languedoc-Roussillon.

De l'évaluation de l'étude d'Orano, l'IRSN retient les éléments suivants.

1 DEMARCHE RETENUE PAR ORANO

Pour réaliser l'étude demandée dans le cadre du PNGMDR, la démarche d'Orano a été de recourir à un outil déjà existant et développé spécifiquement par le CEA pour établir le bilan environnemental de scénarios de gestion du « cycle du combustible ». S'appuyant sur cet outil, dénommé Nelcas, la méthode déployée par Orano se déroule selon les étapes classiques d'une ACV, notamment l'étape d'inventaire des flux de matières et d'énergie consommés (intrants) et rejetés (extrants) au cours des opérations et du fonctionnement de tous les ateliers, usines, installations nécessaires à chaque étape du « cycle du combustible » considéré et l'étape d'analyse des impacts potentiels sur l'environnement. Les catégories d'impact et les méthodes de caractérisation sont celles d'Impact 2002+ [5]. Cette méthode, développée au début des années 2000, recense 14 catégories d'impact (par exemple les rayonnements ionisants du fait de l'émission de substances radioactives, les effets respiratoires du fait de l'émission de poussières, l'appauvrissement de la couche d'ozone du fait de l'émission de certaines substances chlorées ou fluorées), qualifiées de « midpoints », chacune reliée à l'une des 3 aires de protection (santé humaine, qualité des écosystèmes et ressources) qualifiées de « endpoints ». Une figure représentant ces relations est présentée en annexe 2 au présent avis. Les émissions recensées pour 1 MWh, l'unité fonctionnelle retenue par Orano, sont converties en indicateurs de catégories d'impact (par exemple le CO₂ pour le réchauffement climatique). Pour comptabiliser l'impact de la construction des infrastructures, la durée de vie des réacteurs EDF et des usines Orano est prise égale à 50 ans et celle des installations de stockage à 100 ans. Pour faciliter l'estimation des émissions, il existe des bases de données qui fournissent les émissions associées à des procédés industriels ou opérations de base comme la fabrication de matériaux de construction (béton, acier), la production d'énergie ou encore le transport qui interviennent dans la production de l'unité fonctionnelle. La base de données Ecolvent a été retenue comme référence par Orano pour alimenter Nelcas en données d'inventaires de ce type.

L'IRSN estime que l'utilisation de la base de données Ecolvent, qui fait référence au niveau international, est pertinente. En revanche, selon les experts en ACV du groupe ELSA rencontrés par l'IRSN [13], la méthode Impact 2002+ est obsolète, en particulier au regard de la dernière méthode (PEF) développée par le joint research center (JRC) de la commission européenne publiées en 2019 [4]. Cette publication propose une actualisation des recommandations ILCD 2011 (international reference life cycle data system) publiées en 2011 par le JRC. Bien que les catégories d'impact soient peu différentes entre Impact 2002+ et PEF, **l'IRSN estime préférable d'utiliser des méthodes qui font consensus au niveau européen, et qui recourent aux développements scientifiques les plus récents.** A titre d'exemple, les recommandations PEF mentionnent la méthode GIEC 2013 comme méthode de référence pour la catégorie changement climatique alors que la méthode impact 2002+ se réfère aux travaux du GIEC de 1992 qui, notamment, modélisait de façon différente la persistance des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

2 CATEGORIES D'IMPACT RETENUES POUR L'ETUDE

Orano indique que, dans l'exercice d'adaptation de la méthode Impact 2002+, des indicateurs ont été ajoutés et certaines catégories d'impact ont été supprimées.

Les indicateurs ajoutés par Orano sont les volumes des 5 catégories usuelles de déchets radioactifs (très faiblement actifs-TFA, de faible et moyenne activité à vie courte - FMA-VC, de faible activité à vie longue - FA-VL, de moyenne activité à vie longue - MA-VL et de haute activité - HA) et le volume des déchets conventionnels, ainsi que la surface des entreposages. L'IRSN estime que ces indicateurs apportent un éclairage complémentaire pertinent. Toutefois, l'IRSN appelle l'attention sur le fait que l'ajout de ce type d'indicateurs, qui s'apparentent à des flux et non à des impacts, peut conduire à une surreprésentation de certains impacts, ce qui peut avoir comme conséquence de fausser la comparaison entre scénarios. En effet, dans l'étude réalisée par Orano, les flux de matières et d'énergie, utilisés ensuite pour le calcul des impacts tiennent déjà compte de la gestion des déchets produits. Par exemple, la quantité d'acier et de béton nécessaire à la construction de Cigéo figurent dans le tableau de l'étude d'Orano récapitulant les besoins en matériaux et en énergie pour la construction des usines du « cycle du combustible ». L'IRSN estime que l'étude d'Orano devrait clairement faire la distinction, dans la présentation des résultats, entre les indicateurs de catégories (comme le CO₂ pour le réchauffement climatique et le carbone 14 gazeux pour les rayonnements ionisants par exemple) et les indicateurs complémentaires qu'il a décidé d'introduire.

Orano justifie la suppression de certaines catégories d'impact (les effets respiratoires dus à la présence de particules fines dans l'air par exemple) par le fait que les procédés dans le cycle du combustible, hors mines, ne génèrent pas ou peu d'émissions responsables de ces impacts. De plus, les poussières issues de l'exploitation des mines étant insuffisamment caractérisées, celles-ci sont écartées de l'inventaire. S'agissant de ce dernier point, l'IRSN estime qu'il importe de prendre en compte l'ensemble des inventaires y compris mal caractérisés. En outre, la philosophie de la méthode de l'ACV est d'intégrer l'ensemble des impacts induits par la production de l'unité fonctionnelle retenue. En conséquence, il est nécessaire de prendre en compte l'intégralité des quantités de matières ou d'énergie utilisées à chaque étape de cette production, au moins lors de la première étude visant à cibler les impacts prépondérants. A cet égard, l'IRSN remarque que l'inox est présent en grande quantité dans les structures de l'usine de retraitement du combustible de la Hague et que l'étude d'une ACV générique relative à l'inox disponible dans la base IMPACT de l'outil Bilan Produit de l'ADEME montre que, pour la fabrication d'un kilogramme d'inox, l'impact sur la santé des particules fines produites est environ 2000 fois plus élevé que l'impact des rayonnements ionisants. L'IRSN estime en conséquence qu'Orano devrait considérer l'ensemble des catégories d'impact proposées par la méthode Impact 2002+, en intégrant notamment les particules fines produites par les activités d'arrière-plan et par les mines. Cette recommandation (cf. recommandation n°1 en annexe au présent avis) est renforcée par le fait que la construction de l'usine de la Hague, spécifique au cycle avec mono-recyclage du plutonium, a nécessité de grandes quantités de béton et d'acier. Ce n'est qu'au vu des résultats qu'une catégorie peut être supprimée, rendant alors le raffinement de l'inventaire lié à cette catégorie superflu.

Enfin, dans une démarche d'ACV équitable entre les 2 cycles, l'IRSN estime qu'Orano aurait dû, d'emblée, intégrer la consommation de ressources autres que l'uranium et l'eau, en particulier celles utilisées en grande quantité et les ressources naturelles rares ou en cours d'épuisement (cf. recommandation n°2 en annexe au présent avis). En effet, si la stratégie de retraitement est par essence moins consommatrice d'uranium, elle peut en revanche conduire à une consommation accrue de matériaux, comme l'inox et le béton, et d'énergie, du fait d'un cycle plus complexe nécessitant un nombre plus important d'installations, notamment l'usine de La Hague et l'usine Melox dans laquelle est produit le combustible Mox.

En conclusion, l'IRSN estime que globalement l'introduction des volumes de déchets générés, en complément des catégories d'impact retenues dans la méthode impact 2002 + fournit un élément d'appréciation pertinent. En revanche, la justification de la suppression de certaines catégories d'impact mériterait d'être renforcée et la prise en compte des ressources devrait être élargie.

3 EXHAUSTIVITE DES OPERATIONS PRISES EN COMPTE ET DES INVENTAIRES ASSOCIES

Les opérations recensées par Orano sont : l'extraction du minerai, la conversion et l'enrichissement de l'uranium, la fabrication des combustibles, l'exploitation des centrales, le retraitement des combustibles usés (pour le cycle avec mono-recyclage du plutonium uniquement), l'entreposage des combustibles usés, des colis de déchets et des matières nucléaires, le stockage des déchets (colis et combustibles usés) ainsi que les transports nécessaires pour passer d'une étape à l'autre du cycle. Concernant la gestion des déchets, l'IRSN rappelle que la saturation du Cires, qui est l'installation dans laquelle les déchets de très faible activité (TFA) sont stockés, est prévue aux alentours de 2035, ce qui nécessite d'envisager la mise en œuvre d'autres installations pour couvrir la période de 100 ans de fonctionnement retenue par Orano dans son étude pour les installations de stockage. Par ailleurs, l'IRSN relève qu'Orano ne prend pas en compte le stockage des déchets FA-VL, alors que le dossier transmis identifie, à juste titre, la production de ce type de déchets dans les « cycles du combustible » étudiés (en particulier les résidus de traitement de conversion de l'uranium). Par conséquent, l'IRSN considère qu'Orano devrait intégrer, dans l'inventaire des installations nécessaires au fonctionnement des « cycles du combustible » étudiés, une ou plusieurs, installation(s) supplémentaire(s) permettant la gestion de l'intégralité des déchets TFA ainsi qu'une installation dédiée au stockage des déchets FA-VL (cf. recommandation n°3 en annexe au présent avis). De plus, certaines opérations se déroulant dans des installations existantes sont également absentes des opérations prises en compte par Orano (cf. recommandation n°4 en annexe 1 au présent avis).

L'IRSN n'a pas de remarque sur les flux d'uranium et de plutonium considérés ainsi que sur les flux d'arrière-plan (ensemble des intrants et des extrants nécessaires à la construction et déconstruction des installations). Toutefois, quelques consommables ou matériaux de construction utilisés en quantités supérieures à la tonne par an ne sont pas mentionnés dans l'étude. L'IRSN estime qu'Orano devrait justifier que ces matières n'ont pas d'incidence sur les résultats des études d'impact environnemental et peuvent être négligées (cf. recommandations n°5 et n°6 en annexe 1 au présent avis).

avis. A des fins de clarté, l'IRSN recommande que, dans la révision de l'étude, les flux considérés soient rapportés à l'unité fonctionnelle retenue, à savoir le MWh, ce qui n'est pas systématiquement le cas dans l'étude d'Orano.

Pour ce qui concerne plus particulièrement les émissions radioactives, Orano a présenté les rejets associés à chacune des installations identifiées, en considérant que ceux-ci se produisent pendant la durée de vie des installations, à l'exception des mines pour lesquelles Orano indique que des rejets issus des résidus peuvent perdurer plusieurs dizaines de milliers d'années au-delà de la période d'exploitation et de surveillance. Les rejets post-fermeture associés aux installations de stockage de déchets ne sont pas pris en compte. Or, les installations de stockage seront à l'origine de rejets diffus d'ici quelques centaines ou quelques milliers d'années. Compte tenu de l'horizon temporel de l'ACV pour ce qui concerne l'impact des rejets radioactifs (100 000 ans) [6], il conviendrait de les prendre en compte (cf. recommandation n°7 en annexe au présent avis).

Pour se prononcer sur la représentativité des valeurs de rejets d'effluents radioactifs, l'IRSN a examiné les rejets associés aux installations susceptibles d'induire le plus d'impact radiologique, à savoir les mines, et à celles spécifiques au cycle avec monorecyclage du plutonium, à savoir les installations Orano de traitement/recyclage du combustible (usine de la Hague, usine TU5 de dénitration de l'URT à Pierrelatte, usine Melox).

Les rejets associés aux mines dépendent du type d'extraction minière utilisé. Il existe en effet différents types d'extraction : souterraine (MS), à ciel ouvert (MCO) et par lixiviation in situ (ISL). Reprenant les informations fournies par EDF sur l'origine de ses approvisionnements en uranium, Orano a retenu une répartition de l'approvisionnement en uranium issu à 54 % de mines de type MS, à 18 % de mines de type MCO et à 28 % de mines de type ISL. Dans l'objectif de renseigner les extrants associés aux mines, Orano a choisi une mine représentative de chaque type d'extraction minière dont il est l'exploitant, à savoir les mines de la Somaïr (Niger) (MCO), Cominak (Niger) (MS) et Katco (Kazakhstan) (ISL). Pour chacune de ces trois mines, Orano considère les rejets suivants :

- l'émission de radon 222, lors de l'exploitation de la mine et du traitement du minerai d'uranium en usine ainsi que celle induite par les stériles et les résidus de traitement à l'issue de la période d'exploitation considérée,
- les rejets liquides de substances chimiques, que comprennent les eaux d'exhaure et les effluents de lixiviation des résidus de traitement par ruissellement des eaux pluviales, pendant la durée des activités liées à l'exploitation minière,
- les émissions de poussières atmosphériques (radioactives ou non).

L'IRSN juge pertinent que la répartition de l'approvisionnement en uranium soit prise en compte dans l'analyse. En outre, EDF pouvant faire évoluer ses sources d'approvisionnement en uranium, Orano indique que l'analyse de sensibilité prévue dans la révision de l'étude intégrera une répartition différente de l'approvisionnement en uranium, ce que l'IRSN juge utile compte tenu des rejets radioactifs très différents d'un type de mine à l'autre. Toutefois, l'IRSN observe que les eaux issues d'une usine associée à une mine (comme par exemple une usine de traitement du minerai) n'ont pas été prises en compte dans le recensement des rejets liquides sans présenter de justification notamment au regard des impacts environnementaux qu'elles sont susceptibles de générer. Par conséquent, l'IRSN recommande qu'Orano détermine si les rejets liquides des usines

présentes sur les sites d'extraction minière sont susceptibles de contribuer significativement à l'impact environnemental global de chacun des « cycles du combustible » étudiés (cf. recommandation n°8 en annexe 1 au présent avis).

Pour les autres installations examinées par l'IRSN, Orano a fait le choix de présenter les rejets des installations pour une année type (généralement l'année 2016) alors que ceux-ci varient d'une année à l'autre, comme le montre, par exemple pour l'établissement de La Hague, le tableau présenté en annexe 3 au présent avis. Aussi, l'IRSN estime qu'Orano devrait considérer les variations annuelles d'activité des différents radionucléides rejetés pour définir des valeurs représentatives du fonctionnement de l'installation sur sa durée de vie (cf. recommandation n°9 en annexe 1 au présent avis). Par ailleurs, quelques incohérences et besoins de compléments ont été relevés lors de l'instruction du dossier et font l'objet des recommandations n°10 à 12 en annexe 1 au présent avis.

Pour ce qui est du radon issu des mines, Orano a considéré les émissions de radon issues de la mine en exploitation, de l'usine de traitement du minerai, des stériles et des résidus de traitement. Pour le site du Kazakhstan, mine de type In situ Leaching dont l'exploitation ne génère pas de résidus miniers, Orano retient un facteur d'émission de $1,5 \cdot 10^5$ kgBq.kgU⁻¹ (cf. Dones [11]). Ce choix n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN. Pour les mines souterraines et les mines à ciel ouvert, Orano ne retient qu'un seul facteur d'émission de radon, en kBq.kgU⁻¹, et ce sur une période de 80 000 ans au-delà de l'exploitation minière pour tenir compte de l'émission de radon à long terme par les résidus miniers. L'IRSN partage l'analyse d'Orano qui considère que l'émission principale, sur cette période, est attribuable aux résidus. Le facteur d'émission de $6 \cdot 10^7$ kBq.kgU⁻¹ retenu par Orano, correspondant à des résidus couverts, est issu de la littérature [6] et apparaît enveloppe des facteurs d'émission estimés par Orano sur ses propres mines de la Somair et de Cominak. Orano précise que le facteur d'émission du radon à partir de résidus sans couverture serait une trentaine de fois plus élevé. L'IRSN estime que, compte tenu de l'horizon temporel de l'étude sur lequel l'absence d'érosion de la couverture ne peut pas être garantie, l'étude devrait intégrer un scénario sans couverture des résidus pour les mines de type MS et MCO (recommandation n°13 en annexe 1 au présent avis).

En conclusion, l'IRSN estime qu'il n'y a pas de manquement majeur dans l'étude réalisée par Orano pour ce qui concerne les opérations prises en compte et les émissions de radionucléides. Plus particulièrement, les émissions de radon ont été abordées de façon pertinente en intégrant dans l'étude les différents types de mines. Toutefois, pour les mines à ciel ouvert et les mines souterraines, l'évolution des émissions de radon due à l'érosion de la couverture des résidus miniers devrait être prise en compte.

4 ESTIMATION DES VOLUMES DE DECHETS

En complément des catégories d'impact déjà mentionnées, Orano a introduit comme indicateurs supplémentaires les volumes de déchets radioactifs produits en les distinguant selon les 5 catégories usuelles (TFA, FMA-VC, FA-VL, MA-VL et HA) et a également considéré les déchets conventionnels.

L'IRSN estime que, au-delà des catégories d'impact, ces indicateurs apportent un éclairage complémentaire pertinent.

Pour ce qui concerne les déchets radioactifs issus du fonctionnement des installations, les volumes sont globalement correctement évalués compte tenu des estimations disponibles par ailleurs. Toutefois certaines installations spécifiques au cycle avec monorecyclage du plutonium sont à l'origine de la production de déchets MA-VL autres que ceux considérés dans le dossier transmis. C'est le cas des effluents de fonctionnement des usines UP2-800 et UP3 d'Orano La Hague, aujourd'hui bitumés à raison d'environ 80 fûts de 0,25 m³ par an (soit environ 20 m³ par an) mais surtout des fûts de déchets non susceptibles d'un stockage de surface¹ (dit N3S) produits par l'usine Melox² à raison de 60 tonnes de déchets MA-VL par an. L'IRSN souligne que ces déchets n'ont pas vocation à être stockés à Cigéo dans leur forme physico-chimique actuelle, et que la mise en œuvre du conditionnement envisagé pour ces déchets, l'incinération-vitrification, demande le développement d'une installation dédiée³ et implique à terme le stockage d'un nombre relativement important de colis à Cigéo. Aussi, l'IRSN estime que ces colis devraient être pris en compte dans les volumes à stocker dans Cigéo⁴. De même, l'installation de traitement/conditionnement des fûts N3S devrait être intégrée à l'inventaire de la présente étude et les intrants et extrants associés devraient être considérés dans l'ACV (recommandation n°14 en annexe 1 au présent avis).

Pour ce qui concerne les déchets de démantèlement des installations, Orano indique que les déchets conventionnels qui en seront issus ne sont pas pris en compte dans l'étude. En effet, Orano considère que les quantités produites sont très dépendantes des « *stratégies de démantèlement retenues et des contraintes réglementaires futures relatives à l'assainissement* ». L'IRSN considère que l'absence de prise en compte de ces déchets peut potentiellement représenter un biais sensible dans l'évaluation : le démantèlement de La Hague va en effet générer un volume très important. Par conséquent, l'IRSN estime qu'Orano devrait proposer une méthode pour estimer le volume de déchets conventionnels produits lors du démantèlement des différentes installations considérées dans l'analyse. A cet égard, il pourrait être pertinent de s'appuyer sur le REX aujourd'hui disponible pour le démantèlement d'installations et proposer une fraction justifiée sur cette base pour en établir l'inventaire (cf. recommandation n°15 en annexe 1 au présent avis).

Enfin, les déchets radioactifs issus du démantèlement ont été évalués pour l'ensemble des usines du cycle, à partir de données transmises par Orano et complétées le cas échéant par le CEA. Les volumes estimés apparaissent pertinents. Toutefois, l'IRSN appelle l'attention sur la nécessité que les terres polluées issues des travaux d'assainissement des sites en démantèlement, absentes de l'inventaire actuel, soient bien comptabilisées en tant que déchets de démantèlement (cf. recommandation n°15 en annexe 1 au présent avis).

En conclusion, l'IRSN estime que les volumes de déchets sont convenablement estimés à l'échelle globale du cycle. Il sera néanmoins important de compléter ces estimations par les déchets

¹ Actuellement entreposés à La Hague dans l'attente du développement d'un conditionnement

² De l'ordre de 300 fûts par an selon les données disponibles à l'IRSN.

³ Le procédé aujourd'hui à l'étude pour le conditionnement de ces déchets est le procédé PIVIC.

⁴ Les déchets N3S ne sont pris en compte que dans l'indicateur « volume de déchets ». Les colis bitumés semblent absents de l'étude.

conventionnels issus des démantèlements et les terres polluées pour affiner la comparaison entre les deux scénarios.

5 MODELISATION DE L'IMPACT DES RAYONNEMENTS IONISANTS

Pour ce qui concerne la modélisation des impacts, vous avez demandé à l'IRSN d'examiner les modèles retenus pour évaluer l'impact de la catégorie « rayonnements ionisants ».

Pour ce qui est de l'impact sur la santé humaine, le modèle utilisé dans Nelcas est celui de Impact 2002+. En l'état actuel, la modélisation, ou méthode de caractérisation, pour cette catégorie est issue de la publication de Frischknecht et al. [6] qui est la seule à traiter de l'impact des rayonnements ionisants dans une ACV. La méthode de caractérisation se fonde sur une étude réalisée par Dreicer et al. en 1995 [7] s'inscrivant dans le projet ExternE de la commission européenne qui visait à mieux connaître le coût des impacts, ou externalités, de différents modes de production d'énergie. Dans cette étude, l'estimation des rejets de radionucléides induits par la production d'un TWh est réalisée et utilisée pour le calcul de la dose collective reçue en prenant en compte la population et des conditions météorologiques moyennes propres à chaque site concerné par le « cycle du combustible » français. Une conversion des doses reçues en cancers létaux et non létaux est ensuite effectuée pour aboutir *in fine* à un coût financier. D'autres impacts tels que l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants, les accidents du travail ou encore les rejets potentiels en cas d'accident sur un réacteur sont également pris en compte. La vertu principale de la méthode développée par Frischknecht [6] a été de construire un modèle d'impact des rayonnements ionisants sur le même schéma que les modèles décrivant les catégories d'impact déjà prises en compte dans les méthodes d'ACV en utilisant les calculs de dose collective réalisée dans l'étude [7]. A cet égard, la construction de facteurs de caractérisation des radionucléides par rapport à un radionucléide de référence et la correspondance entre dose collective et unité de mesure de la catégorie de dommage à la santé humaine (DALY) constituent un apport essentiel.

La méthode proposée appelle toutefois quelques remarques.

La première observation a trait à la méthode de caractérisation de l'impact sur la santé humaine. Les facteurs de caractérisation des radionucléides, établis par rapport à un radionucléide de référence, ont été construits par Frischknecht [6] en comparant les doses collectives dues à chaque radionucléide pour l'ensemble des usines du cycle. A titre d'illustration, si la somme des doses⁵ dues à un radionucléide émis sur différents sites est 4 fois plus élevée que la somme des doses⁶ dues au carbone 14 gazeux, alors le facteur de caractérisation de ce radionucléide sera de 4. Ainsi, dans le calcul de l'activité équivalente en carbone 14 gazeux, l'activité totale de ce radionucléide sera multipliée par 4 pour être exprimée en cette activité équivalente appelée également « indicateur de catégorie d'impact ». Ainsi calculés, les facteurs de caractérisation obtenus sont propres à la production française d'électricité d'origine nucléaire dans sa globalité. En revanche, ils ne devraient pas être appliqués installation par installation comme proposé dans l'étude d'Orano. Enfin, Orano

⁵ rapportée à 1 Bq

⁶ rapportée à 1 Bq

propose une méthode d'attribution de facteur de caractérisation pour les radionucléides identifiés dans les rejets des usines du cycle du combustible pour lesquels l'étude de Frischknecht [6] n'en propose pas. Pour ces radionucléides, Orano leur attribue, dans leur ensemble et par installation, un facteur de caractérisation moyen calculé à partir des activités et des facteurs de caractérisation des autres radionucléides. Ce facteur est alors appliqué à l'activité sommée des radionucléides qui ne disposent pas de leur propre facteur de caractérisation pour déterminer une activité équivalente en ^{14}C gazeux. Dans son principe, la méthode proposée par Orano n'est pas pleinement satisfaisante. La méthode devrait en effet garantir que le facteur de caractérisation d'un radionucléide par rapport au ^{14}C gazeux n'est pas dépendant de l'activité des autres radionucléides rejetés.

Par ailleurs, l'étude source ayant permis le calcul des facteurs de caractérisation date des années 90 [7]. L'IRSN estime que cette étude doit être réactualisée pour intégrer en particulier la forte baisse des rejets des installations sur les 30 dernières années et la fermeture de la mine de Lodève en 1995. Sur ce dernier point, il faut rappeler que cette étude [7] avait considéré cette mine, et les installations associées, comme la source exclusive de minerai d'uranium pour le « cycle du combustible » français. Cette réactualisation pourrait avoir une forte influence sur l'impact du radon notamment du fait de l'écart de densité de population autour de la mine de Lodève et autour des mines de Somaïr ou de Cominak.

Concernant l'impact des émissions de radon, qui est un radionucléide naturel et ubiquitaire, l'IRSN estime qu'il est nécessaire de réexaminer l'ensemble des hypothèses et des données utilisées dans l'étude de Dreicer [7], qui sert de base à la détermination du facteur de caractérisation du radon faite par Frischknecht [6]. La prise en compte du bruit de fond, le choix du facteur d'équilibre en environnement extérieur, l'évolution du coefficient de risque ajusté au détriment de la CIPR depuis la parution de l'étude de Dreicer [7] et les évolutions en cours du coefficient de dose radon sont des sujets qu'il conviendra en effet d'aborder pour statuer sur la nécessité ou non de modifier le facteur de caractérisation du radon.

Enfin, la méthode retenue par Orano [6] n'intègre pas l'impact des rayonnements ionisants à l'environnement. Or, dans leurs développements plus récents, certaines méthodes intègrent cet impact. Par exemple, dans la méthode PEF 2019, le modèle, liant l'exposition due aux rayonnements ionisants aux dommages aux écosystèmes d'eau douce, est celui développé par Garnier-Laplace et al. [8] [9]. Ce modèle reprend les deux concepts de base de l'approche appliquée aux substances toxiques non radioactives, à savoir la concentration dangereuse pour 50% des espèces d'un écosystème (HC_{50}) et la fraction d'espèces potentiellement affectées (PAF), en les adaptant aux substances radioactives. Pour un radionucléide i donné, la conversion du débit de dose dangereux pour 50% des espèces (HDR_{50} , $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) en l'activité massique ou volumique correspondante ($\text{HC}_{50,r}$, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ou $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$) est réalisée par l'application d'un modèle de transfert des radionucléides dans l'environnement, d'un modèle d'exposition et d'un calcul dosimétrique. L'IRSN recommande qu'Orano, dans la révision de son étude, examine la possibilité d'utiliser cette méthode pour produire des résultats relatifs à l'impact des rayonnements ionisants sur l'environnement (cf. recommandation n°16 en annexe 1 au présent avis). Il est à noter que depuis 2008, l'approche proposée a été retravaillée [10]. Des développements additionnels sont cependant encore nécessaires pour pouvoir exprimer l'indicateur de la catégorie « rayonnements ionisants » pour les

écosystèmes en unité de radionucléide de référence (qui pourrait être le ^{14}C comme pour l'impact sur la santé humaine dans la méthode Impact 2002+), à l'aide de facteurs de caractérisation.

Globalement, l'IRSN estime qu'Orano a appliqué convenablement le modèle qui fait référence [6] pour évaluer l'impact des rayonnements ionisants sur la santé humaine. Toutefois, des actualisations sont nécessaires, notamment pour le radon et Orano devrait examiner la possibilité d'intégrer, dans la révision de son étude, l'évaluation de l'impact des rayonnements ionisants à l'environnement.

6 PRESENTATION ET MISE EN PERSPECTIVE DES RESULTATS

Dans la partie finale de son rapport, Orano présente les résultats sous des formats qui apportent différents éclairages. La majeure partie des graphes présentent des écarts relatifs entre scénarios (cycle actuel et cycle ouvert) ou des contributions en % des différentes étapes du cycle du combustible, et donc des résultats relatifs et adimensionnels (ce qui a l'avantage de s'affranchir des unités propres à chaque indicateur d'impact). Ce mode de présentation ne permet cependant pas de hiérarchiser les écarts entre catégories d'impacts. L'expression des impacts en indicateurs de dommages potentiels ou « Endpoints » (par exemple les DALY pour la santé humaine) correspondant aux trois aires de protection de l'ACV (Santé humaine, Écosystèmes, Ressources) répondrait à ce problème car les indicateurs sont alors exprimés dans la même unité, permettant ainsi, pour deux scénarios différents, la comparaison des écarts d'une catégorie à l'autre et de faire la somme d'impacts dus à différentes catégories (l'impact des rayonnements ionisants et celui des substances chimiques toxiques sur la santé humaine par exemple). Mais cette pratique n'est pas encore suffisamment consensuelle pour être mise en œuvre dans ce type d'étude en raison de l'incertitude des modèles d'impacts orientés dommages. Concernant les rayonnements ionisants par exemple, la controverse porte notamment sur la traduction d'une dose collective, bâtie sur des doses individuelles très faibles, en nombre de cancers. L'IRSN estime que la présentation des résultats de l'étude d'Orano répond aux principes de neutralité (le contour, les hypothèses et les modèles retenus ne doivent pas privilégier un scénario plutôt qu'un autre) et de transparence (ces mêmes éléments doivent être explicitement mentionnés dans le rapport d'étude) qui sont sous-tendus dans les recommandations de la norme NF EN ISO 14044 relative aux études d'ACV destinées à être divulguées au public. Toutefois, si la nécessité d'affiner la comparaison des impacts environnementaux des deux cycles se manifestait avec une volonté d'arbitrer quel est le meilleur scénario, la procédure d'aide à la décision en ACV comparative proposée en [13] pourrait être mise en œuvre. Brièvement, le déroulement de cette procédure est le suivant : lorsque toutes les catégories d'impacts ne sont pas favorables à l'un des deux scénarios, la première étape de la procédure consiste à éliminer de la comparaison les catégories pour lesquelles l'écart entre scénarios est jugé suffisamment faible pour être non significatif (i.e. inférieur à l'incertitude inhérente aux modèles de calcul de l'impact, soit 5 à 10% minimum pour la plupart des catégories d'impact et jusqu'à plus de 30% pour les catégories d'impact toxicité et écotoxicité) ; une seconde étape consiste à éliminer de la comparaison les indicateurs qui contribuent de façon non

significative aux dommages (moins de 0,1% est proposé). In fine, un scénario peut être préféré à un autre scénario si la comparaison pour toutes les catégories d'impact restantes est en faveur de l'un par rapport à l'autre.

Enfin, les résultats obtenus pourraient être mis en perspective de différentes façons pour permettre de mieux intégrer le bilan environnemental dans un processus de comparaison plus large. Une première piste est la comparaison des résultats obtenus exprimés sous la forme de dommages (Daly pour la santé humaine par exemple). Bien qu'elle introduise, comme évoqué ci-dessus, une étape de modélisation supplémentaire beaucoup moins consensuelle que l'étape reliant l'émission à la catégorie d'impact, cette comparaison permet de mieux appréhender la signification des écarts des différentes solutions ou scénarii pour une catégorie d'impact donnée (pour la catégorie rayonnements ionisants par exemple, un écart donné en nombre d'année de vie perdues a une signification plus accessible qu'un écart donné en becquerels de ^{14}C gazeux équivalents), ce qui constitue un atout pour mettre en balance le bilan environnemental avec des aspects sociaux, économiques ou politiques. Une seconde piste consiste à comparer les impacts de chaque catégorie à des niveaux de référence, comme par exemple l'empreinte d'un européen moyen, pour chaque résultat d'indicateur de catégorie d'impact. Pour le cas présent, il s'agirait de comparer par exemple la quantité de CO_2 émise du fait de la consommation annuelle d'électricité d'origine nucléaire d'un européen moyen à l'empreinte annuelle totale en CO_2 de ce même européen. Cette méthode, utilisée à des fins de normalisation de chaque impact (c'est-à-dire ramené à un nombre sans unité), présente néanmoins l'inconvénient d'inciter à négliger une nouvelle source de pollution au motif que le niveau existant de cette pollution est déjà important. Dans une toute autre logique, une troisième piste consiste à comparer les résultats obtenus à des niveaux sensibles pour le maintien de l'équilibre environnemental de la planète. C'est notamment le concept de limites planétaires illustré succinctement par la figure tirée de la référence [14] présentée en annexe 4 au présent avis (pour le réchauffement climatique par exemple, cette limite planétaire va être exprimée en concentration⁷ de CO_2 dans l'atmosphère). Ce concept permet d'objectiver la gravité des émissions de polluants les unes par rapport aux autres en normalisant chacune d'elle par rapport à la limite planétaire qui lui correspond. Selon les spécialistes en ACV rencontrés par l'IRSN, cette approche est prometteuse car très centrée sur la préservation de l'environnement mais n'est à ce jour utilisable que pour quelques catégories d'impacts, rendant impossible son utilisation en ACV multicritères sur l'ensemble des indicateurs. Des travaux sont en cours sur ce sujet.

⁷ Exprimée en ppm - partie par million

7 CONCLUSION

En conclusion, l'IRSN estime qu'Orano a bien mis en œuvre dans son étude les éléments majeurs d'une analyse de cycle de vie, en définissant notamment un contour assez large permettant d'intégrer l'essentiel des flux de matières et d'énergie nécessaires à la production du service rendu (la production d'un MWh dans le présent exercice) dans l'évaluation comparative des impacts de plusieurs modes de production de ce service. Quelques points pourraient être cependant améliorés dans le cadre de la révision de l'étude qu'Orano doit conduire pour intégrer l'analyse de sensibilité qu'il mentionne dans cette première étude. Ces pistes d'amélioration sont proposées en annexe 1 au présent avis.

Au-delà de ces pistes d'amélioration, la question se pose de l'utilisation de ce type de bilan environnemental globalisé dans un exercice de comparaison plus large encore, intégrant notamment des aspects sociaux, économiques et politiques. Le premier élément à rappeler est que la prise en compte de ce type de bilan n'a de sens qu'en termes de comparaison entre 2 ou plusieurs solutions rendant le même service. Le second élément est qu'une comparaison en termes d'écart relatif pour chacune des catégories d'impact ne suffit pas pour rendre compte de l'ampleur du gain environnemental total que présente une solution par rapport à une autre, affaiblissant ainsi l'information que peut apporter ce type d'étude dans une comparaison plus globale. Aussi, sans s'exonérer de la présentation par catégorie d'impact telle qu'Orano l'a faite et qui reste essentielle, les pistes évoquées au chapitre 6 du présent avis pourraient, à terme, être investiguées pour offrir des angles de vue complémentaires à même d'éclairer un débat plus large.

L'IRSN a conduit un examen approfondi de la méthode de caractérisation de l'impact des rayonnements ionisants sur la santé humaine et sur l'environnement. Cet examen a fait apparaître quelques insuffisances, en particulier pour ce qui est du calcul des facteurs de caractérisation utilisés pour l'impact sur la santé humaine. La prise en compte de très faibles doses individuelles dans une dose collective calculée à l'échelle mondiale et sur des temps très longs devrait également faire l'objet d'une réflexion quant à sa signification, notamment eu égard à la traduction des impacts (les doses) en dommages (les DALY). En conséquence, l'IRSN considère que la méthode de caractérisation de l'impact des rayonnements ionisants, en particulier sur la santé humaine, doit être améliorée, en associant à ce travail conséquent des organismes compétents dans le développement des outils d'ACV.

Enfin, l'IRSN rappelle que son analyse ne se substitue pas à la revue critique qui, selon les termes de la norme NF EN ISO 14044, doit accompagner toute ACV. Orano devrait prévoir une telle revue à l'occasion de la révision de l'étude.

Pour le directeur général, par délégation

François Besnus

Directeur de l'Environnement

- Réf.
1. Lettre ASN CODEP-DRC-2019-023213 du 22 mai 2019
 2. Lettre ORANO DM2D-2019-002-CE-PNGMDR du 11 janvier 2019
 3. Arrêté du 23 février 2018 pris en application du décret n°2017-231 du 23 février 2017
 4. “Suggestions for updating the product environmental Footprint (PEF) method”, Zampori L., Pant R., JRC technical report, 2019
 5. “Impact 2002+ : a new life cycle impact assessment methodology”, Olivier Jolliet et al. Journal of LCA 2003
 6. “Human health damages due to ionizing radiation in life cycle impact assessment” , Frischknecht et al. Environmental impact assessment review 20, 159-189, 2000
 7. “ExternE- Externalities of Energy - Nuclear. Vol 5”, report EUR 16524 EN prepared by M. Dreicer, V. Tort, P Manen CEPN, 1995
 8. “First derivation of Predicted-No-Effect Values for freshwater and terrestrial ecosystems exposed to radioactive substances”, Garnier-Laplace et al Environ. Sci.&Techno.,40, 6498-6505, 2006
 9. “A Screening Level Ecological Risk Assessment and ranking method for liquid radioactive and chemical mixtures released by nuclear facilities under normal operating conditions”, Garnier-Laplace et al., Radioecology 2008, Bergen (Norvège),. Radioprotection, 44 (5) 903-908, 2008
 10. “How to better include environmental assessment in public decision-making : lessons from the use of an LCA-calculator for waste water system”, Laetitia Guerin-Schneider et al - journal of cleaner production 2018
 11. “Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries”, Dones R. et al., Paul Scherrer Institut, Villigen, and Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland, 2007
 12. IRSN/PSE-ENV/2019-00016 : Compte rendu de reunion IRSN- Groupe ELSA
 13. “How to better include environmental assessment in public decision-making: Lessons from the use of an LCA-calculator for wastewater systems”, Guérin-Schneider et al., Journal of cleaner production, JCLP 12426, Mars 2018
 14. “A safe operating space for humanity”, J. Rockström et al, nature, 2009

Annexe 1 à l'Avis IRSN/Avis IRSN/2019-00233 du 21 novembre 2019

Pistes d'amélioration

Dans le cadre de la révision de l'étude intégrant l'analyse de sensibilité des deux scénarios de « cycle du combustible » étudiés, l'IRSN recommande qu'Orano prenne en compte les pistes d'amélioration suivantes :

1/ considérer l'ensemble des catégories d'impact proposées par la méthode Impact 2002+, en intégrant notamment les poussières produites par les activités d'arrière-plan et par les mines ;

2/ intégrer la consommation de ressources autres que l'uranium et l'eau, en particulier celles utilisées en grande quantité et les ressources naturelles rares ou en cours d'épuisement ;

3/ intégrer une ou plusieurs installation(s) supplémentaire(s) permettant la gestion de l'intégralité des déchets TFA ainsi qu'une installation dédiée au stockage des déchets FA-VL dans l'inventaire des installations ;

4/ justifier que le traitement et/ou le conditionnement des déchets de MELOX et de ceux issus de l'exploitation des installations d'EDF et d'Orano effectués respectivement dans les installations CDS et CENTRACO, ainsi que les opérations dédiées à la maintenance de conteneurs utilisés dans les « cycles du combustible » considérés n'ont pas d'influence notable sur les impacts environnementaux globaux des deux scénarios étudiés ;

5/ justifier que les trois consommables suivants, non pris en compte dans l'étude d'Orano, n'ont pas d'influence notable sur les impacts environnementaux globaux des deux cycles étudiés ;

- l'hydrogène, l'argon et l'azote nécessaires à la fabrication des combustibles dans l'installation MELOX ;

- l'hydrogène utilisé dans l'usine W de conversion de l'UF₆ appauvri en U₃O₈ ;

- le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) de l'atelier TU5 (INB 155) ;

6/ intégrer les prévisions d'EDF concernant les épaisseurs de mur en béton des futures piscines d'entreposage des combustibles usés (2 fois plus importantes que celles des piscines de l'établissement de La Hague prises comme référence dans l'étude) ;

7/ prendre en compte les rejets diffus issus des installations de stockage, compte tenu de l'horizon temporel de l'ACV pour ce qui concerne l'impact des rejets radioactifs (100 000 ans) ;

8/ déterminer si les rejets liquides des usines présentes sur les sites d'extraction minière sont susceptibles de contribuer significativement à l'impact environnemental global ;

9/ considérer les variations annuelles d'activité des différents radionucléides rejetés pour définir des valeurs d'activités rejetées représentatives du fonctionnement de l'installation sur sa durée de vie ;

10/ préciser comment sont pris en compte les rejets de la phase de démantèlement des usines UP3 A, UP2 800 et STE3 du site de La Hague ;

11/ justifier, pour l'usine TU5, les écarts entre les valeurs de rejet de certains radionucléides (notamment ³H, ¹⁴C et transuraniens) qu'il retient dans son étude et les données issues du rapport ORANO « données chiffrées par exploitant du site Orano Tricastin, Edition 2017 » ;

12/ rétablir la cohérence entre les données relatives aux rejets de l'établissement de la Hague et de l'usine MELOX fournies en annexe 1 et en annexe 5 de son étude ;

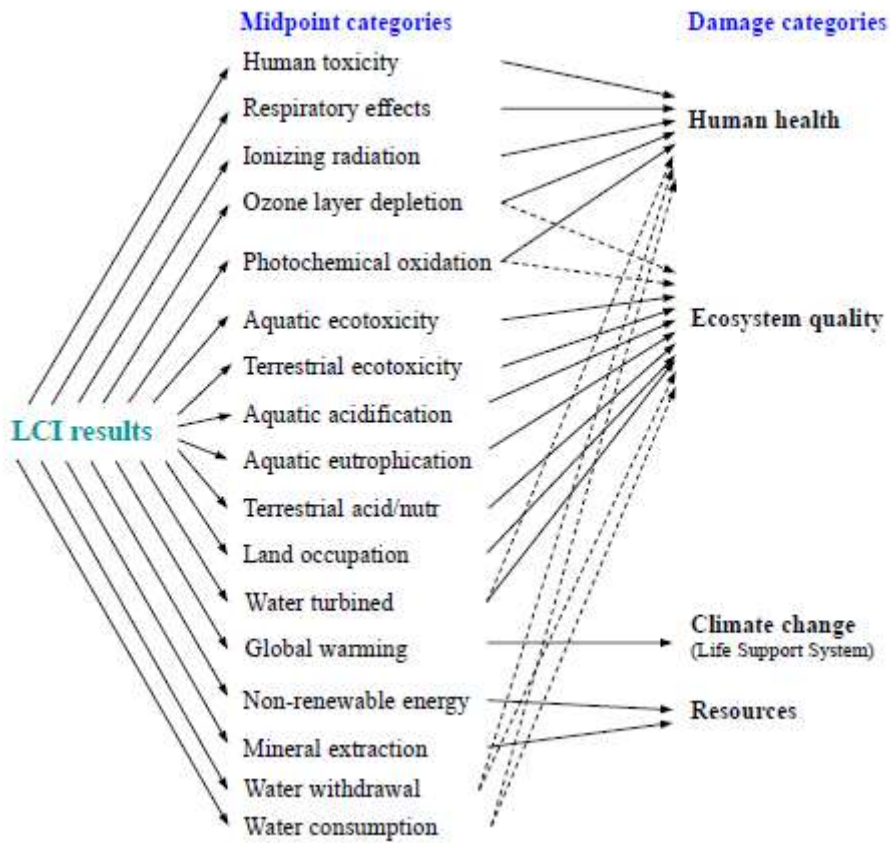
13/ intégrer un scénario sans couverture des résidus pour les mines de type MS et MCO ;

14/ prendre en compte l'ensemble des déchets MA-VL, notamment les effluents de fonctionnement des usines UP2-800 et UP3 bitumés ainsi que les fûts N3S dans les volumes à stocker dans Cigéo en intégrant dans les installations du cycle l'installation qui sera nécessaire au traitement et au conditionnement des fûts N3S ;

15/ proposer, une méthode pour estimer le volume de déchets conventionnels, le volume des terres polluées considérées comme déchets et les quantités d'effluents radioactifs produits lors du démantèlement des différentes installations considérées dans l'analyse ;

16/ examiner la possibilité d'utiliser le modèle de la méthode ILCD 2011 pour produire des résultats relatifs à l'impact des rayonnements ionisants sur l'environnement ;

Annexe 2 à l'Avis IRSN/Avis IRSN/2019-00233 du 21 novembre 2019
 Concept général d'Impact 2002+



Annexe 3 à l'Avis IRSN/Avis IRSN/2019-00233 du 21 novembre 2019

Rejets du site de la Hague sur différentes années

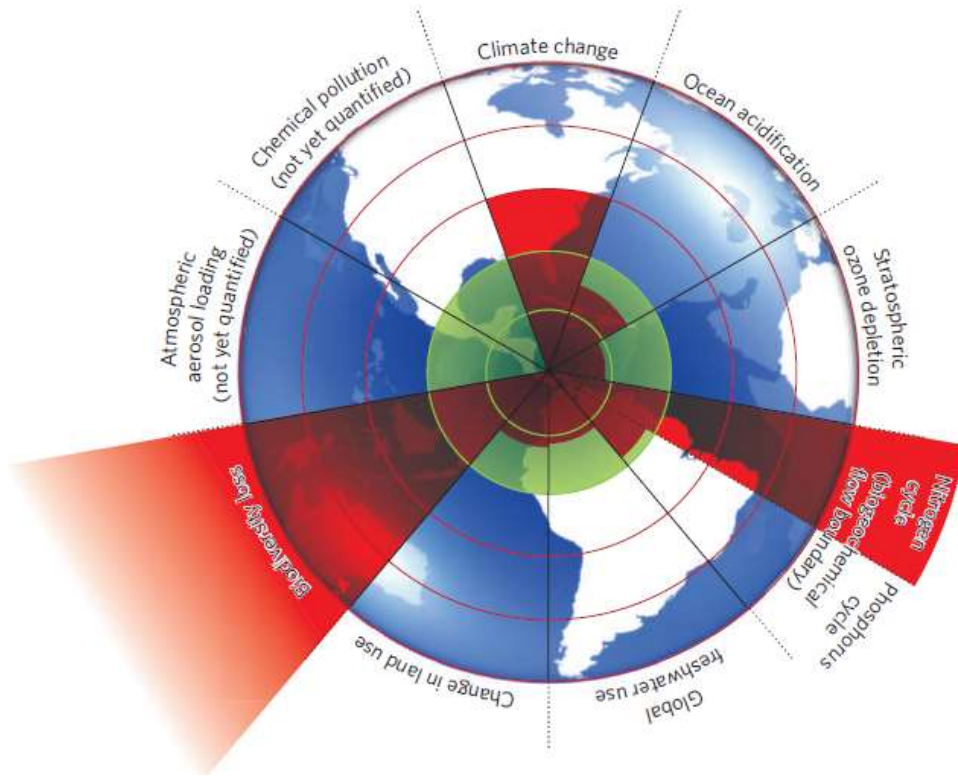
o Site de la Hague

Rejets radioactifs		Activité rejetée (MBq)				Ecart relatif observé par rapport à la moy 2015-2017
		Rapport ACV (année 2016)	Bilan 2017*	Bilan 2016*	Bilan 2015*	
gazeux	Gaz rares	3,20E+11	2,85E+11	3,2E+11	3,15E+11	4,2%
	Iodes	6,41E+03	5,58E+03	6,41E+03	5,58E+03	8,6%
	Tritium	7,45E+07	7,16E+07	7,45E+07	7,82E+07	-0,4%
	Beta gamma	1,04E+02	1,06E+02	1,04E+02	9,50E+01	2,2%
	Alpha	4,09E-01	4,10E-01	4,10E-01	4,10E-01	-0,2%
	¹⁴ C	1,91E+07	1,66E+07	1,91E+07	1,95E+07	3,7%
liquides	Tritium	1,23E+10	1,19E+10	1,23E+10	1,37E+10	-2,7%
	Iodes	1,44E+06	1,28E+06	1,44E+06	1,66E+06	-1,4%
	¹⁴ C	7,55E+06	7,33E+06	7,55E+06	8,52E+06	-3,3%
	⁹⁰ Sr	9,70E+04	2,73E+05	9,70E+04	2,21E+05	-103,1%
	¹³⁷ Cs	6,59E+05	8,21E+05	6,59E+05	5,66E+05	-3,5%
	¹³⁴ Cs	5,03E+04	8,29E+04	5,03E+04	3,30E+04	-10,1%
	¹⁰⁶ Ru	1,37E+06	2,00E+06	1,37E+06	1,52E+06	-19,0%
	⁶⁰ Co	5,80E+04	5,98E+04	5,80E+04	5,86E+04	-1,4%
	Autres émetteurs Beta/gamma	1,68E+06	2,54E+06	1,68E+06	2,03E+06	-24,0%
Alpha	2,30E+04	1,88E+04	2,30E+04	2,27E+04	6,5%	

* Valeurs extraites du rapport annuel de surveillance de l'environnement du site AREVA La Hague 2017

Annexe 4 à l'Avis IRSN/Avis IRSN/2019-00233 du 21 novembre 2019

Les neuf processus terrestres faisant l'objet de limites planétaires selon J. Rockström



L'espace central en vert représente le domaine dans lequel les systèmes planétaires considérés restent préservés.

Les secteurs rouges représentent l'estimation de chaque variable effectuée en 2009