



HAL
open science

Déchets radioactifs : retour sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo

Julie de Brux, Patrice Geoffron, Pierre-Benoît Joly, Reza Lahidji, Jacques
Percebois, Émile Quinet

► **To cite this version:**

Julie de Brux, Patrice Geoffron, Pierre-Benoît Joly, Reza Lahidji, Jacques Percebois, et al.. Déchets radioactifs : retour sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo. *Revue de l'Energie*, 2021, novembre-décembre 2021 (659). hal-04202331

HAL Id: hal-04202331

<https://hal.science/hal-04202331>

Submitted on 11 Sep 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Déchets radioactifs : retour sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo

Julie de Brux*, Patrice Geoffron**, Pierre-Benoît Joly***,
Reza Lahidji****, Jacques Percebois*****, Émile Quinet*****

@ 11842

Mots-clés : déchets radioactifs, méthodologies de calcul, nucléaire, prospective, stockage

Cigéo vise à stocker en couche géologique profonde les déchets radioactifs les plus dangereux. L'évaluation socio-économique (ESE) du projet est destinée à analyser les gains et les coûts pour la collectivité, notamment par comparaison à un entreposage de longue durée restant à la charge des générations futures. Cette ESE a soulevé diverses questions méthodologiques en raison de la durée du projet, des difficultés à monétiser certains coûts et avantages, des incertitudes sur les sociétés du futur et du choix du taux d'actualisation. Une conclusion est que Cigéo procure, grâce à l'enfouissement sécurisé des déchets, un « bénéfice assurantiel » face à un risque de dégradation des sociétés futures.

Le projet Cigéo vise à stocker en couche géologique profonde les déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Cela dans le but d'offrir une sûreté passive sur le très long terme, dès lors que ce dispositif ne nécessite aucune intervention de la société une fois l'ouvrage fermé. Le projet Cigéo a fait l'objet d'une évaluation socio-économique (ESE) finalisée en août 2020 [Andra, 2020], suivie d'une contre-expertise indépendante conduite par le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) [SGPI, 2021] en février 2021. L'ESE a été pilotée par l'Andra, accompagnée d'un comité d'experts¹, et confiée à deux cabinets d'étude (Deloitte, puis Citizing).

Cette ESE était destinée à objectiver les implications de la réalisation ou non de Cigéo, en termes de bénéfices (économiques, sociaux et environnementaux) pour nos générations, mais aussi pour celles qui suivront sur des siècles. Cette réflexion a permis de poser, pour la première fois en termes socio-économiques, les enjeux du débat relatif au traitement des déchets radioactifs. Il y eut certes des travaux académiques utilisant notamment la théorie des options réelles, mais c'est une première dans le domaine de la décision publique. Compte tenu des grandes singularités de Cigéo, non comparable à d'autres projets publics (développement sur plus d'un siècle, fonctionnement sur des millénaires, incertitude tant sur les coûts que sur les bénéfices produits...), cette ESE a soulevé des difficultés méthodologiques qui présentent un intérêt au-delà du cas d'espèce : un des apports méthodologiques de l'ESE de Cigéo est, compte tenu

* Citizing.

** Université Paris-Dauphine/PSL, LEDa-CGEMP.

*** INRAE.

**** KPMG.

***** Université de Montpellier, CREDEN-ART-Dev.

***** PSE-ENPC (cf. biographies p. 79-80).

de l'horizon extraordinairement lointain de l'analyse, de devoir imaginer une société différente de la nôtre, dont les institutions auraient pu être déstabilisées.

Au terme de deux années de crise sanitaire et au début d'un siècle dominé par le changement climatique, il est apparu que certaines questions soulevées à l'analyse de Cigéo pouvaient trouver un intérêt au-delà même de son objet premier, la problématique de gestion des déchets radioactifs.

1. Contexte et objet de l'ESE de Cigéo

1.1. Rappel du cadre institutionnel

Dans les années 1980, face aux oppositions sur la recherche de sites portée alors par le Commissariat à l'Énergie Atomique, le gouvernement avait saisi l'OPEECST (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques), dont le travail a abouti en 1991 à la «loi Bataille» (c'est à cette occasion

que fut créée l'Andra). Celle-ci disposait que trois options, partiellement compatibles et non exclusives, seraient explorées pendant 15 ans avant qu'un choix définitif de gestion des déchets intervienne : le stockage géologique profond, l'entreposage et la transmutation. Plus près de nous, deux textes importants ont été adoptés : la loi du 28 juin 2006 qui retient le stockage géologique profond comme «solution de référence»; la loi du 25 juillet 2016 sur les modalités de création d'un centre de stockage géologique profond, Cigéo.

La construction de Cigéo est prévue dans une couche d'argile située à environ 500 mètres de profondeur, à Bure (d'autres communes limitrophes sont également concernées par le site), à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne. Après une phase industrielle pilote, suivie de la mise en stockage progressive de l'ensemble des déchets les plus dangereux produits et à produire par les installations nucléaires existantes, le centre de stockage Cigéo pourra être fermé : la couche géologique prendra alors le relais des actions de surveillance active,

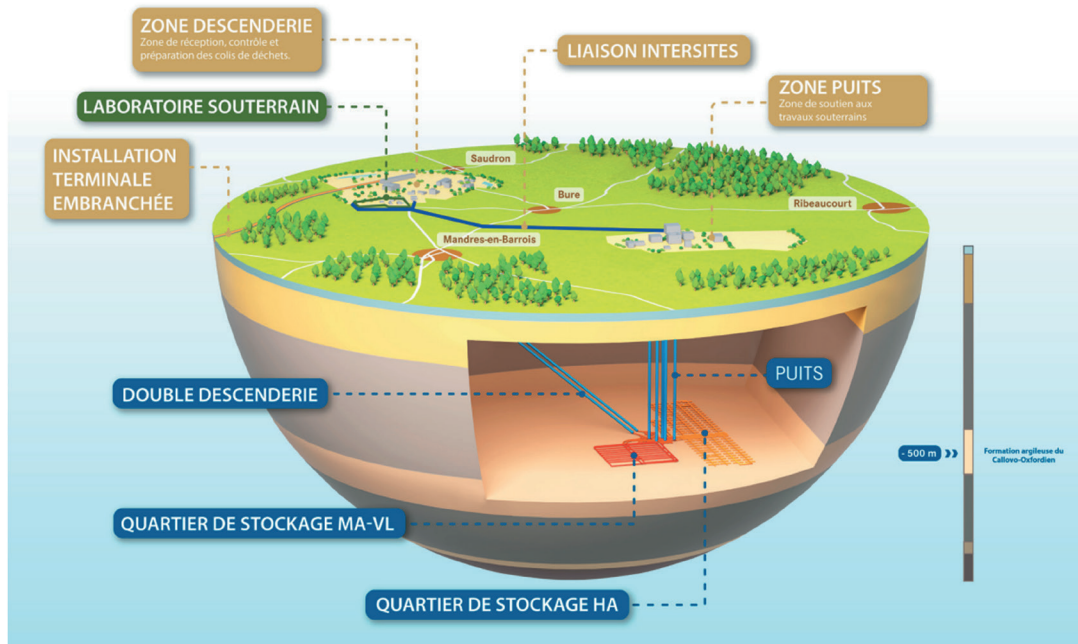


Figure 1. Structure du centre de stockage Cigéo

Source : Andra

Déchets radioactifs : retour sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo

jusqu'ici prises en charge par la société, pour assurer le confinement des radionucléides et la protection de l'homme et de l'environnement.

On pouvait considérer que, le Parlement ayant tranché après de longues études et de nombreux débats, l'ESE de Cigéo n'avait plus lieu d'être ou qu'elle devait ne pas considérer les alternatives à la solution retenue par la représentation nationale, mais plutôt aider à l'optimisation de sa mise en œuvre. Il est vrai que si les débats parlementaires n'ont pas disposé d'un tel travail d'évaluation, ils se sont toutefois fondés sur un raisonnement qualitatif des enjeux en considération ; l'approche quantitative de l'évaluation étant dès lors inscrite dans la loi depuis 2012². Ajoutons à cela que de nouveaux débats parlementaires pourraient conduire à reconsidérer dans le futur la position politique actuellement retenue, éventualité qui ne peut être écartée pour une infrastructure dont l'exploitation s'étendra sur plus d'un siècle.

1.2. Nature des déchets radioactifs destinés à un stockage géologique profond

Les déchets considérés sont des substances radioactives issues de différentes filières, pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est actuellement envisagée et qui sont classées en fonction de leur niveau d'activité et leur durée de vie. Les déchets concernés par le projet de stockage géologique sont ceux qui présentent une haute activité (HA) ou une moyenne activité et une vie longue (MA-VL). Les déchets à faible ou très faible activité sont entreposés ou stockés en surface ou en sub-surface (à quelques dizaines de mètres de profondeur).

Une grande partie des déchets destinés à un stockage profond provient de la production électronucléaire, notamment des combustibles usés des centrales. La France a fait, dans ce domaine, le choix d'un « cycle fermé » (à l'instar de la Russie, de la Chine ou du Japon) qui consiste à dissoudre les combustibles usés et à en séparer les composantes : matières recyclables d'un côté (U et Pu) et déchets de l'autre. Les combustibles MOX recyclent le Pu. Notons que le recyclage U+Pu permet d'économiser environ 20 % de l'uranium. D'autres pays ont fait le choix d'un « cycle ouvert » (États-Unis,






Catégorie	Déchets dits à vie très courte contenant des radionucléides de période < 100 jours	Déchets dits à vie courte dont la radioactivité provient principalement de radionucléides de période ≤ 31 ans	Déchets dits à vie longue dont la radioactivité provient principalement de radionucléides de période > 31 ans
Très faible activité (TFA)	 Gestion par décroissance radioactive	 Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	 Stockage à faible profondeur à l'étude dans le cadre de l'article 4 de la loi du 28 juin 2006 codifiée
Faible activité (FA)		 Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	
Moyenne activité (MA)		Non applicable	
Haute activité (HA)			

Figure 2. Classification des déchets radioactifs

Source : Andra

Allemagne, Suède, Finlande, Corée du Sud, Espagne) imposant de stocker en l'état les combustibles usés. La France étudie également la transmutation des actinides mineurs par RNR (Réacteur à Neutrons Rapides dit de «IV^e génération»), ce qui pourrait permettre de réduire la durée de vie et la toxicité de certains déchets; mais il s'agit pour l'instant d'un projet de recherche et la transmutation ne supprime pas le besoin d'une solution pour les déchets ultimes de type HA et MA-VL. On étudie aussi, en France comme dans d'autres pays, cette transmutation par d'autres technologies (ADS³, comme en Belgique, ou laser).

Le volume et la nature des déchets à stocker dans Cigéo sont répertoriés au sein d'un inventaire de référence (revu périodiquement par le PNGMDR – Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs), qui porte sur le parc de réacteurs nucléaires actuellement en fonctionnement, en cours de démantèlement ou en construction (i.e. l'EPR de Flamanville). Il existe également un inventaire de réserve comprenant les combustibles usés qui sont encore considérés comme des matières potentiellement valorisables. La frontière entre l'inventaire de référence et l'inventaire de réserve dépend de différents choix publics (au niveau du cycle du combustible ou concernant la durée d'activité de certains réacteurs) et pourra donc évoluer au cours du temps.

L'ESE de Cigéo n'avait certes pas vocation à s'interroger sur des choix qui relèvent de la politique nucléaire globale de la France, en conséquence, il n'intègre pas les déchets de l'inventaire de réserve, ni la question de l'adaptabilité de Cigéo à l'éventualité d'une prise en charge d'une partie de cet inventaire. Quoi qu'il en soit, les résultats de l'ESE doivent être lus en gardant à l'esprit l'incertitude sur le périmètre et, conséquemment, l'intérêt d'une flexibilité de Cigéo dans l'éventualité où une évolution de la politique publique entraînerait un déplacement de la frontière entre «inventaire de référence» et «inventaire de réserve».

Par ailleurs, l'ESE interroge les possibilités de rendre mobilisables des technologies

alternatives au stockage géologique profond, sous réserve d'investissements conséquents. Rappelons qu'à ce jour, ce type d'alternative n'existe pas. À cette fin, est intégrée à l'analyse l'éventualité du recours à un forage très profond de type *deep borehole*. Ces *deep boreholes* sont des forages à plusieurs milliers de mètres⁴ (profondeurs maîtrisées par l'industrie pétrolière), mais l'étroitesse du diamètre impose de ne stocker que des déchets dont le volume est limité.

Si la France a fait officiellement le choix du stockage en site géologique profond, notons que cette solution est également retenue par la plupart des pays qui disposent aujourd'hui d'un parc nucléaire, de même qu'elle est recommandée par l'Union européenne, l'AIEA et l'AEN. Le stockage en couche géologique profonde pour les déchets les plus dangereux est ainsi prédominant, mais certains pays n'excluent pas d'explorer d'autres solutions complémentaires (la transmutation par exemple).

2. Aperçu des singularités de l'ESE d'un projet hors normes

Selon les termes du guide de l'évaluation socio-économique des investissements publics, cet exercice «permet d'apprécier le bénéfice d'un investissement pour la collectivité, en analysant les gains de bien-être et les coûts que celui-ci induit pour la collectivité. Elle a pour ambition d'appréhender, mesurer et valoriser l'ensemble des effets attendus d'un investissement [...] affectant le bien-être de la collectivité» [Commissariat général à la stratégie et à la prospective, 2013]. L'ESE est par nature comparative : elle met en regard le projet d'investissement public envisagé avec une situation dite «contrefactuelle», représentant ce qui serait réalisé si le projet n'était pas mis en œuvre. Cet exercice implique de traduire en termes monétaires les bénéfices et les coûts du projet pour l'ensemble de sa durée (exploitation et surveillance). Ces éléments sont ensuite actualisés sur la durée du projet, durée qui en pratique ne s'étend généralement pas au-delà de 2070⁵, et comparés à

Déchets radioactifs : retour sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo

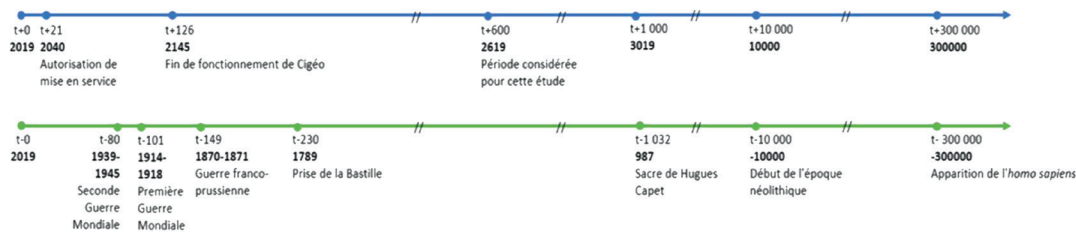


Figure 3. Contextualisation des échelles de temps considérées dans l'ESE

Source : Andra

ceux d'un contrefactuel. Ces évaluations s'effectuent en fonction d'un référentiel macro-économique dont les grandes lignes sont circonscrites par l'État jusqu'aux horizons correspondants.

Mais, la singularité de Cigéo a conduit à lever des difficultés méthodologiques à chaque niveau de l'analyse, à commencer par la prise en compte des horizons temporels en jeu dans le projet.

2.1. Comment aborder un horizon temporel... tirant vers l'infini ?

L'une des principales spécificités est la longueur des horizons qu'implique le projet : avec tout d'abord des délais de choix du projet et de son site extraordinairement longs (plusieurs dizaines d'années entre la décision de lancer des recherches exploratoires et l'amorçage des travaux); ensuite, une durée totale de réalisation de près de 150 ans jusqu'à l'achèvement complet marqué par la fermeture définitive du site; et au-delà, des bénéfices attendus (confinement des radionucléides) s'étendant sur des centaines de milliers d'années.

Les coûts de réalisation et d'exploitation sont en outre dépendants des compétences techniques qu'il convient d'entretenir sur la durée, mais qui sont susceptibles d'évoluer sur le long terme en fonction d'efforts de recherche consentis et de la place prise par la filière

nucléaire dans la politique énergétique. Pendant la phase d'exploitation du projet (jusqu'à la fermeture du site au milieu du ^{xxi}e siècle), des incertitudes existent concernant le maintien des compétences dans le domaine du nucléaire, surtout dans un pays qui aurait décidé d'abandonner cette source d'énergie, mais qui, néanmoins, aurait à gérer ses déchets.

De fait, en raison des délais de conception et de réalisation, les solutions alternatives mettent en jeu non seulement les institutions actuelles, mais aussi celles des générations futures. Leur définition implique de comprendre et de prévoir les décisions qu'elles prendraient, et d'en simuler les effets, ce qui, pour être fait rigoureusement, impliquerait des analyses complexes mêlant l'économie, l'histoire, la sociologie, la prospective, à travers peut-être des modélisations théoriques poussées.

Surtout, il s'agit d'envisager, au-delà de la fermeture du site de Cigéo, les bénéfices produits (c'est-à-dire les risques évités; voir infra) sur des temps très longs et dans des sociétés inconnues.

2.2. Quel sera l'état des sociétés dans un futur lointain ?

L'incertitude la plus radicale porte sur l'état des sociétés du futur : ira-t-on vers une société prospère, en paix, bénéficiant d'institutions fortes et d'un État de droit, ou au contraire

vers une société chaotique, en décroissance économique, avec des institutions dégradées et des conflits sociaux, voire militaires? Compte tenu de ces incertitudes, garantir une pérennité institutionnelle sur plusieurs siècles est impossible. Or les conséquences sur la gestion des déchets ne seraient pas les mêmes dans les deux cas mentionnés. Une société chaotique serait-elle en mesure de gérer durablement un entreposage de déchets en surface, en assurant son renouvellement? Classerait-elle cet objectif parmi ses priorités en y dédiant des moyens humains et financiers appropriés?

En conséquence, l'ESE implique de délimiter l'environnement économique et social au sein duquel un projet tel que Cigéo pourrait advenir, avec une impossibilité de procéder par simple extrapolation en considérant, au fil des siècles, uniquement une société stable institutionnellement et raisonnablement prospère, à l'image de celle qui prévaut depuis le début du cycle d'investissement nucléaire en France.

Cette nécessité a conduit à proposer différentes innovations méthodologiques en suivant une stratégie spécifique, fondée sur la séparation entre les paramètres probabilisables, et ceux que l'on a renoncé à probabiliser, parce que trop incertains ou chargés de choix politiques et éthiques. Dans la première catégorie, entrent les coûts et les probabilités diverses intervenant dans le calcul (de succès de la recherche, de perte du site de Cigéo, de réussite dans la découverte d'un nouveau site) pour lesquelles sont définies des plages très larges, fixées elles aussi à «dire d'expert».

D'autres paramètres s'avèrent relever de choix d'ordre éthique, politique ou d'événements auxquels nous ne sommes pas capables d'attribuer des probabilités, qui ressortissent plutôt à l'incertitude qu'au risque, selon la distinction opérée par [Knight, 1921]. Pour ces paramètres, ont été déterminées des plages de variations larges, et calculées les valeurs actuelles nettes (VAN) qui balisent ces plages, fournissant ainsi aux décideurs les informations techniques leur permettant d'éclairer

leur décision, mais sans préempter leurs choix politiques.

Ces paramètres sont au nombre de trois. Il s'agit d'abord du taux d'actualisation, qui dépend à la fois de la croissance économique à long terme et de choix politiques sur la préférence accordée au futur par rapport au présent. Il s'agit, aussi, de notre attitude face au risque que représentent les déchets, que cette attitude relève d'une aversion particulière pour le risque d'accident nucléaire ou d'un jugement d'ordre éthique et politique sur notre responsabilité vis-à-vis des générations futures. Enfin, le principal choix de représentation de l'incertitude a été de retenir deux évolutions volontairement contrastées de la société, l'une stable institutionnellement à l'image de la nôtre (et qualifiée de «OK»), et l'autre progressivement déstabilisée (et qualifiée de «KO»), afin de couvrir largement le «champ des possibles». Cet effort de scénarisation n'a pas cherché à reproduire une évolution réaliste de la société jusque dans ses détails, car à un tel horizon, l'exercice aurait été hautement hypothétique.

Le scénario «OK» correspond à un prolongement sur le très long terme des tendances retenues dans les prévisions macroéconomiques en usage dans les évaluations socio-économiques — telles que rappelées dans le guide méthodologique de l'ESE — qui reposent centralement sur les prévisions du Conseil d'orientation des retraites (COR) et qui, implicitement, reflètent une société prospère, structurée par des institutions fortes et bénéficiant d'un État de droit.

Le scénario «KO», destiné à refléter une dégradation économique progressive et durable, combine une situation de rupture de croissance et une perte de contrôle de la société. Les hypothèses de rupture participent d'idées déjà mises en œuvre dans la pratique de l'ESE. Le ministère des Transports impose, dans le cadre des analyses des risques, d'étudier une variante de rentabilité des investissements dans un environnement économique de croissance nulle; dans les travaux liés à la détermination du taux d'actualisation, de nombreux auteurs, sur les résultats desquels s'appuient les

Déchets radioactifs : retour sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo

recommandations officielles en matière de taux d'actualisation, considèrent différents régimes de croissance, l'un « normal » correspondant au rythme de croissance moyen constaté actuellement, et l'autre correspondant à une situation de baisse importante du PIB, avec des modalités diverses de passage d'un régime à l'autre.

L'originalité ici a été d'ajouter à ces traits économiques des caractéristiques de fonctionnement de la société, et de se référer au concept de « fragilité », notamment issu de travaux en économie politique du développement, et renvoyant à des situations de faillite des institutions. Et, dans le prolongement de ce choix, il a été retenu de prendre appui sur des travaux d'économie de l'environnement en se référant aux « *Shared Socioeconomic Pathways* » [UNFCCC, 2017].

2.3. Comment caractériser les bénéfices attendus du projet ?

Quant aux bénéfices attendus, ils sont non seulement étalés sur ces mêmes horizons, mais également hors norme. D'habitude, les bénéfices sont liés soit à des gains directs (exemple des gains de temps dans les ESE de projets de transports), soit à la réduction de risques balisés par des statistiques fournies et des évaluations robustes (exemple des réductions de risques d'accidents résultant de la réalisation d'autoroutes). Dans le cas de Cigéo, nous sommes hors de ce cadre : les bénéfices les plus évidents résident dans le confinement des effets potentiels nocifs des déchets les plus radioactifs, et s'étendent sur plusieurs centaines de milliers d'années ; et, même à plus court terme, il n'y a pas l'équivalent d'accidents majeurs (comme ceux de Fukushima ou Tchernobyl pour les réacteurs) concernant des sites d'entreposage de déchets HA et MA-VL qui puissent nous renseigner sur leur phénoménologie et l'étendue de leurs dommages potentiels⁶.

L'absence d'accidents graves d'entreposage dans l'histoire du nucléaire civil s'explique par le soin accordé à la sûreté dans le cadre d'institutions organisées, comme c'est le cas dans

les sociétés contemporaines. C'est la conception même des colis et des entrepôts qui est le premier facteur de sûreté. Cela étant, une perte de contrôle, sous la forme de conflits majeurs (guerre civile ou extérieure) ou de toute autre situation chaotique liée à une dégradation des institutions, ne peut être exclue aux horizons considérés dans cette ESE. L'histoire des siècles passés (y compris le xx^e) en atteste et nous invite à envisager cette éventualité dans l'avenir. On sort alors du domaine de l'analyse économique pour entrer dans celui de la prospective, avec des événements aux probabilités mal connues, aux conséquences potentiellement très graves, mais produisant leurs effets dans des sociétés dont les contours nous échappent (concernant notamment les modes d'organisation, les institutions, les technologies en vigueur...).

L'ESE de Cigéo propose, dans le scénario KO, une évaluation d'un accident tant en termes de coût des dommages qu'en termes de probabilité d'occurrence. Le coût de cet accident, comme sa probabilité, ne résulte pas d'observations dont on aurait tiré des estimations statistiques. Toutefois, il a été retenu que les deux estimations pouvaient donner des ordres de grandeur, des magnitudes vraisemblables d'un accident représentatif, et servir utilement dans la modélisation pour reproduire le sens et l'ampleur des coûts d'insécurité.

2.4. Quelle valeur du taux d'actualisation dans le cas d'espèce ?

Le taux d'actualisation repose, selon l'analyse économique traditionnelle, sur la formule de Ramsey⁷. Dans cette formule, deux paramètres traduisent les choix éthiques et politiques : la préférence pour le présent δ et le paramètre d'aversion à l'inégalité γ . Ces deux paramètres, qui doivent être communs à toutes les ESE pour assurer la cohérence et la comparabilité des choix, se situent depuis longtemps dans tous les pays, et en particulier en France, dans des fourchettes étroites, entre 0 et 1 pour le premier, et entre 1 (cas du Royaume-Uni) et 2 (cas de la France) pour le second.

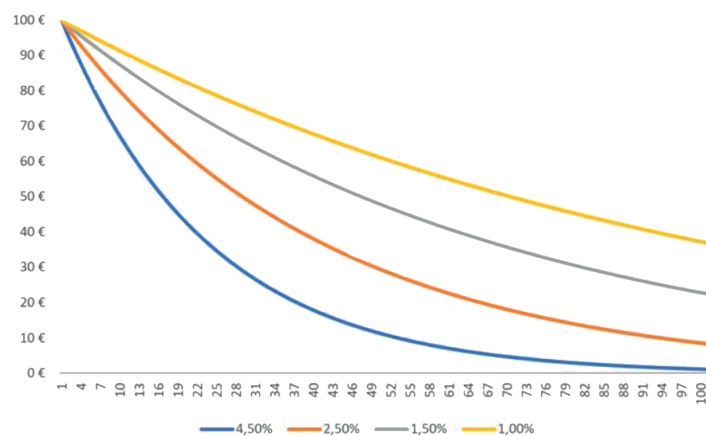


Figure 4. Simulation de valeurs actualisées en fonction du choix de taux d'actualisation

Source : Andra

Dans ces conditions, le taux d'actualisation dans les situations présentes ne peut guère sortir de la fourchette 2 %-3 % pour le taux sans risque. Son évolution dans le temps est en revanche plus incertaine : elle dépend de celle du taux de croissance et de l'incertitude qui s'y rapporte. Ces deux facteurs jouent dans le sens d'une réduction dans le temps des taux d'actualisation, mais à un rythme mal connu et peu précisé par les recommandations officielles qui, en France, s'arrêtent à peu près à la fin du siècle actuel.

C'est la raison pour laquelle trois systèmes d'actualisation ont été testés :

- Le premier correspond à celui préconisé par les directives officielles en vigueur à la date de l'étude (limitée à 2100). Le choix a été de le prolonger en tenant compte des tendances généralement admises en ce qui concerne la décroissance des taux d'actualisation. Ce système d'actualisation est, de façon assez générale, considéré comme plutôt haut compte tenu notamment du ralentissement de la croissance économique et de la baisse des taux d'intérêt du marché depuis le moment (2012) où il a été fixé. Ce système constitue donc une borne haute des systèmes d'actualisation envisageables.

- À l'autre extrême, un taux résolument bas a été retenu, surtout à partir de 2070, où le niveau sans risque est fixé à 0,1 % (soit la valeur qui avait été prise dans le rapport Stern [Stern, 2006] pour un horizon équivalent). Ce taux peut procéder de la conjonction d'une croissance très ralentie et d'un *trend* spécialement incertain.

- Un troisième système d'actualisation, intermédiaire entre les deux précédents, a été utilisé. Ses caractéristiques sont à peu près les moyennes entre celles du système haut et celles du système bas.

3. Les options de gestion des déchets retenues dans l'ESE

3.1. Définition des options et éléments de différenciation

La solution qui a été retenue, inhabituelle dans les ESE, a consisté à étudier un ensemble d'options — et pour certaines d'entre elles des variantes — dont l'analyse attentive permet de considérer qu'elles balaient le champ des possibles raisonnables.

Pour résumer, les solutions considérées sont les suivantes :

Déchets radioactifs : retour sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo

- Option 1 : réalisation du projet Cigéo tel que prévu par l'Andra, en réponse à la loi et après avis favorable de l'ASN;
- Option 2 : configuration dans laquelle les premiers investissements du projet Cigéo sont réalisés (phase industrielle pilote Phipil), mais où seuls les déchets MA-VL y seraient stockés dans un premier temps. En parallèle, la R&D sur les déchets HA dispose d'un temps supplémentaire sur la période 2019-2070, à l'issue de laquelle, soit la recherche est fructueuse et la technologie prospective est déployée; soit en cas d'échec, les déchets HA sont finalement stockés dans Cigéo comme initialement prévu;
- Option 3 : configuration dans laquelle les premiers investissements du projet Cigéo sont réalisés mais où aucun déchet n'est stocké. La R&D bénéficie d'un temps supplémentaire sur la période 2019-2070, pour le déploiement d'options de gestion alternatives pour les déchets MA-VL et HA. À l'issue de cette période, plusieurs possibilités s'ouvrent en fonction du succès de la recherche et des coûts.
- Option 4 : configuration où la décision de lancer les premiers investissements liés à Cigéo est reportée. La R&D d'options de gestion alternatives bénéficie d'efforts financiers conséquents jusqu'en 2070. Le report de la décision d'investissement fait également peser un risque important de perte du site d'implantation actuel du stockage en Meuse/Haute-Marne, considérant que durant cette période aucune opération d'aménagement ne sera engagée. À l'issue de la période de recherche complémentaire, différentes possibilités apparaissent pour assurer la gestion des déchets HA et MA-VL en fonction des résultats de la recherche, de la perte du site et des coûts. Cette option comprend une variante consistant à choisir de ne pas réaliser Cigéo et à ne pas investir dans la recherche d'alternatives technologiques (variante de l'option 4), laissant aux générations futures la charge de l'entreposage de longue durée, à renouveler éternellement.

3.2. Observations sur les coûts des différentes options

Une des difficultés de la présente ESE a été de devoir estimer de nombreuses catégories de coûts, de nature très différente (certaines relevant du BTP et d'autres de la R&D) et qui sont parfois communes entre les options (coûts qualifiés dans cette ESE de «standards»), parfois spécifiques à l'une ou plusieurs d'entre elles. Certaines de ces catégories de coûts avaient d'ores et déjà fait l'objet d'investigations approfondies (schématiquement, les coûts relatifs à Cigéo qui avaient fait l'objet d'un travail «d'esquisse» par l'Andra en 2014, ensuite repris par la DGEC), tandis que d'autres ont procédé d'estimations spécifiques dans le cadre de la réalisation de cette ESE (coûts de recherche d'une variante à Cigéo comprenant la R&D, la recherche d'un site et les coûts de mise en œuvre, coûts d'entreposage, de transports des colis de déchets radioactifs, de maintien des compétences et de maintien de site...).

Une autre spécificité de cette ESE est de reposer sur un coût de Cigéo fixé par arrêté à 25 milliards déterminé par la puissance publique (et servant de référence au dimensionnement des provisions financières que doivent constituer les producteurs de déchets). Cette ESE est donc fondée sur une estimation du coût du projet Cigéo établie à partir du dossier de chiffrage de 2014 initialement soumis et qui s'élevait à environ 35 milliards. Les efforts fixés par l'État en termes d'optimisation et de maîtrise des coûts ont donc été intégrés en conséquence dans la chronique des coûts adaptée en conséquence pour les besoins de l'ESE.

À la lumière de l'expérience générale sur les évaluations de coûts des grands projets, le rapport prend en compte des plages de variations possibles. Celles-ci ont été définies par l'intervalle 80-150 % à la fois pour Cigéo et pour les autres coûts. En outre, une partie importante du projet Cigéo correspond à des investissements réalisés en début de période, de sorte que les coûts (à la différence des bénéfices comme nous le verrons plus loin) échappent à la grande indétermination des temps très

lointains, ceux du siècle prochain et au-delà. Ce n'est certes pas le cas de toutes les options, certaines prévoyant un renouvellement à très long terme de l'entreposage, ce qui conduit à envisager les coûts d'une telle opération dans les siècles à venir. Mais, les coûts engagés en début de période, en cas de dérive, ne sont pas érodés par l'actualisation (de sorte qu'une dérive pèserait sur la valeur socio-économique), tandis que les coûts très lointains (et comparativement plus incertains) se trouvent amoindris en valeur actuelle.

Ces plages ont été établies en comparaison des études de sensibilité effectuées dans d'autres ESE. On peut considérer qu'elles ne prennent pas assez en compte les grandes incertitudes particulières au problème traité, largement documentées dans la littérature sur les mégaprojets [Flyvbjerg, 2017]. Il serait intéressant d'établir une variante augmentant l'étendue de ces plages, surtout du côté des valeurs hautes, car il est bien documenté que dans les projets de grande taille (*a fortiori* dès lors qu'il s'agit d'un exemplaire unique, comme dans le cas de Cigéo), les dépassements de budgets sont la norme et leur respect l'exception.

Il est de ce fait important de s'interroger sur le risque de sous ou surestimation des coûts de Cigéo relativement aux solutions alternatives étudiées. On notera que cette incertitude dépend du degré de maturation du projet. Ainsi, le rapport précédemment cité de la Cour des comptes propose un pourcentage de somme à valoir et de provisions de 20 à 25 % quand on en est au stade de l'avant-projet — ce qui correspond en gros à l'état actuel de maturation de Cigéo — et recommande un pourcentage de 30 à 50 % au stade des études préliminaires.

De ce point de vue, il faut distinguer entre les solutions d'entreposage et la technologie prospective. Les solutions d'entreposage sont déjà mises en œuvre, mais sous une forme qui n'est pas celle d'un entreposage de longue durée renouvelé. Si donc les coûts de l'entreposage actuel sont relativement bien connus, en raison de l'expérience accumulée, ceux qui résulteraient d'un

renouvellement d'entreposage le sont moins. On peut en particulier exprimer des doutes sur le coût des opérations de renouvellement.

La technologie prospective choisie comme exemple du résultat de la recherche est le *borehole*. C'est l'un des rares procédés techniques qui puissent être prêts à l'horizon de 2070, compte tenu des délais de développement, d'études et de recherche de site. Les informations dont on dispose à son égard sont très limitées. Elles résultent d'une thèse effectuée aux États-Unis dont l'ESE a transcrit les résultats en fonction des paramètres français de la manière la plus soignée possible. Il ressort de ce travail que les meilleures estimations dont on dispose situent le coût de cette solution légèrement en dessous de celui de Cigéo s'il s'agit de traiter uniquement les déchets HA, mais au-dessus s'il faut traiter aussi les déchets MA-VL. Il faut considérer que les chiffres obtenus sont malgré tout incertains, et il est difficile de dire s'ils sont plus ou moins sous-estimés que ceux des deux autres technologies, en raison de la moindre maturation du projet de *borehole*, n'ayant pas encore atteint le stade des études de faisabilité.

Un autre facteur de coût important est constitué par les coûts de recherche pour la conception et le développement d'une technologie prospective. Ces coûts sont établis à partir de l'expérience passée des dépenses de recherche effectuées pour Cigéo. On pourrait s'interroger sur l'optimisation de ces dépenses : faut-il dépenser davantage, avec l'espoir de trouver plus vite, ou l'inverse? Il est apparu qu'on ne disposait pas d'éléments d'information permettant d'éclairer cette question, et qu'il était plus raisonnable de s'en tenir sur ce point à l'expérience passée. On peut toutefois objecter à cela que la recherche qui sera menée aura toutes les chances d'avoir des retombées autres que pour la gestion des déchets radioactifs. Il faudrait alors intégrer dans l'évaluation du projet les bénéfices correspondants; mais on n'a aucune estimation robuste de ces bénéfices. De même qu'il n'a pas été possible de considérer que la recherche conduite par d'autres nations

Déchets radioactifs : retour sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo

puisse avoir des retombées sur l'émergence de telle ou telle solution en France.

3.3. Quantification des bénéfiques et risques évités par les différentes options

L'ESE de Cigéo appréhende les risques nucléaires selon une double focale : elle cherche d'une part à rendre compte des probabilités et des conséquences d'accidents graves dans l'ensemble des options; et elle tente par ailleurs de proposer un cadre d'évaluation du bénéfice à très long terme que représente la sûreté passive.

Les risques nucléaires à considérer dans l'ESE sont divers et il peut être utile, en suivant la méthodologie des démarches de sûreté, de les distinguer en fonction du contexte opérationnel dans lequel ils surviennent :

- Une première catégorie de risques est relative aux activités de manutention et de transport des colis de déchets radioactifs propres à chaque option étudiée. Deux facteurs sont saillants dans l'analyse de ces risques. Le premier est la nécessité, dans l'option 1, de transporter l'ensemble des déchets depuis leurs différents lieux d'entreposage vers le site centralisé de Cigéo. Les opérations de transport concernent des dizaines de milliers de colis et s'échelonnent sur plusieurs décennies. Le second facteur tient aux conditions particulières du stockage en grande profondeur, qui impose des opérations de manutention particulières, mais offre également l'avantage de l'existence de barrières de protection naturelles en cas de survenue d'un accident.

- Une seconde catégorie de risques concerne l'évolution à long terme des colis de déchets au sein des solutions de gestion considérées. Dans un entreposage, les colis doivent être maintenus à l'abri des agressions naturelles (inondation, séisme...) ou humaines (incendie, acte malveillant, conflit); ils doivent de surcroît être ventilés afin que la chaleur ou les gaz qu'ils dégagent puissent être évacués. À intervalles réguliers, ils doivent également être reconditionnés afin de compenser les effets de leur usure. Dans le stockage en grande profondeur, les colis sont placés dans des

alvéoles qui sont comblées et scellées. Ils sont alors relativement moins exposés aux dangers provenant de la surface, même si une intrusion humaine reste possible. Après fermeture du stockage, ils sont soumis à une altération possible et aux agressions liées notamment à la présence de l'eau dans la roche. Au fil du temps, ils perdent de leur étanchéité et relâchent des radionucléides qui migrent dans la formation rocheuse, notamment du fait du transport hydrique. Les risques qu'ils posent pour l'homme et l'environnement sont déterminés par les dynamiques comparées de leur cheminement jusqu'au plus proche exutoire et de la décroissance de leur activité. La robustesse d'un stockage fermé aux accidents graves est donc quasi totale.

La démarche de sûreté de Cigéo — ainsi d'ailleurs que celles des installations d'entreposage existantes et de l'ensemble des installations nucléaires de base — se fonde sur l'approche déterministe, conformément à la doctrine de sûreté nucléaire en vigueur en France. L'approche consiste à mettre en place un ensemble de dispositifs visant à préserver les fonctions de sûreté des installations selon la logique de la défense en profondeur.

Il existe certes des outils d'évaluation du risque d'accident grave dans les réacteurs nucléaires, notamment les évaluations probabilistes de sûreté (EPS). Ces outils d'évaluation quantitative du risque n'ont cependant pas été appliqués, pour l'heure, aux cas du transport, de l'entreposage et du stockage des déchets radioactifs. En l'absence d'étude préexistante, l'ESE de Cigéo a dû traiter des risques en utilisant pour partie le raisonnement par analogie, en suscitant des travaux novateurs sur la dynamique accidentelle dans les entrepôts de déchets, et enfin en ayant recours à des scénarios d'évolution institutionnelle à très long terme.

En s'appuyant notamment sur les travaux de la nouvelle économie institutionnelle, l'ESE a retenu un scénario dans lequel une longue période de déclin économique, résultant en particulier des difficultés climatiques et environnementales prévisibles à l'horizon de la fin du siècle, se traduirait à terme par un effondrement

institutionnel. Dans ce scénario KO, les normes de sûreté se dégraderaient au point de faire remonter les probabilités d'accident grave de plusieurs ordres de grandeur, c'est-à-dire à des valeurs de 10^{-4} à 10^{-3} au lieu de 10^{-6} à 10^{-5} . Un tel recul ramènerait la sûreté nucléaire au niveau où elle se trouvait au moment du développement de la première génération de réacteurs à eau pressurisée.

Au total, le site de Cigéo ne demandant aucune intervention humaine après sa fermeture, il serait protégé d'un effondrement institutionnel en surface (probabilité d'accident grave considérée comme nulle, indépendamment de l'état de la société). Dans le cas de l'entreposage, l'analyse a combiné les niveaux de probabilité mentionnés plus haut avec les conséquences d'un accident grave, tels qu'elles ressortent de travaux réalisés par l'IRSN pour les besoins de l'ESE.

4. Les principaux résultats de l'ESE

4.1. La hiérarchie des options

Il s'avère que les options 2 et 3 sont toujours dominées par l'option 1 : les options modélisant la poursuite d'investissements dans de la R&D en vue de trouver une technologie prospective alternative au stockage géologique profond, combinés à la construction initiale et la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo, visant à s'assurer que cette technologie et le site afférent soient toujours disponibles au cas où la R&D ne serait pas fructueuse (options 2 et 3), ressortent sans ambiguïté comme moins favorables que la réalisation de Cigéo (option 1).

Les résultats sont plus nuancés lorsque la comparaison concerne l'option de projet 1 (centre de stockage Cigéo) avec l'option 4, qui comporte des branches menant à de l'entreposage de longue durée renouvelé. L'option 4 modélise le choix d'un décideur public qui considère un report des premiers investissements du centre de stockage Cigéo et qui lance à la place des investissements de R&D

pour tenter de trouver une solution prospective alternative de mise en sécurité définitive des déchets HA et MA-VL. Le décideur public fait donc le choix de ne pas réaliser le projet du centre de stockage Cigéo dans l'immédiat, et accepte de faire face au double risque portant sur l'issue de la R&D et sur le maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne.

Les résultats de la comparaison de l'option de projet 1 avec l'option 4 sont décrits ci-après :

- Dans le scénario KO, les résultats de l'évaluation socio-économique sont constants, quelle que soit la valeur du taux d'actualisation retenue : le centre de stockage Cigéo est préférable. En effet, le centre de stockage Cigéo permet de se prémunir des conséquences économiques et sociales d'un hypothétique accident en entreposage (estimées dans cette étude de façon partielle et selon des hypothèses conservatrices), accident susceptible de se produire dans une société où les normes de sûreté ne seraient plus respectées. C'est l'intérêt d'une solution de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, ne nécessitant plus d'actions de la part de l'homme et protégeant des menaces susceptibles d'émerger sur le très long terme.

- Dans le scénario OK, les résultats de l'évaluation socio-économique dépendent de la valeur prise par le taux d'actualisation. Dans ce scénario, le cadre macroéconomique est durablement favorable à la croissance et au respect des exigences de sûreté. En conséquence, les ordres de grandeur des conséquences probabilisées et actualisées d'un accident sont négligeables par rapport aux autres ordres de grandeur en jeu. Les comparaisons entre les options ne concernent donc que les coûts associés à leur mise en place.

Avec la borne basse du taux d'actualisation, la solution du centre de stockage Cigéo (option de projet 1) est toujours moins onéreuse que l'option 4, qui peut conduire à de l'entreposage de longue durée renouvelé. En effet, l'utilisation d'un taux d'actualisation bas, en limitant l'érosion des coûts et bénéfiques survenant sur le temps long, est cohérente avec la vocation du centre de stockage Cigéo destiné

Déchets radioactifs : retour sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo

à préserver les générations très lointaines des charges liées à la gestion active des déchets, nécessaires en cas d'entreposage.

En revanche, avec les taux d'actualisation intermédiaire et haut, c'est l'option 4 qui est en moyenne la plus favorable (avec toutefois un différentiel de coût actualisé relativement faible). À l'inverse du taux bas, ces taux d'actualisation plus élevés diminuent fortement la valeur des coûts et bénéfices futurs. Or la solution d'entreposage de longue durée renouvelé qui nécessite une surveillance active (comme c'est le cas actuellement) présente des coûts étalés dans le temps, alors que le centre de stockage Cigéo (option de projet 1) nécessite d'engager des dépenses élevées à brève échéance. L'utilisation de taux d'actualisation élevés souligne ainsi l'incidence forte de l'échéancier des dépenses.

Au total, dans quatre cas sur six, le modèle quantitatif d'évaluation socio-économique met donc en évidence que l'option de projet 1 est préférable (dans le scénario KO avec les taux d'actualisation bas, intermédiaire et haut et dans le scénario OK avec un taux d'actualisation bas); tandis que dans deux cas sur six, l'option 4 est celle qui présente le coût global actualisé le plus faible (dans le scénario OK avec les taux d'actualisation intermédiaire et haut).

4.2. La nécessité de prendre en compte le « bénéfice assurantiel »

Pourtant, l'option de projet 1 et l'option 4 ne sont pas équivalentes en termes de service rendu : l'option de projet 1 avec un stockage géologique fermé et ainsi rendu passif répond à une mise en sécurité définitive des déchets radioactifs et minimise le report des charges sur les générations futures, lorsque l'option 4 conduit à un renouvellement potentiellement « perpétuel » de l'entreposage qui la rend *in fine* « risquée » si l'on se place dans l'hypothèse d'une perte de contrôle sociétal.

Ces options ne sont donc pas pleinement comparables. Pour l'être pleinement, il faudrait

pouvoir tenir compte d'autres bénéfices liés à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, tels que le fait de se libérer de la crainte des répercussions d'une alternance de scénario avec le KO, ou du transfert des charges financières et morales liées aux enjeux de la gestion des déchets radioactifs (surveillance des colis et des sites d'entreposage, renouvellement des installations, réparation des colis endommagés ou usés, etc.) à des générations futures qui n'auront pas profité directement des avantages du nucléaire. Le modèle quantitatif d'évaluation socio-économique ne permet pas de tenir compte de ces bénéfices, que l'on pourrait qualifier d'« assurantiels ». Pourtant, il semble bien que le décideur public de 2006, qui a privilégié la réalisation du centre de stockage Cigéo, plutôt que de poursuivre continuellement l'entreposage des déchets radioactifs, ait intégré à son choix ces bénéfices assurantiels, puisqu'il n'a pas choisi la solution présentant le coût global actualisé le plus faible.

Dès lors, un raisonnement qualitatif a été mobilisé, permettant de déduire un « bénéfice assurantiel pivot », qui se définit comme la prime additionnelle à mettre au crédit de l'option jugée « sûre » (gestion comportant une mise en sécurité définitive) afin qu'elle soit plus favorable qu'une option jugée « risquée » (gestion demeurant en mode actif). Ainsi, si le décideur public actuel estime que les sociétés du futur auront, comme hier et aujourd'hui, une préférence pour les options de mise en sécurité définitive, alors il convient d'affecter dans les modélisations une prime assurantielle aux options permettant cette mise en sécurité définitive.

La Figure 5 raffine la comparaison entre l'option 1 et l'option 4, ainsi que la variante de cette dernière.

Le tableau se lit ainsi :

- Dans le cas où la probabilité d'un scénario OK est de 95 %, et si le système d'actualisation est le système intermédiaire, alors si le bénéfice assurantiel dépasse 8000 millions d'euros, la solution de coût actualisé le plus faible est l'option 1.

- Si en revanche le bénéfice assurantiel est inférieur à 8000 millions d'euros, c'est la variante de l'option 4 qui présente le coût actualisé le plus faible.

L'interprétation de ce chiffre est alors la suivante :

- Si le décideur considère que le bénéfice assurantiel est supérieur ou égal à 8000 millions d'euros, alors il doit choisir l'option 1 ;
- Et, réciproquement, s'il a choisi l'option 1, la rationalité de sa décision nécessite que le bénéfice assurantiel qu'il estime soit supérieur à 8000 millions d'euros.

Une autre lecture de ce résultat est utile : rapporté à la population française, ce bénéfice assurantiel pivot de près de 8 milliards d'euros représente une somme d'environ 120 euros par habitant en un seul versement (dans le cas d'un taux d'actualisation intermédiaire

et d'une probabilité de survenue du scénario KO de 10 %). Autrement dit, si la disposition à payer est supérieure à cette prime unique de 120 € par habitant, cela pour qu'une option de gestion comportant une mise en sécurité définitive soit préférée à une solution de gestion demeurant en mode actif, le choix de réaliser le centre de stockage Cigéo domine.

5. Quelles conclusions tirer de l'ESE de Cigéo ?

De cette analyse, il ressort que l'entreposage sans cesse renouvelé est plus intéressant dans le cas d'une société à fonctionnement normal, avec un taux d'actualisation relativement élevé. Mais, dès lors que l'on envisage la possibilité d'une baisse du taux d'actualisation au sein de cette société ou le cas d'une société chaotique, l'analyse montre que c'est Cigéo qui constitue

		Actualisation			
Prob OK=1 Prob KO=0	Haute	Plage de variation cout assurantiel	<2 000	2 000-8 000	>8 000
		Hiérarchie des options (<: moins bon)	OP1<OP4<VarOP4	OP4<OP1<VarOP4	OP4<VarOP4<OP1 (1)
		Décision	VarOP4	VarOP4	OP1
	Intermédiaire	Plage de variation cout assurantiel	<1 000	1 000- 8000	>8 000
		Hiérarchie des options (<: moins bon)	OP1<OP4<VarOP4	OP4<OP1<VarOP4	OP4<VarOP4<OP1 (1)
		Décision	VarOP4	VarOP4	OP1
	Basse	Plage de variation cout assurantiel	<6 000	>6 000	
		Hiérarchie des options (<: moins bon)	OP4<OP1<VarOP4	OP4<VarOP4<OP1 (1)	
		Décision	Var OP4	OP1	
Prob OK=0,95 Prob KO=0,05	Haute	Plage de variation cout assurantiel	<1 500	1 500-8 000	>8 000
		Hiérarchie des options (<: moins bon)	OP1<OP4<VarOP4	OP4<OP1<VarOP4	OP4<VarOP4<OP1 (1)
		Décision	VarOP4	VarOP4	OP1
	Intermédiaire	Plage de variation cout assurantiel	<1 500	1 500-8 000	>8 000
		Hiérarchie des options (<: moins bon)	OP1<OP4<VarOP4	OP4<OP1<VarOP4	OP4<VarOP4<OP1 (1)
		Décision	VarOP4	VarOP4	OP1
	Basse	Plage de variation cout assurantiel	<4 000	>4 000	
		Hiérarchie des options (<: moins bon)	OP4<OP1<VAROP4	OP4<VAROP4<OP1	
		Décision	VAROP4	OP1	
Prob OK=0,75 Prob KO=0,25	Haute	Plage de variation cout assurantiel	<500	500-7 500	>7 500
		Hiérarchie des options (<: moins bon)	OP1<OP4<VarOP4	OP4<VarOP4<OP1	OP4<VarOP4<OP1 (1)
		Décision	VarOP4	VAR OP4	OP1
	Intermédiaire	Plage de variation cout assurantiel	<500	500-8 000	>8 000
		Hiérarchie des options (<: moins bon)	OP1<OP4<VarOP4	OP4<OP1<VAROP4	OP4<VarOP4<OP1 (1)
		Décision	VarOP4	VAR OP4	OP1
	Basse	Plage de variation valeur pivot	0-∞		
		Hiérarchie des options (<: moins bon)	OP4<VarOP4<OP1		
		Décision		OP1	

Figure 5. Solutions et pivots selon les valeurs des paramètres : système d'actualisation, probabilités KO/OK et coût assurantiel

Source : calcul des experts

Déchets radioactifs : retour sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo

le scénario le plus intéressant, celui qui marquerait donc à une attention forte au bien-être des générations futures. En d'autres termes, l'entreposage de longue durée ne l'emporte sur le projet Cigéo qu'à condition d'être optimiste dans l'avenir, ou peu attentif aux générations futures et en excluant tout basculement sociopolitique vers une société plus chaotique. Cigéo constitue ainsi une forme d'assurance face à un risque de dégradation de la société à l'horizon de 150 ans. Le choix d'un taux d'actualisation faible traduit ainsi le souci de la génération présente d'être attentive au bien-être des générations futures en ne leur laissant pas à gérer des déchets liés à de l'électricité nucléaire dont les générations présentes auront profité.

Le 5 février 2021, le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) a rendu l'avis suivant sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo soulignant que «le projet Cigéo a une forte valeur prudentielle et assurantielle face aux risques environnementaux et sanitaires qui se manifesteraient localement autour d'entreposages non surveillés voire abandonnés dans le cas où une société future se trouverait dans une situation très dégradée dans laquelle les normes de sûreté ne seraient plus respectées».

RÉFÉRENCES

- Andra, 2020. Évaluation socio-économique du projet global Cigéo, août 2020.
- Bracke, G., Charlier, F., Liebscher, A., Schilling, F., Röckel, T., 2017. About the Possibility of Disposal of HLRW in Deep Boreholes in Germany. *Geosciences* (2017). Vol 7, N° 3, pp. 58.
- Commissariat général à la stratégie et à la prospective, 2013. L'évaluation socio-économique des investissements publics, Rapport de la mission présidée par Émile Quinet.
- Flyvbjerg, B. (Éd.), 2017. *The Oxford handbook of mega-project management*, Oxford University Press.
- Knight, Frank H., 1921. *Risk, Uncertainty, and Profit*. Boston: Houghton Mifflin.
- SGPI, 2021. Contre-expertise de l'évaluation socio-économique du projet de Cigéo, 5 février 2021.
- Stern N., 2006. *Stern Review on the Economics of Climate Change*.
- UNFCCC, 2017. *The Shared Socio-Economic Pathways (SSPs): An Overview*, https://unfccc.int/sites/default/files/part1_iiasa_rogelj_ssp_poster.pdf.

NOTES

1. Par décision du 8 janvier 2018, l'Andra a mis en place un comité de pilotage d'experts-économistes chargé de conseiller l'Agence «sur toutes les questions relevant du pilotage et de la production de l'évaluation socioéconomique préalable du projet Cigéo». La décision spécifie que le «comité de pilotage d'experts-économistes interviendra notamment pour définir la méthodologie, préciser le cadre de l'évaluation socio-économique, garantir l'application des règles de l'art, élaborer le cahier des charges et analyser les offres pour engager un cabinet d'études et assurer le pilotage de la prestation intellectuelle afférente, vérifier la production de l'évaluation socio-économique et émettre un avis motivé sur le dossier final».
2. «Les projets d'investissements civils financés par l'État, ses établissements publics, les établissements publics de santé ou les structures de coopération sanitaire font l'objet d'une évaluation socio-économique préalable. Lorsque le montant total du projet et la part de financement apportée par ces personnes excèdent des seuils fixés par décret, cette évaluation est soumise à une contre-expertise indépendante préalable». Loi n° 2012-1558 du 31 décembre 2012 de programmation des finances publiques pour les années 2012 à 2017. Par ailleurs, le décret n° 2013-1211

du 23 décembre 2013 précise que les ESE ont pour but d'objectiver les coûts et les bénéfices de toutes natures (économique, sociale, environnementale) d'un projet.

3. L'*Accelerator Driven System* (ADS) ou réacteur hybride est un réacteur nucléaire piloté par un accélérateur de particules.

4. Bracks et al. [2017] évoquent des profondeurs comprises entre 1 500 et 3 500 mètres.

5. Pour les projets les plus longs, l'horizon est étendu sur 50 ans, jusqu'en 2120, et les cinquante dernières années sont prises identiques à l'année 2070.

6. À l'exception de l'accident de Mayak en septembre 1957 en URSS : des cuves de déchets radioactifs enterrées ont connu une panne de refroidissement entraînant une explosion avec comme conséquence 200 morts et près de 10 000 personnes déplacées. Certes, il s'agissait d'un site militaire, mais opérant également du retraitement utilisé dans les réacteurs civils. Cet accident, classé 6 sur l'échelle INES, fut couvert par le secret militaire.

7. Le taux d'actualisation dit «sans risque» est indépendant du projet et est noté : $r_f = \gamma\mu + \delta$.

Il reflète : a) Le taux de préférence pure pour le présent (δ) qui reflète l'impatience des agents économiques, ainsi que leur «probabilité de mourir». Ainsi, plus grande est la préférence pour le présent, plus élevé doit être le taux d'actualisation. b) L'«effet richesse» ($\gamma\mu$), combinant les anticipations portant sur la croissance économique et l'élasticité marginale de la consommation. L'effet richesse reflète le comportement pro-cyclique du taux d'intérêt observé sur les marchés financiers. Ainsi, plus on anticipe une croissance forte, plus le taux d'actualisation est élevé. c) L'«effet de précaution» est pris en compte dans la règle de Ramsey étendue. Il reflète la volonté d'épargner (investir) lorsque notre futur est incertain, plutôt que de consommer aujourd'hui; il aura donc tendance à diminuer le taux d'actualisation. Ainsi, plus incertaine est la croissance, plus le taux d'actualisation est faible.