

Indicateur d'impact radiologique et ACV : état des lieux

Karine Beaugelin-Seiller¹, Yannick Arimone², Eric Blanchardon¹, Cécile Boyer³, Xavier Capilla⁴, Philippe Ciffroy³, Vincent Coursimault⁴, Patrick Devin⁴, Didier Hartmann⁵, Denis Le Boulch³, Elisabeth Leclerc², Mélanie Maître², Marguerite Monfort⁵, François Paquet¹, Virginie Wasselin²

1 : ASNR ; 2 : ANDRA ; 3 : EDF ; 4 : ORANO ; 5 : CEA

karine.beaugelin@asnr.fr

L'analyse de cycle de vie (ACV), outil de plus en plus utilisé dans la stratégie RSE des entreprises pour déterminer leur empreinte environnementale, constitue une méthode normalisée pertinente pour identifier les systèmes énergétiques les plus durables et responsables pour l'environnement. Ce type d'approche est aujourd'hui couramment utilisé pour établir un diagnostic intégré des impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service, tout au long de son cycle de vie (« du berceau à la tombe »), en considérant des pressions d'origine variée. Le résultat d'une ACV peut ainsi participer à identifier des étapes particulièrement impactantes dans un processus de production, les consommations et émissions les plus contributrices aux indicateurs évalués, ou encore comparer plusieurs alternatives technologiques de production du même objet. L'ACV est un outil de communication puissant, mais elle est aussi très utile pour éclairer des choix d'écoconception ou orienter des politiques publiques ou des évolutions réglementaires.

Réaliser une ACV peut ainsi permettre la comparaison de l'énergie nucléaire avec d'autres sources d'énergie, identifier des points d'amélioration de processus existants, alimenter le débat sur les politiques énergétiques des nations et faciliter la compréhension et l'engagement du public.

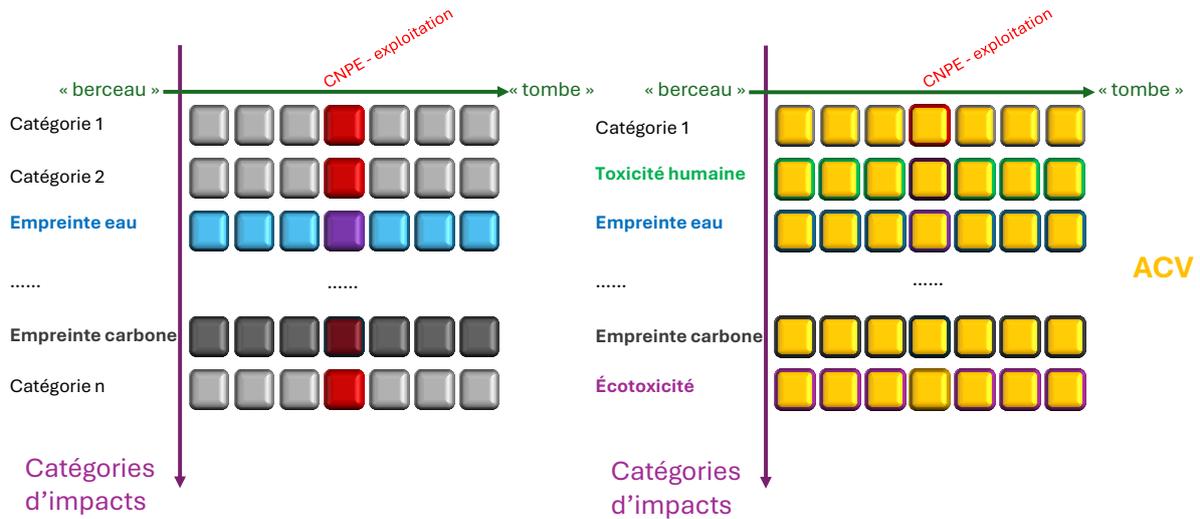
Une ACV associe une phase d'inventaire des flux de matière et d'énergie entrants et sortants à une étape d'analyse d'impact (AICV) dont les résultats interprétés constituent des éléments clés d'aide à la décision. Des approches sont disponibles pour inclure la catégorie « rayonnement ionisant » comme un vecteur d'impact potentiel sur la santé humaine et pour les écosystèmes. Concernant la santé humaine, les propositions existantes ont principalement été développées par la communauté de l'AICV, sans forte implication des professionnels de la radioprotection. Pour ce qui est des écosystèmes, les travaux sont rares et demandent à être validés. L'évolution des politiques énergétiques et le regain d'intérêt pour le nucléaire incitent donc à s'intéresser à ces méthodes pour en faire une analyse critique et proposer si nécessaire des pistes d'amélioration ou des alternatives.

La notion d'impact en ACV

La phase d'analyse d'impact d'une ACV n'est pas l'étude d'impact d'une installation au sens réglementaire. Sur le schéma ci-dessous, qui met en relation les étapes du cycle de vie d'un produit avec les catégories d'impact, l'étude d'impact correspond pour une étape donnée du cycle de vie à la colonne couvrant toutes les catégories d'impacts (ex. : CNPE en exploitation dans le cycle du combustible nucléaire, en rouge sur le schéma de gauche). De façon orthogonale, les lignes du schéma représentent les méthodes du type « empreinte écologique » (empreinte eau – ligne bleue, empreinte carbone – ligne anthracite) qui couvrent toutes les étapes du cycle de vie pour une catégorie d'impact donné. L'ACV (schéma de droite) couvre quant à elle tout le domaine, c'est-à-dire toutes les catégories d'impact pour toutes les étapes du cycle de vie. Elle a pour objectif de fournir une estimation relative d'impacts potentiels qui sera le support de la comparaison des impacts entre plusieurs substances

émises par un processus, entre plusieurs étapes de ce processus ou encore entre plusieurs alternatives de production d'un produit.

Étapes du cycle de vie



Les enjeux de l'indicateur « rayonnements ionisants »

En matière de santé humaine, la première formalisation d'une méthode d'intégration de la catégorie « rayonnement ionisant » dans une AICV remonte aux années 2000. Frischknecht et al (2000) ont publié une méthode de quantification des dommages associés aux rejets gazeux et liquides de radionucléides dans l'environnement pour la réalisation d'ACV. Cette approche est directement inspirée d'une étude antérieure (Dreicer, 1995) qui sans être une ACV en donnait les éléments de base. Il est à noter que ces éléments étaient inspirés du cycle électronucléaire français de l'époque. Cette approche est encore implémentée dans de nombreux outils d'ACV, bien que ses limitations soient nombreuses : données déterminées sur une seule année de référence pour quelques installations françaises, pratiques obsolètes (mines d'uranium situées en France, modélisation des rejets de ^{14}C - alors qu'ils sont aujourd'hui mesurés), hypothèses caduques (30 ans de durée d'exploitation pour un CNPE), etc. L'apport principal de Frischknecht et al a été d'introduire l'usage des disability-adjusted life years (DALY) pour quantifier le dommage à la santé humaine lié à l'exposition aux rayonnements ionisants. Ces auteurs considéraient toutefois cet ajout comme une source d'incertitude supplémentaire. Ce n'est qu'après 20 ans environ qu'une alternative a été proposée (Paulillo et al, 2018, 2020, 2020a, 2020b). Fortement portée par la communauté ACV (Paulillo et al 2023), cette alternative améliore la méthode de Frischknecht et al mais demande des justifications complémentaires et demeure perfectible du point de vue de la radioprotection. Notamment les modèles de transfert restent simplistes et les indicateurs proposés, toujours basés sur la dose collective et le DALY, sont sujets à discussions.

Concernant les écosystèmes, une méthode a été publiée (Garnier-Laplace et al, 2009), basée sur une adaptation pour les rayonnements ionisants de la notion usuelle en écotoxicité chimique de la concentration dangereuse conduisant à affecter 50 % des espèces à hauteur de 50 % d'effet délétère. Cette approche est considérée dans le monde de l'ACV comme provisoire car demandant à être validée. En outre, les travaux de Garnier-Laplace et al, effectivement inspirés par l'ACV, n'ont cependant pas été réalisés dans cet objectif et n'ont pas été appliqués dans une telle analyse. A notre connaissance, l'indicateur d'impact « rayonnement ionisant » n'est donc pas utilisé pour les écosystèmes.

Ainsi, les méthodes disponibles pour la prise en compte de la catégorie d'impact « rayonnement ionisant » en AICV sont donc rares et perfectibles, que ce soit pour la santé humaine ou celle des écosystèmes. La mise en œuvre de telles études étant appelée à se

multiplier, il est important d'analyser plus avant les pistes d'évolution de ces approches, et si nécessaire de développer des alternatives.

Similitudes et différences avec l'indicateur d'impact pour les substances chimiques

Les substances chimiques sont prises en compte de longue date en ACV dans différentes catégories d'impact, dont deux relatives à leur toxicité. La catégorie « toxicité humaine » contribue à l'aire de protection « santé humaine », et de façon parallèle l'écotoxicité est caractérisée pour la protection de la qualité des écosystèmes. Aujourd'hui, l'approche USEtox® (Fantke et al, 2017) est largement consensuelle au sein de la communauté AICV pour traiter ces sujets (Life Cycle Initiative 2021).

D'un point de vue conceptuel, les méthodes et approches AICV définies pour les éléments chimiques stables devraient s'appliquer pleinement aux radionucléides qui en constituent une déclinaison radioactive. Partageant leurs propriétés chimiques, leur transfert dans l'environnement est similaire. Caractériser l'exposition des êtres vivants est plus complexe puisqu'il faut prendre en compte la voie d'exposition par irradiation, spécifique à la radioactivité. Par ailleurs, si la décroissance radioactive des radionucléides peut être assimilée à la dégradation des substances chimiques, effectivement prise en compte en AICV, les produits de filiation ainsi générés doivent être inclus dans le terme source dont la nature sera ainsi très liée aux horizons temporels considérés. Enfin, une étape supplémentaire est introduite lors de la caractérisation des effets, avec le calcul de la dose de rayonnement. Toutefois, les actuelles méthodes AICV relatives aux rayonnements ionisants s'inspirent bien pour l'homme comme pour l'environnement de celles établies et reconnues pour traiter de la toxicologie humaine et de l'écotoxicologie (modèle USEtox®). C'est d'ailleurs une recommandation soutenue par le Programme pour l'Environnement des Nations Unies (PNUE) dans le cadre de la Life Cycle Initiative (Life Cycle Initiative 2021).

Perspectives

Deux actions complémentaires sont engagées au niveau national pour contribuer à l'amélioration des approches AICV relatives à la catégorie d'impact rayonnement ionisant. D'une part, une méthodologie inspirée à la fois de l'approche USEtox® pour l'environnement et des travaux de Garnier-Laplace et al (2009) a été développée par EDF, proposant un jeu de facteurs de caractérisation pour évaluer l'impact de l'exposition d'organismes non-humains vivant en eau douce. Cohérente avec l'approche d'écotoxicologie appliquée aux substances chimiques, cette méthodologie fera prochainement l'objet d'une publication.

D'autre part, un groupe de travail a été constitué, réunissant ASNR, ANDRA, CEA, EDF et Orano, pour dresser un état de l'art en analysant les méthodes existantes, et plus particulièrement les récents travaux de Paulillo et al (2018, 2020, 2020a, 2020b, 2023) dont le dernier volet a été entrepris sous l'égide du PNUE et de la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) dans le cadre de la phase 3 de la Life Cycle Initiative (2021). Cette analyse doit permettre de mettre en exergue les atouts et les faiblesses éventuels de cette approche, notamment du point de vue de la radioprotection.

Les conclusions de ces travaux permettront alors de proposer des pistes d'amélioration, voire des alternatives opérationnelles pour la catégorie d'impact « rayonnements ionisants ».

Références

Dreicer, M, Tort, V, Margerie, H (1995). ExternE: Externalities of Energy. Volume 5, Nuclear, Commission Européenne, Direction Energie et Recherche, Publications Office, 1995.

Fantke, P. (Ed.), Bijster, M., Guignard, C., Hauschild, M., Huijbregts, M., Jolliet, O., Kounina, A., Magaud, V., Margni, M., McKone, T.E., Posthuma, L., Rosenbaum, R.K., van de Meent, D., van Zelm, R., 2017. USEtox® 2.0 Documentation (Version 1), <http://usetox.org>

Frischknecht, R, Braunschweig, A, Hofstetter, H, Suter, P (2000). Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* **20** : 159–189.

Garnier-Laplace, J, Beaugelin-Seiller, K, Gilbin, R, Della-Vedova, C, Jolliet, O, Payet J (2009). A Screening Level Ecological Risk Assessment and ranking method for liquid radioactive and chemical mixtures released by nuclear

facilities under normal operating conditions. *Radioecology* 2008, Bergen (Norvège), 16-21 juin 2008. *Radioprotection*, **44** (5) : 903–908.

Life Cycle Initiative (2021) GLAM Scoping Document. Consultable en ligne à l'adresse [GLAM3 - Human Health](#), page consultée le 15 janvier 2025

Paulillo, A, Clift, R, Dodds, JM, Milliken, A, Palethorpe, SJ, Lettieri, P (2018). Radiological impact assessment approaches for life cycle assessment: a review and possible ways forward. *Environmental Reviews* 26(3), novembre 2018. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0004>

Paulillo, A, Clift, R, Dodds, JM, Milliken, A, Palethorpe, SJ, Lettieri, P (2020). Data supporting UCrad and CGM, two novel methodologies for radiological impacts in Life Cycle Assessment. *Data in Brief* **28**, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104857>

Paulillo, A, Clift, R, Dodds, JM, Milliken, A, Palethorpe, SJ, Lettieri P (2020a). Radiological impacts in Life Cycle Assessment. Part I: General framework and two practical methodologies *Science of Total Environment* **708**, 135179, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135179>

Paulillo, A, Clift, R, Dodds, JM, Milliken, A, Palethorpe, SJ, Lettieri P (2020b). Radiological impacts in Life Cycle Assessment – Part II: Comparison of methodologies. *Science of Total Environment* **708**, 134612, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134712>

Paulillo, A, McKone, TE, Fantke P (2023). Characterizing human health damage from ionizing radiation in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02226-1>