

Évaluation Socio-Économique du Projet Cigéo

Avis du Comité d'experts

Table des matières

| | | |
|---|---|-----------|
| • | RAPPEL DE LA MISSION CONFIEE AU COMITE D'EXPERTS-ECONOMISTES..... | 3 |
| • | LES SPECIFICITES DU PROJET ET DE SON EVALUATION SOCIO-ECONOMIQUE | 4 |
| | LES CONTOURS DU PROJET..... | 4 |
| | LES SPECIFICITES DE L'ESE | 6 |
| | UN HORIZON EXCEPTIONNELLEMENT LONG PAR RAPPORT AUX PROJETS SOUMIS A ESE..... | 6 |
| | DES BENEFICES HORS NORME | 6 |
| | EN DEHORS DU PROJET CIGEO, DES OPTIONS MAL DEFINIES..... | 7 |
| | DES DONNEES SOUVENT INCERTAINES ET/OU DIFFICILEMENT MONETISABLES | 7 |
| | UNE DIMENSION ETHIQUE TRES SPECIFIQUE | 8 |
| | RAPPEL DE L'IMPERATIF DE TRANSPARENCE..... | 8 |
| | DE LA NECESSITE D'INTERROGER L'UTILITE D'UNE ESE DANS LE CAS D'ESPECE | 8 |
| | LE PARTI PRIS DE LA PRESENTE ESE..... | 9 |
| • | CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA METHODE D'EVALUATION SOCIO-ECONOMIQUE..... | 10 |
| • | CHAPITRE 2 : CONTEXTE ET STRATEGIE NATIONALE..... | 11 |
| • | CHAPITRE 3 : SCENARIII DE REFERENCE | 12 |
| | LES SCENARIOS CARACTERISANT LA SOCIETE | 13 |
| | LE TAUX D'ACTUALISATION | 14 |
| • | CHAPITRE 4 : OPTIONS DE PROJET COMPAREES | 15 |
| • | CHAPITRE 5 : QUANTIFICATION DES COUTS DES DIFFERENTES OPTIONS..... | 17 |
| • | CHAPITRE 6 : QUANTIFICATION DES BENEFICES ET RISQUES EVITES PAR LES DIFFERENTES OPTIONS..... | 20 |
| | LA NECESSITE DE PRISE EN COMPTE DES RISQUES NUCLEAIRES DANS L'ESE | 20 |
| | LES RISQUES A CONSIDERER | 20 |
| | MODALITES DE QUANTIFICATION DES RISQUES..... | 21 |
| | LES DETERMINANTS DES RISQUES ET LEURS EVOLUTIONS POSSIBLES A TRES LONG TERME | 22 |
| | CONCLUSION SUR LES RISQUES | 23 |
| • | CHAPITRE 7 : RESULTATS DE L'ESE DE CIGEO | 23 |
| | COMMENT COMBINER LES SCENARIOS OK ET KO? | 23 |
| | COMMENT VALORISER LES RISQUES ? | 24 |
| | LES PROCEDURES DE CALCUL UTILISEES..... | 25 |
| | LES RESULTATS..... | 27 |
| • | OBSERVATIONS SUR LES ANNEXES DU RAPPORT D'ESE | 31 |
| • | CONCLUSION DU PRESENT AVIS..... | 32 |
| • | ANNEXE 1: NOTE SUR LA MODELISATION DES BRANCHES 4.5 ET 4.8..... | 33 |

- **ANNEXE 2 : ESTIMATION DE LA DATE OPTIMALE DE REALISATION DE L'OPTION 1 35**

• Rappel de la mission confiée au comité d'experts-économistes

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* » et composé de :

- **Patrice Geoffron**, Professeur à l'Université Paris-Dauphine, directeur du LEDa-CGEMP.
- **Pierre-Benoît Joly**, Directeur de recherche à INRAE, directeur du LISIS.
- **Reza Lahidji**, Responsable du pôle Gouvernance et Évaluation, KPMG AS.
- **Jacques Percebois**, Professeur Émérite à l'Université de Montpellier, CREDEN-ART-Dev.
- **Émile Quinet**, Professeur Émérite, PSE-ENPC (*Président du Comité d'experts*).

La décision spécifie que le « *comité de pilotage d'experts-économistes interviendra notamment pour définir la méthodologie, préciser le cadre de l'évaluation socioéconomique, 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 socioéconomique et émettre un avis motivé sur le dossier final* ». C'est à cette dernière obligation que répond la présente note.

Le dossier sur lequel porte le présent avis, en date du 20 Juillet 2020 et intitulé « *Évaluation socio-économique de la solution de gestion actuellement retenue pour les déchets HA et MA-VL ; Projet global Cigéo* », a été élaboré, sous la responsabilité de l'Andra, par le groupement Citizing-CEPN (Julie de Brux, Alice Mevel, Bertrand Villeneuve, Ludovic Vaillant, Mélanie Maître) avec les apports du bureau d'étude Deloitte assisté de François Lévêque et Jean Michel Charpin.

Il comporte 7 chapitres :

- Présentation de la méthode d'évaluation socio-économique,
- Contexte et stratégie nationale,
- Scénarii de référence,
- Options de projet comparées,
- Quantification des coûts des différentes options,
- Quantification des bénéfices et risques évités par les différentes options,
- Conclusions

Le présent avis, après une section de considérations générales sur les spécificités du projet et de son évaluation socio-économique (« ESE » dans la suite), détaille les observations qu'appelle chacun des chapitres de l'étude. Il s'attache essentiellement à l'architecture des raisonnements, à la pertinence des hypothèses, à la rectitude des calculs présentés et à la robustesse des résultats auxquels ils aboutissent.

L'étude ayant été effectuée pour sa quasi-totalité avant le mois de mars 2020, les paramètres qu'elle utilise, en termes notamment de perspectives de croissance économique et de taux d'actualisation, sont issus des recommandations officielles d'avant la crise du COVID-19. Aucune indication n'est fournie, à la date de cet avis, sur d'éventuelles nouvelles valeurs de

ces paramètres à adopter à la suite de cette crise. Bien évidemment, si de nouvelles valeurs étaient recommandées par les instances officielles, les calculs effectués devraient être adaptés en conséquence. La conclusion esquissera le sens des inflexions que les changements possibles de ces paramètres pourraient avoir sur les résultats de l'étude.

• Les spécificités du projet et de son évaluation socio-économique

Les contours du projet

Avant de discuter les conditions de mise en œuvre de cette ESE, ce qui sera l'objet des sections suivantes, il est nécessaire de préciser le cadre dans lequel s'inscrit le projet en termes techniques, politiques et sociétaux.

Comme rappelé par le rapport, les déchets nucléaires sont des substances radioactives issues de différentes filières, et pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est actuellement envisagée ; ils sont classés 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). Une grande partie de ces déchets provient de l'activité électronucléaire, notamment des combustibles usés des centrales nucléaires. 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 séparer les combustibles usés et à recycler une partie d'entre eux sous forme de MOx (Mélange d'Oxydes). D'autres pays ont fait le choix d'un « cycle ouvert » (États-Unis, Allemagne, Corée du Sud, Espagne) imposant de stocker en l'état les combustibles usés. La France a également fait le choix d'étudier la transmutation des actinides mineurs par RNR (Réacteur à Neutrons Rapides dit de « IVème 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 (ADS¹, comme en Belgique, ou laser) et le rapport met bien en évidence que des changements techniques majeurs pourraient être observés dès lors que des efforts de recherche-développement sont entrepris.

Le volume et la nature des déchets à stocker dans Cigéo sont répertoriés sous l'appellation *d'inventaire de référence* (revu périodiquement par le plan national PNGMDR), 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. Le rapport n'a certes pas vocation à s'interroger sur des choix qui relèvent de la politique nucléaire globale de la France, mais il faut tenir compte du fait que les déchets de

¹ L'Accelerator Driven System (ADS) ou réacteur hybride est un réacteur nucléaire piloté par un accélérateur de particules.

l'inventaire de réserve seront aussi à gérer. L'ESE ne se penche pas sur la question de l'adaptabilité de Cigéo à l'éventualité d'une prise en charge d'une partie de l'inventaire de réserve. 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 « référence » et « réserve ».

Le rapport rappelle que les déchets ultimes peuvent être stockés dans un site géologique profond de type Cigéo, mais pourraient aussi l'être dans un forage très profond de type *deep borehole*, voire entreposés sur très longue période. La France a fait officiellement le choix du stockage en site géologique profond au terme de la loi du 28 juin 2006. Cette solution est également le choix de 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'AIE. Rappelons que les déchets à faible ou très faible activité sont entreposés ou stockés en surface ou sub-surface. Si le choix d'un stockage en couche géologique profonde pour les déchets les plus dangereux est prédominant, certains pays n'excluent pas d'explorer d'autres solutions comme cela est rappelé dans le rapport.

L'une des principales spécificités du projet est la durée exceptionnellement longue d'une part de la phase de mise en œuvre du stockage (plus d'un siècle) et de l'autre de la période durant laquelle les déchets représentent un danger potentiel pour l'homme et pour l'environnement (plusieurs centaines de milliers d'années). Les incertitudes en jeu sur de telles échelles de temps sont immenses. Pendant la simple phase d'exploitation du projet (et a fortiori au-delà), des incertitudes existent concernant le maintien des compétences dans le domaine du nucléaire, surtout dans les pays qui ont décidé d'abandonner cette source d'énergie mais qui, néanmoins, auront à gérer ses déchets. Plus généralement l'incertitude porte partout sur l'état de la société future. 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 militaires ou sociaux ? 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 renouvelé ? Classerait-elle cet objectif parmi ses priorités en y dédiant des moyens humains et financiers appropriés ? Telles sont les questions dont nous ne pouvons aujourd'hui préjuger la réponse. Parce que, après fermeture des installations, le stockage géologique ne requiert pas de mesure de sécurité active, dépendante de la continuité des institutions, c'est une solution qui a l'avantage de ne pas transmettre cette responsabilité aux sociétés futures, et d'être subordonnée à leur état.

Les arbitrages entre les différentes options doivent être opérés sans négliger que tous les pays rencontrent aujourd'hui des difficultés à trouver des sites de stockage (voire des sites d'entreposage) pour leurs déchets en raison des réticences ou de l'opposition des populations locales. La recherche d'un site est à la fois coûteuse et d'issue incertaine, ce qui a conduit à prendre en compte, dans cette ESE, la possibilité de perte irréversible d'une option de stockage géologique profond, mais également l'éventualité d'une impossibilité de

mise en œuvre d'une technologie potentielle (les forages profonds, pour le cas exploré dans le rapport).

Les spécificités de l'ESE

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 »². 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 fait 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 de vie. Ces bénéfices et coûts sont ensuite actualisés sur la durée du projet, durée qui en pratique ne s'étend généralement pas au-delà de 2070³, et comparés à ceux du 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.

Le projet Cigéo échappe à la plupart des conditions communes de réalisation des ESE qui viennent d'être rappelées.

Un horizon exceptionnellement long par rapport aux projets soumis à ESE

La plus singulière réside dans la longueur des horizons qu'implique le projet : après des délais de choix du projet et de son site extraordinairement longs (60 ans entre la décision de lancer des recherches exploratoires et le moment où l'on peut envisager de commencer les travaux), une durée de réalisation de près de 150 ans jusqu'à l'achèvement complet marqué par la fermeture définitive du site ; des bénéfices attendus concernant des périodes totalement inhabituelles, exprimées en centaines de milliers d'années. Les coûts de réalisation et d'exploitation sont en outre dépendants des compétences techniques, notamment en matière nucléaire, l'expertise étant susceptible d'évoluer sur le long terme en fonction d'efforts de recherche consentis et de la place prise par cette filière dans la politique énergétique. Autrement dit, les évolutions à prendre en compte dépendent largement de décisions publiques à venir, et ce sur un horizon éloigné, dans une société qui pourrait être différente de celle que nous connaissons aujourd'hui.

Des bénéfices hors norme

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

² Commissariat général à stratégie et à la prospective, *L'évaluation socio-économique des investissements publics, Rapport de la mission présidée par Émile Quinet*, 2013.

³ 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.

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 la réduction des effets potentiels nocifs des déchets les plus actifs, liés à leur radioactivité, et s'étendent sur plusieurs centaines de milliers d'années ; et, à plus court terme même, il n'y pas l'équivalent d'accidents majeurs (comme ceux de Fukushima ou Tchernobyl pour les réacteurs) concernant des sites entreposage de déchets HA et MA-VL, qui puissent nous renseigner sur la phénoménologie de tels accidents et l'étendue de leurs dommages potentiels⁴.

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. Ceci étant, une perte de contrôle, sous la forme de conflits majeurs (guerre extérieure ou guerre civile) ou de toute autre situation chaotique liée à une dégradation des institutions, n'est pas exclue aux horizons considérés dans cette ESE. L'histoire des siècles passés 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 (du point de vue notamment des modes d'organisation, des technologies, des comportements sociaux, ...).

En dehors du projet Cigéo, des options mal définies

Le propre de l'ESE est de comparer le projet à évaluer, ici Cigéo, à d'autres solutions possibles du problème auquel il répond. Ces autres solutions sont en général faciles à fixer. Les plus couramment utilisées répondent à la définition "*do minimum*" ou "*do nothing*". Ici le "*do nothing*" est impensable, et le "*do minimum*" n'aboutit pas à une définition opérationnelle précise. En fait, en raison des délais d'études et réalisation qu'impliquent les travaux nucléaires (60 ans d'études et 150 ans de travaux pour Cigéo comme on l'a vu plus haut) les solutions alternatives mettent en jeu non seulement les autorités publiques 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.

Des données souvent incertaines et/ou difficilement monétisables

Il convient de mentionner également les limites des chiffres intégrés dans cette ESE. Beaucoup d'entre eux sont fondés sur des estimations à dire d'expert, certes fixés de la manière qui est apparue la plus raisonnable et prudente ; mais peu d'entre eux résultent de statistiques éprouvées ou d'études spécifiques, rendues robustes par la convergence de leurs résultats. De nombreuses grandeurs sont difficilement estimables et monétisables. Il est

⁴ A 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 10000 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.

nécessaire que les choix prennent bien en compte les incertitudes de ces données et reposent sur des estimations mûrement pesées et plutôt conservatrices (qui n'avantagent pas, a priori, le projet évalué).

Une dimension éthique très spécifique

En outre, les décisions à prendre ont un contenu éthique évident. Sous une forme simplifiée, elles conduisent à considérer que, ayant bénéficié des avantages de l'énergie nucléaire, nous avons la responsabilité, vis-à-vis des générations futures, d'assurer la gestion des déchets que nous avons produits. Cet impératif est à rapprocher de la règle appliquée en matière d'atteintes à l'environnement : éliminer, réduire, compenser. Ayant choisi, par le provisionnement des charges, de ne pas faire porter les coûts de gestion des déchets sur les générations futures, des questions continuent de se poser au sujet de notre responsabilité à leur égard : A-t-on bien estimé tous les coûts que nous transférons aux générations futures ? Comment les coûts futurs doivent-ils être comptabilisés en termes actuels ? Ce sont ces questions que l'ESE permet de mieux éclairer.

Rappel de l'impératif de transparence

Pour permettre au calcul économique de jouer son rôle de soutien au débat, il convient d'accomplir un travail de totale transparence. En dehors de sa nécessité en termes de communication, c'est aussi une exigence scientifique, dans le cadre par exemple de ce que les spécialistes (notamment Whitehead 1925⁵) appellent la « réification » ou « *misplaced concreteness* ». Il faut garder à l'esprit que le modèle est différent de la réalité et restituer au lecteur tous les choix (hypothèses, paramètres, ...) qui ont été opérés pour obtenir les résultats. Ce travail de transparence conditionne la falsifiabilité, élément essentiel de la démarche scientifique. Cela conduit à une exigence forte qui guide le recueil des données (point mentionné précédemment) et impose d'éclairer des zones d'ombre sur lesquelles davantage de connaissances devraient être assemblées. Il faut enfin que le tout puisse être exprimé dans des termes et concepts appréhendables par les parties prenantes qui auront à débattre du sujet.

Cet impératif doit être d'autant plus prégnant que, compte tenu de la nouveauté de l'étude, il n'a pas été possible de s'appuyer sur un état de l'art détaillé et, par de multiples côtés, l'étude constitue un premier pas.

De la nécessité d'interroger l'utilité d'une ESE dans le cas d'espèce

Face à ces difficultés, il convient de mettre en avant les apports de l'ESE : elle conduit à étudier des variantes de Cigéo qui n'avaient pas été explicitement prises en compte jusqu'alors et à envisager des alternatives qui conduisent à objectiver les bénéfices et les coûts des différentes possibilités. Certes, le projet Cigéo a fait l'objet de plusieurs débats publics (trois, en prenant en compte celui sur le PNGMDR), de nombreuses études

⁵ Whitehead, A.N., *Science and the modern world*. New York: The Free Press, 1925.

d'autorités publiques (notamment le rapport de la Cour des Comptes de 2019⁶) ou encore d'organisations de la société civile (voir notamment le rapport de Greenpeace en 2019⁷).

Mais jamais ces débats n'avaient pris explicitement en considération l'ensemble des effets socio-économiques et les aspects d'utilité collective. On pense ici, et ce sera développé dans la suite, à la comparaison entre les coûts de Cigéo et ceux d'un entreposage, à l'analyse des scénarios d'accident dans une société ayant subi un fort déclin, à la prise en compte du temps très long et de notre attitude vis-à-vis des générations futures par l'intermédiaire du taux d'actualisation.

L'ESE fournit ainsi un cadre commun et un langage de référence dans les débats et les expressions d'opinions. Pour l'ensemble de ces raisons, la présente ESE constitue une avancée, à la fois à l'échelle française et sans nul doute également pour les autres nations en charge des mêmes problématiques et où, à notre connaissance, aucun exercice de cette nature n'avait été engagé à ce jour. On peut espérer que cette ESE permettra d'éclairer et de nourrir les débats futurs sur le sujet.

Le parti pris de la présente ESE

Parmi les difficultés recensées plus haut, trois se sont avérées particulièrement ardues : la difficulté de définir des options alternatives à Cigéo impliquant des modélisations qualitatives ou quantitatives complexes (dans le domaine économique: programmation dynamique, optimisation en avenir incertain, modélisation des comportements des autorités publiques) qui auraient mobilisé la majeure partie du temps disponible pour l'étude ; l'absence de données qui auraient permis de nourrir ces modèles complexes ; enfin l'impératif de transparence impliquant d'aboutir à des résultats simples et faciles à communiquer.

Compte tenu des contraintes de moyens de l'étude, il est apparu prioritaire de mettre l'accent sur l'acquisition de données originales, notamment sur les coûts de réalisation et sur les risques possibles. Les solutions alternatives à Cigéo n'ont pas fait l'objet d'une recherche théorique ou de conceptualisations approfondies ; elles ont été définies sous des formes simples, à partir des idées exprimées dans le débat public et des données techniques disponibles ; ce choix avait en outre l'avantage de permettre une communication publique plus aisée. Est ainsi laissée à des approfondissements ultérieurs, s'ils sont jugés nécessaires, la recherche de modélisations complexes justifiant ces solutions.

⁶ Cour des Comptes, *L'aval du cycle du combustible nucléaire, Les matières et les déchets radioactifs, de la sortie du réacteur au stockage, Rapport public thématique, 2019.*

⁷ Greenpeace France, *La crise mondiale des déchets nucléaires, 2010.*

• Chapitre 1: Présentation de la méthode d'évaluation socio-économique

Le chapitre 1, après une présentation approfondie des méthodes classiques de l'ESE, détaille de façon complète les sources d'incertitude qui affectent l'analyse de Cigéo. Comme le dit le rapport, l'incertitude porte sur tous les coûts et bénéfices du projet, et elle est amplifiée par l'éloignement des horizons, qui complique la prévision de l'état de la société de la probabilité de catastrophes.

Aussi l'analyse des risques des résultats de l'étude, qui tient souvent une place annexe ou complémentaire dans les ESE de projets usuels, constitue ici le cœur de l'étude et en détermine la stratégie d'ensemble. Cette stratégie est fondée sur la séparation entre les paramètres probabilisables, même selon des larges plages (grande variance, support de distribution étalé), et ceux que l'on a renoncé à probabiliser. Dans la première catégorie, des plages de variation suffisamment larges peuvent être définies même si, dans le cas présent, la fixation de leur étendue et de la répartition des valeurs est largement subjective. Cette procédure est mise en œuvre pour tous les paramètres de coûts, pour lesquels des variations du simple au double ont été prises en se fondant sur les rares enseignements quantitatifs et qualitatifs de l'expérience. Elle a également été appliquée aux 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 ».

De ce fait, l'ESE ne fournira pas de valeur actuelle nette (VAN) à proprement parler, mais des espérances de VAN et des distributions de probabilité s'y rapportant.

Cependant, pour certains paramètres, ni les auteurs de l'étude ni le comité d'experts n'ont jugé possible de déterminer des probabilités avec un degré suffisant de confiance : ce sont ceux qui procèdent du très long terme, à partir du milieu de prochain siècle, qui ne correspondent ici qu'à la fin des opérations de Cigéo et au tout début de son exploitation. Ces paramètres s'avèrent relever de choix d'ordre éthique (renvoyant à notre responsabilité à l'égard des générations lointaines), 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)⁸. Ces paramètres sont au nombre de trois.

Il s'agit d'abord de l'évolution économique à très long terme et de notre jugement sur le mode de croissance, qui justifient le choix du taux d'actualisation.

Il s'agit ensuite de l'organisation des sociétés futures, dont dépend la capacité à traiter les effets adverses, et qu'on a traduite par la sélection de deux scénarios décrivant schématiquement l'état de stabilité de la société (« OK » ou « KO »).

Il s'agit, enfin, de notre attitude face à un accident potentiel dans la gestion des déchets ; le coût qu'il représente pour la société, tant au titre de l'aversion pour le risque catastrophique

⁸ Knight, F. H., *Risk, Uncertainty, and Profit*. Boston, Hart, Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Company, 1921.

que comme charge psychologique ou crainte diffuse échappant à la rationalité économique, comporte en outre des jugements d'ordre éthique et politique sur notre responsabilité vis-à-vis des générations futures : nous sommes prêts à y consacrer des efforts, mais pas à n'importe quel prix ; comme pour d'autres biens ayant une valeur morale, comme la vie humaine, nous ne dépenserions pas des sommes infinies pour l'assurer. A l'instar des réflexions qui ont été développées pour la valeur de la vie humaine, on peut considérer que la collectivité accorde au risque de catastrophe une valeur qui puisse être différente de celle qui résulterait d'un pur calcul de l'espérance de pertes. On peut considérer que, comme une sorte de coût caché, elle obère toutes les solutions non définitives. Mais cette valorisation, qualifiée dans le rapport de "bénéfice assurantiel", n'a jamais été révélée, ni par la puissance publique, ni par des enquêtes qui s'avéreraient très délicates à mener. On peut en rendre compte de façon plus rigoureuse sur le plan théorique grâce aux développements les plus récents de la théorie de l'aversion au risque collectif. Cette théorie analyse l'attitude de la collectivité à l'égard d'événements catastrophiques, dont le risque est faible, mais qui entraînent, s'ils surviennent, des dommages graves à une forte proportion de la collectivité. Cela imposerait après avoir calculé les risques des solutions non définitives (en fait, l'entreposage longue durée), de les traduire en termes d'utilité en tenant compte de l'aversion au risque qui leur est attachée. Mais là aussi la théorie manque d'estimations concrètes permettant d'en tirer des chiffres.

Pour ces trois paramètres, il n'est pas apparu possible, ni souhaitable, de fixer une valeur, ni même une distribution de probabilité. La démarche suivie a consisté à balayer le plus largement possible les valeurs envisageables de chacun d'eux, dans le but de fournir les résultats obtenus par le calcul pour une large gamme de valeurs vraisemblables et de calculer des valeurs « pivots » : c'est-à-dire de déterminer le niveau de ces paramètres pour lequel la hiérarchie des options fournie par le calcul bascule.

• Chapitre 2 : Contexte et stratégie nationale

Le rapport considère la nature et la structure des déchets à stocker telles qu'elles sont précisées dans le PNGMDR. A partir de cette donnée, il n'a pas à se prononcer sur les évolutions possibles de la politique nucléaire de la France.

Il convient néanmoins de mentionner qu'une évolution de cette politique aurait des conséquences sur l'aval du cycle nucléaire et, par conséquent, sur la gestion des déchets. Un abandon du retraitement -recyclage ou une accélération de la réduction de la part du nucléaire, voire un une sortie du nucléaire, seraient de nature à modifier la frontière entre inventaire de référence et inventaire de réserve.

Gestion des déchets et politique nucléaire

La loi française de 2006 dispose que la gestion des déchets fait intervenir l'entreposage industriel, le stockage géologique et la séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue. Elle prévoit aussi que les recherches sur la transmutation soient conduites via le recours à des réacteurs de

Génération IV (projet ASTRID). Les orientations de la PPE repoussent aujourd'hui le déploiement des RNR et prévoient la réduction de la part du nucléaire, ce qui entraînera la fermeture de plusieurs réacteurs de 900 MWe et aura des conséquences sur la politique de recyclage de l'uranium de retraitement (URT) et du plutonium (Pu). De nouvelles installations d'entreposage deviendront nécessaires si le recyclage de l'URT n'est pas mis en œuvre dans les délais. La fermeture de réacteurs de 900 MWe moxés nécessitera de s'appuyer sur des réacteurs de 1300 MWe afin de poursuivre le mono-recyclage de l'uranium et du plutonium issus du retraitement du combustible usé UOx. Le retard du recours aux RNR impose également d'envisager un multi-recyclage de l'uranium et du plutonium issus des combustibles usés en REP, ce qui nécessiterait de construire de nouveaux EPR (EPR2). Le volume des déchets à haute activité risque donc de s'accroître plus vite que prévu. La technologie des RNR, qui demeure toutefois officiellement l'option de référence pour le long terme, permet à la fois de consommer l'uranium appauvri, de multi-recycler le Pu et de réduire la radio-toxicité des déchets. Selon la PPE, l'utilisation du Pu se fera en plusieurs étapes : recyclage sous forme de MOx, puis recyclage du MOx en EPR dans l'attente d'un recyclage en RNR. Le nombre limité de cycles avec le REP pourrait conduire, en l'absence de RNR, à une augmentation de l'entreposage des MOx usés tout en accroissant l'inventaire en déchets à haute activité.

Le fait que le rapport n'ait pas pris en compte l'impact qu'un changement de politique nucléaire pourrait avoir sur le volume et la structure des déchets à entreposer et à stocker ne doit pas occulter qu'il existe aujourd'hui de nombreuses incertitudes concernant le devenir et le remplacement du parc actuel. De ce fait, l'ESE présentée ici devrait être reprise si les conditions de définition de l'inventaire changeaient par rapport à celles qui sont prises en compte ici. On doit toutefois considérer que, dans une telle éventualité, le cadre méthodologique établi par l'ESE fondée sur l'inventaire de référence serait également pertinent en cas d'évolution de périmètre de ce dernier.

Les trois pays les plus avancés dans le monde en matière de stockage géologique profond sont la Finlande, la Suède et la France, comme le rappelle la CNE2 dans son rapport de juin 2019 : « Dans ces pays un site a déjà été sélectionné et les demandes de construction associées ont été acceptées (Finlande), soumises à examen en attendant une décision finale (Suède) ou sur le point d'être soumises (France) » (p.45)⁹. Cependant les programmes électronucléaires et les inventaires de déchets correspondants diffèrent beaucoup entre ces trois pays, la France représentant un cas spécifique, comparé à la Finlande et à la Suède dont les situations sont assez similaires. Le programme français est plus complexe du fait de réacteurs de natures différentes (y compris dédiés à la recherche). Les autres pays nucléaires qui, tous, envisagent un stockage géologique profond, sont encore à la recherche d'un site.

• Chapitre 3 : Scenarii de référence

Ce chapitre définit d'abord ce que les économistes appelleraient la demande, c'est-à-dire les déchets à traiter. Ici elle est fixée de façon exogène, en quantité et en calendrier. La présente ESE n'est donc valable que sous ces conditions, et devrait être adaptée si le volume des déchets et leur échéancier venait à varier (cf. chapitre précédent). Un moyen de compléter

⁹ Rapport d'évaluation n°13 de la CNE2, juin 2019.

l'étude sur ce point dans une phase ultérieure serait d'analyser le degré de flexibilité du projet en réponse à une évolution éventuelle des besoins à satisfaire, c'est-à-dire de l'échéancier et du volume des déchets à traiter.

En dehors de cette remarque générale, ce chapitre introduit deux concepts majeurs qui jouent un rôle déterminant dans l'évaluation, et pour lesquels l'étude a été obligé d'innover. Il s'agit des scénarios destinés à caractériser la société et du système d'actualisation.

Les scénarios caractérisant la société

L'ESE suppose de délimiter l'environnement économique et social au sein duquel le projet aura vocation à être développé. Dans le cas présent, la singularité de l'ESE procède essentiellement de la nécessité de devoir se projeter dans des temps exceptionnellement longs, comme nous l'avons déjà souligné plusieurs fois ici. Cette singularité a eu diverses implications sur la réalisation de l'ESE, dès lors que cet horizon dépasse celui des investissements publics pour lesquels des référentiels existent ; surtout, dès lors qu'il devenait impossible de procéder par simple extrapolation en considérant, au siècle prochain, uniquement une société lointaine mais stable institutionnellement et raisonnablement prospère, à l'image celle qui prévaut depuis le début du cycle d'investissement nucléaire en France.

Cette nécessité a conduit à proposer différentes innovations méthodologiques.

La principale 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 macro-économiques 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 transcrire 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 de croissance 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 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 issus 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* »¹⁰.

Au-delà de la détermination, dans chacun des scénarii, des trajectoires de PIB, il s'est également agi de tirer des conséquences logiques sur les prix des différentes composantes étudiées (coûts de génie civil, coûts de maintien des compétences et dédiés à la recherche, ...), avec, à nouveau, des problématiques spécifiques : par exemple, la nécessité de discuter un éventuel différentiel d'élasticité des prix par rapport au PIB selon l'état de la société.

Le taux d'actualisation

Le taux d'actualisation repose, selon l'analyse économique traditionnelle, sur la formule de Ramsey rappelée dans le rapport. 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. 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 l'évolution du taux de croissance et de l'incertitude sur le taux de croissance, comme cela est bien indiqué dans les rapports successifs ayant traité du sujet. 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.

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. Il présente l'inconvénient de s'arrêter à environ 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.

A 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 Stern¹¹ pour un

¹⁰ UNFCCC, *The Shared Socio-Economic Pathways (SSPs): An Overview*, https://unfccc.int/sites/default/files/part1_iiasa_rogelj_ssp_poster.pdf

¹¹ Stern N., *Stern Review on the Economics of Climate Change*, 2006.

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.

• Chapitre 4 : Options de projet comparées

Dans le guide de l'ESE, on définit un contrefactuel (qualifié de « solution de référence ») correspondant à une solution évidente, généralement le statu quo. Par exemple, la construction d'une autoroute sera comparée au maintien du réseau routier actuel, ce qui permettra d'évaluer si les bénéfices attendus compensent les coûts prévisibles. Pour Cigéo, nous nous trouvons dans une situation fort différente où le contrefactuel ne se présente pas comme une évidence. Il n'est pas inutile d'expliquer cette situation singulière en deux temps (i) en rappelant qu'elle est le résultat d'une histoire longue de la gestion des déchets nucléaires et (ii) en explicitant les conséquences pour l'analyse socio-économique.

Rappelons en premier lieu que dans les années 1980, face aux oppositions contre l'implantation de centres de stockage des déchets radioactifs, le gouvernement de l'époque avait saisi l'OPECST, dont le travail de l'Office a abouti en 1991 à la « Loi Bataille ». 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 : stockage géologique profond, entreposage, 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 12 juin 2016 sur les modalités de création de Cigéo. On pourrait considérer que, le Parlement ayant tranché après de longues études et de nombreux débats, l'évaluation socio-économique de Cigéo n'a aujourd'hui plus lieu d'être ou que, si elle doit avoir lieu, elle ne doit pas considérer les alternatives à la solution de référence, mais dit plutôt aider à l'optimisation de sa mise en œuvre. Ce serait oublier que les débats parlementaires ne se sont pas fondés sur un tel travail d'évaluation, qui reste donc utile et nécessaire compte tenu de la loi n°2012-1558 du 31 décembre 2012. Ajoutons à cela que de nouveaux débats parlementaires pourraient conduire à reconsidérer dans le futur la position retenue aujourd'hui par le politique. En outre, les ESE, et plus généralement l'économie normative, ont vocation à étudier des décisions portant modification de l'état des choses existant. Beaucoup d'analyses coûts-bénéfices, comme celle-ci, conduisent implicitement, à mettre en cause de façon potentielle les lois et règlements en vigueur.

Concernant les implications pour l'ESE, elles sont de deux ordres.

En premier lieu, il faut insister sur la très forte hétérogénéité de l'information concernant les coûts. Parce que c'est la « solution de référence », le projet Cigéo a fait l'objet de nombreuses études techniques qui permettent progressivement d'établir une estimation de ses coûts. Les discussions qui ont eu lieu montrent que, s'agissant d'un objet singulier, les coûts peuvent fortement varier selon les solutions techniques retenues. L'incertitude sur les coûts est

néanmoins beaucoup plus faible que dans le cas des solutions alternatives à Cigéo, pour lesquelles des études techniques et – a fortiori – le chiffrage des coûts n’ont pas été réalisés.

En deuxième lieu, l’évaluation des bénéfices de Cigéo, qui se ramène ainsi à une comparaison des risques d’accident dans les différentes options alternatives et en stockage géologique, rencontre de sérieuses difficultés qui font l’objet d’un chapitre du rapport et sur lesquelles nous revenons dans la section correspondante.

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 nous permet de considérer qu’elles balayaient le champ des possibles raisonnables.

Pour résumer, les solutions considérées sont les suivantes :

- L'**option 1**, qui consiste en la réalisation de Cigéo immédiatement. Des variantes de cette option 1 basées sur un décalage de la mise en œuvre du projet dans le temps ;
- Les **options 2 et 3** qui consistent dans un engagement partiel dans Cigéo (afin d’éviter le risque de perte du site) et un investissement dans la R&D sur les technologies prospectives afin d’augmenter les probabilités de trouver et mettre en œuvre d’autres solutions. Dans l’option 2, les déchets MA-VL sont stockés dès 2040 et une solution alternative est cherchée pour les déchets HA. Dans l’option 3, une solution alternative est recherchée à la fois pour les déchets MA-VL et pour les déchets HA ; on s’est assuré auprès des techniciens de l’Andra que les dépenses prévues en première étape de chacune des deux options correspondaient bien aux engagements minimaux permettant d’obtenir de premiers ouvrages utilisables et d’éviter un tronçonnement du chantier nuisible à sa bonne économie.
- Une **option 4**, qui est plus complexe dans sa structure, et aussi plus riche d’enseignements comme on le verra. Sa ligne directrice est de différer la réalisation de Cigéo pour rechercher d’autres solutions techniques. Les premiers investissements du centre de stockage Cigéo ne sont pas réalisés, ce qui conduit à considérer une probabilité de perte du site d’implantation du centre de stockage Cigéo en Meuse/Haute-Marne. En parallèle, des efforts de R&D sont réalisés, pour trouver une autre solution de mise en sécurité définitive des déchets HA et des déchets MA-VL. Au final, 12 branches, dont 8 distinctes, se dessinent, en fonction du risque de la perte du site actuel du centre de stockage Cigéo, de l’issue de la R&D pour les déchets HA, de l’issue de la R&D pour les déchets MA-VL, et le cas échéant de l’issue de la recherche d’un nouveau site d’implantation pour le centre de stockage Cigéo. Pour deux des branches de l’option 4, numérotées 4.5 et 4.8 dans le rapport, le site de Bure est perdu, sans en retrouver un autre, alors même que la recherche d’une solution alternative s’avère infructueuse ; à ce stade, le choix des décideurs de l’époque devrait résulter d’une optimisation entre les solutions qui s’offrent à eux. Il n’était pas possible d’explorer toutes ces solutions et il n’y aurait d’ailleurs pas eu grand sens d’échafauder des stratégies hypothétiques complexes. Pour rendre les choses simples et faciles à traiter, l’étude a retenu à titre principal la stratégie où, dans la situation précédente, on se résout à de l’entreposage longue durée à partir de 2070. La difficulté de l’analyse tient alors à ce que le service rendu n’est pas le même : le

décideur renonce à la recherche d'une solution définitive, ce qui n'est pas envisagé actuellement. La prise en compte de cette stratégie conduit à intégrer les risques d'accident en entreposage, négligeables dans une société stable mais dont on considère que le risque augmente de plusieurs ordres de grandeur dans le scénario KO. La nécessité d'évaluer le service rendu par les solutions définitives à partir de 2070 conduit de façon logique à prendre en compte dans l'analyse une autre solution où l'entreposage indéfini sans recherche est décidé dès 2019. Cette solution est en quelque sorte celle du moins disant, puisqu'on y fait l'économie des dépenses de recherche entre maintenant et 2070 ; elle a été étudiée sous le nom de variante de l'option 4. Certes, rien n'assure que l'entreposage longue durée soit la meilleure solution de prolongement des branches 4.5 et 4.8, ce qui met en question le choix de modélisation au sein de l'option 4. Parmi les nombreuses autres possibilités de prolongement qu'on pourrait imaginer, l'une retient spécialement l'attention, celle qui consiste à continuer la recherche tant qu'on n'a pas trouvé ; cette solution évite d'avoir à traiter de l'entreposage éternel. Mais est-elle meilleure que l'ELD ? On ne peut pas à ce stade répondre à cette question, qui sera reprise et éclairée - sans être totalement résolue - dans la section relative au chapitre 7 (où l'on verra que le prolongement choisi (ELD), sans être la meilleure solution, a toutes les chances d'en être suffisamment proche pour que les conclusions qu'on en tire restent valables). De même, la variante de l'option 4 peut être considérée comme un cas polaire d'une stratégie générale partant de l'abandon du site et du projet. Cette variante consiste à entreposer indéfiniment, une solution extrême dont il n'est pas possible d'assurer en 2019 qu'elle sera effectivement suivie : les décideurs actuels ne peuvent pas décider pour ceux des générations futures et les empêcher de chercher de nouveau une solution de gestion passive. Il n'est pas non plus possible d'assurer que c'est la stratégie optimale en cas d'abandon du site et du projet, en raison du grand nombre d'autres cheminements ; par exemple, une solution consistant à faire de la recherche à partir de 2019, et à continuer tant qu'une solution n'a pas trouvée ; ou encore, à entreposer pendant N années et se mettre ensuite à rechercher tant qu'une solution n'a pas trouvée. On explorera, dans la section consacrée au chapitre 7, les conséquences que pourraient avoir de tels cheminements.

• Chapitre 5 : Quantification des 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. Comme cela a déjà été souligné, 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 a été d'être établie sur la base d'un coût objectif de Cigéo de 25 milliards d'Euros déterminé par la puissance publique (et servant de référence au dimensionnement des provisions financières que doivent constituer les producteurs de déchets). Cette ESE n'est donc pas fondée sur une estimation du coût réel du projet Cigéo, mais en fonction d'un objectif fixé à l'Andra (certes à partir du dossier de chiffrage initialement soumis) et impliquant de mettre en œuvre les meilleurs efforts en termes d'optimisation et de maîtrise des coûts. Toutefois, la chronique des coûts corrigés par l'Andra, selon l'objectif d'optimisation fixé par l'État, n'étant pas encore établie au moment de la réalisation de l'ESE, il a fallu procéder à un calcul de prorata, pour une partie du projet, à partir du chiffrage de 2014 qui s'élevait à 32 milliards d'Euros, de façon à rester dans « l'enveloppe » des 25 milliards d'Euros alloués par l'État. Le groupe d'experts n'a ni les compétences ni les moyens d'évaluer la faisabilité de l'objectif d'optimisation des coûts jusqu'à 25 milliards d'Euros.

A 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 par 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 bénéfiques 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 ESE¹². 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 méga-projets (voir Flyvbjerg 2003 et 2017¹³). 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-estimation 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

¹² Ainsi la cour des comptes recommande pour les grands projets de prendre des pourcentages pour imprévus différents selon la maturation du projet, et de l'ordre de 20 à 25% au stade de maturation de Cigéo dans son rapport de décembre 2017 : " Société du Grand Paris ; Communication à la commission des finances, de l'économie générale et du contrôle budgétaire de l'Assemblée nationale"

¹³ Flyvbjerg, B., Bruzelius, N., & Rothengatter, W. (2003). *Megaprojects and risk: An anatomy of ambition*. Cambridge University Press et Flyvbjerg, B. (Ed.). (2017). *The Oxford handbook of megaproject management*. Oxford University Press)

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 alternative actuellement recherchée. 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. L'incertitude, plus faible que pour le coût de Cigéo pour l'entreposage actuel, est plus forte pour les entreposages renouvelés ultérieurs. Il n'y a pas de raison de penser que, au total, l'incertitude soit très différente de celle qu'on peut attribuer à Cigéo, ni que l'éventuelle sous-estimation y soit moins forte.

La solution technique choisie comme exemple du résultat de la recherche est le *borehole*.¹⁴ C'est le seul procédé technique qui puisse être prêt 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 USA 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 situe 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*, plus proche des études préliminaires que de l'avant-projet.

Un autre facteur de coût important est constitué par les coûts de recherche pour la conception et le développement d'une nouvelle technologie. 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. 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 puisse avoir des retombées sur l'émergence de telle ou telle solution en France. Il aurait certes été possible de ne mettre à la charge de la gestion des déchets qu'une partie des dépenses de recherche qui seraient effectuées ; on verra dans

¹⁴ Il est à noter que, dans le rapport, une discussion plus large a été organisée, concernant les technologies susceptibles d'être intégrées dans l'une des options, au-delà du borehole mentionné ici. Par exemple concernant les perspectives de la transmutation via laser. Le choix retenu se comprend comme celui d'une technologie dont les conditions et coûts de mise en œuvre étaient susceptibles d'être objectivés et intégrés dans le cadre d'évaluation.

la discussion du chapitre 7, par une analyse de sensibilité, les conséquences qui en résulteraient sur le choix des solutions.

- **Chapitre 6 : Quantification des bénéfices et risques évités par les différentes options**

La nécessité de prise en compte des risques nucléaires dans l'ESE

La prise en compte des risques nucléaires constitue un élément important de l'ESE de Cigéo à deux titres au moins.

En premier lieu, l'évaluation et la gestion du risque à travers la démarche de sûreté sont un élément central de tout projet nucléaire. La dangerosité des procédés et des matières impliquées dans le cycle de production électronucléaire, la possibilité d'occurrence d'accidents catastrophiques tels que ceux de Tchernobyl ou de Fukushima, enfin la sensibilité de l'opinion publique à cette question justifie que la plus grande attention soit portée au risque nucléaire. Cet impératif n'est pas seulement d'une nature technique ; il s'impose aussi au débat et à la décision publics, et donc à une ESE telle que celle de Cigéo. Comme toutes les options considérées dans l'ESE constituent une solution possible de gestion des déchets nucléaires, l'exigence d'attention au risque les concerne toutes également.

En second lieu, le principal argument qualitatif en faveur du projet Cigéo est qu'il organise la transition d'une gestion active à une gestion passive de la sûreté. Le raisonnement est le suivant : l'homme et l'environnement doivent être protégés des radiations émises par les déchets nucléaires pendant des centaines de milliers d'années ; à de tels horizons, il paraît beaucoup plus raisonnable, en l'état actuel de nos connaissances, de confier la responsabilité de cette protection à la géologie qu'à la société. Si le passage à la gestion passive est le principal bénéfice du projet Cigéo, alors l'ESE doit, dans toute la mesure du possible, en évaluer l'ampleur et permettre sa comparaison avec les coûts du projet. La prise en compte des bénéfices passe donc par une évaluation différentielle du risque nucléaire à très long terme entre le projet et les autres options à l'étude.

L'ESE de Cigéo appréhende donc les risques nucléaires selon cette 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 à considérer

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 propres à chaque option étudiée. Deux facteurs sont saillants dans l'analyse de ces risques. Le premier est la nécessité, dans l'option de projet, 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. Si le risque d'une opération de transport vers Cigéo ne diffère guère du transport usuel de colis de déchets, il se trouve en revanche reproduit à une fréquence exceptionnelle. 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 qu'ils dégagent puisse être évacuée. A 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 l'usure 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 cheminent 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.

Modalités de quantification des risques

La démarche de sûreté de Cigéo – ainsi d'ailleurs que celles des installations d'entreposage existants 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. Lors de la conception et de l'évaluation de ces dispositifs, l'approche déterministe s'écarte d'une description réaliste des états de l'installation en retenant des valeurs conservatrices des paramètres de fonctionnement et d'environnement, en stipulant des hypothèses pénalisantes, et en imposant le maintien de marges de sûreté. Ces choix méthodologiques s'écartent de l'évaluation des risques résiduels posés par l'installation, qui doit s'appuyer sur une représentation aussi proche que possible des conditions réelles de fonctionnement de l'installation.

Il existe certes des outils d'évaluation du risque d'accident grave dans les réacteurs nucléaires, notamment les évaluations probabilistes de sûreté (EPS). En France, ces outils sont partiels et leur utilisation vise principalement à comparer l'importance relative de

différentes séquences accidentelles, afin d'orienter les efforts (continus) d'amélioration de la sûreté. Ils ne permettent pas, au total, une estimation de la probabilité d'un accident avec fusion du cœur et rejets radioactifs non contrôlés dans l'environnement. Les travaux internationaux sur le sujet font cependant état d'une probabilité de l'ordre de 10^{-6} par réacteur et par an pour les centrales conformes aux normes de sûreté les plus avancées (comme celles en vigueur en France). On dispose par ailleurs de chiffreages détaillés des conséquences possibles d'un tel accident.

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 nucléaires. 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.

Pour l'ensemble des risques d'accident grave survenant d'ici au milieu du siècle prochain (qui correspond à la fermeture de Cigéo dans l'option de projet), l'étude fait l'hypothèse qu'ils seraient gérés selon un référentiel de sûreté au moins aussi exigeant que celui en vigueur aujourd'hui en France. Elle a par ailleurs supposé que leur probabilité de survenue annuelle était du même ordre que celle d'un accident grave de réacteur. Il est alors apparu qu'en combinant cette probabilité avec les conséquences d'un accident, l'espérance de perte résultante était négligeable en comparaison des autres grandeurs en jeu (coûts des différentes options). Ainsi, tant que les normes de sûreté sont au moins aussi exigeantes qu'aujourd'hui, les risques nucléaires associés aux différentes options, estimés simplement par l'espérance des pertes en termes monétaires, peuvent être négligés dans le calcul de l'ESE.

Les déterminants des risques et leurs évolutions possibles à très long terme

Il en irait bien sûr tout autrement si les normes de sûreté nucléaire venaient à se dégrader de façon marquée. En s'appuyant notamment sur les travaux de la nouvelle économie institutionnelle, l'ESE a ainsi 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 traduiraient 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} - 10^{-5} .

Dans une société où la sûreté ne serait plus une priorité et où les installations de gestion des déchets radioactifs ne feraient plus l'objet d'un entretien vigilant, la différence entre sûreté passive et sûreté active est essentielle. Le site de Cigéo ne demandant aucune intervention humaine après sa fermeture, la détérioration de la sûreté conduit à envisager le scénario d'une intrusion humaine dans le stockage. Un tel scénario a été envisagé dans la démarche de sûreté de Cigéo, et il a été démontré que ses conséquences sanitaires et environnementales resteraient limitées. 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.

Conclusion sur les risques

En conclusion, l'ESE de Cigéo parvient à proposer un traitement novateur et satisfaisant de l'ensemble des risques en jeu. Naturellement, il ne s'est pas agi de procéder à une évaluation précise du risque à la manière des EPS, ce qui n'est pas dans la vocation d'une ESE. Mais l'exercice, en rassemblant de nombreuses informations qualitatives et quantitatives et en suscitant des travaux novateurs, a permis de développer un raisonnement formel complet et des éléments de chiffrage convaincants au sujet des risques nucléaires posés par les différentes options.

• Chapitre 7 : Résultats de l'ESE de Cigéo

Dans cette section, on commentera d'abord la manière dont les risques considérés au chapitre précédent ont été introduits dans la détermination des VAN, ce qui implique à la fois de combiner les scénarios OK et KO, puis d'analyser la manière dont les risques sont valorisés; ensuite on passera en revue les procédures de calcul utilisées; enfin on analysera les résultats obtenus, concernant notamment les valeurs pivots correspondantes.

Comment combiner les scénarios OK et KO?

Des deux scénarios mis en œuvre, le premier, le scénario OK est standard ; c'est celui prescrit par les directives officielles. Le scénario KO est une illustration, un exemple de ce qui pourrait se passer dans une situation où un accident est devenu possible parce que le pays a atteint un faible niveau d'activité économique, que les institutions sont fragilisées, de sorte que le contrôle sur la société n'est plus assuré, ou l'est nettement moins bien. L'hypothèse est que la baisse d'activité et la perte de contrôle sont le résultat d'un lent et long processus ; cette hypothèse correspondant au cas extrême d'une stagnation séculaire, évoquée plus fréquemment que par le passé par les prospectivistes. Mais il faut bien voir que ce n'est qu'une modélisation parmi de nombreuses autres qui auraient été possibles. L'analyse historique française, comme celle de la plupart des pays occidentaux, montre que les périodes de perte de contrôle et de décroissance économique ont été courtes : on les trouvera dans les épisodes de guerre et de révolutions, qui au cours des deux derniers siècles n'ont guère dépassé 4 ans, et ont souvent été inférieures à l'année ; le retour à l'ordre économique et social s'est fait ensuite très rapidement. On est donc amené à considérer que le choix OK/KO ne s'opérera pas une fois pour toutes vers la fin du siècle, comme pourrait le suggérer une interprétation simpliste du rapport. Au contraire, il correspond à des possibilités de basculements de régime susceptibles d'intervenir dans les deux sens, le retour à la situation OK pouvant survenir très vite. On remarquera aussi que les basculements qu'on a connus dans le passé étaient difficilement prévisibles à quelques décennies de distance, une durée courte par rapport aux constantes de temps du projet. On est donc fondé à considérer qu'il y a chaque année une probabilité de se trouver dans une situation OK (et l'opposée à l'unité pour la situation KO), et que ce qui importe est le niveau

de cette probabilité ; ce niveau est inconnu, bien sûr, encore que l'histoire récente amène à considérer comme vraisemblables des valeurs comprises entre 5 et 10%.

Comment valoriser les risques ?

Dans son chapitre 6, le rapport donne, dans le scénario KO, l'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 résultent pas d'observations dont on aurait tiré des estimations statistiques. Toutefois le comité d'experts a estimé que les deux estimations pouvaient donner des ordres de grandeurs, des magnitudes vraisemblables d'un accident représentatif, et servir utilement dans la modélisation pour reproduire le sens et l'ampleur des coûts d'insécurité, tout en reconnaissant l'incertitude de l'assimilation de l'accident modélisé à l'accident représentatif de la situation de risque présentée par l'entreposage.

Dans le cheminement qui doit nous conduire à l'évaluation de l'insécurité de l'entreposage en termes d'utilité, la question suivante qui se pose est de savoir pour quelle valeur compter les dommages dans le calcul de la VAN.

Un premier niveau de prise en compte des dommages consiste à les intégrer sous la forme de l'espérance mathématique des pertes, selon la procédure standard du traitement des risques non systématiques dans les ESE.

Mais la nature et l'importance des risques en cause dans l'étude conduit à aller plus loin dans l'analyse. On peut songer ici à trois directions :

- La première est de solliciter les théories économiques de l'aversion au risque catastrophique, dont le rapport indique les linéaments et pour lesquelles il fournit les références les plus marquantes.
- La deuxième est de se référer à des notions de disponibilité à payer des agents, telles que pourraient les révéler des enquêtes, ou des analyses de préférences révélées.
- La troisième renvoie à la notion de valeur tutélaire, telle qu'elle est définie dans le guide méthodologique de France Stratégie: "*valeur donnée à un bien non marchand, définie par la puissance publique, représentant sa valeur (ou son coût) pour la collectivité et destinée à être utilisée dans les calculs socio-économiques.*"¹⁵

La première, fondée sur l'aversion au risque collectif, est la plus satisfaisante sur le plan conceptuel. Les risques catastrophiques sont ceux qui engendrent des coûts très importants, notamment en termes de vies humaines, non mutualisables et susceptibles d'avoir des effets systémiques. Il semble dès lors justifié qu'un décideur public traite de façon particulière le risque d'accident nucléaire et qu'il considère cette aversion collective au risque. L'étude modélise un tel accident, dans le cas du scénario KO. Telles que chiffrées dans le chapitre 6 du rapport, les conséquences (coût de décontamination, de prise en charge des réfugiés, etc.) peuvent paraître largement mutualisables. Il faut cependant garder en tête que les dimensions sanitaires (de nombreux décès et maladies induites ; ces dommages sanitaires n'ont pas été chiffrés ici, mais dans les études sur les dommages des accidents nucléaires, ils

¹⁵ France Stratégie, *Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics, sous l'autorité du comité d'experts des méthodes d'évaluation socioéconomique des investissements publics, présidé par Roger Guesnerie, 2017.*

représentent environ 10% du total) et symboliques (de grandes métropoles françaises touchées par les retombées) justifient ainsi la référence aux travaux de recherche sur l'aversion au risque collectif citées plus haut. Mais ces travaux restent pour le moment largement à l'état de théorie ; enfin, il n'y a pas de recul sur les paramètres qui y interviennent et leur estimation.

La deuxième s'appuie, non plus sur les risques objectifs probabilisables tels qu'ils sont modélisés dans le chapitre 6 du rapport (une probabilité d'accident dans le cas où on est dans un scénario KO), mais sur la perception du risque telle qu'elle est perçue par l'ensemble des agents et sur l'utilité qu'ils attachent à la réduction du risque, frappée d'une large incertitude, et guère exprimable en termes de probabilité. Les enquêtes montrent qu'elle est différente selon les catégories de population, et souvent fondée sur une mauvaise connaissance des risques réels. L'utilisation des données de ce type en économie normative fait l'objet de débats et pourrait être questionnée. En outre, les enquêtes correspondantes sont peu nombreuses, et il n'est pas possible, là aussi d'en déduire des estimations tant soit peu robustes.

La troisième se réfère à la notion de valeur tutélaire. Ces valeurs sont dites tutélaires soit parce qu'elles ne sont pas fournies directement par un marché, soit parce que les valeurs de marché ne reflètent qu'imparfaitement la réalité des coûts sociaux. Elles sont fixées par l'État en fonction des attentes de la société telles qu'on peut les appréhender ; elles résultent d'un compromis qui a été élaboré sur la base d'un dialogue entre économistes, partenaires économiques et sociaux, et représentants des organisations non gouvernementales, organisés par France Stratégie. Le coût du risque qui nous occupe rentrerait bien dans cette catégorie. Mais la valeur en question n'a pas été établie.

On peut s'interroger sur la place respective de chacune de ces explications. Toujours est-il qu'aucune ne fournit d'estimation pour la valorisation des dommages permettant de les exprimer en termes d'utilité (ou plutôt ici de désutilité) intégrable dans un calcul de VAN. Aussi, selon la méthode énoncée au début, on balisera les différentes valeurs possibles de ce coût qui grève les solutions non définitives, ou de ce bénéfice pour les solutions définitives, qualifiée ici de « bénéfice assurantiel ». Plus précisément, on cherchera à déterminer comment varie la hiérarchie des solutions selon la valeur de ce bénéfice, et on s'attachera en particulier à établir ses valeurs-pivots, celles pour lesquelles la hiérarchie des solutions change.

Les procédures de calcul utilisées

Comme on l'a indiqué dans les commentaires relatifs au chapitre 1, la stratégie suivie ici a été de probabiliser toutes les variables qui pouvaient l'être – il s'agit ici essentiellement de variables techniques concernant des coûts, les dépenses de recherche et autres, et les probabilités de succès des démarches et recherches entreprises – et de baliser les valeurs possibles des trois paramètres qui étaient particulièrement difficiles à appréhender pour des

raisons bien exposées dans l'étude. Pour ces trois paramètres, l'étude se limite à balayer largement le champ des valeurs possibles, sans leur donner de probabilité a priori et à déterminer les valeurs pivots correspondantes, celles pour lesquelles les décisions changent.

Les calculs de VAN auraient pu être menés selon de multiples procédures, étant donné la complexité du problème et la diversité des paramètres et de leur interaction. On présentera et commentera ici les plus importants des choix effectués en la matière.

Rappelons que la quasi-totalité des variables intervenant dans l'ESE sont probabilisées :

- Les coûts de génie civil des variantes, sur une plage uniforme 0,8-1,5.
- Les montants de recherche, de conservation du site et de maintien des compétences, sur des plages 0,5-1,5.
- Les taux de croissance des coûts dans leur corrélation avec le PIB.

Sont également probabilisés les « changements d'état » à savoir : probabilités de perte du site de Bure, de retrouver un nouveau site, de succès de la recherche. Il faut noter que les probabilités de succès de la recherche sont non corrélées avec les montants consacrés à la recherche, et que les probabilités de maintien du site ne le sont pas avec les montants consacrés au maintien du site ; on pourrait s'attendre à ce que plus le montant des dépenses de recherche est élevé, plus la probabilité de succès le soit aussi ; il est apparu au comité que l'incertitude en la matière était spécialement importante et que la procédure suivie en ce domaine reflétait bien cette incertitude.

Comme mentionné plus haut, les incertitudes concernant les coûts sont considérables, et peut-être insuffisamment prises en compte par les fourchettes indiquées ci-dessus. Des calculs de variantes avec des fourchettes plus larges seraient intéressants, mais on peut en prévoir les effets : ils élargiraient les fourchettes de variations, les supports de probabilité des VAN et donc les plages de recouvrement des solutions ; en revanche leurs effets sur les espérances mathématiques des VAN seraient faibles si l'élargissement des plages était symétrique.

Notons que les espérances de coûts et de dépenses diverses (maintien des compétences, recherche...) ont été calculées en tenant compte de la corrélation entre ces dépenses et le PIB défini par le paramètre communément appelé "Beta"; la procédure est correcte, elle constitue même un raffinement heureux par rapport à celles utilisées communément dans les ESE, qui n'intègrent pas cette corrélation. Le coefficient par lequel il convient de multiplier le Beta est particulièrement difficile à estimer, puisqu'il est lié à la fois à l'écart-type du taux de croissance du PIB et à la prime de risque. Ici, la valeur prise minimise l'effet et des compléments d'analyse seraient très utiles, comme le recommande le rapport, ne serait-ce que pour évaluer l'importance de l'effet, dont le sens ne fait guère de doute (il défavorise les dépenses lointaines).

Sur ces bases, les calculs de l'option 1 n'appellent pas de remarque particulière.

Pour les autres options (2, 3 et 4), il convient de bien préciser la structure d'information. Le modèle suppose qu'en 2070 l'information relative au coût de la technologie *borehole* et sur le

coût de Cigéo sera la même que maintenant. Il est difficile de penser qu'au bout de 50 ans de recherche on n'en saura pas plus que maintenant sur le coût des options.

Cela conduit à tenir compte de la valeur présentée par l'amélioration de l'information en 2070¹⁶, d'où il résulte que les espérances de coût sont plus faibles que la valeur actuelle calculée à partir de la seule information disponible en 2019. Cette procédure qui constitue une mesure prudente à l'égard de l'option 1 (puisque'elle réduit les coûts généralisés actualisés des options concurrentes) a été mise en œuvre, et conduit à des résultats un peu modifiés, mais conservant les ordres de grandeur respectifs.

Toutes ces simulations ont été faites en tenant compte de manière correcte des corrélations entre variables, et notamment entre les coûts des options comparées : la corrélation est parfaite quand il s'agit de comparer les options 2 et 1 ainsi que les options 3 et 1 : il n'y a pas de raison de penser que les surprises sur les coûts soient différentes selon qu'on entreprend la totalité ou seulement une partie de Cigéo. En revanche, pour l'option 4, il n'y a bien sûr aucune corrélation entre les aléas qui frappent les différentes solutions qui apparaissent (Cigéo, nouvelle technologie, entreposage, stockage sur nouveau site).

Enfin, soulignons qu'il conviendrait d'ajouter l'empreinte carbone de la construction des variantes. Cette empreinte affecte toutes les options pour leur part de dépense de génie civil surtout. La comparaison avec des travaux de nature similaire (tunnels en particulier) donne à penser que l'impact serait faible, de l'ordre de 2% des coûts de construction en ordre de grandeur), et négligeable eu égard à l'incertitude sur ces coûts, à une nuance près : les émissions liées au transport des déchets (en partie par la route) sont plus élevées dans certains scénarios. Notons d'ailleurs que l'effet frapperait également toutes les solutions.

Les résultats

En ce qui concerne les résultats eux-mêmes, on remarque d'abord que le rapport les exprime en coûts et non en VAN et sans faire référence à un contrefactuel ; cette présentation est justifiée dans les commentaires du chapitre 3. Leur examen doit tenir compte de l'influence de la valeur des différents paramètres : le taux d'actualisation, le scénario considéré et sa probabilité, et ce qu'on a appelé plus haut le « bénéfice assurantiel » (ou le coût assurantiel des solutions impliquant un entreposage).

En miroir des résultats présentés dans le rapport, on va ici analyser la manière dont, selon les valeurs de chacun de ces paramètres, la hiérarchie des options se modifie. On remarque d'abord que les options 2 et 3 sont toujours moins bonnes que l'option 1. Restent alors les options 1, 4 et la variante de l'option 4. Des simulations simples permettent d'établir le tableau suivant, qui montre comment, selon le système d'actualisation, et pour trois valeurs de la probabilité KO/OK encadrant une plage d'estimations vraisemblable de cette probabilité, la solution change selon la valeur du bénéfice assurantiel.

Tableau 1 : Solutions et pivots selon les valeurs des paramètres : système d'actualisation, probabilités KO/OK et coût assurantiel

¹⁶ En termes techniques, plutôt que de calculer le minimum des espérances des deux branches, il faudrait calculer l'espérance du minimum des deux branches, qui est plus faible.

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

Source : calcul des experts

Ce 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 8 000 Millions d'Euros, la solution de coût actualisé le plus faible est l'option 1. Si en revanche le bénéfice assurantiel est inférieur à 8 000 Millions d'euro, c'est la variante de l'option 4 qui présente le coût actualisé le plus faible.

Les résultats portés dans le tableau ci-dessus sont cohérents avec ceux indiqués dans le rapport selon lequel une valeur du bénéfice assurantiel d'environ 8 000 Millions d'Euros constitue la valeur pivot à partir de laquelle l'option 1 est préférée aux autres solutions. L'interprétation de ce chiffre est alors la suivante : si le décideur considère que le bénéfice assurantiel est supérieur ou égal à 8 000 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 8 000 Millions d'Euros. C'est d'ailleurs ainsi que pourrait être interprétée la décision prise en 2006 par le législateur.

On voit par ce tableau que l'option 4 n'apparaît jamais comme la meilleure solution. Ce résultat doit être qualifié car le tableau ci-dessus se fonde sur les valeurs moyennes, et ne présente pas les probabilités de chaque solution ; leur considération aboutirait à mettre des halos autour des valeurs pivots.

A partir des simulations ayant abouti à ce tableau, on peut aussi évaluer la sensibilité des résultats à une réduction des dépenses de recherche, annoncée au chapitre 5, et destinée à rendre compte du fait que les recherches en cause ont très probablement des bénéfices annexes en dehors de la gestion des déchets.

Si, par exemple, les dépenses de recherche de l'option 4 sont divisées par 2 et tombent de 170 à 85 Millions d'Euro par an, alors :

- Avec un taux d'actualisation haut, l'option 4 devient la meilleure pour un bénéfice assurantiel compris entre 7 000 et 11 000 Millions d'Euro.

- Avec un taux d'actualisation intermédiaire ou bas, l'option 4 n'est jamais la meilleure.

Il est possible aussi de reprendre la question posée au chapitre 4 concernant le prolongement des branches 4.5 et 4.8 de l'option 4. Comme vu alors, rien n'assure que l'entreposage longue durée soit la meilleure poursuite, en cas de perte du site et d'échec de la recherche. Parmi les nombreuses autres possibilités de prolongement envisageables¹⁷, l'une retient spécialement l'attention, consistant à continuer la recherche tant qu'aucune solution définitive n'a pas trouvée. Une telle éventualité est-elle meilleure que l'ELD ? L'annexe 1, ci-après, s'efforce d'explorer cette question¹⁸; elle apporte des indices permettant de considérer que, au moins autour d'un bénéfice assurantiel de 8 Milliards d'Euros et pour le système d'actualisation intermédiaire, l'ELD, tout en étant une moins bonne solution que la poursuite de la recherche, en est suffisamment proche pour que le coût actualisé en constitue une approximation valable, et justifie donc a posteriori les hiérarchies de solutions trouvées, dans leur ordre de grandeur.

Dans la même veine, on peut, à partir de ces simulations, considérer des conséquences d'autres stratégies d'abandon de Cigéo, différentes de celle qui consiste, dans le cadre de la variante de l'option 4, à entreposer indéfiniment (et dont l'esprit a été présenté dans le chapitre 4). En transposant à ce cas les esquisses d'estimation présentées dans le paragraphe précédent, toujours dans les mêmes conditions de bénéfice assurantiel et de système d'actualisation, il y a lieu de penser que la stratégie d'entreposage éternel soit dominée par une stratégie qui consisterait, à partir de la fin du siècle, à lancer des recherches poursuivies jusqu'à ce qu'elles aboutissent, mais que le coût actualisé de cette dernière stratégie serait probablement à peine plus faible que celui de l'ELD indéfini.

Dans ces situations, le décideur actuel est amené, pour choisir son action immédiate, à imaginer ce que devraient ou pourraient être les décisions des générations futures, sur lesquelles il n'a pas de pouvoir. On peut alors chercher à optimiser ces décisions du point de vue du décideur actuel, en faisant jouer l'effet de valeur d'option et l'acquisition progressive d'information. On peut aussi tenir compte de la dynamique des mégaprojets, qui permet de donner une interprétation concrète en termes socio-politiques des enjeux mis en évidence par l'ESE. Les recherches sur les dynamiques de constitution des grandes options technologiques permettent de saisir les caractéristiques des processus de *path creation*¹⁹, notamment l'importance de l'alignement des anticipations et des activités d'un ensemble large d'acteurs hétérogènes aux intérêts divers pour la conception et la réalisation de grands projets complexes et incertains. En l'occurrence, Cigéo est le résultat d'un processus socio-politique très long que l'ESE prend en compte de façon schématique par les paramètres qui représentent les délais nécessaires pour, en cas de perte du site ou d'abandon de la solution, trouver une autre solution ou un autre site, et les probabilités de succès de ces recherches.

Dans cette perspective, cette ESE montre que, lorsque l'on raisonne dans le cadre du modèle, et sans faire intervenir un bénéfice assurantiel, l'approche rationnelle conduit à choisir de

¹⁷ En toute rigueur logique, il faudrait énumérer toutes les suites possibles envisageables, calculer leur coût actualisé généralisé incluant un coût assurantiel et retenir la meilleure, qui dépend du coût assurantiel.

¹⁸ L'hypothèse principale qu'elle exploite est que, sans solution définitive et compte tenu de la permanence de l'entreposage, un coût assurantiel annuel peut être calculé comme l'annuité du coût assurantiel total actualisé considéré plus haut.

¹⁹ Voir notamment Garud, R., Karnoe, P. (2013). *Path dependence and creation*, New York: Psychology Press.

ne pas faire Cigéo et à ne pas investir dans la recherche d'alternatives technologiques (variante de l'option 4). Cela conduirait donc à laisser aux générations futures la charge de l'entreposage de longue durée éternellement renouvelé, ou de la décision d'une éventuelle reprise ultérieure de la recherche d'une solution définitive après abandon de Cigéo, malgré l'existence des risques d'accident dans une société chaotique (scénario KO). Bien sûr, avec le taux d'actualisation bas, cette éventualité de long terme a plus de poids, ce qui conduit à privilégier Cigéo. Néanmoins, ce résultat tient dans le cas du taux intermédiaire (et a fortiori du taux élevé). Si nous faisons ce choix, rien ne permet d'assurer que les générations à venir en changeront, et la réalisation d'une solution définitive n'est plus assurée, ou risque d'être repoussée dans un avenir mal défini. On en revient ici à notre responsabilité vis-à-vis des générations futures, traduite dans l'ESE par deux paramètres qu'on a essayé d'objectiver, mais qui sont de nature essentiellement politique, à savoir ce qui a été appelé les bénéfices assurantiels de Cigéo ou d'une autre solution définitive (ou le coût assurantiel des périodes d'entreposage), et le système d'actualisation. L'analyse qui précède montre aussi l'importance des conditions socio-politiques entourant le choix et la mise en œuvre d'une solution: s'il faut éviter de mobiliser les contraintes qu'elles entraînent pour justifier de façon ad hoc des projets qui ne seraient pas socialement souhaitables, il ne faut pas non plus sous-estimer la force de ces contraintes.

Cette analyse permet de confirmer et compléter la liste des paramètres devant jouer un rôle majeur dans la décision, parmi lesquels on trouve bien sûr les coûts et dépenses liées aux différentes solutions, le système d'actualisation, la valeur du bénéfice assurantiel (ou du coût assurantiel des entreposages), et aussi la probabilité de réussite des recherches (comprenant non seulement la réussite technique mais aussi le bon déroulement des procédures décisionnelles), et plus généralement l'idée qu'on peut se faire des décisions des générations futures.

Dans l'hypothèse où le décideur a choisi l'option 1, une question se pose alors, celle de la date de réalisation optimale de l'option 1. Le rapport met bien en évidence à la fois l'importance de cette question et les principaux paramètres en jeu : en reculant Cigéo, on gagne du fait de l'actualisation, mais on risque de perdre le site, et on s'expose alors au coût de recherche d'un nouveau site ; si, en outre, cette recherche est infructueuse, on est alors condamné à réaliser un entreposage longue durée s'exposant aux risques qu'il comporte, dans la ligne des raisonnements effectués dans le cadre de l'option 4. Le rapport rappelle aussi que la détermination de la date optimale d'un projet s'opère usuellement à travers des calculs fins et délicats. Le comité a cependant jugé qu'il pouvait être utile d'éclairer le décideur sur ce sujet, ne serait-ce que par des estimations d'ordre de grandeur. L'annexe 2 jointe répond à ce souci. Elle est fondée sur la logique de la décision de faire Cigéo, qui implique que le bénéfice assurantiel soit jugé supérieur à la valeur pivot de 8 000 Millions d'Euro. En utilisant une modélisation cohérente avec le cadre de l'option 4, elle fait des hypothèses en termes de probabilité de perte du site et d'en retrouver un autre, elle tient compte de ce que le décalage de dates de réalisation entraîne, outre des frais d'entreposage supplémentaires, des durées d'entreposage allongées, donc un coût assurantiel (voir l'annexe). Le résultat auquel on arrive est que, la date optimale de réalisation apparaît se situer dans la décennie 2040. Toutefois, compte tenu des constantes de temps considérables

du projet, le gain qui résulterait d'un décalage au-delà de 2030 est très faible, et peu assuré eu égard à la précision des calculs, il risque d'être illusoire, et d'autant plus s'il conduit à ralentir les procédures administratives de réalisation du projet dont la longueur risque déjà d'assurer de manière naturelle le décalage à 2030,. En outre, si le bénéfice assurantiel est supérieur à la valeur pivot (et dans l'hypothèse où on a choisi l'option 1, il ne peut en être autrement), la date de réalisation optimale doit être plus proche. Sous réserve de la précision des calculs et de la validité du modèle sur lequel ils sont fondés, ceci incite le comité d'experts à recommander que, si la décision est de réaliser l'option 1, sa mise en œuvre ne soit pas différée.

Comme cela était mentionné dans le préambule, l'ensemble de l'étude a été menée en prenant en compte un environnement économique pré-Covid19. La crise sanitaire entraînera certainement des changements dans les anticipations de plusieurs paramètres de l'étude, tels que la croissance économique et le taux d'actualisation, dont on a mesuré l'influence sur les résultats. Ces changements s'exerceront d'abord sur leurs valeurs à court terme, qui impacteront peu ce projet à long terme. Mais il n'est pas exclu que des modifications soient apportées aux projections à plus long terme. Jusqu'ici les recommandations officielles n'ont pas été changées. Mais si elles l'étaient, il est très probable qu'elles iraient dans le sens d'une réduction de la croissance économique et d'une diminution du système d'actualisation.

• Observations sur les annexes du rapport d'ESE

Les annexes du document donnent un panorama complet des situations observées dans les principaux pays qui disposent d'un programme électronucléaire (13 pays sont étudiés dans le rapport). La Chine, qui a opté pour un cycle fermé et un stockage en couche géologique profonde, recherche un site pour le stockage des HA dans la région granitique du désert de Gobi (un laboratoire y sera construit à partir de 2020). La Russie, qui elle aussi a opté pour un cycle fermé et recycle déjà du MOx dans des RNR, a un projet de stockage dans du granite (un laboratoire souterrain devrait y être construit à partir de 2024 en vue d'un stockage en 2035). Les États-Unis, qui ont opté pour le cycle ouvert, cherchent encore des sites de stockage, suite à l'abandon de celui de *Yucca Mountain*. Le Japon a récemment réaffirmé son engagement dans la filière nucléaire et l'option du cycle fermé (avec développement de RNR), mais cherche toujours un site de stockage pour les déchets à haute et moyenne activité et à vie longue. La Corée du Sud a adopté une stratégie de cycle ouvert (suite à un accord avec les États-Unis, ce qui lui interdit maintenant toute activité de retraitement sur son sol) et cherche un site de stockage définitif (à définir dès 2029) qui devrait être opérationnel en 2053. En Europe, à l'exception de la France, de la Finlande et de la Suède qui ont identifié et arrêté un site de stockage, tous les pays sont à la recherche de sites définitifs, que ce soit le Royaume-Uni, l'Allemagne, les Pays-Bas, l'Espagne, et même la Belgique (où le choix du site de Mol n'est pas définitivement arrêté). Il en va de même au Canada. Les annexes du rapport font un tour d'horizon complet de la politique nucléaire des pays étudiés et mettent en évidence la grande hétérogénéité des situations rencontrées.

Comme l'indique le rapport, tous ces pays considèrent aujourd'hui le stockage profond comme la solution optimale pour gérer les déchets HA et MA-VL.

- **Conclusion du présent avis**

Au total, le comité d'experts considère que l'étude apporte une valeur ajoutée notable pour éclairer la décision.

La valeur ajoutée réside d'abord dans les informations et données rassemblées, qui portent sur les coûts de réalisation et opérationnels des solutions possibles et – avancée nouvelle et majeure – sur l'évaluation des risques et les bénéfices de l'amélioration de la sûreté. Elle montre que si l'on ne peut pas totalement objectiver l'appréciation collective des coûts et bénéfices assurantiels, on peut en tout cas prendre en compte dans ce genre d'étude économique les risques et dommages encourus par une solution de gestion non définitive, et donc appréhender les avantages que procure une solution définitive.

L'intérêt de l'étude réside également dans la manière d'associer les coûts et les bénéfices et de les comparer dans la construction d'un raisonnement économique autour des problèmes de gestion des déchets et de l'articulation de leurs solutions.

Ces informations sont certes frappées d'incertitude, ce qui est pour le moins compréhensible. La vertu de l'étude est d'avoir pris en compte cette incertitude, dans toute la mesure du possible, et d'avoir recherché à l'objectiver par différentes voies, allant de la définition de probabilités et de plages d'incertitude à la mise en évidence de valeurs pivots des paramètres non probabilisables, en particulier les bénéfices assurantiels d'une solution définitive, valeurs de ces paramètres qui font basculer la hiérarchie des projets et la décision les concernant.

Il arrive souvent qu'une ESE ne fournisse pas de résultats totalement concluants permettant à eux seuls de justifier une décision de façon irréfragable. C'est spécialement vrai de la présente ESE, pour toutes les raisons développées dans le rapport lui-même et rappelées dans cet avis et son préambule, qui tiennent aux nombreuses incertitudes en jeu, eu égard à la nature du projet, et qui entraînent que les plus importants des résultats mis en évidence sont conditionnels à des appréciations de nature politique.

Néanmoins, le comité d'experts considère que ces résultats, assortis des conditions de validité dont la nature est bien mise en évidence et discutée dans le rapport et dans cet avis, sont robustes. Elle met aussi en exergue les paramètres essentiels dont ils dépendent. Elle constitue donc aux yeux du comité une source d'éclairage nouvelle, particulièrement pertinente pour bien informer les débats auxquels le projet donnera lieu et la décision politique qui sera prise.

• Annexe 1: Note sur la modélisation des branches 4.5 et 4.8

Objet

Dans l'analyse du chapitre 4, on a signalé que le prolongement choisi pour prolonger les branches 4.5 et 4.8, l'ELD indéfini, n'est pas forcément le meilleur, surtout si le bénéfice assurantiel est suffisamment élevé. Parmi les nombreuses autres solutions qu'il n'est bien sûr pas possible d'explorer complètement, on en choisira une consistant à poursuivre la recherche tant qu'un résultat n'a pas été atteint. Cette éventualité constitue-t-elle une meilleure solution que l'ELD indéfinie ? Si oui, l'option 4 telle qu'elle a été définie constitue-t-elle une solution valable ? Cette annexe a pour objectif d'éclairer cette question.

Modèle

Le modèle proposé vise à représenter un processus par lequel on cherche une solution technique (autre que Cigéo, ici supposé abandonné ou perdu), et en attendant les déchets sont entreposés. Chaque année t , une dépense en recherche $r(t)$ est engagée, ainsi qu'en entreposage une somme $e(t)$, et l'entreposage présente en outre un coût assurantiel $s(t)$. On raisonne en temps continu, et on note j (éventuellement dépendant de t) le taux d'actualisation. Le processus de découverte est le suivant : à l'instant t , la probabilité de trouver entre t et $(t+dt)$ est $\lambda * dt$. Si cette éventualité se produit, le coût de la recherche est C , une variable aléatoire tirée d'une distribution de probabilité supposée connue.

A chaque intervalle de temps, le décideur est obligé de continuer à entreposer si la recherche n'a pas abouti, ce qui présente une probabilité : $(1 - \lambda) * dt$, et un coût : $(r+e+s) * dt$. Si la recherche a abouti, événement dont la probabilité est $\lambda * dt$, il a le choix entre continuer à chercher ou mettre en œuvre la solution trouvée.

Traitement

Soit $V(t)$ la VAN de la décision optimale à l'instant t ; $V(t)$ est une variable aléatoire. Son espérance obéit à la relation suivante :

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(V(t)) = & (1 - \lambda * dt) * [(r(t) + e(t) + s(t)) * dt + \mathbb{E}V(t + dt) * e^{-jdt}] \\ & + \lambda * dt * e^{-jdt} * [\mathbb{E}(\text{Min}[C, V(t + dt)])] \end{aligned}$$

Dans cette expression, le premier crochet représente la poursuite de l'entreposage lorsque la recherche est infructueuse, multipliée par sa probabilité d'occurrence ; le second le choix du décideur (arbitrer entre mettre en œuvre la nouvelle technologie et continuer à chercher et à entreposer) multiplié par sa probabilité d'occurrence. Elle ne peut être résolue que numériquement lorsque les fonctions r , e , s et j varient dans le temps.

En revanche, elle est aisée à résoudre lorsque ces fonctions ne dépendent pas du temps. Alors, l'équation se simplifie considérablement, puisque dans la relation précédente, rien ne dépend plus de t , le processus est stationnaire. Les termes en dt^2 sont négligeables, les termes finis disparaissent, de sorte qu'il reste les termes en dt , qu'on égale à zéro, ce qui donne :

$$\mathbb{E}V = (1 - \lambda * dt) * [(r + e + s) * dt + \mathbb{E}V * e^{-jdt}]$$

$$+\lambda * dt * e^{-jdt} * [E(\text{Min}[C, EV])]$$

Connaissant la fonction de distribution de C , l'expression sur le signe E dans le deuxième crochet est une fonction de V et la relation précédente est une équation en V , d'où l'on tire V , dont la valeur dépend bien sûr de la fonction de distribution²⁰.

Si C n'est pas une variable aléatoire, mais un montant certain, on aboutit à des relations simples :

- Si $C < V$, alors le minimum de C et V est C et : $V = \frac{r+e+s+\lambda*C}{\lambda+j}$
- Si $C > V$, alors le minimum de C et V est V et : $V = \frac{r+e+s}{j}$

Interprétation

Regardons la modélisation la plus simple, en régime stationnaire et où C est certain. Ce que disent les deux dernières formules, c'est que, si le coût de la nouvelle recherche est supérieur à $(r+e+s)/j$, alors la nouvelle technologie n'est jamais mise en œuvre, car trop chère par rapport à l'entreposage longue durée poursuivi éternellement, dont l'expression $(r+e+s)/j$ représente son coût actualisé jusqu'à l'infini.

En revanche, si le coût de la nouvelle technologie est inférieur à $(r+e+s)/j$, alors, tôt ou tard, on aboutira à cette nouvelle technologie, qui sera mise déployées. Ce qui conduit à une échappatoire par rapport à « l'enfermement » dans l'ELD éternel.

Si le coût de la nouvelle technologie est une variable aléatoire, pour peu qu'elle puisse prendre des valeurs assez basses, même avec des faibles probabilités, une valeur inférieure à $(r+e+s)/j$ sera atteinte tôt ou tard, avec également une échappatoire par rapport à « l'enfermement » dans l'ELD éternel.

Application

L'application au cas des branches 4.5 et 4.8 de l'option 4 doit être faite avec attention. En effet, les fonctions e , r , s et les taux d'actualisation dépendent du temps. Mais cette dépendance, qui est forte au début de la période, s'estompe ensuite. A partir de 2070, les fonctions r , s et e deviennent stables, ou presque. Quant au taux d'actualisation, qu'on considère uniquement dans le système intermédiaire, il baisse de 3% en 2100 au niveau de 1% qu'il atteint en 2250, pour ne plus quitter ce niveau. A défaut de traiter le problème sous son aspect le plus rigoureux de non-stationnarité, sa solution sera encadrée par les résultats de deux problèmes stationnaires, l'un avec un taux d'actualisation constant de 3%, et l'autre avec un taux d'actualisation de 1%.

Les autres paramètres mis en œuvre sont les suivants :

- Entreposage et maintien des compétences : 0,34- GE
- Recherche : 0,20 GE

²⁰ On pourrait par exemple déterminer cette valeur avec la fonction de distribution prise pour C dans l'option 4

- Paramètre λ : on prend la valeur cohérente avec les hypothèses de l'option 4, d'après laquelle on a 50% de chances d'avoir trouvé au bout de 50 ans. Cela correspond à une valeur de 1,4%
- L'annuité d'assurance s est prise égale à S^*j , où j est le taux d'actualisation et S la valeur actualisée en 2080, du bénéfice assurantiel. Si le bénéfice assurantiel prend la valeur pivot de 8 Geuro en 2019, ce qui correspond à une valeur actualisée en 2080 d'environ $S=64$ Geuro.
- Enfin, on prend comme coût de la nouvelle technologie la valeur de 40 GEuro (cette valeur peut paraître élevée, mais elle tient compte de ce que les dépenses, très étalées dans le temps, sont actualisées à la date de mise en exploitation de l'installation).

A partir de ces données, on peut comparer la solution "recherche jusqu'à ce qu'à atteinte d'un résultat" et la solution ELD. La comparaison dépend de la valeur du bénéfice assurantiel.

Pour un taux d'intérêt de 3%, l'application de la formule précédente donne pour la solution "recherche.." un cout généralisé actualisé en 2019 plus faible que la solution ELD, d'environ 1 GEuros.

Pour un taux d'intérêt de 1%, l'écart actualisé en 2019, entre les deux solutions est de même sens, mais un peu plus important, de l'ordre de 3 GEuros.

Si on recherche l'ordre de priorité des solutions en adoptant pour les branches 4.5 et 4.8 une solution de recherche, et en affectant à cette solution de recherche un coût moyen compris entre les deux valeurs précédentes (celle obtenue avec un taux de 3% et celle obtenue avec un taux de 1%), l'ordre de priorité des solutions ne change pas : l'option 4 est toujours derrière l'option 1. Cette évaluation ne constitue pas une preuve complète, compte tenu des nombreuses approximations qu'elle comporte; elle fournit néanmoins un indice que l'option 4 est raisonnable et conforte les conclusions chiffrées auxquelles les calculs du rapport aboutissent.

Bien évidemment, ces conclusions dépendent de la valeur du bénéfice assurantiel. S'il est suffisamment bas, la solution de poursuite des branches 4.5 et 4.8 par de l'ELD est la meilleure.

Notons que, compte tenu des approximations faites, les résultats ci-dessus semblent surtout valables en sens et en ordre de grandeur, de sorte qu'il convient de ne pas de tirer de ces chiffres des conclusions trop précises.

• [Annexe 2: Estimation de la date optimale de réalisation de l'option 1](#)

La présente note a pour objet d'éclairer la question de la date optimale de réalisation de l'option 1. La ligne directrice est la suivante : on calcule les coûts actualisés généralisés correspondants à chaque décalage de réalisation de Cigéo, par pas de 10 ans, puis en les comparant, on choisit le décalage qui comporte le cout actualisé généralisé le plus faible.

Pour chaque décalage de durée N , les effets suivants doivent être pris en compte :

- Le coût de réalisation de Cigéo est repoussé de N années par rapport à la réalisation immédiate en 2019. Il en résulte un gain de coût actualisé.
Mais entre 2019 et l'année N , le site a pu être perdu. On prend comme hypothèse que la probabilité de perte est poissonnienne, la loi de Poisson considérée étant telle que, au bout de 50 ans, la probabilité d'avoir perdu le site est de 0,5. On recoupe ainsi la probabilité prise comme hypothèse dans l'option 4.
- Si le site est effectivement perdu, on est conduit à rechercher un nouveau site, ce qui occasionne des dépenses de recherche de site, de maintien des compétences et d'entreposage. On calque ces dépenses sur celles qui ont été prises dans l'option 4 dans les branches où il y a recherche de site ; la durée de recherche est également reproduite de ces branches : 40 ans.
 - o A l'issue de cette période de recherche, deux issues sont possibles : soit on a trouvé un site, soit on ne l'a pas trouvé. On suppose, comme dans les branches correspondantes de l'option 4, que la probabilité de trouver est de 0,5.
 - o Si on a trouvé le site, commencent les procédures administratives puis la construction et les tests, qui durent 20 ans. Aux coûts de génie civil il faut ajouter les dépenses de maintien des compétences et les dépenses d'entreposage supplémentaires, calquées elles aussi des branches idoines de l'option 4.
 - o Si on n'a pas trouvé le site, on est ramené à de l'entreposage longue durée, comme dans l'option 4.

Au-delà des coûts matériels qui viennent d'être évoqués, il convient de tenir compte, pour chaque décalage N , de la modification du bénéfice assurantiel : la séquence d'entreposage est décalée dans le temps. De ce fait, le bénéfice assurantiel de Cigéo (calculé dans l'hypothèse où Cigéo est réalisé en 2019) est amoindri puisqu'il ne commence à apparaître que plus tard, en raison du décalage de stockage des déchets. Pour calculer ce décalage, on a supposé que le bénéfice assurantiel ne jouait que sur les déchets HA, une hypothèse justifiée par le fait qu'ils sont de loin les plus nocifs, mais prudente car ce sont eux dont le stockage est le moins décalé. En effet, on ne peut les stocker qu'après 2080 et tout décalage qui avancerait leur entrée avant 2080 n'aurait pas de conséquence sur ce bénéfice assurantiel. Sous ces hypothèses, le calcul de la variation de bénéfice assurantiel entre la solution de réalisation immédiate et une solution de réalisation différée est effectué selon les modalités suivantes : si le bénéfice assurantiel de la réalisation immédiate est de B , correspondant à un début de stockage en 2080, et si le stockage, du fait du différencement de Cigéo, commence à la date T , le bénéfice assurantiel correspondant est, en appelant j le taux d'actualisation, $B \cdot \exp[-j \cdot (T - 2080)]$, plus faible que celui correspondant à la réalisation immédiate de Cigéo.

Ces principes sont appliqués au cas du taux d'actualisation intermédiaire. On prend comme bénéfice assurantiel de Cigéo la valeur de 8 GEuro, correspondant dans le tableau final des résultats de l'étude, au cas où avec une probabilité de scénario KO de 10%, l'option 1 est juste rentable (bénéfice assurantiel-pivot). Le taux d'actualisation utilisé est celui du génie civil. Les données sont tirées des tableurs de coûts pour les décalages correspondants aux

années 2029, 2039, et 2070 ; elles sont interpolées par pas de 10 ans entre ces dates. Les résultats, conditionnels à la validité de l'interpolation précitée, sont donnés dans le tableau suivant, où les bénéfices assurantiels sont calculés par différence avec la solution de réalisation immédiate de Cigéo.

| Date de décalage | Durée du décalage | Coût total |
|-------------------------|--------------------------|-------------------|
| 2019 | 0 | 12,50 |
| 2029 | 10 | 10,90 |
| 2039 | 20 | 10,41 |
| 2049 | 30 | 10,38 |
| 2059 | 40 | 10,54 |
| 2069 | 50 | 11,77 |

On voit que l'optimisation de la date de mise en service conduirait, avec les hypothèses faites, à un gain d'environ 2 GEuro de VAN.