

Contre-expertise de l'évaluation socioéconomique du projet de CIGÉO



Source : Dossier Socio-Economique - Andra

Jean-Paul BOUTTES
Christian GOLLIER
Anne-Laure MASCLE ALLEMAND
Aude POMMERET
Eric PREUD'HOMME

5 Février 2021

PREAMBULE	3
1 INTRODUCTION.....	4
2 RESUME ET RECOMMANDATIONS	6
3 ANALYSE CRITIQUE DE L'ESE	9
3.1 LE PROJET CIGEO : SON CONTEXTE, SES OBJECTIFS, ET SES ALTERNATIVES	9
3.1.1 Cigéo, « solution de référence » pour les déchets HA et MA-VL et ses objectifs.	9
3.1.2 Alternatives techniques et option de référence, scénario de référence	13
3.2 LES COÛTS « BRUTS » DES DIFFERENTES ALTERNATIVES ET DES OPTIONS DE PROJET ASSOCIEES.....	17
3.2.1 Les coûts de Cigéo : l'option de projet 1	17
3.2.2 Les coûts du « forage profond » (deep borehole) et les options de projet 2 et 3	19
3.2.3 Les coûts de l'Entreposage de Longue Durée, et l'option de projet 4.....	22
3.3 PERIMETRE ET PILOTAGE DE CIGEO	26
3.3.1 Des choix en matière de politique nucléaire et de retraitement-recyclage déterminants pour Cigéo 26	
3.3.2 Un projet qui s'inscrit dans un territoire : analyse du volet transport du projet global Cigéo	27
3.3.3 Un développement local efficace s'appuyant sur une fiscalité maîtrisée.....	29
3.3.4 Une phase industrielle pilote d'une durée de 20 ans à sécuriser.....	29
3.3.5 Une gouvernance adaptée à une nouvelle phase industrielle.....	30
3.4 METHODE D'EVALUATION DANS L'ESE.....	32
3.4.1 Prise en compte de l'incertitude.....	33
3.4.2 L'actualisation	34
4 DES ANALYSES COMPLEMENTAIRES A L'ESE INITIALE.....	36
4.1 SCENARIO ELD.....	36
4.1.1 Comparaison des coûts de Cigéo et de l'ELD dans le cadre du système d'actualisation français (Quinet, 2013).....	37
4.1.2 En l'absence d'incertitude macroéconomique, Cigéo est plus coûteux que l'ELD	38
4.2 UN SCENARIO CENTRAL PROBABILISE ET ANALYSE DE SENSIBILITE	39
4.2.1 Présentation du scénario central.....	39
4.2.2 Système d'actualisation efficient en incertitude OK/KO.....	40
4.2.3 Application à la comparaison de Cigéo et de l'ELD	42
4.2.4 ESE avec risque de perte de contrôle de l'ELD et processus markovien de croissance	43
4.2.5 Propositions conclusives relatives à la comparaison de Cigéo et ELD.....	47
4.3 COHERENCE DES CHOIX CONCERNANT LES GENERATIONS FUTURES LOINTAINES ET LEUR JUSTIFICATION ETHIQUE	48
4.3.1 Pour une Prospective élargie à très long terme, et une grille d'analyse des risques.....	49
4.3.2 Mobiliser les ressources des philosophies éthiques.....	51
4.3.3 Des institutions démocratiques efficaces et justes pour prendre en compte les générations futures 55	
4.4 CONDITIONS DE REUSSITE DE CIGÉO, MAITRISE INDUSTRIELLE ET GOUVERNANCE.....	56
4.4.1 Les conditions de réussite d'un projet industriel majeur	56
4.4.2 Une maîtrise industrielle sécurisant les enjeux de sûreté et réglementaires	57
4.4.3 Accompagner une montée en responsabilité de l'Andra dans la gouvernance de Cigéo.....	58
4.4.4 En conclusion.....	59
5 CONCLUSION	60
ANNEXE : CONTRE-EXPERTISE DU VOLET TRANSPORT DU PROJET CIGEO.....	64
ANNEXE TECHNIQUE	83
TABLES	85

Préambule

La loi du 31 décembre 2012 instaure l'obligation d'évaluation socioéconomique préalable des projets d'investissements financés par l'État et ses établissements publics et une contre-expertise indépendante de cette évaluation lorsque le niveau de financement dépasse un seuil que le décret d'application de la loi a fixé à 100 M€.

C'est donc en respectant toutes les règles prévues dans le décret d'application (exigences du contenu du dossier, indépendance des contre experts, délais) que le SGPI a fait réaliser cette contre-expertise indépendante de l'évaluation de ce projet.

Ce rapport a été établi à partir des documents fournis par Cigéo et par les réponses apportées aux questions des contre-experts tout au long de la procédure. Il ne saurait être reproché à ce rapport de ne pas tenir compte d'éléments qui n'auraient pas été communiqués à ses auteurs.

Il est à noter que le projet Cigéo comprend un volet transport important, notamment pour rendre le site accessible, par rail et par route. Compte tenu des montants à engager et des procédures propres au secteur du transport, ce volet a fait l'objet d'une évaluation socio-économique spécifique. Celle-ci a été réalisée parallèlement à celle du projet Cigéo dans son ensemble, qui inclut par ailleurs les coûts liés au volet transport. La partie rail est portée en partie par l'ANDRA et en partie par SNCF Réseau et celle relative à la route par le Conseil Général de Haute Marne. Cette évaluation intitulée « *Évaluation économique et sociale des infrastructures de transport du projet global Cigéo* » correspond à la pièce 13 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo et vient donc s'ajouter à l'évaluation socio-économique préalable du projet Cigéo lui-même.

Il a été décidé d'un commun accord avec l'ANDRA de faire réaliser la contre-expertise de ce volet transport par la même équipe de contre-experts en charge du projet global, considérant qu'il y avait une logique de cohérence à traiter ensemble les deux évaluations. Le rapport de contre-expertise sur l'ensemble du projet Cigéo reprend en conséquence dans le corps du texte des éléments de la présente contre-expertise engagée sur le seul volet transport. Le contenu de ce rapport est repris en totalité en annexe du rapport de la contre-expertise du projet Cigéo.

1 Introduction

Le centre de stockage Cigéo doit être construit, sous réserve de l'obtention d'autorisation de création, à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne dans une couche d'argile, datant du Callovo-Oxfordien, qui présente des caractéristiques de stabilité et d'imperméabilité notamment, favorables au confinement des éléments radioactifs et au stockage profond de déchets radioactifs. Il est prévu d'y stocker les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL), qui représentent à peine plus de 3 % du volume de déchets répertoriés mais dont la durée de vie va jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années et dont la radioactivité est élevée, les déchets HA concentrant à eux seuls 94,9 % de la radioactivité des déchets radioactifs français. Les volumes de déchets HA et MA-VL de l'inventaire de référence utilisés pour le dimensionnement du centre de stockage Cigéo correspondent aux déchets produits et à produire par les installations nucléaires existantes, soit environ 10 000 m³ pour les déchets HA (soit 56 000 colis) et environ 73 000 m³ pour les déchets MA-VL (soit 167 000 colis).

Après une phase industrielle pilote d'environ 20 ans, le passage en phase de fonctionnement permettra le stockage sur le centre Cigéo jusqu'en 2145, des colis de déchets MA-VL puis HA, dont l'acheminement est prévu par voie ferrée et par route. Pendant la phase de fonctionnement, le stockage géologique est dit réversible : il restera possible de revenir sur des choix antérieurs et les colis de déchets seront récupérables, ce qui signifie qu'ils pourront être retirés du centre de stockage Cigéo. Après cette date, le centre de stockage Cigéo pourra être fermé : la couche géologique se substituera aux actions de surveillance réalisées par la société afin de permettre une « sécurité passive ».

Une évaluation socio-économique (ESE) pour l'ensemble du projet a été achevée en Août 2020. Elle est complétée d'une seconde ESE complémentaire spécifique au volet transport du projet Cigéo. 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 »

L'ESE du projet global implique de comparer la solution de référence que constitue Cigéo, avec d'autres options. Les options considérées dans cette évaluation reposent essentiellement sur le renforcement des efforts de recherche et développement (R&D) pouvant déboucher sur des solutions alternatives de mise en sécurité définitive (« *Deep borehole* »). Dans le cas où la R&D échoue, l'entreposage longue durée est continuellement renouvelé, ce qui transforme de facto une solution aujourd'hui considérée comme temporaire en une solution de long terme. Par ailleurs deux scénarios d'évolution de la société et plusieurs valeurs pour le taux d'actualisation sont envisagés pour le cadre macroéconomique. L'ESE conclut que si la société reste perpétuellement stable *et* que peu de valeur est accordée au bénéfice assurantiel de Cigéo *et* que le taux d'actualisation est élevé, le calcul socioéconomique préconise l'entreposage en surface des déchets radioactifs. Lorsqu'au contraire la société est défailante, *ou* que le taux d'actualisation est faible *ou* que le bénéfice assurantiel de Cigéo est fortement valorisé, l'ESE conclut que Cigéo domine les autres options considérées.

La contre-expertise a pour objectif d'analyser les ESE du projet Cigéo (l'évaluation globale et l'évaluation complémentaire engagée sur le volet transport du projet) afin de déterminer si ces études permettent d'éclairer le public sur les choix à réaliser.

Le rapport de contre-expertise s'articule en deux parties, la première procédant à l'examen des ESE et la seconde proposant des analyses complémentaires.

La section 3.1 présente les caractéristiques pertinentes de Cigéo ainsi que celles des options auxquelles le projet Cigéo a été comparé, et le cadre macroéconomique retenu (scénario de référence). Les coûts bruts de Cigéo, et des options faisant intervenir la R&D pour le « *Deep borehole* » et l'entreposage de longue durée sont analysés dans la section 3.2. Les enjeux liés au périmètre de Cigéo en lien avec la politique nucléaire, à la fiscalité, à la sécurité de la phase pilote ou à la gouvernance sont considérés dans la section 3.3. Une attention particulière est portée au volet transport, qui, du fait du montant important d'investissement, a fait l'objet d'une ESE spécifique. La contre-expertise ce volet, qui fait l'objet d'un rapport distinct, est repris en totalité en annexe de ce rapport. Les conclusions principales sont reprises dans la section 3.3 du présent rapport. La méthodologie retenue, notamment quant au traitement de l'incertitude ou au choix du taux d'actualisation est analysée dans la section 3.4.

La section 4 permet de préciser les conditions sous lesquelles la réalisation du projet Cigéo est souhaitable. La section 4.1 propose de comparer le projet Cigéo à l'option consistant à renouveler indéfiniment l'entreposage longue durée, cette comparaison étant réalisée dans la section 4.2 dans le cadre d'un scénario de référence unique probabilisé qui prend en compte la possibilité d'une société stable comme celle d'une société défaillante, scénario dont découle une trajectoire de taux d'actualisation. Ce scénario unique est cependant assorti d'analyses de sensibilité. La dimension éthique du projet, incontournable pour un projet d'investissement à la durée de vie inédite, est explorée dans la section 4.3, afin de mettre en évidence le rôle de l'appréhension du risque ou des institutions démocratiques dans nos décisions vis-à-vis des générations futures. Enfin, la maîtrise industrielle comme la gouvernance du projet, peu développées dans l'ESE alors qu'elles sont déterminantes pour la réussite du projet compte tenu des enjeux en matière de coût et de sécurité qu'elle impliquent, font l'objet de la section 4.4.

Ces deux grandes parties sont suivies d'une conclusion de la contre-expertise.

Le résumé avec des recommandations est présenté dans la section 2 ci-après.

2 Résumé et recommandations

Intérêts et limites de l'ESE Cigéo

L'ESE de Cigéo est une étude détaillée relative à la gestion des déchets nucléaires à vie longue qui s'inscrit dans le cadre du guide d'évaluation socioéconomique des investissements publics. Elle s'est interrogée sur les perspectives économiques au-delà des horizons habituels (2020–2600). Un travail novateur a été fait autour d'un scénario OK qui reste dans la continuité des prévisions macro-économiques à l'horizon 2100 et d'un scénario KO de basculement vers des sociétés dont les capacités techniques, économiques et institutionnelles seraient dégradées. Elle étend la période d'étude au-delà de l'horizon 2100 et elle évoque les enjeux réels pour les générations lointaines en termes d'impacts sanitaires et environnementaux.

La qualité de cette étude permet de disposer de jalons pour aller plus loin, mais on reste au milieu du gué : en s'imposant de rester dans le cadre des décisions déjà prises par les pouvoirs publics (lois de 2006 et 2016), le rapport ne retient pas comme alternative de Cigéo l'Entreposage de Longue Durée (ELD). Une partie substantielle de l'étude revient ainsi à comparer Cigéo à une solution pérenne « prospective », le forage profond, qui apparaît rapidement plus coûteuse et moins mature. Les taux de croissance et les taux d'actualisation ne sont pas cohérents entre eux, et surtout dans le cas de KO avec son narratif. Les impacts sanitaires et environnementaux sont seulement esquissés. L'ESE est de ce fait amenée à introduire une valeur tutélaire assurantielle relativement arbitraire pour permettre à Cigéo de dominer l'ELD. On a ainsi au total une étude dont la complexité est grande (six scénarios différents, tirages de Monte-Carlo), et peu adaptée à la question centrale.

Face à une problématique inédite, la contre-expertise propose de revenir d'abord sur la question qu'il faut résoudre : protéger les générations futures lointaines des risques des déchets nucléaires à vie longue. Pour mettre en première ligne la question des impacts sanitaires et environnementaux, elle retient l'ELD comme option de référence.

Enfin, elle propose de mieux caractériser les scénarios pertinents d'évolution de la société à très long terme ainsi que leurs paramètres-clés et leur interaction, et de les intégrer tous avec leurs incertitudes dans un scénario unique de référence.

L'intérêt de Cigéo par rapport à l'ELD comme option de référence, avec une méthode d'évaluation des risques adaptée à l'incertitude à long terme

L'ELD est à l'évidence moins coûteux que Cigéo si l'on est dans un scénario de croissance durable à très long terme, par exemple de l'ordre de 1 ou 1,5 % par an. Considérant des taux d'actualisation cohérents avec ces taux de croissance, dépenser au-delà de 2100 de l'ordre de 10 milliards d'euros par siècle (coûts de l'ELD) est préférable à dépenser 25 milliards les 100 prochaines années (coûts de Cigéo).

Au contraire, si l'on bascule dans un monde de stagnation séculaire ou millénaire, et donc avec des taux d'actualisation nuls à long terme, les coûts de l'ELD sommés sur plusieurs siècles vont l'emporter. Et plus encore, si l'on bascule dans un monde de décroissance et de fragilité institutionnelle, on aura alors à prendre en compte des risques sanitaires et environnementaux localement autour des entreposages non surveillés voire abandonnés. Le cumul des valorisations monétaires de ces impacts sur plusieurs siècles devient considérable.

En intégrant l'incertitude sur la prospérité de nos descendants directement dans l'analyse, nous proposons deux arguments en faveur de Cigéo. Dans l'argument « prudentiel », la possibilité d'une croissance chaotique, voire d'une décroissance, justifie d'actualiser les coûts futurs de l'ELD à un

taux faible. Dans l'argument « assurantiel », le fait que les dommages de l'ELD émergent dans les états du monde dans lesquels les générations futures affrontent simultanément bien d'autres maux conduit aussi à actualiser ces dommages espérés à un taux faible. On montre que, sous les hypothèses de notre modèle de référence, ces deux arguments conduisent à recommander Cigéo plutôt que l'ELD. Compte-tenu des incertitudes sur le paramétrage du modèle, il est important de conforter cette analyse en intégrant les conditions de réussite du projet.

La raison d'être de Cigéo est liée à sa capacité de protéger de façon passive les générations futures en cas de décroissance, et donc à la capacité de fermer le site dès que possible. Ce qui implique de ne mobiliser le concept de réversibilité qu'en précisant toujours sa signification, et uniquement lorsqu'il est pertinent au regard de l'objectif recherché pour les générations futures.

Le poids des investissements de la tranche 1 pourrait inciter à repousser l'échéance de quelques décennies, mais la probabilité même faible de scénario chaotique à l'horizon du siècle prochain comme celle de perte du site et des compétences industrielles (constituées ces dernières années) conduisent à recommander le lancement immédiat de Cigéo, en s'assurant des conditions de réussite du projet.

Cette recommandation rejoint les conclusions de l'ESE, mais en restant dans le cadre standard des analyses socio-économiques (en particulier cohérence des taux d'actualisation et des taux de croissance, pas de valeur tutélaire ad hoc), et en abordant de front la comparaison Cigéo-ELD. Notre analyse a permis en effet d'explicitier les raisons de l'intérêt de Cigéo, mais à condition d'en maîtriser les coûts et les délais.

Les conditions de réussite du projet : simplifier aujourd'hui pour protéger demain les générations futures

Les caractéristiques du projet conduisent à s'interroger sur ses conditions de réussite. Cigéo est un grand projet industriel complexe sur une durée atypique de plus d'un siècle, au confluent de multiples enjeux. Il entre, avec les étapes réglementaires en cours, dans une nouvelle dimension industrielle avec des conditions de réussite à respecter.

Le retour d'expérience de projets industriels de grande ampleur montre que la réussite de la mise en œuvre implique que le projet soit le plus simple possible, avec une gouvernance et une chaîne de décision lisibles, conçu pour atteindre des objectifs clairs : garantir la protection des générations lointaines à un coût optimisé pour les générations présentes.

Cette contre-expertise conclut en faveur de l'intérêt de Cigéo. Mais il faut s'assurer alors de le faire « vite » et « bien » en pensant aux générations futures et en maîtrisant les coûts et les délais. Des simplifications, des gains en robustesse ou les reports de travaux ne mettant pas en cause les objectifs de la phase industrielle pilote mais qui pourraient contribuer à la sécuriser méritent d'être étudiés.

Au-delà du rôle de chacun des acteurs institutionnels, la montée en responsabilité de l'Andra, maître d'ouvrage mais aussi futur exploitant nucléaire et donc premier responsable de la sûreté, est à accompagner et ses compétences à renforcer.

La concertation avec les territoires, enjeu très important du projet, devra permettre un développement local efficace, pour ne pas fragiliser sa légitimité dans la durée.

Enfin, l'examen de l'ESE spécifique au volet transport rappelle que le projet Cigéo s'inscrit dans un territoire et qu'il est essentiel de mener au cœur des processus de décision et de concertation, des analyses coûts-bénéfices socio-économiques et des analyses de risques pour optimiser les choix techniques structurants en objectivant ce qui est fait pour réduire les impacts environnementaux et sociaux pour les territoires et les générations présentes. L'ESE du volet transport gagnerait à être plus détaillée en adoptant une approche par composante des infrastructures de transport, de

manière à mieux appréhender les bénéfices qu'apporte chacun des éléments au bilan global, en particulier ceux relatifs à la Liaison Intersites.

Les enjeux et la durée du projet poussent à une forte intégration entre la maîtrise de la sûreté, la maîtrise du financement et la maîtrise industrielle. Les choix faits par la France s'inscrivent dans un modèle où les exploitants assurent le financement alors que les responsabilités de sûreté et opérationnelles sont confiées à l'Andra. Et c'est la tutelle qui a la responsabilité de ces trois domaines. Ce modèle, quasi unique dans le monde industriel, confère une responsabilité particulière à la puissance publique. Il faudra s'assurer dans ce cadre que les analyses coûts/bénéfices seront conduites avec rigueur et que la gouvernance permettra d'allouer des responsabilités claires concernant les coûts et les délais.

ESE et cohérence des choix publics d'investissements impliquant risques, incertitude et générations futures lointaines

Les conclusions de la contre-expertise sur Cigéo s'accompagnent enfin d'une conviction : le projet doit être replacé dans une vision de long terme plus globale de nos responsabilités vis-à-vis des générations futures lointaines et ainsi ne doit pas se réaliser « à tout prix ». Les déchets nucléaires HA et MA-VL ne sont en effet que l'un des domaines importants présentant des risques d'impacts sanitaires et environnementaux à très long terme. L'évolution du climat, de la biodiversité, des pandémies, des déchets industriels toxiques pour n'en citer que quelques-uns, appellent tous des investissements publics qui visent à protéger les générations futures lointaines. Cela doit réinterroger la part de « l'épargne juste » destinée aux générations futures en l'orientant vers ce qui sera le plus efficace.

Nous allons donc avoir besoin d'approches cohérentes face à ces enjeux : mobiliser les ressources de la prospective à long terme comme celles des diverses philosophies morales, développer l'étude des impacts sanitaires et environnementaux et des grilles d'analyse des risques, utiliser les méthodes d'évaluation socio-économique des risques adaptées, comparer les risques analogues (déchets nucléaires, et déchets industriels entreposés en surface et dont l'avenir est ouvert) ; mettre l'accent sur les risques majeurs (climat, biodiversité...) qui conditionnent les scénarios futurs eux-mêmes.

3 Analyse critique de l'ESE

3.1 Le projet Cigéo : son contexte, ses objectifs, et ses alternatives

Dans la présentation de l'investissement Cigéo et de ses objectifs, comme dans la détermination des alternatives et de l'option de référence, l'ESE choisit de se situer dans le cadre des décisions de 2006 et 2016, et donc de centrer l'essentiel de l'étude sur des « solutions pérennes » dont les bénéfices de sûreté pour les générations futures sont assurés et très proches. Ce point de départ diffère et limite dans l'ESE l'examen du thème de la valeur sociétale de cette sûreté par comparaison avec des solutions moins robustes dans des sociétés défaillantes comme l'Entreposage de Longue Durée (ELD) (chapitre 6, puis section 7.2.2 de l'ESE). Cette valeur de la sûreté à très long terme est pourtant au cœur de la raison d'être de Cigéo.

Cette limitation de l'essentiel de l'analyse aux solutions pérennes conduit également à un scénario de référence initialement focalisé sur les premières décennies, et s'écartant le moins possible des pratiques existantes.

La qualité du questionnement de cette longue étude permet de disposer de jalons pour aller plus loin, mais on reste au milieu du gué.

Face à une problématique inédite, la contre-expertise propose de revenir d'abord sur la question qu'il faut résoudre, protéger les générations futures lointaines des risques des déchets nucléaires à vie longue, puis de restituer rapidement l'histoire en France des réflexions et des décisions politiques (cf. §3.1.1). Histoire qui explique dans une certaine mesure le choix fait dans l'ESE de privilégier les solutions pérennes, et qui en indique aussi les limites. Cette compréhension du problème et de l'histoire conduit à proposer de retenir l'Entreposage de Longue Durée comme option de référence (et non des options sollicitant le « forage profond » trop coûteux et peu mature), et donc un scénario de référence qui intègre les possibles pertinents en termes d'évolution de la société à très long terme (y compris au-delà de 2600) (cf. §3.1.2). Ce qui implique d'une part de revenir sur la méthode d'évaluation (et les valeurs retenues sur les paramètres-clés, croissance, taux d'actualisation...) (cf. §3.4), et d'autre part sur les caractéristiques du projet Cigéo (« variantes internes ») et son pilotage (cf. §3.3). La longue période de fonctionnement (a priori de 2025 à 2155) comme la complexité industrielle de Cigéo posent en effet de nombreux défis, comme nous allons y revenir, notamment en matière de gouvernance.

3.1.1 Cigéo, « solution de référence » pour les déchets HA et MA-VL et ses objectifs.

Les déchets nucléaires HA et MA-VL

Les déchets nucléaires cumulés depuis plusieurs décennies en France représentent environ 2 millions de m³, de très faible activité à haute activité. À titre de comparaison, les déchets industriels toxiques mobilisent des volumes dans un rapport de l'ordre de 50 pour 1.

« Les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) ne représentent qu'environ 3 % des déchets radioactifs en volume, mais 99,8 % de la radioactivité des déchets radioactifs présents sur le territoire français » (page trois, ESE).

Les volumes de ces déchets HA et MA-VL sont limités : 10 000 m³ pour les HA, 70 000 m³ pour les MA-VL (donc au total 8 cubes de 10 m d'arête). Ils présentent des risques pour la santé, y compris à distance sans protection, surtout les 100 à 300 premières années avec des rayonnements γ et β ; puis ensuite dans la longue durée jusqu'à plusieurs dizaines ou centaines de milliers d'années en particulier du fait d'une radioactivité α décroissant lentement, et dangereuse pour l'homme en cas

d'ingestion ou d'inhalation. Ce sont alors des poisons à dose faible s'ils se retrouvent dans la chaîne alimentaire par exemple via les nappes phréatiques.

Les solutions de confinement retenues

Comme pour les déchets industriels toxiques (à vie infiniment longue), il faut pour se protéger d'abord détruire et recycler (inertiser ou transmuter) ce qui peut l'être, puis confiner soit en entreposage de surface ou de subsurface, soit en stockage géologique à plus ou moins grande profondeur dans des couches stables à très long terme et peu perméables à l'eau.

La France a choisi jusqu'à présent le « cycle fermé », et donc recycle l'uranium et le plutonium (dérivé de l'uranium 238) contenus dans le combustible usé, ce qui outre l'utilisation d'un potentiel énergétique important, présente l'intérêt d'enlever l'essentiel des actinides qui portent à long terme la plus forte radiotoxicité potentielle en α .

La gestion des déchets HA et MA-VL repose actuellement sur des solutions d'entreposage « temporaire », *i.e.* dont la durée de vie est de quelques décennies. Ces solutions sont sûres mais cette sûreté repose sur des systèmes actifs de surveillance-maintenance-protection, et sur le renouvellement des entreposages à l'échéance de leur durée de vie tant que l'on n'a pas mis en place de « solutions pérennes » (*i.e.* qui n'exigent plus l'intervention « active » de l'homme). En rester là suppose de transmettre aux générations futures lointaines les coûts de gestion et de renouvellement de ces entreposages, mais aussi des risques sanitaires et environnementaux au cas où elles ne disposeraient plus de compétences scientifiques et industrielles, de moyens économiques et d'institutions capables de mettre en œuvre cette gestion et ces renouvellements avec le niveau de qualité requis.

Le stockage géologique a pour objectif de répondre à cette préoccupation. En cohérence avec le choix de matrice et de colis adaptés aux types de déchets et en complément de ces deux barrières, il fournit une troisième barrière « passive » pour assurer le confinement des radionucléides et assurer à très long terme la protection de l'homme et de l'environnement (« solution pérenne »).

Après une longue maturation structurée par la loi de 1991 autour des trois axes de recherche pour des solutions à long terme – séparation-transmutation, entreposage de longue durée (ELD), et stockage géologique – les lois de 2006 et 2016 ont retenu le stockage géologique profond sur le site de Cigéo comme solution de référence pour la gestion à long terme des déchets.

Une rapide rétrospective

Des années 60 à la fin des années 80 : les scientifiques élaborent des solutions

Dès la fin des années 60 et le début des années 70, la communauté scientifique anticipe le développement significatif des usages nucléaires civils, énergie-médecine-industrie, et donc l'augmentation rapide de la quantité de déchets alors encore négligeable.

Les effets potentiels sur la santé et l'environnement, par la présence de la communauté médicale et le suivi des victimes d'Hiroshima et Nagasaki, font l'objet d'études plus rapidement que dans d'autres domaines. Dans un contexte de préoccupations émergentes fortes sur les risques liés aux déchets industriels chimiques, on réalise la nécessité de prêter une grande attention aux éléments contenus dans les colis, aux matrices utilisées pour « neutraliser » ce que l'on peut (en termes d'incendie ou d'explosion), aux matières choisies pour le colisage (éviter la corrosion, la lixiviation, etc.), et enfin, pour les stockages, développer une meilleure connaissance des propriétés des géologies (perméabilité...) et éviter les fragilités des anciennes zones minières (creuser beaucoup peut fragiliser la stabilité et favoriser la circulation de l'eau).

Ce contexte va permettre d'élaborer dès cette époque la plupart des idées qui seront développées ensuite : on met en place assez rapidement, par rapport à d'autres domaines industriels, des matrices, des colis et des entreposages adaptés aux différentes catégories de déchets. (Cf. par exemple thèses de Julie Blanck 2017, J. C. Petit 1993, etc.). Et on explore sur le plan scientifique les diverses géologies candidates (argile, sel, granite, etc.) pour avoir des solutions plus pérennes à la fois pour éviter d'avoir à renouveler tous les siècles des installations temporaires coûteuses, et être robuste à des sociétés futures plus fragiles.

De la loi de 1991 à la loi de 2006 : les trois axes de recherche et l'implication du politique (national et local).

À la fin des années 80, la poursuite des études géologiques amène les experts et les scientifiques dans les territoires concernés, et c'est la confrontation avec les deux dimensions politiques incontournables :

- locale : avec les questions légitimes des populations vivant à proximité sur les impacts à court et moyen termes de l'implantation d'un site de stockage ;
- nationale : ces décisions engagent l'image de notre responsabilité vis-à-vis des générations futures lointaines, et donc aussi nos positions sur les évolutions possibles de notre société, les perspectives de progrès et le rôle de la science. Elles engagent aussi l'attitude vis-à-vis de l'avenir du nucléaire.

C'est le sens de la mission que Michel Rocard (Premier Ministre), confie à Christian Bataille (député), de remettre les politiques, le Parlement comme les territoires, au centre du jeu.

La loi de 1991 en tire les conséquences : il n'y a aucune urgence puisque les déchets sont correctement gérés (on va continuer par ailleurs à progresser sur cette gestion, avec en particulier la mise en place dans les années 2000 du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) sous l'autorité de l'ASN (Autorité de sûreté nucléaire) et de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGECC)) ; il faut au contraire prendre acte d'abord des incertitudes encore présentes sur le champ des possibles techniques et scientifiques et donc d'abord se donner le temps – 15 ans – de la recherche appliquée sur les trois axes, séparation-transmutation, ELD, stockage géologique. Et ensuite, sur le stockage, mettre les préoccupations des territoires au centre de la problématique. La gouvernance sur cette période 1991–2006 est alors logiquement politique et scientifique, avec le support de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) et de la Commission Nationale d'Evaluation (CNE) au niveau national, et du Comité local d'information et de suivi (CLIS) au niveau local.

La « réversibilité » est au cœur des débats, avec sa dimension polysémique qui n'évite pas toujours les ambiguïtés (cf. le rapport CNE 1998). Il semble intéressant de bien distinguer trois significations différentes également importantes dans cette période :

- son sens le plus large d'ouverture du champ des possibles, en cherchant à réduire les incertitudes sur les options diverses par la Recherche. On ouvre et précise les options pour permettre aux générations présentes de prendre des décisions informées. (Sens cohérent avec le principe de précaution introduit dans la Charte sur l'environnement à la fin de cette période) ;
- Son sens plus concret de récupérabilité des colis en cas de problème, tant que le stockage est testé, puis en exploitation, avant fermeture. Afin d'éviter les défauts observés dans d'autres situations analogues (Stocamine en France, Asse en Allemagne, etc.) ;
- et enfin, dernière signification, importante : il s'agit de mettre en place un processus par étapes où le politique garde la main pour tenir compte en particulier des évolutions possibles de la stratégie nucléaire et de l'inventaire des déchets à stocker associés (arrêt ou non du nucléaire, cycle ouvert ou fermé). Point important et qui permet de déconnecter le débat sur le stockage des déchets de celui sur l'avenir du nucléaire, puisqu'il faudra de

toute façon s'occuper des déchets déjà existants (l'essentiel de l'inventaire de référence de Cigéo).

Les lois de 2006 et 2016 : Cigéo « solution de référence » et le passage progressif à un projet industriel.

La loi de 2006 (et l'avis de février 2006 de l'ASN qui d'une certaine façon l'accompagne) traduit les enseignements des 15 années de recherche (effort significatif de l'ordre d'un peu plus de 3 milliards d'euros) : la séparation-transmutation au-delà de l'uranium et du plutonium ne sera pas mûre dans le siècle qui vient et ne change pas la nécessité d'avoir des solutions d'entreposage ou de stockage pérennes, l'ELD n'est pas retenue comme solution robuste à des sociétés plus fragiles (à ce stade, nous n'avons pas pu trouver sur ce sujet d'analyse, ni examiner les travaux du CEA et de l'ASN-IRSN), par contre le dossier « Argile 2005 » montre bien les qualités du site du futur Cigéo. Le site de Meuse-Haute-Marne dispose d'une géologie favorable. Les coûts encore incertains à ce stade préliminaire (et pour un inventaire différent de celui d'aujourd'hui), d'environ 15 milliards, apparaissent limités au regard de ceux des entreposages.

La possibilité de basculer vers des sociétés plus « fragiles » n'apparaît pas très prégnante, mais ces résultats sur le plan de la sûreté, et ces perspectives sur les coûts, poussent à retenir Cigéo comme « solution de référence », et à se donner un calendrier qui permet de s'appuyer sur les positions plutôt favorables des territoires, et sur les compétences existantes dans la filière nucléaire et en cours de mise en place à l'ANDRA pour la réalisation effective du projet.

Il semble qu'une véritable analyse coûts-bénéfices n'a pas été réalisée alors ; et en tout cas pas sur la base du coût de 26 milliards d'euros 2019 retenu aujourd'hui, et sans doute pas non plus avec les mêmes anticipations de basculement à long terme de la société dans une situation économique, institutionnelle, technique défavorable.

Cette période est aussi celle du passage à un projet industriel dont le cahier des charges se constitue progressivement. Il devra recevoir non seulement les déchets HA, les plus radioactifs, mais aussi les déchets MA-VL avec leur diversité.

L'ASN précise avec l'appui de l'IRSN ses règles en termes de sûreté, elle rappelle dans son avis de 2006 qu'il s'agit d'un stockage réversible (pour certaines significations précises de ce terme), mais qu'il faudra pouvoir le fermer clairement si l'on ne veut pas perdre ses vertus de protection pour les générations futures. Les formes que vont revêtir les exigences de réversibilité, les exigences de l'ASN, le périmètre de l'inventaire vont bien sûr impacter le design, sa complexité, sa constructibilité et les coûts associés (26 milliards d'euros 2019 à partir de 2020, en cohérence avec la décision de la ministre en 2016).

On mesure au travers de l'évolution des estimations des coûts (autour de 15 milliards au début des années 2000, de 35 milliards pour le chiffrage esquisse de l'ANDRA en 2014, puis de 26 milliards d'euros en 2016 fixés par le ministre comme coûts-objectifs après examen d'une partie des optimisations possibles, cf. pages 113 et suivantes dans l'ESE), la complexité de ce projet industriel dont la durée couvre plus d'un siècle, et dont la moitié des coûts sont des investissements. La qualité des options retenues au niveau du design (simplicité, robustesse au regard des objectifs du projet), et la qualité du pilotage industriel sont au cœur de la capacité à délivrer la protection attendue pour les générations futures lointaines, en lien avec la maîtrise des coûts et des délais.

La capacité à conduire des analyses coûts-bénéfices (au sens large) sur ces options-clés suffisamment en amont pour contribuer à cette qualité du processus de mise en œuvre, permettrait aussi de nourrir en aval les Analyses socio-économiques (cf. § 3.3 et 4.4).

Il s'agit donc aussi de s'assurer que la gouvernance est bien adaptée à ces nouveaux enjeux d'un grand projet industriel complexe.

3.1.2 Alternatives techniques et option de référence, scénario de référence

Alternatives techniques et option de référence

Le cheminement de l'ESE

Que ferait-on si l'on renonçait à Cigéo ? Quelles sont les alternatives techniques, et quelle serait « l'option de référence » ?

L'ESE s'inscrit dans la logique des décisions passées, d'abord des lois de 2006 et 2016 qui privilégient les solutions pérennes, *i.e.* celles qui protègent les générations futures lointaines et qui leur évitent d'avoir à mettre en œuvre elles-mêmes les investissements nécessaires. La séparation-transmutation peut contribuer à la diminution de l'inventaire, mais il apparaît clairement qu'elle ne suffit pas pour le supprimer. En mettant pour l'instant de côté l'Entreposage de Longue Durée pour des raisons de sûreté, il ne reste donc que le stockage géologique.

L'histoire des recherches successives de site en France (comme dans d'autres pays) montre qu'il y a d'autres possibilités potentiellement intéressantes dans le granite, le sel, l'argile, etc. Mais ces recherches ont été abandonnées en France (dernière décision en 1998 d'abandon du granite dans la Vienne, et de l'argile dans le Gard, par le gouvernement), surtout parce que le site de Cigéo apparaissait être le plus prometteur sur le plan de la qualité de son argile, et aussi du fait de l'attitude ouverte des territoires, des populations comme des élus.

Là aussi, l'ESE s'inscrit dans le cadre des décisions passées et donc n'évoque pas ces alternatives. Elle propose donc, sur la base d'une étude de l'IRSN sur les alternatives possibles, de retenir la seule autre hypothèse actuellement évoquée dans certains pays comme les États-Unis : le « forage profond » (*deep borehole*) dans le socle cristallin à environ 3 000 à 4 000 m de profondeur (presque 10 fois plus profond que Cigéo). Cette technique, utilisant les progrès réalisés ces dernières décennies par le secteur pétrolier et gazier, ne permet pas a priori la récupérabilité des colis, et suppose de fermer le forage rapidement une fois les colis descendus. En revanche elle peut préserver la réversibilité dans sa signification de processus par étapes dans la mesure où elle est modulaire, chaque forage permet de stocker un petit nombre de colis, puis on recommence un peu plus loin. Tout ceci explique par ailleurs son intérêt pour des petits volumes, et des déchets avec des colis de taille réduite. Mais cette technique présente clairement au stade actuel les mêmes problèmes d'acceptation par les populations locales que le stockage « type Cigéo », des coûts plus importants liés à la grande profondeur et surtout dans les cas de colis de volumes importants, et des incertitudes beaucoup plus grandes liées à son manque de maturité.

Au seul vu de ses coûts bruts prévisionnels retenus dans l'ESE, elle apparaît ainsi d'emblée clairement dominée par Cigéo. D'où l'échec des options de projet 2 et 3 qui s'appuient sur le « forage profond » tout en engageant tout de suite la tranche 1 de Cigéo pour garantir aux générations futures une solution pérenne au cas où la technologie alternative ne serait pas trouvée, ou qu'elle serait trop coûteuse.

Pour se donner une chance d'avoir une alternative crédible face à Cigéo, en mobilisant toujours le « forage profond », l'ESE va construire l'option de projet 4. Cette option retrouve un intérêt économique à l'avenir car on accepte alors la possibilité d'un échec de la maîtrise de la technologie de « forage profond » (comme de la capacité à retrouver la disponibilité d'un site de stockage géologique du « type Cigéo »). Et dans ces situations d'échec, on mobilise l'Entreposage de Longue Durée qui s'avère plus intéressant sur le plan économique dès que l'on utilise à très long terme des taux d'actualisation « usuels ».

Remarques sur l'option de référence dans l'ESE

Cette option de référence est au fond d'abord recherchée dans un mix de deux « solutions pérennes », Cigéo et « forage profond », les options de projets 2 et 3 de l'ESE, mais qui apparaissent disqualifiées avant même tout calcul actualisé (cf. 3.2). Elle est ensuite recherchée dans un mix entre « forage profond » et ELD (avec stockage géologique du « type Cigéo » au cas où), dont l'intérêt principal vis-à-vis de Cigéo provient de l'ELD, directement dans les « branches » où il apparaît, et indirectement en permettant le décalage dans le temps des investissements lourds des stockages dans les « branches » où ils sont développés.

Ce cheminement présente l'intérêt de reconvoquer de façon indirecte l'ELD dans l'étude, d'avoir à en esquisser les coûts et les risques en terme sanitaires et environnementaux selon les évolutions des sociétés, et donc d'avoir à construire un scénario de référence qui va au-delà de la date prévue (2155) de l'achèvement de Cigéo ou du « forage profond » dans les options de projet 1, 2 et 3, et s'intéresse ainsi explicitement à la période 2020–2600 et aux générations futures lointaines.

Il aurait été plus simple de s'écarter du strict cadre de la Loi et de retenir l'ELD comme l'option de référence, « (...) *situation contrefactuelle qui est la situation qui prévaudrait dans le cas où l'investissement considéré ne serait pas réalisé* ». (Page 15 Guide l'évaluation socio-économique des investissements publics, décembre 2017). Ce qui permettrait de simplifier la structure du rapport et de réaliser avec les approfondissements utiles les analyses socio-économiques comparant Cigéo à l'ELD qui n'avaient pas été développées explicitement en 2006 et 2016, en prenant en compte les caractéristiques actualisées de Cigéo (en particulier son niveau de coût) comme la vision actuelle des mondes possibles à très long terme.

Scénario économique de référence

L'approche de l'ESE

On ne peut résoudre le problème de la valeur d'un bénéfice futur sans le contextualiser dans le cadre économique dans lequel ce bénéfice se matérialisera. Pour prendre en compte l'ELD même « marginalement », l'ESE a donc été amenée à s'interroger sur les perspectives économiques au-delà des horizons habituels (2020–2600).

Il faut pouvoir actualiser les coûts de renouvellement et d'exploitation des entreposages à ces horizons, et donc disposer des paramètres-clés que sont en particulier le taux de croissance et l'évolution des prix relatifs des rubriques de coûts des options de projet par rapport au PIB. Mais il faut aussi un scénario de référence qui permette de penser et de valoriser les impacts sanitaires et environnementaux liés à l'abandon partiel ou total de la gestion de ces entreposages. Cela conduit l'ESE à envisager la possibilité de basculement vers des sociétés dont les capacités techniques, économiques et institutionnelles seraient insuffisantes pour éviter cet abandon partiel ou total dans la durée : ce que l'ESE appelle le scénario KO, pour l'opposer au scénario OK qui reste dans la continuité de nos prévisions macro-économiques à horizon 2100.

L'ESE va ainsi conduire ses évaluations sur la base de six (2×3) scénarios, avec trois variantes de taux d'actualisation – haut, intermédiaire et bas – (et les variantes d'élasticité des prix relatifs des coûts de génie civil et de recherche et développement associées à celle des taux). La prise en compte d'un scénario de croissance chaotique constitue un apport déterminant du rapport ESE.

Vers un scénario de référence permettant de mieux évaluer les avantages respectifs de Cigéo et de l'ELD

Là encore, les pistes ouvertes sont intéressantes, en particulier l'introduction du monde possible KO, mais on reste au milieu du gué avec une complexité additionnelle liée à cette multiplicité de scénarios.

Il faut d'abord s'intéresser plus clairement aux deux « situations-types » pour lesquelles on pourrait préférer pour les générations futures lointaines le stockage géologique plutôt que l'ELD :

- ce sont d'abord des scénarios de croissance pour encore un ou quelques siècles, puis l'atteinte de limites à la croissance avec l'instauration d'une stagnation pluri-séculaire et pluri-millénaire. Et donc des taux d'actualisation à très long terme convergeant vers 0 %. Or ces déchets nucléaires doivent être confinés de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers d'années au moins. Cela impliquerait donc des montants considérables liés à la récurrence des coûts d'entreposage sur la très longue durée. Avec de telles perspectives, l'hypothèse d'une prospérité meilleure pour les générations futures ne compense pas la rémanence sur plusieurs centaines de milliers d'années des coûts de gestion de l'entreposage ;
- ce sont ensuite des scénarios de décroissance prononcée et longue, avec possibilité de division par deux ou trois du PIB par tête de la France puis stagnation pluri-séculaire à ce niveau bas. C'est en fait ce qui correspondrait au narratif de KO et à la possibilité d'entreposage de surface laissé « à l'abandon » ou mal entretenu. On aurait alors des risques d'accidents plus élevés avec des impacts sanitaires et environnementaux localement sur de très longues durées, i.e. sans capacité technique de prévenir ex ante et de prendre ex post des contre-mesures (évacuation des populations, décontamination des sols). C'est l'argument de sûreté qui favorise l'option Cigéo.

Cependant, les taux de croissance du scénario KO dans l'ESE (1,2 % en 2020, diminution continue jusqu'à atteindre 0 % en 2100, puis stable à ce niveau jusqu'en 2600) ne traduisent pas cette décroissance prononcée. Ils conduisent en effet à un niveau de PIB à l'horizon 2100 de 75 % supérieur à celui d'aujourd'hui, ce qui ne constitue pas vraiment une illustration de ce que pourrait être une société chaotique. Société chaotique qui pourrait pourtant être cohérente avec la littérature d'histoire économique évoquée pages 59 et 60 à juste titre :

« (...) la littérature présentée dans le précédent chapitre suggère qu'une dégradation économique progressive mais très durable, sous l'effet des multiples facteurs de crise qui s'accumulent à l'horizon de la seconde moitié du siècle, finirait par entraîner une régression institutionnelle difficile à imaginer aujourd'hui » (ESE page 61).

Une partie des opinions publiques intègre en effet dans sa vision du futur des scénarios de régression économique bien plus prononcés que ce que représente le régime KO de l'ESE. Ils sont aussi apparents dans la reconnaissance des faits historiques depuis l'apparition de l'homme sur Terre, dont celle des graves crises de civilisation : chute de l'empire romain, épidémie de peste du XIV^e siècle, stagnation millénaire, etc. Par ailleurs, l'arrêt de la période d'étude en 2600 et la méthode d'évaluation retenue¹ (avec ses six scénarios et les taux d'actualisation associés) empêchent de

¹ Cf. en particulier le calcul des taux d'actualisation avec la présence implicite d'un taux de préférence pur pour le présent, plus l'ajout du terme $\beta\varphi$ (cf. globalement le § 3.4 sur la méthode d'évaluation et une analyse de ces paramètres-clés)

représenter réellement les effets de long terme sur l'évaluation de l'ELD des deux « situations-types » évoquées ci-dessus.

Enfin les taux de croissance du scénario OK, fondés sur ceux du COR (version 2017) jusqu'en 2060, et sur une prolongation du niveau atteint sur la décennie 2050 à 2060, de 1,24 % à l'horizon 2600, aboutit à un PIB/tête de 40 millions d'euros en 2600 (plus de 1000 fois le niveau actuel). Chiffre justement pointé page 58, mais sur lequel on doit s'interroger au-delà du simple rappel que le PIB/tête français a été multiplié par 23 entre le début du XVIIIe siècle et aujourd'hui : les 1500 années qui ont précédé le début du XVIIIe siècle n'ont pas vu le PIB/tête français ou gallo-romain multiplié par 50. Or, ici, le taux de croissance via le taux d'actualisation sert à éclairer des décisions. C'est sans doute la prudence suscitée par ce constat non formulé qui aura conduit à des variantes intermédiaires et basses pour le taux d'actualisation. Mais, outre leur aspect « ad hoc », elles ne permettent pas de prendre en compte réellement ces dimensions, à un moment où l'évolution climatique, l'affrontement géopolitique Chine-États-Unis, le terrorisme, les débats sur le potentiel économique de nos innovations, parmi d'autres facteurs, conduisent à s'interroger sur des ruptures défavorables à 100 ou 150 ans, et à une réelle ouverture du champ des possibles au-delà.

La rencontre de ces interrogations des prospectivistes sur les perspectives à plusieurs siècles et des avantages respectifs du stockage géologique et de l'ELD pourrait suggérer le scénario de référence suivant : un scénario de croissance du type OK, mais dont la croissance diminue très progressivement vers zéro, avec un horizon que l'on prendra très éloigné, et non 2600 trop proche. Et des probabilités de passage dans deux mondes différents qui correspondent aux deux « situations-types » : un monde de stagnation à 0 %, un monde de décroissance puis de stagnation à un niveau de PIB/tête inférieur à celui des Français en 1950. Ces probabilités sont faibles, mais une fois qu'on a changé de monde on y reste en espérance longtemps, le temps des civilisations, entre 500 et 3 000 ans (avec une hystérésis significative) avant d'avoir une chance raisonnable de revenir sur un rythme « OK ». Ces probabilités de passage vers des mondes défavorables étaient sans doute perçues comme très basses il y a 20 ou 30 ans. Elles apparaissent comme faibles aujourd'hui encore, mais plutôt en croissance.

L'intuition suggère que dans un tel contexte, la décision de faire Cigéo (toutes choses égales d'ailleurs) devrait être prise au moment où ces probabilités dépasseraient un certain seuil à déterminer (cf. 3.4, 4.1 et 4.2).

De l'alternative Cigéo/ELD à des « variantes de Cigéo », et à sa gouvernance

Le paradoxe, c'est alors que, plus les perspectives à long terme s'assombrissent, plus il faut investir pour protéger les générations futures des conséquences de nos impérities. En effet, les déchets nucléaires ne sont pas la seule cause de préoccupations pour les générations futures lointaines. D'autres domaines (biodiversité, déchets industriels toxiques, défense, éducation, infrastructures, etc.) posent les mêmes problèmes liés aux conséquences de nos choix sur les générations futures non seulement proches (à 100 ou 150 ans), mais aussi lointaines (au-delà en termes de siècles ou de millénaires). Ils n'ont quasiment pas été explorés jusque-là, y compris dans des domaines comme celui de l'évolution du climat que les groupes 2 et 3 du GIEC (Impacts sur les sociétés, adaptation et mitigation), à la différence des scientifiques du climat du groupe 1, n'ont le plus souvent étudiés que sur les 100 à 150 prochaines années. Les ressources présentes étant limitées, il faudra s'interroger alors sur la cohérence de nos choix et des investissements associés dans ces différents domaines concernant le futur lointain. (Cf. 4.3).

À ce stade où la question des déchets nucléaires est pratiquement la seule à prendre en compte des impacts à très long terme, il faut éviter les effets pervers qui justifieraient une dérive à la hausse du coût de stockage à chaque fois que la probabilité de scénarios défavorables augmente. Il sera donc important de vérifier que la gouvernance de Cigéo permet de réduire les risques de dérives sur les coûts, sur la sûreté, et sur la capacité à réaliser effectivement le projet (cf. 4.3 et 4.4).

Dans le fil de cette discussion, il serait utile aussi d'élargir le champ des alternatives à des « variantes internes de Cigéo », en revenant sur tout ce qui peut permettre de rendre le projet plus simple et plus robuste, tant dans ses options techniques ou de son planning que de ses processus de décision et sa gouvernance (cf. 3.3 et 4.4).

3.2 Les coûts « bruts » des différentes alternatives et des options de projet associées

Les données sur les « coûts bruts » fournies dans l'ESE sont riches, mais disséminées dans l'ensemble du rapport et en particulier dans le chapitre 5. Cela vaudrait la peine de rapprocher de façon plus synthétique les principaux ordres de grandeur qui permettent alors d'anticiper les principaux résultats et d'approfondir la problématique.

On développe ici quelques illustrations qui nourrissent une première discussion sur les options de projet. Cette partie plus précise sur les coûts de Cigéo et de ses alternatives confirme les suggestions du paragraphe précédent.

Elle nous conduit à privilégier l'ELD comme option de référence, et à ne pas retenir le « forage profond » comme alternative crédible. Elle incite aussi à regarder de plus près les coûts et les choix techniques sous-jacents (matrices/colis/entreposage, surface-sous-surface) de l'ELD, ainsi qu'à tenter de mieux décrire les réels impacts sanitaires et environnementaux de cette option dans une société dépourvue de capacités institutionnelles et techniques de gestion et de renouvellement de ces ouvrages.

Elle engage enfin à expliciter les options techniques retenues qui expliquent les évolutions des estimations de coûts de Cigéo ces dernières années, et à examiner les principales options encore ouvertes (en particulier en phase T1 et Phipil) qui pourraient constituer des « variantes internes » du projet.

3.2.1 Les coûts de Cigéo : l'option de projet 1

Trois décompositions des coûts de Cigéo

Le coût du projet se monterait à 26 milliards d'euros 2019 de 2020 à 2155, sur environ 130 ans, dont la moitié d'investissement (13 milliards), un quart de fonctionnement (6,5 milliards), et aussi une part significative de fiscalité (12 %, presque 3 milliards) et de maîtrise d'ouvrage-maîtrise d'œuvre, (presque 10 %, 2,5 milliards) (cf. page 143). Il faut ajouter à ces 26 milliards 1,5 milliards pour le transport des colis jusqu'au site et à l'intérieur du site, et 420 millions d'euros de GIP pour les collectivités locales de 2019 à 2025 (cf. page 142).

Il faut rappeler que ce coût de Cigéo est un coût « objectif » incluant de nombreuses optimisations et non une estimation du coût « réel » de Cigéo (voir guide méthodologique de l'ESE). Il aurait été utile de rappeler dans l'ESE les évolutions dans le temps de ces estimations, les raisons qui ont conduit au coût objectif de 26 milliards et de discuter des risques/opportunités auxquels le projet va devoir faire face.

On peut aussi décomposer ces 26 milliards dans le temps :

- de 2021 à 2040, la première étape, la tranche T1 (2021–2034), accompagnée de la phase Phipil (la « phase pilote » de 2034 à 2040), respectivement de 7 et 3 milliards, donc 10 milliards au total relèvent de l'exécutif suite à l'approbation de la DUP, puis de la DAC par l'ASN ;
- la deuxième étape permet le stockage des MA-VL de 2040 à 2100, elle est déclenchée après le vote d'une loi autorisant la MSI de Cigéo après le retour d'expérience de la Phipil : de l'ordre de 5 milliards d'euros.
- et la troisième étape, le stockage des HA de 2080 à 2145 pour 11 milliards d'euros.

Une troisième décomposition peut être esquissée sur la base du tableau des pages 116 et 117, qui fournit les coûts pour Cigéo selon qu'on utilise le site pour les seuls déchets HA versus MA-VL, ou pour les deux catégories à la fois. Ce tableau permet en effet un premier pas vers une distinction entre coûts fixes communs pour une part, (T1+Phipil), et coûts d'investissement et d'exploitation spécifiques à chaque catégorie de déchets et proportionnels, dénotés « MA-VL stricto sensu » et « HA stricto sensu » ci-dessous.

Tableau 1 : Coûts fixes et coûts variables de Cigéo

Amplitude du projet	Somme des coûts bruts non actualisés
T1+Phipil	10 milliards d'euros
MA-VL seulement à Cigéo*	15 milliards = 10 T1+Phipil +5 MA-VL stricto sensu
HA+MA-VL à Cigéo	26 milliards = 10 + 5+ 11 HA stricto sensu
HA seuls à Cigéo	16 milliards = 5 pour l'équivalent Phipil+T1 pour HA seuls + 11 HA stricto sensu

**Que l'on envisage ou non de mettre les HA ensuite avec les MA-VL.*

Source : Rapport ESE

On observe que les coûts fixes (T1+Phipil : installations de surface, descenderie, puits...) semblent dimensionnés par les MA-VL dont les volumes globaux, et volumes unitaires des colis y compris conteneurs (et les exigences de manutention associées), sont bien supérieurs aux HA : 10 milliards pour les MA-VL seuls comme avec les HA, contre 5 milliards pour les HA seuls. A l'inverse, les déchets HA, bien que pesant 7 fois moins en volume, occupent une surface en profondeur beaucoup plus importante : leurs caractéristiques thermiques exigent un système de galeries et d'alvéoles plus étendu et au total deux fois plus coûteux, 11 milliards contre 5 seulement pour les MA-VL. Ces deux remarques devraient être probablement précisées et nuancées au vu de données plus complètes : une partie des coûts fixes nécessaires aux seuls HA (installations de surface...) est en effet peut-être comprise dans les 11 milliards.

A ce stade, superficiel en l'absence de données précises sur le contenu industriel de ces dépenses, on peut se demander s'il n'existerait pas des solutions moins coûteuses et adaptées aux MA-VL, moins radioactifs et plus importants en nombre et en volumes (impliquant des manutentions plus importantes), comme des stockages en moindre profondeur ou en subsurface. Et on peut aussi remarquer qu'il n'y aurait quasiment aucun surcoût à stocker en même temps les déchets HA et MA-VL compte tenu de la distinction nette entre les installations de surface et les deux zones en profondeur, et du dimensionnement en termes de manutention par les seuls volumes MA-VL, au lieu de stocker les MA-VL quarante ans plus tôt et donc de dépenser les coûts fixes de tranche 1 et de Phipil quarante ans plus tôt également.

Deux questions

Au vu des montants de ces trois décompositions apparaissent d'emblée deux questions, l'opportunité de « variantes internes » de Cigéo, et la gouvernance des risques de ce projet :

Le poids des coûts fixes, et l'intérêt d'explicitier des « variantes internes » possibles des design-échancier-périmètre de Cigéo

- le poids de la T1+Phipil est considérable, plus du tiers des coûts, et près des deux tiers des investissements : on trouve en particulier l'impact d'une installation de surface « nucléaire » et d'un système de descenderie et de transport des colis complexes et de grande taille, et des volumes d'ingénierie très significatifs ;
- cette remarque pourrait suggérer d'examiner dans les alternatives des variantes de Cigéo, où l'on reviendrait par exemple sur le timing du stockage, en prolongeant l'entreposage temporaire des MA-VL pour décaler leur stockage de 2040 à 2080 et le synchroniser avec les déchets HA ; ou en envisageant des solutions de stockage en subsurface peut être adaptées à une part de ces MA-VL ; ou encore, si l'on pense que cela rendrait difficile de conserver le site pour les déchets HA, en examinant des optimisations-simplifications possibles de cette première étape.

La présence de risques importants sur la maîtrise de certaines rubriques, et la gouvernance du projet.

- la fiscalité, 3 milliards d'euros en intégrant les fonds des GIP jusqu'en 2025. Ces derniers sont de l'ordre de 60 millions d'euros par an, les prolonger 50 ans doublerait le poids d'une fiscalité déjà lourde. Une concertation est en cours avec les parties prenantes locales sur les formes que pourrait prendre cette fiscalité afin de contribuer efficacement au développement local, tout en maîtrisant le poids global de ces prélèvements sur le coût du projet ; poids qui, s'il était prohibitif, fragiliserait sa légitimité dans la durée. Il est en effet essentiel de compenser les populations locales de façon efficace pour les impacts de toute nature engendrés par Cigéo ;
- les programmes de recherche et développement concernant ces déchets : rien dans le dossier n'est pour le moment précisé concernant ce sujet, et en particulier le devenir du laboratoire souterrain. Le « ticket » pour la recherche et développement au vu des dépenses 1990–2006 (suite à la loi de 1991) est de l'ordre de 70 millions par an par « axe », presque 1 milliard par décennie. Il est donc important de cibler cette recherche et développement appliquée pour qu'elle soit vraiment efficace pour les générations futures, et cohérente avec la stratégie nucléaire et les décisions qui seront prises sur Cigéo.
- Enfin l'importance des coûts de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre rappelle, s'il en était besoin, qu'il s'agit d'un projet de grande taille « tête de série unique » (montant d'investissement de l'ordre de 13 milliards), et qui de plus, doit se déployer sur une durée atypique (130 ans). D'où des risques de dérives, ou même d'échec, en cas de gouvernance défailante en particulier de sa dimension industrielle, et de l'absence de cohérence des responsabilités sûreté, industrielle et financière dans la chaîne de décision opérationnelle. (cf. ci-dessous le paragraphe 3.3).

3.2.2 Les coûts du « forage profond » (*deep borehole*) et les options de projet 2 et 3

Les coûts du « forage profond »

Ces techniques de stockage en grande profondeur (socle cristallin vers 3000–4000 m) évoquées depuis longtemps aux États-Unis (cf. en particulier le MIT) ont trouvé un écho ces dernières années en bénéficiant de certains progrès sur les forages verticaux et horizontaux réalisés dans le

domaine pétrolier (pétrole et gaz de schiste). Cette technique pourrait être utile pour des déchets en petite quantité grâce à sa modularité (peu d'installation en surface de grande taille, on duplique les forages), de volume faible (les diamètres de forage à cette profondeur sont faibles), et de radioactivité forte dans la durée (sous réserve de vérifier l'effectivité de la barrière géologique et des scellements). Elle suppose a priori de fermer le stockage à chaque fois qu'il est rempli, elle est donc a priori irréversible et ne prévoit pas de récupérer les colis. C'est pourquoi elle est davantage explorée par des petits pays et également aux États-Unis dans l'éventualité de sites locaux multiples pour différents Etats, et pour des colis de faible volume et particulièrement radioactifs comme les combustibles usés en cycle ouvert.

L'estimation des coûts retenue dans l'ESE semble, au vu des études encore limitées sur cette technologie pour laquelle on ne dispose pas de projet à l'échelle industrielle, plutôt optimiste. L'ESE justifie cet optimisme par la volonté de ne pas avantager Cigéo, et présente le forage profond surtout comme représentatif d'une possible future technologie. Les coûts de forage seraient de 10 milliards d'euros 2019 pour les déchets HA. Ces coûts étant à peu près proportionnels aux volumes, ils pourraient être de 70 milliards d'euros pour les MA-VL ; l'ESE propose d'utiliser une technique de densification (sur laquelle travaille le CEA pour transformer certains déchets et dont la faisabilité et les coûts ne sont pas acquis) des déchets MA-VL en vue de diviser quasiment par deux leur volume. Le coût de forage serait alors ramené à 37 milliards d'euros. Il faut ajouter au coût des MA-VL, environ 1,5 milliards (estimation sans doute optimiste) pour les densifier, et aux déchets HA et MA-VL des « coûts annexes » d'environ 1,5 milliards pour chacun. On a donc un coût de stockage des déchets HA de 11,5 milliards, et de 40 milliards pour les déchets MA-VL.

L'ESE ajoute des coûts de recherche et développement pour mettre au point la technologie de 3,5 milliards pour les HA comme pour les MA-VL (70 millions par an des coûts de chaque « axe » de la loi Bataille de 1991 à 2006, sur 50 ans), et des coûts de recherche de site de 6,3 milliards calés sur le cumul des coûts des années 80 à 2025 pour trouver et sécuriser le site de Cigéo.

Comparaison des coûts du « forage profond » et de Cigéo dans l'ESE

On a donc un ordre de grandeur de 20 milliards pour le stockage des déchets HA, et de 50 milliards pour les déchets MA-VL. Ce sont des coûts un peu supérieurs à ceux des seuls HA dans Cigéo (16 milliards, donc + 4 milliards de surcoûts), et très supérieurs à ceux des seuls MA-VL dans Cigéo (15 milliards, donc + 35 milliards de surcoût). Par ailleurs la densification des déchets MA-VL, et surtout la qualification des qualités de la géologie à des profondeurs beaucoup plus importantes que Cigéo constituent deux défis inédits : les exigences de connaissances de la géologie pour simuler ses capacités à retenir les actinides ou les produits de fission sont beaucoup plus fortes que celles mises en œuvre pour la prospection et l'exploitation du pétrole ou du gaz. Même si l'on a sans doute compté deux fois certaines rubriques « historiques » dans les coûts de recherche et développement et les coûts de recherche du site, il est probable que ces sommes sont optimistes au regard de ces défis.

Imaginons enfin de mettre le projet Cigéo et le « forage profond » sur la même ligne de départ : il faut alors rajouter à Cigéo des dépenses de recherche et développement et de recherche de site des trois dernières décennies de l'ordre de 6 milliards d'euros :

- on voit que les coûts bruts de Cigéo et du « forage profond » sont de niveau comparable pour les seuls déchets HA, 20 milliards pour le « forage profond » et 22 milliards pour Cigéo (le « forage profond » étant bien sûr plus risqué) ;
- pour les MA-VL seuls, ils sont toujours deux fois moins importants pour Cigéo, 21 milliards contre 50 milliards ;
- et donc l'avantage est également fort pour HA +MA-VL, 26 milliards pour Cigéo contre 64 milliards pour le « forage profond ».

La conclusion provisoire apparaît d'emblée très défavorable (d'autant que la réduction d'un facteur 2 des volumes et donc des coûts des MA-VL n'est pas acquise, et que les centaines de forages, sinon plus, à réaliser ne seront pas sans provoquer des interrogations localement).

Il nous faut donc regarder de plus près les options de projet 2 et 3 et leur intérêt par rapport à l'option de projet 1.

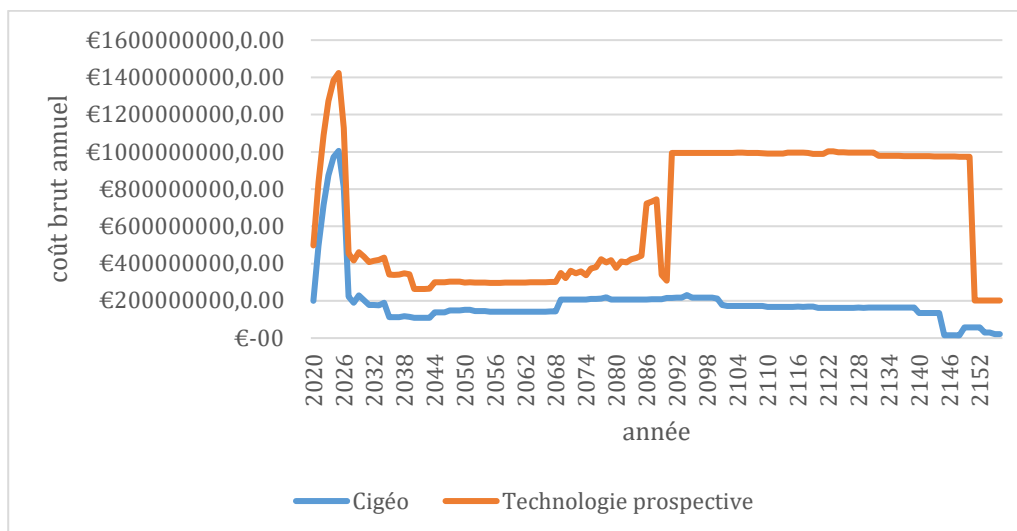
Le « forage profond » et les options 2 et 3

Ces deux options de projet considèrent qu'il faut absolument réaliser la T1 +Phipil de Cigéo pour sécuriser l'existence d'une solution pérenne, et elles mettent en chantier en même temps la recherche et développement sur le « forage profond » jusqu'en 2070.

L'option de projet 2

Dans l'option de projet 2, on stocke les MA-VL entre 2040 et 2100 comme dans l'option de projet 1. Puis en 2070, si les recherches sur le « forage profond » ne sont pas concluantes, on utilise Cigéo pour les déchets HA, sinon on compare alors l'intérêt de Cigéo et du nouveau site avec « forage profond » : le coût brut à partir de 2070 des HA dans Cigéo est de 11 milliards, celui des HA en « forage profond » de 11,5 milliards auxquels il faut ajouter 4,5 milliards d'euros de coûts de recherche et de préparation du nouveau site qui restent à dépenser. Donc le coût brut du « forage profond » est d'environ un tiers plus élevé en 2070 dans cette branche que celui de Cigéo. (On trouve ce résultat dans le tableau page 150. Les 5 milliards de différences avec nos arrondis sont de 5,5 milliards dans le tableau de l'ESE.) Comme l'échéancier des dépenses est à peu près le même, sauf celles de préparation du site qui sont en début de période et donc défavorable au « forage profond », l'évaluation socio-économique sera défavorable globalement à cette « technologie prospective », et ceci quel que soit le taux d'actualisation utilisé. Ce résultat tient dans le rapport ESE y compris avec des tirages de Monte Carlo dans pratiquement toutes les réalisations des aléas compte tenu des plages retenues pour les distributions uniforme (80 %-150 %). Les simulations et les calculs actualisés sont donc inutiles. Et l'option de projet 2 se ramène à l'option de projet 1 plus des dépenses inutiles de recherche et développement et de première recherche de site sur le « forage profond » pour les déchets HA.

Figure 1 : Comparaison de Cigéo à l'option 3 dans le cas favorable de l'utilisation de la technologie prospective pour les déchets HA et MA-VL (scénario 3.1a)



Source : Rapport ESE.

L'option de projet 3

L'option de projet 3 suit la même logique, T1+Phipil décidés sur 2020–2040 en même temps que recherche et développement et première recherche de site de « forage profond » pour les déchets HA et également pour les déchets MA-VL.

On décale donc le stockage des MA-VL pour le synchroniser avec celui des HA, et prendre le temps d'avoir le résultat des recherches sur la technologie prospective. Puis, arrivé en 2070, on regarde si l'on a une technologie qui marche pour les HA, et si de plus elle marche aussi pour les MA-VL, et dans cet ordre logique : si elle marche avec la densification pour les MA-VL c'est *à fortiori* qu'elle marche pour les HA ; et comme on sait que cette technologie est prohibitive pour les MA-VL (cf. ci-dessus, et Figure 1), la seule question qui demeure concerne les HA. Or comme, que l'on dispose ou non du « forage profond », on mettra les MA-VL en 2080 dans Cigéo, mettre les déchets HA dans Cigéo sera alors à nouveau optimal avec le même raisonnement que ci-dessus.

L'option de projet 3 se ramène ainsi à l'option de projet 1, avec des surcoûts liés aux dépenses de recherche et développement, de première recherche de site, et d'entreposage temporaire des déchets MA-VL de 2040 à 2080. Ces surcoûts dépensés sur 2040–2080 s'élèvent à 10,8 milliards, donc plus de deux fois les dépenses de stockage de MA-VL sur cette même période dans l'option de projet 1, i.e. 5 milliards de 2040 à 2100, donc au prorata temporel environ 3,2 milliards. On a donc non seulement des coûts bruts plus importants d'environ 10 milliards d'euros par rapport à l'option de projet 1, mais davantage encore de surcoûts en relatif en actualisant, là encore quel que soit le taux d'actualisation.

Au vu de ces analyses, les options 2 et 3 sont donc dominées par l'option 1 (Cigéo tout de suite) sans qu'il soit utile de réaliser des calculs plus sophistiqués.

3.2.3 Les coûts de l'Entreposage de Longue Durée, et l'option de projet 4

L'option 4 : des coûts comparables à Cigéo du fait de l'ELD

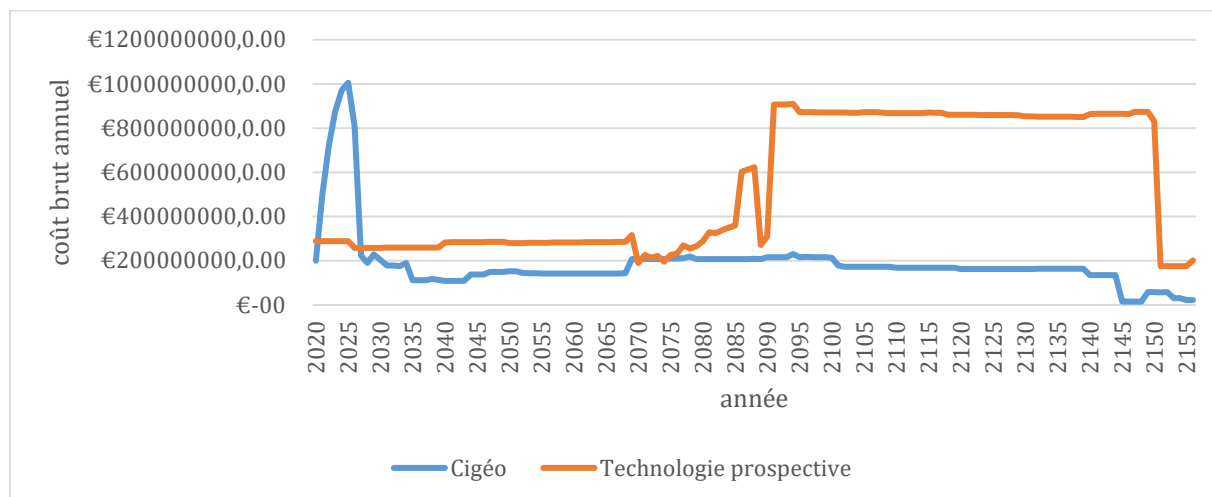
L'option 4 consiste à reporter les premiers investissements du centre de stockage de Cigéo, et à lancer des investissements de R&D sur le « forage profond ». On prend donc le risque de perdre le site de Cigéo, de ne pas mettre au point la nouvelle technologie de « forage profond », et de ne pas trouver de nouveaux sites géologiques du type Cigéo à l'horizon 2070–2080. Dans ce cas on se replie sur l'Entreposage de Longue Durée jusqu'en 2600.

En dehors des branches où on est contraint à se replier sur l'ELD et si l'on a le choix, on préférera toujours sans surprise Cigéo ou un nouveau site de type Cigéo à la technologie prospective de « forage profond » plus coûteuse, comme on le voit à la Figure 2. Par induction à rebours, si l'on sait par avance que la technologie prospective restera systématiquement dominée par Cigéo, pourquoi entreprendre aujourd'hui de la R&D pour la développer ? En coûts bruts, les branches mobilisant l'ELD jusqu'en 2600 seront bien sûr plus coûteuses ; mais dès que l'on retient des taux d'actualisation significatifs ces branches améliorent au contraire l'espérance du coût actualisé de l'option 4. Par rapport à l'option 1, cette option 4 présente donc deux intérêts d'autant plus forts que le taux d'actualisation est élevé : elle repousse la décision de stockage pérenne (Cigéo ou « forage profond ») à l'horizon 2070, en particulier les « coûts fixes » de la T1-Phipil (particulièrement importants pour accueillir les MA-VL) et elle mobilise dans certaines branches sans solution pérenne l'option de l'ELD dont les coûts sont décalés sur les 500 années suivantes.

Elle présente par contre le défaut de mobiliser des coûts importants de recherche et développement et de recherche de site pour une technologie de « forage profond » pourtant intrinsèquement plus coûteuse que Cigéo. On comprend donc intuitivement pourquoi on trouvera des résultats en

termes de coûts actualisés plutôt en faveur de Cigéo dans les scénarios OK taux bas et KO taux intermédiaire et bas (et plus encore si l'on rajoute des coûts d'accident dans KO à l'ELD, cf. ci-dessous), et en faveur de l'option de projet 4 dans les scénarios OK taux d'actualisation haut et intermédiaire, et KO taux d'actualisation haut (cf. page 224 de l'ESE).

Figure 2 : Comparaison de Cigéo à l'option 4, dans le cas favorable de l'utilisation de la technologie prospective pour les déchets HA et MA-VL (scénarios 4.1d et 4.2).



Source : Rapport ESE

Au total, cette option 4 pousse à réintroduire clairement l'ELD comme solution alternative certes non pérenne mais qui, si l'on s'affranchit des lois de 2006 et 2016, constitue une « option de référence » plausible.

C'est sans doute pourquoi l'ESE examine la variante de l'option 4 avec ELD sans recherche de site ni dépense de recherche et développement (page 174 de l'ESE), mais en lui conservant seulement un caractère marginal.

Les coûts de l'Entreposage de Longue durée

L'ESE retient 50 milliards d'euros sur environ 500 ans dont 35 milliards de coûts d'investissement et d'exploitation des entreposages, et 15 milliards de maintien des compétences. Les données sont là encore limitées. On aimerait savoir quels sont les poids respectifs des HA et des MA-VL (les HA pourraient peser de 20 % à 45 % de l'ensemble ?), quelles sont les parts investissement et exploitation (plutôt un tiers-deux tiers pour les MA-VL, et moitié-moitié pour les HA ?), et quelle est la part des coûts fixes versus la possibilité de construction «modulaire» (comme pour les alvéoles-galeries dans Cigéo) ?

Il faudra a priori à intervalles réguliers sortir les déchets, contrôler les colis, parfois les reconditionner avant de les remettre dans les nouveaux entreposages tous les 100 ans environ. Ce qui pourrait amener à mettre en place un processus de récupération et des installations tampons supplémentaires pour contrôler les colis et les reconditionner. On pourrait souhaiter examiner de ce point de vue une variante à 75 milliards plutôt que 50, et donc 150 millions d'euros par an versus 100 millions d'euros par an.

On peut aussi rapprocher ces coûts de ceux de Cigéo : le coût d'entreposage sur un siècle (calculé sur la base de 75 milliards sur 500 ans, donc environ 15 milliards), s'il devait se substituer à Cigéo,

permettrait grosso modo d'économiser les 10 milliards de coûts fixes de la T1 et Phipil (les 15 milliards restants étant construits au fil du temps de 2040 à 2140 dans le projet actuel).

On peut comprendre qu'en 2000–2005, avec des estimations d'un stockage géologique autour de 15 milliards d'euros, on ait moins ressenti le besoin d'analyse coûts/bénéfices rigoureuses, intégrant aussi l'enchaînement temporel du processus afin de vérifier que ce stockage arrive au bon moment pour éviter la construction de nouveaux entreposages temporaires.

L'ELD pose bien sûr question en cas de perte de compétences techniques et de capacités institutionnelles dans des scénarios de type KO. Il serait utile de vérifier qu'on ne laisse pas de côté des alternatives simples et de coûts limités, en particulier pour certaines catégories de MA-VL (la vitrification des déchets HA est déjà un pas important dans cette direction), en termes de matrice, de colisage et/ou d'entreposage qui rendent l'ELD plus robuste à un abandon partiel ou total et renforcent la partie passive de la défense en profondeur.

Les coûts des impacts sanitaires et environnementaux de l'ELD en cas d'abandon en scénario KO.

Les entreposages de déchets nucléaires MA-VL et HA sont aujourd'hui sous le contrôle des autorités de sûreté nucléaire (ASN avec l'appui de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), et considérés comme sûrs dans la mesure où la société dispose d'institutions, d'un niveau scientifique et technique, et d'un niveau économique comparables ou supérieurs au nôtre (société cohérente avec le scénario OK).

La situation serait bien différente dans le cadre du narratif de la société KO, et l'ESE envisage à juste titre, dans son chapitre six, des impacts sanitaires et environnementaux liés à un abandon partiel ou total de la gestion de l'ELD. L'ESE retient comme base du calcul monétaire des impacts sanitaires et environnementaux, la possibilité d'un accident grave sur un ELD construit sur le modèle d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur en marche comme c'est arrivé à Fukushima.

La base du calcul est la diffusion dans un périmètre assez large de la majorité des éléments radioactifs contenus dans un nombre important de colis sur des sites analogues à La Hague ou Marcoule en termes de densité de population locale, et l'application de mesures d'évacuation des populations, de décontamination des territoires, aujourd'hui prévues dans les plans d'urgence de gestion de ce type d'accident grave pour éviter le plus possible les impacts sanitaires.

L'impact monétaire de ces mesures serait dans le cadre de ces hypothèses compris entre 100 milliards et 235 milliards d'euros, et leur probabilité d'occurrence comprise dans une société KO entre 10^{-3} et 10^{-4} par an, (fréquence de 1 000 à 10 000 fois plus importante que celle retenue dans nos sociétés pour la probabilité de fusion du cœur dans les études probabilistes de sûreté). Pour 500 ans et en retenant 10^{-3} on obtient une chance sur deux d'occurrence de cet événement, cela pourrait donner un ordre de grandeur de 150 milliards multiplié par 0,5, donc environ 75 milliards d'euros, ou 150 millions d'euros chaque année sur 500 ans si on l'interprète non plus comme une catastrophe instantanée, mais comme des impacts locaux récurrents forts sur la santé des populations locales (cf. ci-dessous). De 50 à 75 milliards d'euros sur 500 ans, c'est un ordre de grandeur analogue à celui des coûts d'entreposage qui s'ajoutent alors à ceux-ci dans le calcul des coûts globaux de l'ELD dans les scénarios KO.

Les chiffres de 50 à 75 milliards d'euros sur 500 ans pour les impacts sanitaires et environnementaux ne sont pas articulés comme tels dans l'ESE, mais ils paraissent cohérents avec les éléments synthétisés dans les tableaux ci-dessous (cf. pages 73, 79, 174, 177, 215 et 236 de l'ESE) qui comparent dans les deux scénarios OK et KO, et pour les taux d'actualisation haut, intermédiaire et bas (on redonne les valeurs utilisées pour le Génie Civil), les valeurs actualisées de l'option de projet 1 (Cigéo), et de la variante de l'option 4 sans recherche et développement, *i.e.* ELD avec et sans coût de l'accident dans le scénario KO.

Tableau 2 : Coûts actualisés en régime de croissance OK

Taux d'actualisation	haut	intermédiaire	bas
avant 2070	5,5%	3,4%	2,1%
en 2170	2,4%	1,5%	0,3%
après 2270	1,9%	1,0%	0,3%
Cigéo (option 1)	9,8 G€	12,5 G€	14,5 G€
ELD	2,3 G€	4,0 G€	8,5 G€

Source : Rapport ESE

Tableau 3 : Coûts actualisés en régime de croissance KO

Taux d'actualisation	haut	intermédiaire	bas
En 2019	4,0%	2,5%	1,1%
après 2100	1,9%	1,0%	0,3%
Cigéo (option 1)	11,6 G€	16,7 G€	22,8 G€
ELD sans accident	3,6 G€	8,3 G€	23,8 G€
ELD avec accident	4,5 G€	14,2 G€	58,3 G€

Source : Rapport ESE

Ces deux tableaux laissent apparaître l'intérêt de Cigéo face à l'ELD dans le régime de croissance chaotique quand les taux d'actualisation se rapprochent de zéro. La prise en compte de l'accident ne suffit pas en elle-même à favoriser Cigéo. Cigéo est dominé par l'ELD même dans le régime KO lorsque les taux d'actualisation sont « haut » ou « intermédiaire », néanmoins ces taux d'actualisation ne sont pas cohérents avec le narratif d'une société en décroissance ou en stagnation.

La valeur de 75 milliards en ordre de grandeur est peut-être juste mais la démarche retenue mérite d'être débattue et approfondie compte tenu de son rôle clé dans la motivation du stockage géologique et plusieurs points méritent d'être relevés :

- l'analyse suit la démarche d'analyse de sûreté déterministe (imaginer un scénario catastrophe sans reconstituer la chaîne causale qui y mène, ni chercher à déterminer des probabilités d'occurrence), en supposant en l'occurrence le déclenchement d'un incendie majeur de colis MA-VL, et sans que la matrice, le colis et les bâtiments empêchent une large diffusion de la majorité des radionucléides. Puis on applique les contre-mesures d'évacuation des populations et de décontamination qui respectent le seuil réglementaire de radioactivité fixé en application d'un principe de précaution pour protéger les populations. Contre-mesures coûteuses, et qui permettent d'éviter la quasi-totalité des effets sanitaires. Les 75 milliards sont donc des coûts non sanitaires. Cette démarche adaptée à nos sociétés ne correspond pas au déroulement d'incident ou accident en société du type KO où a priori aucune contre-mesure sérieuse ne sera prise, et où il serait alors important de préciser l'origine de l'incendie, d'une explosion, et d'une telle diffusion, pour comprendre où se situent les fragilités laissées aux générations futures, à la fois pour mieux les qualifier et les valoriser et aussi pour ouvrir le cas échéant des pistes d'action sur les matrices ou les colis les plus fragiles. Il serait important de chercher à décrire les impacts sanitaires et environnementaux réels dans une société de type KO ;
- de ce point de vue, l'analogie avec un accident de fusion du cœur n'est sans doute pas la meilleure avec, pour un réacteur : des dispositifs de sûreté particulièrement redondants, un bâtiment réacteur qui dispose d'une enceinte de confinement et un potentiel de radiotoxicité du cœur de plusieurs ordres de grandeur supérieur à celui des déchets HA (et plus éloigné encore des MA-VL).

Il semble donc que, hors malveillance d'État sophistiquée (qui alors peut avoir d'autres objectifs à effets d'ampleur plus forte que de s'attaquer à des entreposages de déchets, malheureusement), il faille regarder de plus près les effets possibles d'un abandon en relation avec des événements externes – séisme, inondations – et des dégradations dans la durée avec diffusion plutôt lente, locale

de produits toxiques dans les nappes phréatiques et la chaîne alimentaire affectant des générations successives. Les ordres de grandeur pourraient être les mêmes, ou peut être supérieurs, mais avec des interprétations différentes et plus pertinentes en termes d'analyse phénoménologique de « l'accident » et de ses impacts : à titre d'illustration, si cela devait provoquer un surcroît de mortalité localement année après année de 50 personnes par an, en retenant la valeur tutélaire actuelle de la vie humaine (voir Rapport Quinet (2013)), on pourrait retrouver le coût de l'accident de l'ESE sur 500 ans.

Il semblerait utile de développer cette réflexion pour mieux discerner entre par exemple une catastrophe de grande ampleur et de probabilité faible, et des impacts sanitaires locaux mais touchant un grand nombre de personnes par leur récurrence sur une longue durée et en l'absence de capacité à prendre des contre-mesures. Cela pousse aussi à élargir la réflexion à des possibles comparables comme les déchets industriels toxiques. Mieux vaut en effet trouver d'autres problèmes comparables et utiliser plutôt la même aversion au risque et les valeurs tutélaires existantes comme celles associées à la valeur de la vie humaine ou la valeur du temps, plutôt que construire des valeurs spécifiques à un seul problème (sauf à démontrer clairement sa singularité), en invoquant des décisions collectives prises dans le passé, mais en l'absence d'une analyse coût-bénéfice explicite.

3.3 Périmètre et pilotage de Cigéo

3.3.1 Des choix en matière de politique nucléaire et de retraitement-recyclage déterminants pour Cigéo

La gestion des déchets a fait l'objet de travaux durant plusieurs décennies en France. Ils s'inscrivent dans un ensemble conséquent d'études menées par les pays concernés. Ces pays ont pour la plupart retenu, comme le mentionne l'ESE, le stockage en couche géologique profonde comme solution de référence pour la gestion définitive des déchets de HA et MA-VL. Les géologies étudiées sont le granite, les formations sédimentaires et plus particulièrement les couches d'argile et le sel. Plusieurs de ces pays sont engagés dans le recyclage du combustible et le développement de réacteurs de génération 4.

Certains pays comme les Pays Bas ont choisi une option d'entreposage temporaire (100 ans) avant un stockage géologique définitif.

Il serait utile de rappeler les caractéristiques principales des autres géologies candidates en France sur le plan technique, et pourquoi on a de bonnes raisons de penser que l'argile de Meuse-Haute-Marne est particulièrement favorable.

Par ailleurs, un rappel des principaux arguments qui ont conduit en 2006 à écarter l'ELD et à choisir le stockage géologique profond comme référence pour la totalité des déchets nucléaires (MA-VL et HA) aurait sa place dans la présentation historique du sujet.

L'ESE aurait pu mentionner dans son panorama international de la gestion des déchets nucléaires certaines caractéristiques comme les modes de financement (prélèvement libératoire comme en Allemagne ou aux USA, ...), les responsabilités de maîtrise d'ouvrage (organisme public comme en Belgique ou filiale des opérateurs comme en Suède ou en Finlande) ou la sollicitation sociétale concernant la gouvernance.

Cigéo est aujourd'hui dimensionné sur l'inventaire issu du PNGMDR (déchets déjà produits ou à produire dans des installations existantes ou autorisées aujourd'hui). L'ESE souligne que « l'évolution de la politique énergétique ou de la politique de gestion des matières et des déchets radioactifs peut impacter sensiblement l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs ». Ces évolutions sont étudiées « au travers d'un inventaire de réserve et d'études d'adaptabilité, qui

seront présentées dans le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo, afin de garantir la capacité du projet à évoluer et à s'adapter à des choix de politique énergétique ».

Les éléments susceptibles d'influencer le dimensionnement ou le rythme de construction de Cigéo ne sont pas présentés dans l'ESE. La capacité d'adaptation de Cigéo aux différents scénarios de politique énergétique est mentionnée comme un objectif.

L'évolution très probable du périmètre de Cigéo aurait pu alimenter pour l'ESE des scénarios intégrant des variantes autour de l'inventaire de réserve (cycle fermé/ouvert, articulation des plannings entre les entreposages provisoires et le stockage en couches profondes, etc.).

L'ESE présente uniquement la R&D pour l'option de référence, la technologie alternative « *deep borehole* ». Les montants prévus sont considérables (1 Md€/10 ans). Les coûts de R&D liés au projet Cigéo et le devenir du laboratoire ne sont pas mentionnés.

L'adaptation du coût initial du projet présenté par l'Andra en 2014 (34 Md€) au coût arrêté par la Ministre en 2016 (25 Md€) s'appuie pourtant sur des innovations technologiques (et donc de la R&D) avec des optimisations prévues à compter de 2035.

Une vision globale de la stratégie de R&D portée en l'état par Cigéo et des innovations nécessaires serait utile ainsi que les modalités d'arbitrage entre les organismes de recherche.

Compte tenu de la durée du projet, la capitalisation du socle de connaissance acquis par l'Andra et le CEA est essentielle. Certaines innovations comme le développement de jumeaux numériques permettront demain de modéliser les phénomènes sur des temps très longs.

Les thématiques de R&D susceptibles d'orienter les choix en matière de politique de retraitement-recyclage à long terme ne sont pas mentionnées comme les études liées au multi recyclage de combustible ou à la faisabilité du stockage de certaines matières.

Le bilan des études sur l'ELD réalisé par l'Andra en 2012 retenait des axes de recherche (vieillesse des structures et conteneurs, simulation thermo-hydro-aérodynamique, systèmes d'auscultation et de surveillance des installations et des colis, etc.). Ces domaines ont-ils été conservés ?

3.3.2 Un projet qui s'inscrit dans un territoire : analyse du volet transport du projet global Cigéo

Le projet global Cigéo prévoit la construction et l'exploitation d'une série d'infrastructures de transport décrites à continuation :

- une liaison ferroviaire qui comprend principalement la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 et la création d'une Installation Terminale Embranchée (ITE) pour pouvoir assurer l'acheminement des matériaux de construction, autres matériaux et des colis de déchets MA-VL et HA par voie ferroviaire et non par voie routière ;
- une liaison intersites (LIS) en surface qui permet d'optimiser le transport de matériaux, en particulier d'argile, et de personnes entre la Zone de Descenderie (ZD) et la Zone Puits (ZP), constituée d'un convoyeur, d'une voie dédiée à la circulation des poids lourds (PL) et d'une voie pour la circulation des véhicules légers (VL) ;
- la déviation de la route départementale D60/960 pour rétablir le transit local interrompu par la construction de la Descenderie.

Du fait de l'important montant d'investissement que représente le volet transport (265 millions d'euros de coût initial²) et de l'impact de l'infrastructure de transport pour les territoires et les populations locales qui en font un facteur déterminant de l'acceptation sociale du projet global Cigéo, une évaluation spécifique du volet transport, appelée « Evaluation Economique et Sociale (ESE) des infrastructures de transport du projet global Cigéo »³, a été élaborée ce qui permet de mettre l'accent sur l'importance d'optimiser ces infrastructures que ce soit en termes de coût ou d'impact territorial et social.

Cette ESE complémentaire a fait l'objet d'une contre-expertise particulière. Le contenu de cette dernière, qui fait l'objet d'un rapport distinct, est repris en annexe de ce rapport.

De manière générale, l'évaluation réalisée pour le volet transport est claire, pédagogique et en conformité avec la réglementation relative à l'évaluation des projets de transport. Elle présente par ailleurs le grand intérêt d'analyser certaines composantes ou décisions relatives au projet de manière séparée permettant ainsi de s'assurer que les différentes composantes du projet sont optimisées en termes de coût pour la société. Dans les très grands projets ces approches sont incontournables.

La principale critique des contre-experts sur l'évaluation du volet transport de Cigéo porte sur le choix de ne pas dissocier suffisamment dans l'analyse les différents éléments de ce volet dont les enjeux et les contraintes apparaissent très différents. L'évaluation telle qu'elle est présentée ne permet pas à la lecture d'appréhender les bénéfices qu'apporte chacun des éléments au bilan global. Ce faisant il ne permet pas de comprendre les raisons des choix qui ont été faits : comme le choix du convoyeur, de la voie de véhicules légers pour la LIS, des avantages et inconvénients des trois options proposées pour la déviation routière de la D60/960.

Dans le cas de la LIS, par exemple, une approche plus spécifique de calcul économique aurait sans doute permis de mettre en évidence que la solution retenue au cours des processus de concertation n'est pas nécessairement l'option la moins coûteuse en termes économiques et est, en grande partie, motivée par la réalité de bénéfices sociaux et environnementaux importants pour les territoires.

Comme l'ESE du volet transport a comme objectif principal de démontrer que les infrastructures de transport proposées dans le cadre du projet global Cigéo sont la solution qui optimisent les coûts économiques, environnementaux et sociaux en comparaison à d'autres alternatives possibles, l'ESE se place dans le cas de la mise en œuvre du projet global Cigéo et donc en supposant que les déchets sont acheminés par train des centres d'entreposage temporaire jusqu'à proximité de la zone du projet sur la ligne ferroviaire Paris-Strasbourg (RFN 070000)⁴, ce qui est correct d'un point de vue méthodologique.

Au contraire dans l'ESE du projet global Cigéo, sont comparées l'option de projet avec le centre de stockage Cigéo à d'autres alternatives sans Cigéo. Dans ce cas-là, les coûts de transport à prendre en compte, sont ceux du transport des déchets depuis les zones d'entreposage temporaires jusqu'au site de stockage de Cigéo. Ceci explique pourquoi dans l'ESE du projet global Cigéo les coûts de transport s'élèvent, selon des données transmises par les producteurs, à environ 1,472 millions d'euros 2019 contre 606.8 millions d'euros 2018 pour le seul volet transport⁵.

² Ce qui est supérieur au montant de 83 084 715 euros fixé par l'article R.1511.1 du code des transports au-delà duquel un projet d'infrastructure de transport doit faire l'objet d'une évaluation socio-économique.

³ Pièce 13 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage des déchets radioactifs Cigéo

⁴ Sorcy-Saint-Martin (option de référence) ou Nançois sur Ornain (option de projet)

⁵ Obtenu en ajoutant les coûts d'investissement 264,8 M€₂₀₁₈, aux coûts d'entretien et d'exploitation cumulés jusqu'en 2171 (129,0 M€₂₀₁₈), aux coûts de renouvellement (201,8 M€₂₀₁₈), aux coûts de démantèlement (11,2 M€₂₀₁₈), pp. 77 et 79 de l'ESE du volet transport (pièce 13).

3.3.3 Un développement local efficace s'appuyant sur une fiscalité maîtrisée

La fiscalité cumulée jusqu'en 2155 représente un coût de l'ordre de 3 Md€ en intégrant les fonds des GIP jusqu'en 2025. Ces derniers sont de l'ordre de 60 millions d'euros par an.

L'ESE mentionne la typologie des taxes liées à Cigéo (dont la future taxe de stockage). Elle précise que le modèle fiscal applicable au projet Cigéo n'est pas encore défini et qu'une concertation est en cours avec les parties prenantes locales sur le sujet.

Enfin le dossier transport ou les choix faits pour l'alimentation électrique des installations de Cigéo illustrent une forte implication des élus locaux avec des concertations qui ont permis l'expression du plus grand nombre d'acteurs. Les choix liés à la liaison intersites ou aux infrastructures ferroviaires ont largement pris en compte les bénéfices environnementaux et sociaux pour les territoires exprimés lors du processus de concertation.

Compte tenu des enjeux de la fiscalité, l'ESE aurait pu préciser des scénarios pour son évolution (fin du laboratoire ? paramétrage de la taxe de stockage ? devenir de la taxe foncière ?).

Il apparaît important que les options mises en débat auprès des collectivités locales ou des concertations donnent lieu à des analyses coûts bénéfices partagées par tous, tant pour mesurer la valeur des nuisances que les bénéfices des actions financées par cette fiscalité.

Il est important d'en rappeler les enjeux : contribuer efficacement au développement local, tout en maîtrisant le poids global de ces prélèvements sur le coût du projet ; poids qui, s'il était prohibitif, fragiliserait sa légitimité dans la durée.

3.3.4 Une phase industrielle pilote d'une durée de 20 ans à sécuriser

La phase industrielle pilote comporte deux étapes :

- une tranche 1 jusqu'en 2034 de 7 Md€ avec des travaux d'aménagement (réseaux d'eau potable, d'électricité, de télécommunications, et le raccordement aux réseaux routiers et ferroviaires), la construction des bâtiments de surface, des liaisons surface-fond (descenderies, puits) et des premiers ouvrages souterrains.
- une phase pilote de 2034 à 2040 de 3 Md€ avec des essais en inactif puis en actif (après une autorisation de mise en service par l'ASN) pour tester les équipements installés, acquérir du retour d'expérience, Cette phase pilote fera l'objet d'un bilan transmis à l'ASN qui en fixera les conditions de sortie. La phase de fonctionnement sera engagée moyennant une loi qui en fixera le cadre. Elle se déroulera sur une centaine d'années.

Cette phase représente un coût de 10 Md€ (7 Md€ + 3 Md€) dont environ 8 Md€ d'investissements.

Plusieurs options industrielles restent aujourd'hui ouvertes, notamment :

- les modalités de stockage des déchets bitumineux pour lesquels l'ASN a demandé des études complémentaires ;
- les modalités de contrôle des colis avant et après enfouissement ;
- la conception des zones de stockage des déchets HA : optimisation de la longueur des alvéoles, de l'entraxe, et de la conception des alvéoles ;
- les modalités de fermeture des alvéoles ;
- de nombreuses dispositions liées aux exigences de réversibilité/récupérabilité.

La Commission particulière du débat public de 2019 a mis en exergue une demande récurrente remontée par les acteurs, en particulier les associations, de faire évoluer la gouvernance actuelle vers une gouvernance davantage pluraliste reposant sur une expertise non institutionnelle et sur un processus d'échanges en continu avec la société civile.

Le choix d'un processus participatif a été fait (JO du 20 février 2020). La composition de l'instance de gouvernance du PNGMDR sera élargie aux élus de la nation, à la société civile, et aux représentants des collectivités territoriales, en complément de la participation des associations de protection de l'environnement.

Plus d'un tiers du coût du Projet et des investissements concernera la phase industrielle pilote. Son coût, sa durée et le processus participatif retenu ont chacun un caractère exceptionnel.

Compte tenu de ces spécificités, l'ESE aurait pu prendre appui sur une analyse de risques.

L'expérience de grands projets industriels, et notamment des têtes de séries, montre que la simplicité et la robustesse sont les deux meilleures garanties tout à la fois de la maîtrise des coûts, des délais et surtout, pour les projets nucléaires, de la sûreté à court et long terme. Si cette durée de 20 ans est une opportunité pour répondre aux exigences des dossiers réglementaires, mener les études d'ingénierie nécessaires, conduire la concertation, c'est aussi un risque bien connu de complexifier le projet.

Les risques auxquels il faudra faire face peuvent être déduits du retour d'expérience : cohérence et la faisabilité des options successivement choisies intégrant maîtrise simultanée des coûts, maintien dans la durée des compétences y compris celles du tissu industriel, capacité à sortir sur des critères explicites de cette phase pilote pour engager les premiers stockages de déchets.

L'ESE aurait pu présenter des variantes autour de Cigéo (choix ouverts, ré-interrogation de certains plannings, utilisation optimisée des entreposages temporaires existant, ...) d'autant plus que le périmètre du projet sera prochainement questionné avec la prise en compte de scénarios autour de l'inventaire de réserve.

Enfin, l'expérience montre que plus le projet est complexe dans le temps et l'espace, plus la qualité et la simplicité-clarté de la gouvernance sont clés. La réussite de sa mise en œuvre industrielle implique une chaîne de décision lisible, mobilisant toutes les compétences industrielles de la filière, et conçu pour atteindre des objectifs clairs : protéger les générations lointaines en garantissant la sécurité des travailleurs et des populations pendant son fonctionnement.

3.3.5 Une gouvernance adaptée à une nouvelle phase industrielle

Cigéo présente de multiples enjeux :

- un projet industriel pour préserver les générations futures contre les dangers des déchets nucléaires HA et MA-VL ;
- un projet nucléaire qui présente des enjeux de sûreté et de sécurité pour les travailleurs sur le site comme pour les populations locales aujourd'hui, et aussi en même temps de sûreté à très long terme ;
- un projet lié à différents domaines de recherche appliquée (géologie, modèle numérique...), avec des questions liées aux orientations et au financement de ces recherches ;
- un projet avec des retombées locales importantes avec des questions sur fiscalité (montants-utilisation) ;
- un projet qui cristallise au-delà de son objet précis des débats nationaux sur la stratégie nucléaire, et au-delà la confiance dans la technique et la science comme dans l'État et le Politique ;

- un projet financé par les producteurs de déchets, responsables juridiquement de leurs déchets, opérationnellement de leur colisage, transport et entreposage temporaire, avec la cohérence nécessaire en particulier dans le timing de ces décisions d'entreposage temporaire avec le timing Cigéo.

Beaucoup de ces enjeux sont nouveaux par rapport au contexte des décennies passées : il s'agit dorénavant d'un projet industriel majeur dont le cahier des charges se constitue progressivement.

Le projet se caractérise autour de ces enjeux par une multiplicité d'acteurs impliqués, et de multiples instances : DGEC, ANDRA, ASN-IRSN, CNE, OPECST, PNGMDR et ses groupes de travail, HCTISN. Qui est responsable de quoi, décide quoi, et donne un avis ? Et qui s'assure de la vision d'ensemble et prend la responsabilité de l'ensemble du sujet ?

Aucune de ces questions n'est abordée par l'ESE. Si l'ESE rappelle le rôle de chacun des acteurs institutionnels (ASN, IRSN, HCTISN, CNE, OPECST, DGEC), ni le rôle de l'Andra n'est mentionné (au-delà de celui d'un maître d'ouvrage), ni sa future responsabilité d'exploitant nucléaire. Cette responsabilité est nouvelle pour l'Andra.

En France, l'approche générale de sûreté applicable à toute installation nucléaire repose sur la responsabilité première de l'exploitant. Ce principe fondateur est inscrit dans le code de l'environnement qui dispose que l'« *exploitant d'une installation nucléaire de base est responsable de la sûreté de son installation* ». Cela conduira à renforcer les compétences de l'Andra, à faire évoluer son organisation. Cette responsabilité est essentielle pour un dialogue de qualité et responsabilisant avec l'Autorité de sûreté et ses appuis.

L'expérience des 15 années passées a permis des avancées significatives du projet. Elle a montré aussi des évolutions de coûts de Cigéo qui n'avaient pas toujours été bien anticipées. Des décisions à impact financier ont pu être prises sans que des analyses coûts bénéfices aient pu être suffisamment partagées.

Enfin, les choix faits dans différents pays (voir 3.3.1.) illustrent la diversité de solutions permettant l'intégration entre maîtrise de la sûreté, maîtrise des coûts et maîtrise industrielle. Dans certains pays comme les USA, un prélèvement libératoire renvoie la responsabilité de maîtrise des coûts au DOE qui exerce par ailleurs les autres responsabilités. En Suède ou en Finlande, il n'y a pas de prélèvement libératoire, les exploitants assurent la responsabilité financière mais aussi, par l'intermédiaire d'une filiale, les responsabilités sûreté et opérationnelle.

La France s'appuie sur un autre modèle où les exploitants sont responsables des financements et les responsabilités sûreté et opérationnelle sont confiées à l'Andra. C'est la tutelle qui a alors la responsabilité des trois domaines.

Le projet Cigéo est aujourd'hui au stade des premières autorisations réglementaires. Le dossier de demande de déclaration d'utilité publique (DUP) est le premier dossier support à ces autorisations réglementaires. Le dépôt de la demande d'autorisation de création (DAC) viendra ensuite, sachant que l'obtention de cette dernière conditionne le début de la construction initiale du centre de stockage Cigéo.

Le DUP a été déposé en 2020 pour le seul centre de stockage Cigéo visant à fournir un cadre réglementaire pour la suite. Il ne couvre pas les opérations menées en dehors du centre de stockage Cigéo par les autres maîtres d'ouvrage (RTE, SIVU du Haut Orne et SIAEP d'Echenay, SNCF Réseau, Conseil départemental de la Haute-Marne en lien avec celui de la Meuse). Les producteurs de déchets sont par ailleurs maîtres d'ouvrage des installations d'entreposage et d'expédition vers Cigéo des colis de déchets radioactifs.

Concernant le volet transport, l'analyse spécifique qui a été menée souligne également l'importance de la qualité du pilotage que doit mener l'Andra avec trois maîtres d'ouvrage différents : l'Andra pour l'Installation Terminale Embranchée et la Liaison Intersites, la SNCF pour la mise à

niveau de la ligne ferroviaire 027000 et le Conseil départemental de la Haute-Marne pour la déviation de la route D60/960.

L'ESE ne mentionne pas les risques associés à la procédure administrative comme le soulignait la CNE en 2019. Elle attirait alors l'attention sur « l'extrême complexité de la procédure administrative préalable à la construction et à la mise en exploitation de Cigéo. La Commission recommande que soient explorées des voies permettant de regrouper l'instruction des diverses procédures. Un retard excessif serait une cause de perte de dynamisme pour les acteurs du projet pouvant aller jusqu'à une perte progressive des compétences ».

Après l'obtention de la DUP, le dépôt du DAC est prévu en 2021. Il sera instruit par l'ASN et il conditionne le démarrage des travaux de construction initiale. Simultanément au dépôt du DAC, une enquête publique est prévue. Le DAC devra engager le projet sur des points qui resteront pour beaucoup soumis à une large procédure de concertation. Ils seront balisés par de nombreuses étapes (séquençement des tranches de construction, adaptabilité de la conception, flexibilité de l'exploitation, capacité de récupérer des colis déjà stockés, ...).

Sur les aspects opérationnels qui débiteront très prochainement, l'existence de nombreux maîtres d'ouvrage (mais aussi de nombreux maîtres d'œuvre) conduira à gérer de nombreuses interfaces (ingénierie, contractualisation, plannings, réalisation des travaux, contrôle, ...). Une vision intégrée est nécessaire avec un planning fédérateur, une anticipation et une gestion des aléas et des recours, des processus de décision adaptés.

Une difficulté portera sur des options qui auront été validées par l'ASN lors du DAC et qui pourront être réinterrogées ultérieurement par le processus de concertation. Des risques de « stop and go », de remises en cause d'options validées, de recours juridiques et de retards dans la conduite du projet sont à anticiper.

3.4 Méthode d'évaluation dans l'ESE

D'emblée, le rapport ESE pose problème par la multiplicité des taux d'actualisation considérés, qui sont conditionnés par le régime de croissance considéré (OK ou KO), par l'horizon temporel considéré, et par une ambiguïté paramétrique qui conduit les auteurs à considérer une fourchette de trois valeurs (haute/intermédiaire/faible). Ceci conduit inéluctablement à un rapport difficile à lire, laissant la porte ouverte à de nombreuses interprétations.

Nous recommandons des rapports d'évaluation fondés sur un scénario central (ou de référence), construit sur une calibration précise, qui intègre directement les risques. Ce scénario central doit être bien explicité, avec des paramètres clairement spécifiés et justifiés. Des conclusions préliminaires issues de l'analyse de ce scénario central doivent être proposées, sans ambiguïté. La prise en compte des incertitudes qui pèsent sur certains paramètres clé de ce scénario central doit être faite par des analyses de sensibilité spécifiques. Au lieu de cela, ce rapport mélange analyse centrale et de sensibilité qui laissent le lecteur gérer la complexité sans lui offrir une grille de lecture centrale.

Les bénéfices de Cigéo - et à un moment donné, de toutes les options considérées dans l'ESE - résident essentiellement dans la réduction du risque d'accident qui pourrait survenir dans le cas de l'ELD. Cet accident engendrerait des dommages sanitaires et environnementaux locaux mais considérables. Compte tenu de la durée de vie des déchets nucléaires, la probabilité d'occurrence d'un tel accident n'est pas négligeable. Comme l'ESE ne considère pas l'ELD comme option de référence, il devient certes moins important de mesurer ces bénéfices. Ce sont pourtant eux qui ont motivés la loi actuelle. Par ailleurs cela est réalisé dans l'ESE mais sans mesure des coûts sanitaires et sans rapprocher ces bénéfices des coûts, c'est-à-dire sans effectuer un calcul de VAN complet.

Dans le cas où l'ELD représente une option à étudier (voir la section 3), il s'agit alors d'ajouter ces coûts d'accident aux coûts de mise en œuvre de l'ELD. Une façon simple de comprendre leur effet consiste à les prendre en compte de façon indirecte en les intégrant dans l'actualisation.

3.4.1 Prise en compte de l'incertitude

Les experts ont indéniablement cherché à prendre en compte l'incertitude en utilisant des simulations de Monte-Carlo sur les coûts incertains. On peut aussi noter des références à la notion de valeur d'option dans le rapport et un calcul réalisé en annexe 18, p377, mais pour l'option 4 uniquement car c'est la seule dans l'ESE qui peut -pour un taux d'actualisation élevé- être préférée à Cigéo.

Intégrer le risque est intéressant s'il existe des effets de convexité (liés à la convexité de sorte que l'espérance de l'utilité diffère de l'utilité de l'espérance) ou des valeurs d'option liées à la flexibilité des stratégies.

Effets de convexité

On peut tout d'abord remarquer qu'au sein d'une même option et pour un même régime (OK ou KO), les spécifications étant essentiellement neutres face au risque diversifiable, l'utilisation de la méthode de Monte-Carlo apporte de la complexité sans aucun impact sur la valorisation ou les concepts.

Le rapport ESE étudie aussi un contexte où le coût de mise en œuvre de la technologie alternative est incertaine.

Sur le principe, une telle analyse est la bienvenue, tant cette incertitude reste prépondérante aujourd'hui, puisque l'évaluation des coûts du projet « *Deep borehole* », sur laquelle cette évaluation est fondée, est limitée à un seul document technique (une thèse de doctorat non publiée) et que de surcroît, « *Deep borehole* » n'est que l'illustration d'une potentielle technologie future.

Néanmoins, en utilisant une distribution uniforme des coûts avec une borne inférieure à 80 % des coûts de l'étude initiale, cette calibration proposée dans l'ESE ne change rien au résultat que l'option 4 est dominée par Cigéo. Pire, l'incertitude introduit un biais pessimiste sur ces coûts de la technologie alternative, puisque la distribution uniforme a comme bornes de son support les valeurs de 80 % et 150 % des coûts déterministes de l'étude initiale. Cela implique une hausse du coût espéré de la technologie alternative de 15 %.

De plus, comme les experts comparent les coûts espérés des deux stratégies en 2080 pour déterminer celle qu'il faudra mettre en œuvre, le risque disparaît de l'analyse. Cette « analyse de risque » n'est en réalité qu'une opération d'augmentation du handicap des options en concurrence de Cigéo. Il est d'ailleurs inutilement complexe de mener une simulation de Monte-Carlo sur une variable aléatoire pour en calculer la moyenne dans l'échantillon ainsi obtenu. Il eut été plus simple, et plus précis, de ne pas faire de simulation Monte-Carlo, mais de calibrer le modèle avec la valeur espérée du coût.

Mais surtout, réaliser une ESE spécifique à chaque régime (OK ou KO) fait disparaître l'essentiel des effets du risque dans l'analyse. La réalité, c'est que le décideur ne sera pas en situation de décider en connaissance du régime de croissance qui prévaudra pour les siècles à venir. Contrairement à l'hypothèse du rapport ESE, nous ne connaissons probablement jamais le destin final de l'humanité. Dans le monde réel, le décideur devra décider dans l'incertitude sur la prospérité dont bénéficieront – ou pas – les générations futures qui auront à gérer l'aval du cycle de nos combustibles nucléaires. Le rapport ESE peine à reconnaître cette réalité fondamentale à la question de l'évaluation des différentes options. Il est vrai cependant que si l'option Cigéo domine une option

alternative Y quel que soit le régime de croissance considéré, alors Cigéo domine aussi Y lorsque le régime de croissance est incertain, et ceci quelle que soit la probabilité du régime KO. C'est essentiellement le cas pour toutes les options Y considérées dans le rapport ESE. Néanmoins, ce n'est pas le cas si on considère l'option ELD (voir Tableaux 2 et 3 ci-dessus).

Par ailleurs, dans le chapitre 6 du rapport ESE, ses auteurs appréhendent les risques d'accident. Mais comme ils analysent séparément les régimes OK et KO, ils ne sont pas en situation de valoriser les bénéfices assurantiels de Cigéo. Tout au plus peut-on observer les coûts bruts plus élevés de l'ELD dans le régime KO que dans le régime OK. Mais en refusant de se mettre dans une situation d'ignorance par rapport au régime de croissance qui prévaudra à l'avenir, ils ne peuvent quantifier ce bénéfice assurantiel. Cet échec ignore le fait que l'option Cigéo a une valeur qu'aucune autre option n'a, celle d'offrir une assurance aux générations futures qui auraient à sacrifier beaucoup pour gérer nos déchets (dont elles auraient perdu le contrôle et la compréhension) alors qu'elles seraient elles-mêmes dans une situation économiquement critique.

Ce bénéfice assurantiel de l'enfouissement profond est sans doute au cœur de l'esprit de la loi, mais n'est pas intégré à l'analyse du rapport ESE.

Valeur de la flexibilité des options alternatives à Cigéo et de la réversibilité dans Cigéo

En accord avec les rapports Gollier et Quinet de France Stratégie, les auteurs du rapport ESE soulignent avec raison l'importance de tenir compte des valeurs d'option des reports de décisions irréversibles dans un processus long d'investissement dans un environnement aussi incertain que celui qui entoure Cigéo (section 3.4, pages 84-88). Hélas, force est de constater que cette recommandation n'est pas mise en œuvre dans l'analyse des options 2, 3 et 4 dans lesquelles des décisions sont reportées à des horizons temporels de plusieurs décennies dans des environnements incertains. En effet, le calcul de valeur d'option consiste à comparer les coûts des différentes stratégies à la date future de décision, et de choisir, dans chaque état du monde, la stratégie la moins coûteuse. C'est avec une telle approche que la simulation de Monte-Carlo prend tout son sens, car elle permet d'estimer l'espérance du coût minimal entre les deux stratégies, où cette variable aléatoire n'a pas de formule analytique pour le calcul de son espérance.

En choisissant la stratégie qui a le coût espéré le plus faible, les auteurs de l'étude ont décidé d'ignorer la valeur de la flexibilité, ce qui, d'un côté, handicape encore plus toutes les options alternatives à Cigéo dans lesquelles des décisions irréversibles de dépenses sont reportées à des dates ultérieures. Néanmoins, comme le coût de la technologie alternative est essentiellement prohibitif dans le rapport ESE, cette problématique de valeur d'option constitue probablement un problème de second ordre qui n'est pas de nature à remettre en cause les conclusions de ce rapport. D'un autre côté, Cigéo intègre aussi de la réversibilité – qui est probablement très coûteuse – sans que les valeurs d'option qui lui sont associées ne soient chiffrées, ce qui est de nature à sous-estimer – avec un effet de premier ordre cette fois – les bénéfices de Cigéo.

3.4.2 L'actualisation

Compte tenu de la durée de vie des déchets nucléaires considérés, ou des délais nécessaires à leur enfouissement, l'évaluation socioéconomique de toute stratégie de l'aval du cycle nucléaire nécessite de faire des arbitrages intergénérationnels pour l'allocation temporelle de ses coûts. Cigéo impose des coûts considérables dans la décennie à venir, tandis que les stratégies alternatives conduisent nécessairement à des reports de coût. Dans un tel contexte, un taux d'actualisation faible favorise le projet Cigéo, tandis qu'un taux d'actualisation élevé favorise les options dans lesquelles les coûts socioéconomiques sont plus étalés dans le temps. Dans cette section, nous discutons des choix réalisés dans ce domaine par les experts de l'ESE, au regard des principes d'actualisation appliqués en France depuis une dizaine d'années (rapports Gollier (2011) et Quinet (2013)). Ce sujet fait l'objet de la section 3.3 (pages 68-83) du rapport ESE.

Le rapport ESE fait l'hypothèse que le décideur saura au moment de la décision dans quel régime l'économie française se trouvera pour toujours, OK ou KO. On ne peut interpréter autrement la méthodologie utilisée dans le rapport ESE, qui propose une ESE séparée spécifique à chaque régime.

Cette approche est en contradiction assez radicale avec les contextes de risque macroéconomique recommandés dans les rapports Gollier et Quinet, qui font l'hypothèse que la croissance économique suit un processus de type brownien avec des catastrophes économiques se produisant périodiquement de façon aléatoire. Il est incohérent de vouloir utiliser dans une ESE fondée sur un régime de croissance OK (par exemple) les recommandations d'actualisation des rapports Gollier et Quinet fondés sur des hypothèses de croissance très différentes. En effet, le fondement moral de l'actualisation, c'est que dans une économie en croissance, investir accroît les inégalités intergénérationnelles et va donc contre le bien commun intégrant une aversion aux inégalités. Dans ce contexte, le taux d'actualisation est le taux de rendement minimal nécessaire pour compenser cette détérioration du bien commun. Il est donc incohérent d'utiliser un taux d'actualisation fondé sur certaines hypothèses de croissance tout en considérant d'autres hypothèses de croissance pour mesurer les coûts et les bénéfices des projets.

De plus, les rapports Gollier et Quinet recommandent d'ajuster le taux d'actualisation d'un projet en fonction de sa capacité à accroître ou réduire le risque collectif. Mais dans les régimes OK et KO, il n'y a pas de risque macroéconomique, ce qui implique que cette prime de risque est nécessairement égale à zéro. Dans le cadre des hypothèses de ce rapport ESE, la logique de l'actualisation justifierait que les évaluateurs actualisent tous les flux de coûts espérés au taux d'intérêt sans risque. Cette erreur d'interprétation de la théorie conduit à surévaluer le taux d'actualisation, et donc à favoriser les options alternatives à Cigéo.

4 Des analyses complémentaires à l'ESE initiale

4.1 Scénario ELD

On a vu qu'aucune des trois options alternatives à Cigéo considérées dans l'ESE ne domine l'option Cigéo, parce que les coûts estimés de la technologie alternative considérée dans ces trois options sont considérablement plus élevés que Cigéo. Faut-il en conclure que Cigéo n'a aucune alternative viable, et qu'en conséquence, il faut mettre cette option en œuvre immédiatement ? En pages 147-148, le rapport ESE explore très brièvement l'option consistant à reporter la construction de Cigéo de 10 ou 20 ans, pour conclure que ce report réduit le coût actualisé de Cigéo même en prenant en compte les coûts de l'allongement de l'entreposage de surface. Cette stratégie de report est néanmoins écartée en constatant que ce report pourrait conduire à la perte du site actuel.

Il est aussi exact que le report de la mise en œuvre d'un projet de stockage souterrain de longue durée est contraire à la loi. Néanmoins, en l'absence de tout scénario alternatif à Cigéo qui soit réaliste, ce groupe de contre-expertise a décidé de comparer Cigéo à la seule alternative crédible, celle d'un entreposage de longue durée (ELD).

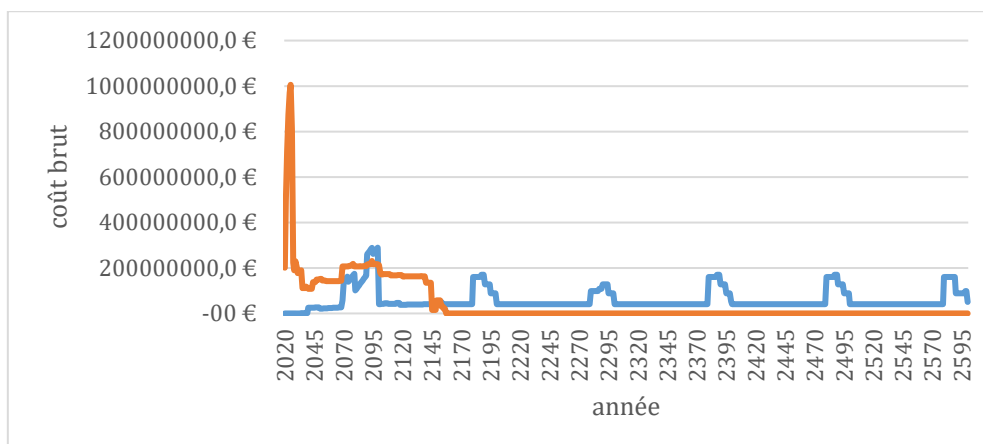
Différents arguments fondent notre approche :

- toute analyse coût-bénéfice doit être fondée sur la comparaison d'options alternatives réalistes. Evaluer un projet sans alternative possible n'a pas de sens. Si aucune décision n'est à prendre, aucune évaluation n'est nécessaire ;
- le fait que le coût réel de Cigéo ait déjà à ce jour été inflaté d'un facteur significatif depuis le vote de la loi pourrait alors contribuer à reconsidérer l'option ELD. Les expertises et contre-expertises ont mission d'évaluer une problématique sociétale dans son ensemble pour faire des recommandations favorables à l'intérêt général, même quand l'optimum social s'écarte de lois votées avant d'apprendre les vrais coûts des solutions retenues dans ces lois ;
- l'ELD reste une option économique souvent discutée parmi les experts, comme le montre les pages 147-148 du rapport ESE.

On retrouve dans le scénario 4.8 de l'option 4 une description détaillée des coûts de l'entreposage de longue durée, qui combine des coûts de maintenance et de reconditionnement périodique des colis. Ce flux de coûts bruts est décrit à la Figure 4, en les comparant au flux de coûts bruts de Cigéo. En accord avec le rapport ESE, le surcoût cumulé brut jusqu'à 2600 de l'ELD est de 35.5 milliards d'euros. En réalité, l'ELD permanent reproduira ces coûts à l'infini. C'est ce scénario d'ELD permanent, reproduit à l'infini, que nous considérerons comme option de référence auquel Cigéo doit se comparer.

L'ELD permanent a un coût cumulé infini, mais beaucoup plus étalé dans le temps. Cigéo a un coût cumulé beaucoup plus faible, mais aussi beaucoup plus immédiat. L'actualisation pourrait-elle nous conduire à préférer l'option ELD si on se contente de comparer les coûts des deux options ?

Figure 3 : Flux de coûts bruts de Cigéo et de l'entreposage de longue durée. On se limite ici à l'horizon 2600, mais l'analyse technique prend en compte un horizon infini des flux de coûts de l'ELD.



Source : Rapport ESE.

4.1.1 Comparaison des coûts de Cigéo et de l'ELD dans le cadre du système d'actualisation français (Quinet, 2013)

L'ESE de Cigéo versus ELD permanent est assez simple à mener dans le cadre du système d'actualisation en vigueur dans le secteur public français tel que recommandé par le rapport Quinet (2013) de France Stratégie. Comme dans le rapport Gollier (2011), il est recommandé d'utiliser des taux d'actualisation r_t ajustés pour le risque égal à

$$r_t = r_{ft} + \beta \pi_t$$

où t est la maturité du coût à actualiser, r_{ft} est le taux sans risque pour cette maturité, π_t est la prime de risque correspondant, et β est l'élasticité-revenu de ce coût. Pour des maturités t inférieures à 50 ans, le rapport Quinet recommande de prendre $r_{ft} = 2,5 \%$ et $\pi_t = 2 \%$. Par contre, pour des horizons très longs, ces taux convergent vers $r_{f\infty} = 1,5 \%$ et $\pi_\infty = 3 \%$.⁶ Ces recommandations sont fondées sur une représentation stochastique de la croissance économique qui n'est pas très explicite.

L'annexe du rapport Quinet (2013) fait référence à un mouvement brownien géométrique contenant deux innovations : une incertitude sur le trend de croissance et des catastrophes macroéconomiques temporaires. La première innovation, fondée sur l'hypothèse d'un trend de croissance de 1 % ou 3 % avec égales probabilités, conduit à la décroissance du taux sans risque et à la croissance de la prime de risque. La seconde innovation, fondée sur le modèle de Barro (2007), permet de résoudre les paradoxes classiques du modèle d'évaluation des actifs financiers.

Rappelons que le rapport ESE fait l'hypothèse que le coût réel X_t s'écarte du coût brut x_t du fait d'une relation croissante entre coût réel et niveau de revenu dans l'économie. Une économie plus prospère engendre des coûts plus élevés, soit parce que le coût du travail y est plus élevé, ou parce que la prospérité accroît la rareté des matières premières, et donc leur prix. Dans le rapport ESE, les auteurs ont fait l'hypothèse d'une élasticité-revenu β constante, soit $X_t = x_t C_t^\beta$. On supposera

⁶ Techniquement, pour des horizons supérieurs à 50 ans, on suivra la recommandation de Quinet (2013) consistant à prendre une interpolation linéaire. Par exemple, $r_{ft} = (50 \times r_{f50} + (t-50)r_{f\infty})/t$.

ici que l'élasticité-revenu β est égale à 0.8.⁷ Cela conduit donc à utiliser un taux d'actualisation de $r_t = 2,5 \% + 0,8 \times 2 \% = 4,1 \%$ pour les coûts se matérialisant avant 2070, puis de réduire progressivement ce taux à $1,5 \% + 0,8 \times 3 \% = 3,9 \%$ au-delà de cette date. Le Tableau 4 indique les valeurs actualisées des deux options sous ces hypothèses.⁸

**Tableau 4 : Valeurs actualisées des coûts
dans le cadre du système d'actualisation français (Quinet, 2013)**

Option Cigéo	Option ELD permanent
10.1 milliards d'euros	1.9 milliards d'euros

Source : Contre-Expertise

Si les rédacteurs du rapport ESE avaient accepté de considérer l'option ELD permanente avec les coûts estimés par eux (scénario 4.8), et s'ils avaient suivi les recommandations du système d'actualisation en vigueur en France depuis 2013, ils auraient dû constater que l'option Cigéo est largement dominée par l'option ELD du point de vue des coûts.

Concrètement, il faudrait inflater les coûts de l'ELD d'un facteur supérieur à 5 pour renverser cette recommandation. Ce rapport ESE aurait pu s'arrêter là, en laissant les décideurs publics devant leur responsabilité.

Cette contre-expertise va plus loin, car cette analyse reste insatisfaisante sur plusieurs points : principalement la non-prise en compte des problèmes de sûreté et l'inadéquation des taux d'actualisation utilisés dans le rapport ESE.

Le rapport ESE de Cigéo s'écarte des hypothèses de croissance économique du rapport Quinet (2013). C'est une façon astucieuse de réviser le système d'actualisation en vigueur et d'en tirer les conséquences dans la valorisation des différentes options.

4.1.2 En l'absence d'incertitude macroéconomique, Cigéo est plus coûteux que l'ELD

Pour comparer les coûts de Cigéo et de l'ELD qui ont des structures temporelles très différentes, le choix du taux d'actualisation est nécessairement déterminant. Pour discuter du taux d'actualisation dans ce cadre, considérons pour commencer l'hypothèse faite dans le rapport ESE d'une croissance économique pérenne telle que décrite par le régime économique OK. Dans ce régime, les experts ont suivi les projections macroéconomiques du COR, qui supposent un taux de croissance des revenus de 1.24 % par an. Dans ce régime de croissance sans incertitude, nous pouvons utiliser la règle de Ramsey pour estimer le taux d'actualisation r_{OK} qui est socialement désirable :

$$r_{OK} = \delta + \gamma g_{OK}$$

où γ est le coefficient relatif d'aversion aux inégalités de la population, δ est le taux de préférence pure pour le présent. Comme dans les rapports Gollier et Quinet, nous choisissons $\gamma = 2$ et $\delta = 0 \%$. Ceci implique un taux d'actualisation égal à $r_{OK} = 2,48 \%$. L'actualisation à 2,48 % est justifiée par la prospérité future très élevée dont bénéficiera les générations futures. Par exemple, dans 300 ans, les générations futures consommeront 40 fois plus de biens et services que nous. Ce taux d'actualisation est largement inférieur à celui recommander par le rapport Quinet (2013). Est-ce suffisant pour renverser la conclusion de Cigéo plus coûteux que l'ELD ?

⁷ Dans le rapport ESE, l'élasticité-revenu est différente selon le type de dépense et l'horizon temporel, sans qu'on sache exactement pourquoi cette élasticité-revenu devrait dépendre du temps.

⁸ En suivant l'esprit du rapport Quinet (2013), nous calculons l'évolution des coûts en supposant que les revenus croissent de 1 % ou 3 % avec égales probabilités.

Notons aussi que le flux de coûts réels des deux options va croître au taux de $0,0124 \times \beta = 0,99\%$ par an. Par exemple, dans 300 ans, les générations futures seraient confrontées à des coûts de gestion des déchets 19 fois plus élevés que maintenant dans l'option ELD.

Dans ce cas, les valeurs actualisées des coûts sont décrites dans le Tableau 5. Malgré l'importance des coûts cumulés de l'ELD et leur croissance dans le temps, l'actualisation à 2,48 % reste suffisamment importante pour écraser ses coûts de long terme. Le fait que l'ELD reporte l'essentiel des coûts de gestion de l'aval du cycle nucléaire laisse cette option nettement plus favorable que Cigéo, dont la valeur actualisée des coûts est trois fois supérieure. Dans ce cadre, l'ELD domine Cigéo en termes d'impact des coûts sur le bien-être intergénérationnel. Parce que nous sommes averses aux inégalités et que nous sommes la génération pauvre dans ce contexte de croissance OK, il est, *ceteris paribus*, socialement désirable de demander aux générations futures de gérer nos déchets.

Tableau 5 : Valeurs actualisées des coûts si le régime OK est certain

Option Cigéo	Option ELD permanent
13.3 milliards d'euros	3.6 milliards d'euros

Source : Contre-expertise

Certains seront surpris de la faiblesse de la valeur actualisée des coûts réels de l'option ELD alors que ses coûts cumulés sont infinis. Pour aider ceux-là, on peut faire le calcul de coin de table suivant. Le rapport ESE suppose un coût cumulé brut jusqu'à 2600 de l'ELD de 35,5 milliards d'euros, ce qui revient à un flux constant de coût brut de 61 millions d'euros par an. L'option ELD pourrait donc être simplifiée comme engendrant un flux de coûts réels initialement égal à 0,061 milliards d'euros par an, croissant à 0,99 % par an. Avec un taux d'actualisation de 2,48 %, la formule de Gordon donne dans ce cas une valeur actualisée égale à

$$VA_{OK}(ELD) \approx \frac{0,061}{0,0248 - 0,0099} = 4,1 \text{ milliards d'euros}$$

Pour résumer, si nous étions sûr que notre économie continuera sur le même chemin de prospérité similaire à celui qu'elle a connu ces deux derniers siècles, la solution Cigéo est plus coûteuse.

Dans le cadre du système d'actualisation en vigueur en France, il faudrait des coûts de l'ELD au moins 3 fois supérieurs à ceux considérés dans le rapport ESE pour renverser ce résultat.

4.2 Un scénario central probabilisé et analyse de sensibilité

4.2.1 Présentation du scénario central

Nous proposons le scénario central probabilisé suivant pour l'ESE de Cigéo et ses options alternatives :

- d'ici 2100, le PIB continuera à croître à 1.24 % par an. A ce moment, le PIB sera 2,65 fois plus élevé qu'aujourd'hui. En 2100, on apprendra lequel des deux régimes de croissance prévaudra, OK ou KO ;
- dans le régime de croissance OK, le PIB continuera à croître au taux $g_{OK} = 1,24\%$ par an ;
- dans le régime de croissance KO, le taux de croissance réel de l'économie est de $g_{OK} = -0,5\%$ par an au-delà de 2100 ;

- on évaluera les options pour différentes probabilités p_{KO} du régime KO. Dans le scénario central, on supposera que $p_{KO} = 10 \%$.

Nous avons rendu le régime KO plus pessimiste que celui décrit dans l'ESE. Dans ce régime, au lieu de se stabiliser à 1,75 fois le PIB actuel dans un siècle, on suppose que la consommation chute de 40 % tous les siècles, ce qui est plus en ligne avec l'idée d'un chaos économique et social durable. Le décideur doit choisir de mettre en œuvre Cigéo ou son alternative dans ce contexte d'incertitude. En espérance au-delà de 2100, la croissance économique reste positive (1,07 % par an), mais l'incertitude grandit avec le temps sur le niveau de PIB.

Nous avons vu antérieurement qu'en termes de coûts, l'ELD domine Cigéo dans le régime OK. Qu'en est-il dans le régime KO ? L'utilisation de la règle de Ramsey conduit dans ce cas à utiliser des taux d'actualisation égaux à deux fois le taux de croissance annualisé sur la période considérée. Pour des maturités inférieures à 80 ans, un taux de 2,48 % doit donc être utilisé, puis ce taux doit se réduire jusqu'à atteindre $\gamma \times g_{KO} = -1 \%$ pour des horizons temporels très éloignés. En même temps, les coûts réels de l'ELD vont croître au taux de $\beta \times g_{KO} = -0,4 \%$. Un flux à actualiser à -1 % qui décroît à un taux de 0,4 % a une valeur actuelle infinie. Par contre, la baisse du taux d'actualisation au-delà de 2100 n'a qu'un faible impact positif sur la valeur actuelle des coûts réels de Cigéo, puisque l'essentiel de ceux-ci se matérialise avant la crise chaotique. Le Tableau 6 résume cette situation.

Tableau 6 : Valeurs actualisées des coûts si le régime KO est certain

Option Cigéo	Option ELD permanent
14.4 milliards d'euros	$+\infty$

Source : Contre-expertise

Dans le régime KO, l'ELD n'est pas envisageable, car il reporte la gestion coûteuse de nos déchets à un avenir misérable. Si KO devait se réaliser, nos responsabilités envers les générations futures nous imposent de prendre en charge l'entièreté de l'aval du cycle nucléaire, et donc de réaliser Cigéo.

Donc, quand il s'agit de comparer les coûts relatifs de Cigéo et ELD, la conclusion dépend intrinsèquement du régime de croissance économique que l'on envisage. La méthode utilisée par les auteurs du rapport ESE qui consiste à mesurer les mérites relatifs de chaque option dans chaque régime et à espérer qu'une de ces options domine les autres quel que soit le régime, ne fonctionne plus quand on intègre l'option ELD dans la liste des options possibles.

En d'autres termes, la méthode d'évaluation utilisée dans le rapport d'ESE ne permet pas de conclure entre Cigéo et ELD, puisque le premier domine le second dans le régime KO, et le second domine le premier en régime OK. Il est donc nécessaire de reconnaître le risque macroéconomique intrinsèque, et de raisonner en situation d'incertitude dans laquelle les différents régimes macroéconomiques sont probabilisés.

4.2.2 Système d'actualisation efficient en incertitude OK/KO

Supposons que la probabilité que le régime KO se déclenche en 2100 soit égale à 10 %. Dans ce cas, quels taux d'actualisation faut-il choisir ? Comment valoriser un coût X_t , possiblement corrélé au revenu C_t , lui-même incertain, qui se matérialisera à la date t ? Les rapports Gollier et Quinet détaillent la solution à cette question. Ils sont fondés sur l'analyse de l'impact des investissements sur le bien-être inter-temporel exprimé comme la somme pondérée des espérances d'utilité du flux de consommation. Dans le contexte étudié ici, il s'agit d'actualiser le coût espéré EX_t à un taux r_t ajusté pour le risque égal à

$$r_t = \delta - \frac{1}{t} \ln \left[\frac{(1 - p_{KO}) \exp(-\gamma g_{OK} t) X_{OKt} + p_{KO} \exp(-\gamma g_{KO} t) X_{KOt}}{(1 - p_{KO}) X_{OKt} + p_{KO} X_{KOt}} \right]$$

où γ est le coefficient relatif d'aversion au risque de la population, δ est le taux de préférence pure pour le présent, et X_{OKt} et X_{KOt} sont les coûts de l'option à la date t respectivement dans les régimes OK et KO.

Comme dans le rapport ESE, on suppose que le coût X_t de toute option a une élasticité-revenu constante et égale à β , c'est-à-dire que $X_t = x_t C_t^\beta$, où x_t est le coût brut (hors croissance) du projet à la date t . Cela permet de remplacer la formule ci-dessus par :

$$r_t = \delta - \frac{1}{t} \ln \left[\frac{(1 - p_{KO}) \exp((\beta - \gamma) g_{OK} t) + p_{KO} \exp((\beta - \gamma) g_{KO} t)}{(1 - p_{KO}) \exp(\beta g_{OK} t) + p_{KO} \exp(\beta g_{KO} t)} \right]$$

Si cette procédure d'actualisation est utilisée correctement, les deux propriétés suivantes sont équivalentes, pour tout projet P :

- le projet P a une VAN positive ;
- la mise en œuvre du projet P augmente le bien-être intergénérationnel exprimé comme la somme actualisée - au taux de préférence pour le présent - des espérances d'utilité des différentes générations impactées.

D'ici à 2100, l'économie croîtra au taux certain de 1,24 %. Dans ce contexte, la formule ci-dessus se simplifie pour donner

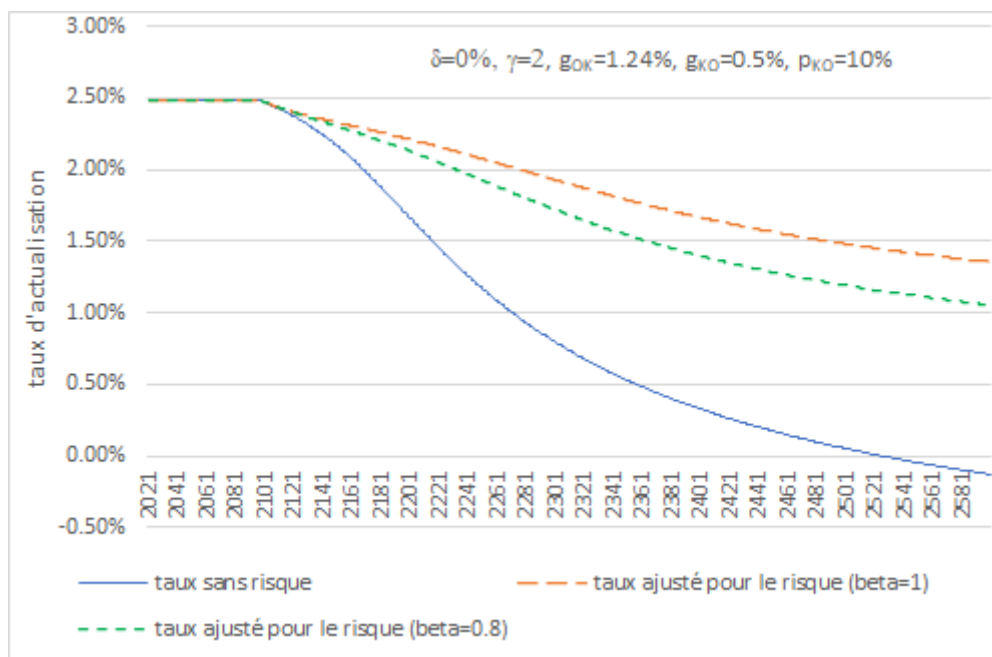
$$r_t = \delta + \gamma g_{OK} = 2,48 \%$$

ce qui constitue la règle de Ramsey. Ni la croissance économique, ni les coûts des différentes options ne sont entachés de risque durant le siècle, et tous les coûts doivent être actualisés au taux de 2,48 % pendant cette période.

Pour les maturités au-delà du siècle, la prospérité et les coûts sont incertains. Cette incertitude pèse sur la façon d'intégrer le long terme dans l'ESE. Quel système d'actualisation devrait être utilisé pour ces horizons temporels ? Quel devrait être par exemple le taux d'actualisation pour les projets sans risque, c'est-à-dire ceux dont les coûts ne sont pas corrélés avec la prospérité du pays ($\beta = 0$). La Figure 4 décrit ce taux d'actualisation sans risque pour différentes maturités. Ce taux décroît de 2,48 % à essentiellement 0 % sur l'horizon temporel du rapport ESE, fixé à 2600.

Le caractère décroissant de la structure par terme du taux d'actualisation sans risque provient de l'immense incertitude qui s'accumule avec le temps sur le niveau de prospérité de la France à long terme. L'incertitude sur la prospérité future de l'économie française justifie une approche précautionneuse (ou prudente) de l'évaluation des investissements de long terme, en particulier en pénalisant plus les projets qui projettent des coûts certains importants à très long terme, là où les incertitudes macroéconomiques sont les plus importantes. Cet argument de prudence est la raison d'être d'une structure décroissante des taux d'actualisation sans risque. Les taux d'actualisation à utiliser pour des coûts certains se matérialisant au-delà du XXI^e siècle sont inférieurs à 2,48 % pour cette raison.

Figure 4 : Actualisation dans le scénario de référence probabilisé



Source : Contre-expertise

Dans le rapport ESE, les coûts des différents projets sont positivement corrélés avec les revenus futurs. Du point de vue de la gestion des risques, cette corrélation positive est une bonne nouvelle. Le pire serait de faire supporter aux générations futures des coûts plus élevés alors que leur économie s'est effondrée (nous reviendrons sur ce point ultérieurement). Le rapport ESE se met dans la position plus favorable où les coûts les plus élevés se matérialisent dans le bon régime de croissance. Parce que nos concitoyens sont risquophobes, cette caractéristique du modèle considéré dans le rapport ESE justifie de prendre un taux d'actualisation plus élevé que le taux sans risque, de manière à ce que les valeurs présentes de ces coûts futurs soient réduites. Dans la Figure 4, nous décrivons la structure par terme des taux d'actualisation de projets dont l'élasticité-revenu β est égale à 0,8 et 1. Ces taux d'actualisation s'écartent fortement de ceux utilisés dans le rapport ESE⁹ tels que synthétisés à la Table 3.3.5 (page 83).

4.2.3 Application à la comparaison de Cigéo et de l'ELD

Comment la plausibilité d'un scénario économique chaotique pourrait-elle renverser la décision favorable à l'ELD dans le régime OK quand on reconnaît que la décision doit être prise avant d'apprendre lequel des deux régimes de croissance prévaudra à l'avenir ? Ce risque a un double effet sur le calcul d'actualisation :

- l'incertitude macroéconomique qui pèse sur les générations futures doit nous inciter à la prudence. Cela doit se faire par une baisse du taux d'actualisation de long terme. Si les coûts étaient sans risque, cet argument prudentiel devrait nous inciter à actualiser avec la structure par terme correspondant au taux sans risque dans la Figure 4. En particulier, cela nous inciterait à utiliser des taux d'actualisation négatifs pour des horizons supérieurs à 6 siècles ;

⁹ Cet écart illustre la difficulté de tout rapport ESE qui ferait des hypothèses de croissance différentes de celles utilisées dans les rapport Gollier et Quinet. On ne peut d'une part faire des hypothèses de croissance s'écartant fortement de Gollier-Quinet et d'autre part utiliser les recommandations d'actualisation de Gollier-Quinet.

- les coûts futurs sont plus élevés dans le bon régime que dans le mauvais régime, ce qui justifie d'avoir une attitude plus favorable au report des coûts. Cela doit conduire à utiliser des taux d'actualisation sans risque plus élevés. Avec $\beta = 0,8$, il s'agit de prendre la structure par terme de taux d'actualisation correspondant à la courbe verte dans la Figure 4.

Ces deux effets vont dans des sens opposés. Mais comme on le voit à la Figure 4, l'effet net nous conduit à utiliser des taux d'actualisation ajustés pour le risque qui sont inférieurs à 2,48 %.

La prise en compte de la plausibilité nous conduit donc à baisser le taux d'actualisation, ce qui est favorable à Cigéo. L'impact de cette baisse des taux d'actualisation est décrit au Tableau 7. Comme dans l'option Cigéo l'essentiel des coûts se concentre dans le siècle à venir, la plausibilité d'un régime KO au-delà de cette période n'a pratiquement pas d'impact sur la valeur actualisée de ses coûts. Par contre, l'impact de la prise en compte du risque sur la valeur actualisée des coûts de l'ELD est tellement important que la série ne converge pas : l'ELD permanent a un coût infini.

Ce résultat reste vrai même pour des probabilités de régime KO beaucoup plus faibles, par exemple $p_{KO} = 0,1$ %. La seule plausibilité d'un tel régime renverse la préférence sociale de ELD vers Cigéo. C'est en quelque sorte une illustration du principe de précaution.

Tableau 7 : Valeurs actualisées des coûts dans le scénario de référence probabilisé.

Option Cigéo	Option ELD permanent
13.4 milliards d'euros	$+\infty$

Source : Contre-expertise

Nous avons donc décrit ici un argument simple mais quantifié de la raison d'être du projet Cigéo.

Dans un monde où les générations futures pourraient être beaucoup moins prospères que nous, il n'est pas économiquement acceptable de leur transférer la charge de nos déchets, et ceci nonobstant le fait qu'en espérance, les générations futures seront beaucoup plus prospères que nous.

Le scénario de référence probabilisé étudié dans cette section comporte une probabilité de 10 % que les générations futures retournent à l'âge de la pierre, et pire encore. Cette hypothèse conduit à vouloir réaliser Cigéo « à tout prix ». Nous considérons néanmoins que cette représentation du destin de l'humanité est trop fruste pour décrire la diversité et la complexité des incertitudes profondes auxquelles les générations futures sont confrontées.

Comme ceci constitue l'élément central de la recommandation de faire Cigéo, nous pensons utile d'enrichir l'analyse par un scénario central probabilisé plus réaliste. Par ailleurs, nous devons tenir compte d'un handicap essentiel de l'ELD, celui de la faiblesse de sûreté, en particulier dans le régime KO. Nous proposons de mener de front ces deux ajustements du modèle de référence dans la section suivante.

4.2.4 ESE avec risque de perte de contrôle de l'ELD et processus markovien de croissance

La « grande peur », celle qui expose réellement nos responsabilités envers les générations futures, c'est une situation dans laquelle nous lèguerions à ces générations des ennuis sérieux, par exemple sanitaires et environnementaux, alors qu'elles-mêmes seraient en situation précaire. Cette grande peur pourrait justifier Cigéo, puisque ce projet annule l'essentiel des problèmes de gestion des déchets nucléaires au-delà de 2156, date de fermeture définitive du site de Bure.

Le rapport ESE n'aborde que tangentiellement les problèmes sanitaires et environnementaux. Or l'option ELD pourrait engendrer de tels risques, en particulier en cas d'évolution chaotique, économique et sociale, de notre société. Dans tout débat sur la gestion de l'aval du cycle nucléaire surgit l'idée qu'il faut une solution pour que le stockage soit fermé, parce que s'il ne l'était pas, une société en perdition deviendrait incapable de gérer les déchets qui l'entourent. Cela conduirait à des catastrophes incontrôlables, au moment même où les gens qui auront à les affronter seront dans la misère. Quand on prend l'option ELD comme référence, l'option Cigéo élimine ce coût dans ce mauvais état du monde. En d'autres mots, elle offre une indemnité d'assurance en cas d'accident. Ce bénéfice assurantiel de Cigéo doit se traduire par une prise en compte directe de ce risque de coût supplémentaire dans l'évaluation de l'ELD ou indirecte par l'intermédiaire d'un taux d'actualisation relativement plus faible pour évaluer les coûts de l'option ELD, et donc, dans tous les cas, une révision à la hausse de la valeur actuelle de ces coûts de l'ELD.

Par ailleurs, comme on l'a vu dans la section précédente, la représentation de l'incertitude pesant sur le destin de notre prospérité collective à très long terme est une dimension clé de la décision de faire – ou de ne pas faire – Cigéo. L'option ELD interroge quant à elle sur le devenir de déchets nucléaires sur des centaines de milliers d'années. Pour questionner notre propension collective à accepter de laisser des milliers de générations futures gérer nos déchets, il nous semble nécessaire d'affiner tant que faire se peut les hypothèses relatives aux évolutions de la société et des dommages potentiels à leur environnement.

Dans cette section, nous mesurons l'impact sur le bien-être intergénérationnel des options Cigéo et ELD dans le scénario central suivant :

- il y a deux régimes de croissance, OK et KO. Le taux de croissance de la consommation est de 1,24 % par an dans le régime OK, et de -0,5 % par an dans le régime KO ;
- si on se trouve dans le régime OK en l'année t , il existe une probabilité $p_{ok} = 0,1$ % de basculer dans le régime KO l'année $t+1$. Si on se trouve dans le régime KO en l'année t , il existe une probabilité $p_{ko} = 1$ % de basculer dans le régime OK l'année $t+1$.

Il s'agit en fait d'un processus markovien à deux régimes. Par rapport au rapport ESE, nous ne supposons plus ici la permanence du régime de croissance. Même quand on tombe dans le régime chaotique, il y a une chance sur cent chaque année de ressortir de ce régime. La durée moyenne de maintien des chaos est de 100 ans. Par contre, quand on est en régime OK, il y a une chance sur mille de basculer dans la dynamique chaotique. La durée moyenne de maintien d'un régime OK est donc de 1000 ans. En bref, un événement chaotique se produit en moyenne tous les millénaires, et il dure en moyenne un siècle. La croissance annuelle moyenne de long terme est de 1.1 % par an. On suppose qu'en 2021, l'économie se trouve dans le régime OK, ce qui implique que les anticipations de croissance à court et moyen termes sont essentiellement de 1.24 % par an.

Le coût économique brut de Cigéo est comme décrit dans le projet d'ESE, avec un coût brut non actualisé de 25,5 milliards s'étalant jusqu'en 2156. On suppose que plus aucun coût n'est supporté par les générations futures au-delà de cette date, et qu'aucun dommage écologique ou sanitaire ne prévaudra dans cette option. Les coûts réels évoluent avec le PIB comme décrit dans le rapport. On suppose que l'élasticité de ces coûts aux variations du PIB est égale à 0,8.

Pour simplifier, on suppose que le coût économique brut de l'ELD est de 100 millions par an, pour toujours. Les coûts réels ont eux aussi une élasticité aux variations du PIB de 0,8. Finalement, on suppose que l'option ELD engendre des dommages économiques, sociaux, environnementaux et sanitaires dès que l'économie rentre en régime chaotique, et aussi longtemps que ce régime prévaut. Nous y reviendrons.

Dans la figure ci-dessous, nous décrivons la structure par termes des taux d'actualisation pour valoriser les flux de coûts nets espérés des options Cigéo et ELD, en supposant un taux de préférence pure pour le présent nul et une aversion aux inégalités de 2. Le calcul de ce système d'actualisation est effectué numériquement (voir annexe technique). A court terme, la croissance annuelle

est quasi-certainement de 1,24 %, et le taux d'actualisation socialement désirable est donc de 2,48 %. A long terme, le niveau du PIB est très incertain, ce qui justifie de réduire le taux d'actualisation à 1,4 %.

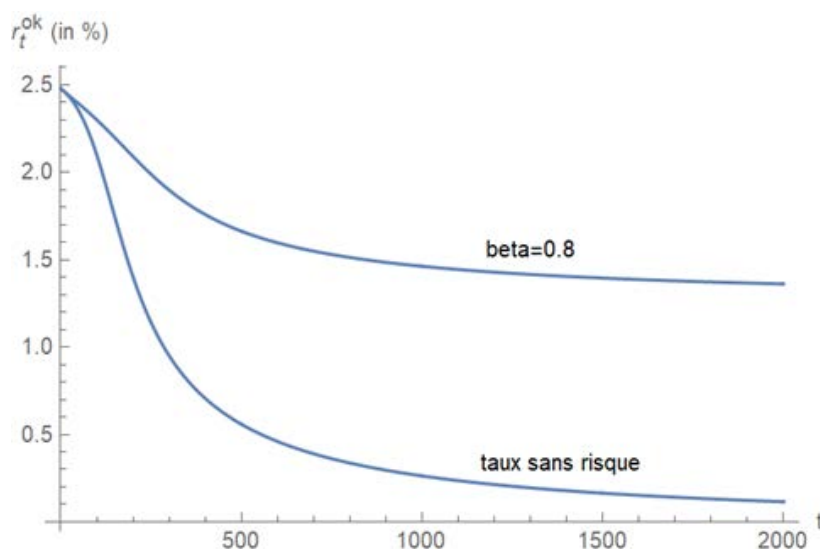
On déduit de ce système d'actualisation les valeurs actualisées des coûts des options Cigéo et ELD (voir Tableau 8). Le coût du projet Cigéo a une valeur actualisée de 13.6 milliards d'euros. Malgré un taux d'actualisation de long terme relativement faible, l'option ELD est moins coûteuse, à 9,3 milliards d'euros.

Tableau 8 : Valeurs actualisées des coûts dans le scénario markovien

Option Cigéo	Option ELD permanent
13,6 milliards d'euros	9,3 milliards d'euros

Source : Contre-expertise

Figure 5 : Structure par termes des taux auxquels actualiser les flux de coûts nets espérés des projets Cigéo et ELD, compte tenu d'une élasticité-PIB de 0,8



Source : Contre-expertise.

Ce calcul ne tient pas compte des risques qui entourent l'option ELD. La question centrale étudiée ici est de savoir s'ils sont suffisamment conséquents pour que la société préfère Cigéo malgré son coût économique important. Pour répondre à cette question, supposons qu'à chaque bascule dans le régime chaotique, un flux de dommages environnementaux se matérialise pour toute la durée de cet épisode chaotique. Faisons l'hypothèse que la valeur unitaire de ce dommage soit proportionnelle au PIB. Se pose alors la question résiduelle de savoir quel serait le dommage annuel supporté par les Français suite à une perte de contrôle de leurs déchets nucléaires, aujourd'hui et pour les 100 années à venir, durée moyenne d'une séquence chaotique dans notre modèle. Un tel événement engendrerait certainement des dommages sanitaires importants les premières années dans les localités aux alentours du site d'entreposage, avec des déplacements de population et un abandon progressif des zones affectées. Supposons que le dommage brut agrégé sur la séquence chaotique soit de 50 milliards d'euros bruts, soit en moyenne 500 millions de dommages annuels bruts.

Pour l'instant, l'entreposage ne pose pas de problème environnemental ou sanitaire, et cela restera le cas tant que le régime de croissance OK prévaudra. Mais le risque de bascule dans un régime chaotique crée un péril considérable. Si cette bascule devait se produire demain, elle engendrerait

un flux de dommages de 0,5 milliard par an pour une durée moyenne de 100 ans, alors même que l'économie s'écroule, avec un taux de décroissance de 0,5% par. Il n'est pas nécessaire de faire des calculs sophistiqués d'actualisation pour conclure que l'hypothèse d'imminence d'un régime chaotique conduit à recommander de démarrer Cigéo immédiatement dans ce cas, si tant est que ce soit encore possible !¹⁰

Néanmoins, le pire n'est pas certain, et nous devons tenir compte de l'incertitude entourant la date du prochain événement chaotique en France. Dans ce contexte, nos calculs indiquent que l'impact de ce risque de perte de contrôle des déchets nucléaires en cas de bascule chaotique est équivalent à une perte de revenus d'environ 8,6 milliards d'euros aujourd'hui. Cela conduit donc à ce que l'option ELD combine deux coûts, le coût direct lié au flux de dépenses brutes de 100 millions d'euros par an, combiné au coût indirect lié au flux de dommages sanitaires et environnementaux de 500 millions d'euros par an durant toutes les années chaotiques.

Le premier flux a une valeur présente de 9,3 milliards, tandis que le second flux vaut 8,6 milliards, pour une valeur présente complète de 17,9 milliards. L'ELD est donc dominé par Cigéo dans ce contexte.

Tableau 9 : Valeurs actualisées des coûts complets dans le scénario markovien

Option Cigéo	Option ELD permanent
13.6 milliards d'euros	17.9 milliards d'euros ^{+∞}

Source : Contre-expertise

Cette recommandation favorable à Cigéo est fondée sur l'hypothèse d'un dommage annuel dû à la perte de contrôle de l'entreposage estimé à 500 millions d'euros, dommage prévalant pour toutes les années chaotiques s'étalant jusqu'à la fin des temps. Comme les périodes KO sont éloignées en moyenne d'un millénaire, cette hypothèse n'est d'une part pas irréaliste (la mémoire s'étant estompée, l'adaptation est à refaire) et d'autre part sans grande conséquence pour le résultat, en comparaison avec une situation où ces coûts ne seraient présents que durant la première période KO. Cette estimation est hasardeuse. Une autre approche consiste à déterminer le seuil de dommage annuel minimum qui conduit à préférer Cigéo à l'ELD. Selon nos calculs, ce montant est de 250 millions d'euros par an.

Notre analyse de sensibilité explore des variations de trois paramètres : l'élasticité des coûts aux variations de PIB, la probabilité de bascule quand le régime est KO, et le taux de décroissance en KO. Deux effets contradictoires se produisent quand on réduit l'élasticité b des coûts aux variations de PIB. D'une part, comme la croissance espérée est positive, la baisse de la sensibilité des coûts aux variations de PIB réduit les coûts réels en espérance. D'autre part, comme la croissance du PIB est incertaine, les coûts réels le sont aussi. Une baisse de β réduit la prime de risque et donc réduit le taux auquel actualiser les coûts réels. Le premier effet tend à réduire la valeur actualisée des coûts, tandis que le deuxième effet tend à les accroître. Il apparaît que pour les maturités courtes, inférieures à 300 ans, l'effet dominant est l'effet de la baisse des coûts réels espérés. Ainsi, la baisse de β de 0,8 à 0,2 réduit le coût de Cigéo, qui passe de 13,6 milliards d'euros à 10,9 milliards d'euros. Par contre, elle accroît les coûts de l'ELD, qui passent de 9,3 milliards d'euros à 11,2 milliards d'euros. Comme cette réduction de β n'a pas d'effet sur les dommages de l'ELD, elle renforce la préférence en faveur de Cigéo.

¹⁰ Les calculs indiquent que si en 2021 démarrait un épisode chaotique, la valeur actualisée des dommages de l'ELD serait d'environ 114 milliards d'euros.

Tableau 10 : Analyse de sensibilité dans l'économie markovienne

	Cigéo coûts	ELD		
		coûts	dommages	total
référence	13.6	9.3	8.6	17.9
$\beta : 0.8 \rightarrow 0.2$	10.9	11.2	8.6	17.4
$p_{ko} : 1\% \rightarrow 0.8\%$	13.6	12.1	15.5	27.6
$g_{ko} : -0.5\% \rightarrow 0\%$	13.4	7.5	4.1	11.6

Source : Contre-expertise

Une baisse de la probabilité de retour au régime OK quand on est en régime KO modifie les perspectives de croissance, et donc le système d'actualisation socialement désirable. En prolongeant le temps de passage moyen en régime chaotique, on baisse le taux de croissance espéré de l'économie, et on accroît l'incertitude qui pèse sur la prospérité à long terme de l'économie. Ces deux phénomènes conduisent à réviser les taux d'actualisation de LT à la baisse pour tous les projets à β plus petits que 1. Cela tend à accroître les coûts actualisés. A ce phénomène se rajoute pour l'ELD l'effet de l'augmentation de la durée moyenne de séjour en régime chaotique, et donc des dommages sanitaires et environnementaux qui en découlent. Dans l'analyse de sensibilité, nous avons fait passer la probabilité p_{KO} de 1 % à 0,8 %. Ceci n'a pas d'effet sensible sur le coût de Cigéo. Par contre, cela augmente massivement autant les coûts que les dommages espérés de l'ELD. Globalement, une telle baisse de la probabilité de recouvrement du régime OK favorise aussi l'option Cigéo.

Finalement, on a étudié l'effet d'une hausse du taux de croissance de l'économie en régime chaotique. Cette hausse augmente le taux de croissance espérée de la consommation et réduit le risque macroéconomique. Cela augmente le taux d'actualisation, en particulier pour les maturités les plus longues. Dans cette analyse de sensibilité, on a fait l'hypothèse que le taux de croissance en KO passe de - 0,5% à 0%. Cela est particulièrement favorable à l'option ELD, qui domine l'option Cigéo dans ce cas. Lorsque, comme dans le rapport ESE, la consommation ne baisse pas en régime chaotique, les générations futures seront plus prospères que nous. Elles seront capables d'affronter les coûts et les dommages de l'ELD. Ceci renforce l'idée que la raison d'être de Cigéo est fondée sur sa valeur assurantielle pour les générations futures qui pourraient être moins prospères que la nôtre.

Pour conclure, cette section suggère que la raison d'être de Cigéo, c'est sa capacité à assurer les générations futures contre une perte de contrôle des déchets en cas de dégradation économique, sociale, politique et scientifique de notre société.

La supériorité de Cigéo par rapport à l'option ELD n'est néanmoins pas très élevée. Il est donc important de vérifier que la gouvernance de Cigéo est suffisamment solide pour garantir que son coût n'excède pas celui de l'option alternative.

4.2.5 Propositions conclusives relatives à la comparaison de Cigéo et ELD

Dans le cadre du calibrage des coûts contenu dans le rapport, il est inutile de mener une analyse complexe pour déduire que parmi les différentes options considérées, Cigéo est la meilleure solution. Les coûts de R&D et de mise en œuvre de la technologie alternative de forage profond sont prohibitivement élevés.

Mais le rapport ignore l'option d'entreposage de longue durée (ELD), que nous proposons d'intégrer dans l'analyse compte tenu des coûts beaucoup plus élevés que prévu de Cigéo (25 Mds€ au lieu de 15 Mds€). Si les rapporteurs avaient utilisé le système d'actualisation existant en France

depuis 2013, ils auraient constaté que l'option Cigéo est plus chère que l'option ELD. Il faudrait des coûts d'ELD 5 fois supérieurs à ceux estimés dans le rapport pour renverser ce résultat. Leur analyse de la variante de l'option 4 va aussi dans ce sens.

En réalisant des ESE spécifiques à chaque régime de croissance, OK et KO, les rapporteurs auraient dû choisir d'actualiser tous les coûts au taux sans risque efficace dans le régime correspondant. Dans un monde sans incertitude macroéconomique, l'Etat devrait être neutre face aux risques. Or en l'absence de risque KO, le projet Cigéo est plus cher que l'ELD.

En réalité, les conditions macroéconomiques qui prévaudront dans les siècles à venir sont très incertaines, et ces incertitudes sont naturellement aux centres des préoccupations de l'Etat, comme le rappellent les rapport Gollier (2011) et Quinet (2013). Le rapport ESE ignore les valeurs prudentielle et assurantielle de Cigéo.

Nous développons deux arguments en faveur de Cigéo, qui sont absents du rapport ESE :

- Argument « prudentiel »

La plausibilité d'une décroissance multiséculaire telle qu'ébauchée dans le rapport ESE nous oblige à actualiser les coûts futurs à un taux plus faible, même si en espérance les générations futures seront plus prospères. Cela favorise les options qui mettent en œuvre une solution pérenne rapidement, comme le projet Cigéo.

- Argument « assurantiel »

L'option ELD va engendrer un risque d'accident local important à l'origine de dommages sanitaires et environnementaux particulièrement élevés dans le régime chaotique. Le projet Cigéo offre un contrat d'assurance aux générations futures contre ce risque. Cela justifie aussi d'actualiser les coûts de l'option ELD à un taux plus faible, ce qui le disqualifie par rapport à Cigéo.

4.3 Cohérence des choix concernant les générations futures lointaines et leur justification éthique

En mettant au cœur de l'analyse de l'intérêt de Cigéo sa comparaison avec l'ELD, la méthode d'évaluation proposée ci-dessus (4.2) intègre l'incertitude sur la prospérité des générations futures comme ingrédient central dans une approche prospective en environnement incertain. La conclusion est donc sensible à trois catégories de paramètres-clés qui méritent réflexions et discussions :

- ceux qui portent sur les caractéristiques principales des «mondes possibles» –taux de croissance, niveau technique et scientifique, qualité des institutions et des formes de coopération, probabilités– ;
- ceux qui portent sur les risques liés à nos actions présentes et leurs impacts potentiels à long terme en terme sanitaire, environnemental, économique (4.3.1);
- et ceux qui portent sur notre attitude morale, nos responsabilités –l'aversion aux inégalités entre générations η , le taux de préférence pure pour le présent (4.3.2).

Cette partie est ainsi motivée par un double constat.

D'une part, si l'on cherche à dégager la trame sous-jacente du projet Cigéo (« nous avons profité des bénéfices du nucléaire civil -électricité, médical, etc. -, nous avons les compétences et une solution, à nous de la mettre en œuvre pour protéger les générations futures dans des scénarios KO »), on s'aperçoit qu'elle repose à la fois sur une prospective des mondes possibles (OK, KO), une grille d'analyse des risques à long terme, et des choix moraux, qui sont peu explicités, alors qu'ils sont fondamentaux dans le choix des actions à mener, la définition de leur cahier des charges, et les objectifs fixés en matière de protection des générations futures. Or ces choix sous-

jacents au projet Cigéo ainsi que l'évaluation qui peut en être menée, méritent une discussion menée avec clarté et cohérence.

D'autre part, le contraste est saisissant entre les milliers de pages d'analyses réglementaires, techniques et sociologiques ou économiques, les centaines d'heures de débats publics consacrés aux déchets nucléaires, et la relative absence de développements structurés sur ces questions prospectives et éthiques pourtant cruciales pour fonder les décisions à prendre.

Si l'ESE aurait pu aller plus loin dans cette réflexion, en particulier sur la cohérence avec le choix de la méthode d'évaluation, elle a le mérite d'inviter à mettre ces questions au centre de l'analyse. C'est une démarche qui devrait être reprise et approfondie plus largement pour mettre en cohérence les réflexions et les décisions concernant les choix publics à venir qui entraîneront des conséquences pour les générations futures lointaines.

4.3.1 Pour une Prospective élargie à très long terme, et une grille d'analyse des risques

Il semble indispensable à ce stade de resituer la question des impacts à long terme des déchets nucléaires dans celle plus vaste de nos responsabilités vis-à-vis des générations futures lointaines. Ces responsabilités, bien mises en scène par Hans Jonas dans les premières pages du « Principe Responsabilité », viennent de la rencontre entre une puissance technique inédite, et des capacités de connaissance de ses impacts dans le futur significatives. Et donc d'autres risques importants liés à cette puissance technique méritent d'être abordés dans les mêmes termes : déchets industriels toxiques, pandémies, changement climatique, biodiversité, impacts des nanotechnologies et de l'IA (nanorobots), guerre nucléaire, etc.

Quatre remarques nous semblent utiles pour relever le défi de ces capacités de connaissances nécessaires pour l'action responsable et cohérente que Jonas appelait de ses vœux :

Partager une grille d'analyse des risques à très long terme

Partager une grille d'analyse des risques à très long terme qui permette de distinguer des degrés dans l'échelle des dangers, l'échelle géographique et le niveau de réversibilité. Une guerre nucléaire mondiale est clairement un risque majeur global aux conséquences irréversibles. L'évolution du climat pourrait présenter des conséquences analogues dans les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre les plus élevées. Les actions visant à diminuer les probabilités d'occurrence de ces scénarios les plus défavorables, ainsi que celles visant à préparer les moyens de s'adapter lorsque c'est encore possible, sont probablement les plus importantes pour les générations futures. Les déchets nucléaires HA et MA-VL comme les déchets industriels toxiques sont particulièrement dangereux pour la santé et l'environnement dès qu'ils se retrouvent concentrés dans les chaînes alimentaires, leurs impacts sont a priori locaux, et peuvent être réversibles dans une certaine mesure en fonction des moyens techniques disponibles.

Analyser les impacts sanitaires et environnementaux

Il faut analyser les impacts sanitaires et environnementaux explicitement, sans s'abriter derrière l'atteinte de normes de pollution ou de rejet qui correspondent à nos pratiques de gestion des risques aujourd'hui, si l'on souhaite évoquer les conséquences réelles sur la vie des hommes et des vivants dans des mondes possibles différents du nôtre et plus défavorables. De ce point de vue, viser les niveaux objectifs de nos seuils réglementaires est compréhensible au vu des pratiques de sûreté d'aujourd'hui et de notre application du principe de précaution, mais a peu de sens à très long terme, notamment dans un scénario de type KO, et de surcroît rend impossible toute comparaison des risques entre domaines différents comme les déchets industriels toxiques, puisque les

normes associées ne sont pas établies dans un même cadre. Ceci doit aussi conduire à des réflexions sur la valeur que les générations futures accorderont à la vie et à leur environnement, en fonction du régime économique (OK ou KO) qu'elles auront à affronter. Ces remarques appellent à franchir les lignes des disciplines (industrie et technique, modèles de diffusion des produits toxiques et impacts dans l'environnement, épidémiologie et impacts sur les collectifs, médical et impacts sur les individus, réglementation), et à dépasser les frontières des domaines d'activités.

Rapprocher les risques comparables et interroger la cohérence des solutions

Il s'agit ensuite de rapprocher les risques comparables et de s'interroger sur la cohérence des solutions proposées et mises en œuvre. On tiendrait là un outil utile pour éviter de solliciter des valeurs tutélaires ad hoc et spécifiques à chaque nouveau problème rencontré. Et surtout utile pour croiser les regards sur les actions pertinentes. Il serait intéressant d'interroger le domaine des déchets industriels toxiques dont les produits les plus dangereux présentent des risques sanitaires significatifs, et pour lesquelles la démarche de recyclage-inertage-puis confinement via entreposage avec la recherche du bon mix entre matrice, colisage, et entreposage relève des mêmes préoccupations que pour les déchets nucléaires à vie longue. L'horizon actuel pour ces entreposages est de l'ordre de la trentaine d'années, et les problèmes spécifiques rencontrés sur le stockage de Stocamine dans d'anciennes mines de potasse ont pour le moment arrêté le stockage géologique en France pour les produits les plus dangereux. Mais il faudra aussi s'interroger sur la gestion à long terme de ces déchets, dans les cas où ils ne trouvent pas d'utilisation et où leur toxicité potentielle perdure sans limite temporelle. Les diverses pratiques internationales (États-Unis, Royaume-Uni, Allemagne, pays scandinaves, Suisse, etc.) mériteraient aussi d'être comparées dans ce domaine comme dans celui des déchets nucléaires.

Étendre l'horizon temporel des exercices de prospective

Prendre en compte ces risques et leurs impacts à très long terme conduit enfin à étendre l'horizon temporel des exercices de prospective. Ouvrir notre regard sur les mondes possibles pertinents pour ces analyses au-delà de la centaine d'années implique de revenir sur l'histoire longue des civilisations en s'appuyant non seulement sur l'histoire économique (Robert Gordon, Angus Maddison, Fernand Braudel, M.I. Finley, Claude Nicolet, etc.), mais aussi les réflexions d'historiens sur les conditions à long terme de la croissance comme du déclin des civilisations (Joël Mokyr, Doug North, David Landes, Francis Fukuyama, ou de Gibbon à Kyle Harper pour Rome, etc.), et le rôle des interactions avec leur environnement (cf. « *Introduction à l'histoire environnementale* », J. B. Fressoz et alii, 2014).

Les développements de l'histoire comme de l'historiographie de ces dernières décennies ont considérablement enrichi notre appréhension de la complexité des relations entre les rôles respectifs des institutions, des mentalités et des cultures, des innovations techniques, de la géographie humaine, des enjeux géopolitiques. De nombreuses études donnent à voir le rôle des réactions des acteurs confrontés à des situations difficiles d'épidémies (par exemple la Grande Peste en Europe), de catastrophes naturelles, d'épuisement des ressources (voir par exemple les écrits de Jared Diamond ou Joachim Radkau), d'évolution du climat ou d'invasions et de guerres civiles ou les « réflexivités environnementales » plus ou moins couronnées de succès dans le renouvellement et la sauvegarde à long terme des écosystèmes, forêts, pêche, pollution des villes, carrières et sous-sol des villes comme Paris, etc. Il y a là un nouveau matériau disponible pour nourrir une « Prospective Systémique » dans l'esprit des pionniers en France comme Gaston Berger et Pierre Massé, élargie au temps long des civilisations, et s'interrogeant non seulement sur les tendances lourdes ou les faits porteurs d'avenir, mais aussi sur l'imagination à avoir concernant les possibilités d'action et d'initiative des individus comme des communautés humaines dans l'avenir lointain pour le

meilleur comme pour le pire. C'est d'autant plus important qu'au cœur des réflexions sur nos obligations vis-à-vis des générations futures se retrouve souvent le dilemme protéger les conditions de vie/ouvrir l'espace des choix (sécurité/liberté).

4.3.2 Mobiliser les ressources des philosophies éthiques

Responsables vis-à-vis des générations futures : dans quelle mesure ? Quelle « épargne juste » ?

Nous avons vu qu'en l'absence de stockage géologique comme Cigéo, les dangers potentiels associés aux déchets nucléaires à vie longue en ELD se traduiront en impacts sanitaires et environnementaux d'autant plus que les probabilités de basculement vers des mondes possibles défavorables (KO) seront élevées. Or nos perceptions de ces probabilités sont probablement plus élevées aujourd'hui qu'il y a quelques années avec les interrogations sur l'évolution climatique, sur les tensions géopolitiques et les risques de conflit nucléaire et/ou d'extension des terrorismes, sur l'évolution démographique en particulier en Afrique, l'arrêt de la croissance (« stagnation séculaire ») liée à long terme à un possible ralentissement des innovations technologiques réellement transformationnelles (cf. R. Gordon et les General Purpose Technologies) et à court terme à des endettements excessifs (L. Summers), ou sur les fractures des sociétés civiles en particulier des démocraties...

La prise en compte de ces enjeux devrait nous amener à valoriser davantage les investissements destinés comme Cigéo à préserver les générations futures lointaines à la marge de ces nouveaux scénarios. Elle devrait plus encore nous amener à investir davantage pour limiter les probabilités d'émergence de ces scénarios défavorables ou catastrophiques : mieux maîtriser l'évolution du climat, accélérer les coopérations internationales pour apaiser les conflits et reprendre les processus de désarmement, améliorer l'efficacité des tissus industriels et des solidarités à l'échelle des sociétés nationales etc. Il faudrait donc augmenter significativement « l'épargne juste » en vue des générations futures, mais jusqu'où ? Comment dimensionner nos efforts et notre responsabilité pour les générations futures lointaines ?

C'est en particulier le débat sur le taux de préférence pure pour le présent δ , entre ceux qui militent pour le mettre à zéro (notamment Ramsey, Rawls), au motif d'éviter de « sacrifier » les générations futures lointaines, et ceux qui militent au contraire pour lui donner une valeur positive, craignant sinon, en cas de croissance nulle ou négative à très long terme, que la « dictature du futur » liée au nombre des individus des générations successives entraîne au contraire des sacrifices exorbitants sur les projets personnels des générations présentes (cf. Koopmans, Arrow). Il n'est d'ailleurs pas anecdotique de rappeler que ce paramètre δ , initialement positif, a été introduit en économie pour permettre techniquement la finitude du bien-être intergénérationnel, exprimé comme la somme actualisée du flux de bien-être de la séquence infinie de générations à venir. Stern avait retenu dans son étude 2006 sur le climat une valeur de 0,1 % qu'il interprétait en lien avec une probabilité de disparition de l'humanité. Le paramètre η d'aversion aux inégalités joue aussi un rôle-clé, faut-il l'aligner sur l'aversion au risque des générations présentes et/ou leur aversion aux inégalités au sein des cités actuelles, ou au contraire le calibrer autrement ?

Trouver la bonne « mesure » sur toutes ces questions est particulièrement délicat comme Rawls l'indique au début du paragraphe 44 de « Théorie de la justice » consacré à la justice entre les générations :

« Nul besoin d'insister sur la difficulté de ce problème. Il soumet les théories éthiques à des épreuves très difficiles, pour ne pas dire impossibles à surmonter ».

Faut-il, s'inspirant malgré cela des principes qu'il propose par ailleurs, agir en ayant non seulement le souci des générations futures les plus faibles, mais en ayant le souci des plus faibles au sein des futures générations (cf. par exemple Fleurbaey-Zuber 2013) ? Cette suggestion, qui peut

être pertinente pour certaines questions et certaines situations, nous interroge sur l'extension de nos responsabilités : devons-nous prendre des actions aujourd'hui pour garantir l'équité de la répartition ou la protection contre les malveillances dans mille ans ? Ou doit-on considérer qu'il s'agit là d'abord de la liberté de choix de ces générations futures lointaines, même si notre responsabilité comme celle des générations intermédiaires peut être de leur transmettre des exemples de comportement, des traditions de sagesse pratique, et des institutions de coopération et de solidarité ? Question qui concerne aussi notre sujet, car les dangers des déchets nucléaires dans la durée seront pour une part importante fonction d'actes de malveillance et/ou de défauts humains dans la gestion de leur confinement (et non le seul résultat de l'évolution de processus physico-chimiques « autonomes »).

Il devient ainsi difficile de comparer les impacts positifs et négatifs à très long terme de nos actions en raison des incertitudes à ces horizons lointains liées à l'enchaînement des chaînes causales naturelles comme à l'exercice des libertés des générations intermédiaires (cf. Hilary Greaves, « Cluelessness »). Comme le rappelle Paul Ricoeur :

« (...) Le déplacement de l'objet de la responsabilité sur l'autrui vulnérable et fragile [pour nous, les générations futures dans des « mondes KO »] tend incontestablement à renforcer le pôle imputation singulière/risque partagé (...) » (Page 69 Le Concept de Responsabilité, Le Juste, 1995). »

Cette imputation ne tient que dans la mesure où elle « vise un sujet capable de se désigner comme l'auteur de ses actes », et capable de les relier à leurs conséquences. On en revient à la sagesse pratique des Grecs : « entre la fuite devant la responsabilité des conséquences et l'inflation d'une responsabilité infinie, il faut trouver la juste mesure et répéter avec R. Spämann le précepte grec : « rien de trop » (Page 68).

Si l'on revient à l'exemple des déchets nucléaires, on comprend bien comment l'hypothèse d'une croissance positive à l'infini consacre la « dictature du présent » dans les calculs actualisés, et comment l'hypothèse d'une croissance négative ou nulle à l'infini peut entraîner la « dictature du futur ». Il faut donc s'interroger sur l'horizon pertinent où l'on peut encore relier nos actions présentes à des conséquences clairement positives ou négatives.

Dans cet exemple, soit au bout de quelques milliers d'années la société KO rebascule sur une société OK, et les déchets sont reconfiés ; soit on reste en société KO, et si les radionucléides restent concentrés et dangereux, les populations locales auront sans doute réalisé qu'il faut partir s'installer ailleurs, comme on s'écarte du seuil d'une zone volcanique en activité. On retrouve la nécessité de relier imagination, prospective et « sagesse pratique » dans l'analyse, en tenant compte de la plausibilité de la mort de notre civilisation comme des capacités d'adaptation de civilisations différentes. Les impacts des déchets nucléaires sont un problème sérieux en société KO, mais demeurent a priori locaux, et pas totalement irréversibles ou « inévitables » à très long terme.

On comprend alors pourquoi Cigéo peut être justifié à condition que les probabilités de basculer à un horizon pas trop lointain dans des scénarios défavorables soit plus prégnantes, que ses caractéristiques soient bien adaptées à son objectif de protection des populations en KO, et que ses coûts et ses délais soient maîtrisés.
--

Que faut-il transmettre aux générations futures ?

Si le dimensionnement de notre effort global est un sujet délicat, il est d'autant plus important de vérifier la pertinence et l'efficacité des différentes actions qui le composent. Pour revenir sur l'exemple des déchets nucléaires, la notion de réversibilité mal utilisée peut conduire à des décisions contre-productives. Comme nous l'avons évoqué au paragraphe 2.1, cette notion est perti-

nente dès lors qu'il s'agit de pouvoir récupérer les colis en cas de problème en phase d'exploitation, de mettre en place un processus durant la phase d'exploitation flexible « par étapes » pour s'adapter aux évolutions des politiques énergétiques en concertation avec les parties prenantes, ou d'ouvrir le champ des possibles via les trois axes de recherche et développement entre 1991 et 2006 pour réduire les incertitudes et fournir aux décideurs les moyens de choisir conformément à l'esprit du principe de précaution.

Cette notion de réversibilité est également parfois invoquée en lien avec le respect de la liberté de choix des générations futures lointaines, l'idée étant alors de leur léguer l'ensemble de nos technologies disponibles, et libre à elles d'en inventer de meilleures y compris si elles trouvent une utilisation nouvelle des déchets. Il faudrait ainsi ne pas fermer le stockage pour faciliter la récupérabilité des colis et des matières qu'ils contiennent : il s'agirait en fait d'un « ELD en couche géologique ».

Cette proposition semble contradictoire : en effet, ou l'on recherche la protection pour les populations locales en scénario KO, qui par définition n'auront pas les capacités d'utiliser nos technologies et encore moins celles d'en inventer de nouvelles pour inertier ou utiliser ces déchets ; alors laisser le stockage ouvert, c'est faciliter les actes de malveillance, les infiltrations d'eau et la diffusion des radionucléides en situation d'abandon de ce qui s'est transformé en ELD. On perd l'objectif de protection sans effet utile par ailleurs.

En revanche, cela peut sembler être utile en scénario OK, surtout si en plus des HA et MA-VL, on stockait des combustibles usés qui présentent un potentiel énergétique intéressant pour des sociétés disposant d'une bonne maîtrise technique. Mais, dans ce cas, on peut considérer qu'elles auront aussi les capacités techniques d'aller forer dans ces stockages fermés et d'aller récupérer ces déchets redevenus matière utile.

Cela permet de redire au fond que nous ne pouvons sans doute pas empêcher par nos actions les conséquences des actes malveillants de sociétés nettement plus avancées que les nôtres sur le plan technique : ce sera leur responsabilité, et elles en auront les moyens.

En revanche nous pouvons rendre ces déchets inoffensifs pour des sociétés moins développées, ce qui ne réduit pas leur liberté réelle, mais au contraire augmente leur espace de choix et leur capacité à mener leurs projets.

Cette discussion conduit naturellement au thème de la valorisation des options que nous offrons aux générations futures selon le degré de réversibilité du stockage et leur niveau de développement. Il faut intégrer dans l'analyse la manière dont les générations futures pourront techniquement ou économiquement gérer cet « héritage », selon les évolutions de société auxquelles elles seront confrontées.

Au-delà de cet exemple, se pose bien, plus largement, la question de ce que nous devons transmettre : patrimoines institutionnel et politique, culturel et moral, scientifique et technique, économique et industriel, environnemental. Cette question a souvent été abordée en termes de justice distributive, et comme si la plupart de ces patrimoines et des « biens » qui les composent étaient substituables. On voit bien que les libertés fondamentales, les valeurs, les institutions qui constituent la cohésion d'une Cité, sont indispensables pour l'existence de communautés humaines. Il en est de même pour certains aspects de notre écosystème : un climat avec + 4 °C ou + 6 °C en moyenne aurait des conséquences négatives concernant la possibilité de vie humaine sur des parties importantes de la planète. On voit qu'il s'agit là probablement de « ressource non substituable ». Il ne s'agit donc pas seulement ni peut-être d'abord de justice distributive au sens habituel en économie, mais de vérifier que l'on transmet le mieux possible aux générations futures les patrimoines fondamentaux et « non substituables » pour la vie humaine, et que l'on cherche sinon, non seulement à être « équitable », mais efficace dans le choix et la mise en œuvre des investissements spécifiques aux différents problèmes qui affectent les générations futures (cf. l'exemple du choix de confinement des déchets nucléaires).

Les raisons de nos obligations envers les générations futures : les Ressources des philosophies éthiques.

Plusieurs débats traversent les philosophies éthiques sur les raisons de nos obligations envers les générations futures (cf. D. Parfit ; D. Birnbacher ; A. Gosseries et L. H. Meyer « *Intergenerational Justice* » 2009). Faut-il parler de « droit » des générations futures à notre égard, alors que l'existence même de ces générations futures lointaines comme les « identités » des personnes qui les composent dépendent de nos actions, et que la succession temporelle introduit une asymétrie et une non-réciprocité peu compatibles avec les approches en termes de contrat social ?

Même si, suivant ces objections, on ne suit pas les philosophes comme Janna Thompson (*Intergenerational Justice*, 2009) favorables à la mise en œuvre de ces « droits », on peut trouver de nombreuses raisons d'avoir des obligations morales envers les générations futures dans les différents courants de pensée philosophiques, qu'ils soient attentifs aux conséquences des actions à long terme (comme les utilitaristes), à la nature morale des actions elles-mêmes (Kant et les approches « déontologiques »), ou à la qualité des motivations et des intentions (« vertus »).

Les différentes approches explicites ou implicites des conditions d'une vie bonne insisteront selon les cas sur l'attention au respect des préférences des générations futures (utilitaristes), aux « biens primaires » (incluant les libertés fondamentales) chez Rawls, aux « capacités » chez Sen. Hans Jonas fonde son « impératif » de préserver l'existence de générations futures et d'un monde habitable pour des raisons métaphysiques (une approche « substantielle » du Bien appuyée sur sa philosophie de la vie) face à la possibilité de catastrophe majeure déclenchée par la puissance technique de l'homme (risque de guerre nucléaire totale par exemple).

Il y a là des ressources importantes pour permettre d'explicitier les raisons qui justifient nos intuitions morales concernant les générations futures, et mettre ainsi en évidence leurs conditions de possibilité et les paradoxes associés. Le groupe 3 du GIEC a proposé dans le chapitre trois de son rapport en 2014 (AR5) et en particulier son paragraphe 3 « *Justice, equity and responsibility* », une brève revue de ces approches. C'est une tentative encore trop rapide, mais qui mériterait d'être développée pour offrir aux citoyens, aux parties prenantes, et aux décideurs une présentation pédagogique et rigoureuse de ces démarches, et nourrir ainsi les débats publics à venir dans nos sociétés caractérisées par le « pluralisme axiologique ».

De nombreux auteurs comme S. Scheffler (« *Why worry about future generations ?* » 2018) ont mis en évidence dans nos comportements ordinaires les valeurs que nous accordons à l'existence et au bien-être des générations futures, et le temps et les efforts que nous y consacrons (cf. « *Lifetime transcending interests* ») : de l'entretien des forêts à l'écriture de livres, de la construction des cathédrales ou des voies romaines aux systèmes d'irrigation des grands « empires hydrauliques », ou encore l'énergie consacrée à la mise en place des cités humaines et de leurs institutions. Il est cependant difficile d'en tirer des indications directes sur les actions collectives à mettre en œuvre. Dans nos pays pluralistes, il faut donc en appeler à la confrontation des convictions argumentées pour faire émerger une vision du Bien Commun, s'appuyant autant que possible sur ces ressources prospectives et éthiques évoquées ci-dessus, et donc à la démocratie délibérative (cf. Charles Girard et Alice Le Goff, « La Démocratie Délibérative », O. Godard « *Global Climate Justice* », 2017).

En lien avec ce sujet de la révélation de nos préférences collectives concernant l'avenir, un des grands paradoxes de la finance est celui qui porte sur le taux sans risque. Depuis deux siècles, la croissance économique a été considérable, mais les taux d'intérêt réels sont restés extrêmement faibles. C'est un paradoxe parce que les individus anticipant une forte croissance de leurs revenus devraient épargner peu ou pas du tout. Au contraire, ils ont beaucoup sacrifié de leur consommation pour épargner massivement, malgré les taux d'intérêt faibles. Cela a permis à nos sociétés d'accumuler un capital considérable, source de notre prospérité. Cette très forte accumulation de capital illustre et pourrait donner une mesure la propension des générations passées à se préoccuper des générations qui les ont suivies. Pourquoi nos aïeux ont-ils tant fait pour nous, alors qu'ils étaient tellement moins riches ? L'intégration de risques de désastres macroéconomiques (une

nouvelle peste noire, une troisième guerre mondiale, etc.) pourrait expliquer une partie de ce paradoxe : les générations passées ont joué la prudence, sans savoir si leurs descendants seraient réellement plus prospères qu'eux. Mais, à l'inverse, elles pourraient aussi avoir eu plaisir à prendre les risques des innovations et du progrès, estimant avoir peu à perdre pour elles-mêmes et leurs enfants, et sans trop d'espoir non plus dans les résultats concrets dans leurs entreprises. Il faudrait aussi intégrer dans l'analyse les conséquences de ces choix sur d'autres types de patrimoine comme l'environnement. En écho à ces remarques, la prise en compte d'un régime KO fonde une analyse coût-bénéfice des sacrifices que nous devrions faire pour les générations futures.

Rappelons qu'il existe de nombreuses stratégies pour améliorer le destin des générations futures. Cigéo en est une. Est-ce la meilleure ? Il ne suffit pas d'affirmer que Cigéo est une bonne chose dans un futur incertain. Encore faut-il montrer que c'est la meilleure chose à faire dans ce cadre.

Peut-être les générations futures désireraient-elles que nous consacrons l'argent de Cigéo pour des choses qui leur seraient encore plus utiles, comme le renforcement de notre système scolaire, l'investissement dans nos infrastructures, la conquête de nouvelles connaissances scientifiques ou de l'espace, le renforcement de notre démocratie, la réduction des inégalités, l'aide au développement comme instrument de paix et de stabilité mondiale, etc.

Par son système d'actualisation et de valeurs tutélaires, l'ESE devrait idéalement organiser la comparaison des mérites relatifs de ces différentes stratégies favorables aux générations futures. Systèmes d'actualisation, valeurs tutélaires, mondes possibles, qui devraient s'appuyer sur un travail collectif mobilisant les ressources prospectives, comportementales et éthiques évoquées ci-dessus.

4.3.3 Des institutions démocratiques efficaces et justes pour prendre en compte les générations futures

On est donc conduit à examiner ces approches, pour une large part, procédurales et « en situation », de démocratie « technique » délibérative qui permettent de confronter et de faire converger les désirs, les préférences, les connaissances, et les convictions morales des générations présentes concernant les générations futures lointaines, pour déboucher sur la mise en œuvre d'actions pertinentes pour ces dernières. On est ainsi confronté à une triple difficulté :

- organiser au service des citoyens une expertise transverse de qualité sur ces risques à long terme et les éléments de prospective associés. Il faut pouvoir mettre en place des « épreuves de justification » qui permettent de prendre en compte des controverses scientifiques et prospectives ouvertes sur la société civile, tout en préservant la préoccupation « substantielle » de la « vérité » et des « faits » (cf. Cours de 2016-2017 de Claudine Tiercelin au Collège de France) ;
- assurer une confrontation des arguments moraux dans une société pluraliste concernant les intérêts de générations absentes. On sait qu'au sein même de la plupart des traditions d'inspiration contractualiste, pour permettre la coopération et le contrat social, il faut supprimer les préférences malveillantes : cf. Harsanyi et les préférences étendues, l'impartialité et le voile d'ignorance chez Rawls, la bénévolence nécessaire et persévérante pour s'engager dans la communication habermassienne. Cette exigence d'un minimum de bénévolence est d'autant plus exigeante ici pour des parties prenantes confrontées à des questions techniques et morales moins familières, et sans la capacité des générations futures à faire valoir leurs intérêts et leurs valeurs ;
- c'est un point d'autant plus important que les problèmes discutés mettent en cause non seulement les générations futures lointaines, mais présentent également des risques ou des opportunités potentiels pour les générations présentes, par exemple pour les populations locales pendant la construction et l'exploitation du stockage de Cigéo. De plus les parties prenantes qui interviennent sur ce problème des déchets nucléaires ont aussi des

intérêts sur d'autres sujets connexes ou plus larges comme la stratégie énergétique ou nucléaire, l'attitude vis-à-vis du progrès, ou le rôle de l'État. Il y a donc des enjeux d'équité intragénérationnelle avec les populations vivant à proximité du site, et des enjeux liés aux intérêts de divers groupes appartenant à la génération actuelle.

Des auteurs comme Dominique Bourg ont mis en avant l'importance de mener une vraie réflexion sur des institutions démocratiques qui soient efficaces et justes pour ces générations futures aujourd'hui absentes de notre espace public de délibération et de décision.

Sans aller plus loin sur ce domaine encore en friche, ces remarques nous incitent à compléter l'analyse de l'intérêt de Cigéo pour les générations futures en s'intéressant à ses conditions de réussite et à la qualité de la gouvernance de ce grand projet industriel complexe (maîtrise des coûts et des délais, maîtrise de la sûreté et plus largement qualité des processus de débat, de concertation et de décision).

4.4 Conditions de réussite de CIGÉO, maîtrise industrielle et gouvernance

4.4.1 Les conditions de réussite d'un projet industriel majeur

Cigéo est un projet industriel majeur sur une durée de plus d'un siècle dont le cahier des charges se constitue progressivement. Il porte sur de multiples enjeux, pour beaucoup nouveaux par rapport au contexte des décennies passées. Il s'agit de piloter un processus par étapes avec de très nombreux acteurs et parties prenantes et de multiples instances de concertation, d'avis et de décisions.

L'expérience de grands projets industriels montre que la simplicité et la robustesse sont les deux meilleures garanties tout à la fois de la maîtrise des coûts, des délais et pour les objectifs de sûreté à court et long terme. La réussite de la mise en œuvre industrielle de Cigéo implique une chaîne de décision lisible, mobilisant toutes les compétences industrielles de la filière et conçue pour atteindre des objectifs clairs : au meilleur coût, protéger les générations lointaines en garantissant la sécurité des travailleurs et des populations pendant son fonctionnement.

En réponse aux sollicitations exprimées lors des concertations précédentes, l'Andra souhaite définir et déployer un programme de concertation et de dialogue avec la société de manière à s'assurer que les décisions prises aujourd'hui ne préemptent pas l'avenir (aspects techniques, éthiques et sociétaux) et définir avec les parties prenantes le jalonnement des décisions.

La gouvernance de la mise en œuvre du projet industriel doit pouvoir garantir que les décisions qui seront prises à l'avenir seront prises dans le sens de l'intérêt général, en intégrant à leur juste valeur les enjeux de sûreté, sanitaires, environnementaux, sociaux et économiques. En un mot, que la gouvernance garantisse la bonne utilisation de l'analyse coût-bénéfice pour éclairer les choix. L'obligation légale de réaliser une ESE ainsi qu'une contre-expertise pour lancer Cigéo va bien sûr dans ce sens, mais cela ne suffit pas.

Comme le montre clairement le rapport ESE, des décisions complémentaires devront être faites à l'avenir pour tenir compte de façon rationnelle de nouvelles informations sur les techniques et les valeurs sociétales. Compte tenu des spécificités de ce projet (coûts, durée, gouvernance, ...), l'affectation de la responsabilité financière doit être clairement allouée.

Ces caractéristiques, tout à fait particulières dans le monde industriel, nécessiteront une claire distinction entre les différents niveaux logiques qui sont au cœur de l'exercice démocratique appliqué à ces choix techniques : décision politique, pilotage industriel et opérationnel, organisation

de la recherche et développement et de l'expertise scientifique et technique transverse, concertation avec les parties prenantes avec un rôle spécifique pour la concertation locale avec les territoires.

4.4.2 Une maîtrise industrielle sécurisant les enjeux de sûreté et réglementaires

Le projet, caractérisé par différents maîtres d'ouvrage et de nombreux maîtres d'œuvre conduira à gérer de nombreuses interfaces : ingénierie, contractualisation, plannings, réalisation des travaux, contrôle, etc. Sous la responsabilité de l'Andra, une vision intégrée, partagée entre maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, est nécessaire. Elle doit prendre appui sur un planning fédérateur, des analyses de risques, une anticipation et une gestion des aléas et des recours, des processus de décision adaptés.

Si ce point est particulièrement important pour les projets industriels complexes, il le sera encore plus pour Cigéo compte tenu du nombre important d'acteurs, de leur nature et de la durée du projet. Un point d'attention particulier concerne le maintien dans la durée de compétences de pilotage et de réalisation particulièrement pointues. Un maillage fort avec les producteurs et des partenariats industriels adaptés et pérennes pourront fournir un appui important à l'Andra dans ce domaine.

L'implication des parties prenantes pour les décisions à prendre sur le projet implique, au titre des enjeux de sûreté et des enjeux industriels, une maîtrise opérationnelle rigoureuse des évolutions de configurations de Cigéo, dès aujourd'hui et pour la phase d'exploitation qui s'étalera sur 150 ans.

Le coût de la phase industrielle pilote (le tiers du coût de Cigéo), sa durée de 20 ans et le processus de concertation retenu ont chacun un caractère exceptionnel. La concertation portera notamment sur ses objectifs, sa durée, sa portée et sa gouvernance. Si cette durée de 20 ans est une opportunité pour répondre aux exigences des dossiers réglementaires, mener les études d'ingénierie nécessaires, conduire la concertation, c'est aussi un risque bien connu de complexifier le projet et, en conséquence, de le fragiliser. A ce titre, l'Andra devra prioriser (sûreté, faisabilité, maîtrise industrielle) le volume d'études concernant les options qui pourraient être alors envisagées.

Des outils sont connus comme les analyses coûts/bénéfices, la recherche permanente de simplifications et de gains en robustesse, la capacité à optimiser des plannings voire à réinterroger la pertinence de certains travaux

Les simplifications ou les reports de travaux ne mettant pas en cause les objectifs de la phase industrielle pilote mais qui pourraient contribuer à la sécuriser méritent d'être étudiés. Par ailleurs, les conditions de sortie de la phase pilote pour basculer dans la phase opérationnelle sont à définir clairement lors du dépôt de la DAC.

Le DUP déposé en 2020 est le premier dossier support aux autorisations réglementaires. Le dépôt de la DAC viendra ensuite, sachant que l'obtention de cette dernière conditionne le début de la construction initiale du centre de stockage Cigéo. Le domaine réglementaire est complexe avec différents maîtres d'ouvrage (RTE, SIVU du Haut Ornain et SIAEP d'Echenay, SNCF Réseau, Conseil départemental de la Haute-Marne en lien avec celui de la Meuse). Les producteurs de déchets sont par ailleurs maîtres d'ouvrage des installations d'entreposage et d'expédition vers Cigéo des colis de déchets radioactifs.

Une vision et un pilotage coordonnés de cette étape entre les différents acteurs sous la responsabilité de l'Andra est incontournable pour maîtriser la tenue des délais et des budgets et sécuriser le cadre réglementaire du projet.

4.4.3 Accompagner une montée en responsabilité de l'Andra dans la gouvernance de Cigéo

La gouvernance de Cigéo est placée sous la tutelle du groupe de travail du PNGMDR. Ces leviers concernent essentiellement les conditions de la mise en œuvre de la réversibilité, l'élaboration de la gouvernance et la définition des objectifs et des critères de réussite de la phase industrielle pilote.

Le GT PNGMDR, co-présidé jusqu'en 2020 par le sous-directeur de l'industrie nucléaire à la DGEC et le président de l'Autorité de sûreté nucléaire, rassemble aujourd'hui essentiellement les représentants des exploitants et des associations de défense de l'environnement. Un élargissement du GT est prévu aux élus de la nation, à la société civile, et aux représentants des collectivités territoriales.

Dans la différenciation des niveaux logiques intervenants dans la gouvernance, la dimension industrielle est nouvelle et doit prendre toute sa place parmi l'organisation de la R&D, l'expertise transverse ou la concertation avec les parties prenantes et les territoires.

Au-delà du rôle de chacun des acteurs institutionnels (ASN, IRSN, HCTISN, CNE, OPECST, DGEC), la responsabilité de l'Andra est essentielle en tant que maître d'ouvrage et futur exploitant nucléaire. En France, l'approche générale de sûreté applicable à toute installation nucléaire repose sur la responsabilité première de l'exploitant. Cette responsabilité est essentielle pour un dialogue de qualité responsabilisant avec l'Autorité de sûreté et ses appuis. Cela doit conduire à renforcer les compétences de l'Andra et à faire évoluer son organisation.

La concertation avec les territoires est un enjeu important du projet. Elle devra permettre un développement local efficace, tout en maîtrisant le poids global de ces prélèvements sur le coût du projet ; poids qui, s'il était prohibitif, fragiliserait sa légitimité dans la durée. Il apparaît important que les options mises en débat auprès des collectivités locales ou des concertations donnent lieu à des analyses coûts bénéfices partagées par tous.

Concernant la R&D, l'Andra devra à la fois garantir la capitalisation du socle de connaissances acquises et prendre appui sur des compétences et des outils pour garantir la démonstration de la sûreté et consolider les options technologiques. Des priorisations sont nécessaires compte tenu des connaissances acquises en priorisant les enjeux de long terme. Dans le cadre des orientations que prendront les pouvoirs publics pour la filière nucléaire, une veille internationale sur d'autres géologies, permettra de garder ouvertes deux options complémentaires de Cigéo pour les générations futures : sur l'ELD d'une part (en distinguant HA et MA-VL, et les différents MA-VL ; avec les dimensions liées produits-matrice-colis-entreposage) et d'autre part l'utilisation-transmutation du Plutonium et de l'Uranium avec la Génération 4.

Une diversité de solutions existe dans le monde pour assurer la nécessaire intégration entre maîtrise de la sûreté, maîtrise du financement et maîtrise industrielle. En Suède ou en Finlande, s'il n'y a pas de prélèvement libératoire comme aux USA ou en Allemagne, les exploitants assurent la responsabilité financière mais aussi, par l'intermédiaire d'une filiale, les responsabilités sûreté et opérationnelle.

Les choix faits par la France s'appuient sur un modèle où les exploitants assurent le financement alors que les responsabilités sûreté et opérationnelles sont confiées à l'Andra. C'est la tutelle qui a alors la responsabilité des trois domaines. Ce modèle, quasi unique dans le monde industriel, confère une responsabilité particulière à la puissance publique. Il faudra s'assurer dans ce cadre que les analyses coûts/bénéfices seront conduites avec rigueur et que la gouvernance permettra d'allouer des responsabilités claires concernant les coûts et les délais.

4.4.4 En conclusion

Le projet Cigéo entre dans une nouvelle phase avec une dimension industrielle à intégrer. Cette contre-expertise conclut en faveur de l'intérêt de Cigéo. Mais il faut s'assurer alors de le faire « vite » et « bien » en pensant aux générations futures et en maîtrisant les coûts et les délais.

Les procédures réglementaires et la phase industrielle pilote seront les étapes majeures des années à venir. Les simplifications ou les reports de travaux ne mettant pas en cause les objectifs de cette phase mais qui pourraient contribuer à la sécuriser méritent d'être étudiés. Ce nouveau contexte et la prise en compte des enjeux de long terme doivent enfin constituer une grille d'analyse pour les choix de R&D (par exemple ceux concernant le devenir du laboratoire, etc.).

5 Conclusion

Quels sont les objectifs du Projet ? (Alternatives, option de référence, scénario de référence)

En s'imposant de rester dans le cadre des décisions déjà prises par les pouvoirs publics (en particulier les lois de 2006 et 2016), le rapport ne retient pas comme alternatives de Cigéo l'entrepôt de longue durée (ELD), des variantes « structurelles » dans les options-clés du projet Cigéo lui-même, ou encore d'autres géologies en France pour un stockage profond. Une partie substantielle de l'étude revient ainsi à comparer Cigéo à une solution pérenne « prospective », le forage profond, qui apparaît rapidement plus coûteux et moins mature.

Ne pas mettre au cœur de la problématique dès le départ la comparaison de Cigéo à l'ELD (candidat crédible comme option de référence) empêche de développer ce que pourraient être les impacts sanitaires et environnementaux sur les générations futures lointaines en l'absence de stockage profond, et du coup de s'interroger plus précisément sur les caractéristiques des sociétés à très long terme à prendre en compte dans le scénario de référence, ainsi que sur la méthode d'évaluation à retenir pour ce projet atypique tant par sa durée que sur ses impacts potentiels éloignés dans le temps (jusqu'à des centaines de milliers d'années). Au-delà des questions méthodologiques, cette problématique interroge les décideurs publics dans des dimensions autant pragmatique que philosophique sur nos responsabilités envers les générations futures confrontées à un futur chargé d'incertitudes profondes. La proposition du rapport ESE consistant à considérer un scénario persistant de croissance chaotique est une innovation qui fera sans doute date.

Cigéo, la meilleure « solution pérenne » vu d'aujourd'hui

Si l'on s'en tient aux « solutions pérennes », i. e. stockages profonds du type Cigéo ou « forage profond », ce dernier apparaît clairement dominé par les premiers pour les déchets MA-VL, et dans une moindre mesure pour les HA, en l'état de cette technologie encore non mature sur le plan industriel. Il serait utile de rappeler les caractéristiques principales des autres géologies candidates en France sur le plan technique, et pourquoi on a de bonnes raisons de penser que l'argile de Meuse-Haute-Marne est particulièrement favorable.

L'intérêt de Cigéo face à l'ELD

L'ELD est à l'évidence meilleur que Cigéo si l'on suppose un scénario de croissance durable (du PIB par tête) à très long terme, par exemple de l'ordre de 1 ou 1,5 % par an. Considérant des taux d'actualisation cohérents avec ces taux de croissance, dépenser au-delà de 2100 de l'ordre de 10 milliards d'euros par siècle (coûts de l'ELD) est nettement préférable à dépenser 25 milliards les 100 prochaines années (coûts de Cigéo). Ceci est dû au fait qu'avec de tels taux de croissance, les générations de 2300 seront entre 16 et 70 fois plus riches que nous. De plus, sous l'hypothèse d'une telle prospérité à venir, investir 25 milliards d'euros dans le capital productif de l'économie aujourd'hui créera plus de valeur sociale pour ces générations que de construire Cigéo.

Au contraire, si l'on bascule dans un monde de stagnation séculaire ou millénaire, et donc des taux d'actualisation nuls à long terme, les coûts de l'ELD sommés sur le temps long deviennent incommensurables. Et plus encore, si l'on bascule dans un monde de décroissance et de fragilité institutionnelle avec un niveau de PIB par tête durablement inférieur à celui des années 1950, les générations futures seront confrontées localement à des risques sanitaires et environnementaux majeurs autour des sites d'entrepôt dans un contexte détérioré de contrôle actif. Dans ce scénario de croissance chaotique, la combinaison d'un taux d'actualisation faible et l'émergence d'une problématique majeure de sûreté démontrerait la supériorité de l'option Cigéo si nous étions certains que ce scénario économique constitue notre destin collectif.

Ainsi, l'optimalité sociale de Cigéo par rapport à l'ELD dépend de notre vision collective de l'avenir. Dans ce rapport de contre-expertise, et en accord avec les principes d'ESE en vigueur en France, il nous paraît fondamental de prendre en compte, à la différence de l'évaluation socio-économique proposée ici, l'incertitude macroéconomique de long terme comme un élément constitutif de l'analyse. Nous avons cherché à déterminer si Cigéo domine l'ELD dans cette réalité que nous devons affronter, celle de devoir choisir sans savoir (le destin des générations futures). Il s'agit donc de construire un « scénario de référence » unique qui prend en compte en probabilités ces trois mondes possibles, croissance durable, stagnation millénaire, décroissance et fragilité institutionnelle, avec possible aller-retour entre eux.

La plausibilité de scénarios de stagnation séculaire, voire de régression et de décroissance, a pour effet de réduire le taux d'actualisation de long terme en-deçà des niveaux actuellement recommandés en France, ce qui devrait induire plus d'efforts en faveur des générations futures. Nous avons mis en avant dans ce rapport cet effet « prudentiel » en faveur de Cigéo. Nous avons aussi mis en évidence un autre argument, l'argument « assurantiel ». Cigéo a pour vocation première d'éliminer tout risque sanitaire ou environnemental qui pourrait se produire en cas d'évolution chaotique de notre société. Cigéo évite des dommages au moment même où les générations futures appauvries seraient incapables de les affronter. Nous avons montré que cette corrélation négative entre dommages et prospérité conduit à ce que l'impact de l'option ELD sur le bien-être intergénérationnel soit bien plus négatif que celui de l'option Cigéo.

Cette approche rejoint les conclusions qualitatives (non quantifiées dans le rapport ESE) du dernier paragraphe de la page 6 du rapport de l'ESE, tout en restant dans les cadres standards des analyses socio-économiques (en particulier cohérence des taux d'actualisation et des taux de croissance, pas de valeur tutélaire ad hoc), et en abordant de front la comparaison Cigéo-ELD. Elle évite les complexités inutiles en particulier de l'option 4 et de la multiplicité des taux d'actualisation dont les valeurs ne sont plus cohérentes avec les taux de croissance sous-jacents. Enfin elle met en évidence les paramètres-clés que sont ces mondes possibles et notre perception des probabilités de basculement dans ces mondes défavorables probablement plus élevées aujourd'hui avec les interrogations sur l'évolution climatique, les tensions géopolitiques et les rythmes d'innovation technologique dans les prochaines décennies.

La cohérence de nos choix (au-delà des seuls déchets nucléaires) concernant les générations futures lointaines, et leur justification éthique

On mesure bien sûr la fragilité de l'estimation de paramètres-clés comme les caractéristiques de ces mondes possibles et leurs probabilités, ou de la mesure des coûts ou des dommages sanitaires et environnementaux dans les options à niveau de sûreté inférieurs à l'option Cigéo. On reconnaît aussi l'importance de la caractérisation de nos préférences sociales, en particulier au travers du degré d'aversion aux inégalités qui fonde le choix du système d'actualisation.

Mais il faut surtout resituer la question spécifique des déchets nucléaires dans celle plus vaste de nos responsabilités vis-à-vis des générations futures lointaines, qui touchent à bien d'autres domaines dont les impacts sont peut-être plus importants encore : déchets industriels toxiques (entreposés en surface et dont l'avenir est ouvert à plus de quelques décennies), biodiversité, changement climatique, etc. Si les probabilités de mondes défavorables augmentent, il faut sans doute augmenter la part de « l'épargne juste » destinée aux générations futures lointaines, mais il faut surtout l'orienter vers ce qui sera le plus efficace, et d'abord agir sur le niveau de ces probabilités de basculement par exemple en dépensant davantage sur l'évolution du climat ou sur la qualité des patrimoines institutionnels ou culturels que nous leur laissons. Prendre davantage en compte la cohérence de nos choix dans l'ensemble des domaines qui ont potentiellement des impacts à très long terme implique donc de développer une grille d'analyse de ces risques, travailler sur les scénarios possibles et les actions utiles « d'atténuation » ou « d'adaptation », et d'adapter des méthodes d'évaluation de façon cohérente pour l'ensemble de ces domaines. Enfin, il serait utile de

revenir sur ce que sont nos responsabilités sur ces sujets où le très long terme introduit un niveau d'incertitude supplémentaire sur le lien action aujourd'hui-conséquences demain, non seulement du fait de la complexité des chaînes causales physiques en cause, mais surtout en raison du rôle décisif des choix des générations intermédiaires (cf. philosophie morale et justice intergénérationnelle).

Ce travail interpelle l'État pour une meilleure cohérence de ses efforts envers la soutenabilité. Il serait utile que l'État mette en place un cadre de réflexion qui permette de produire un consensus sur la représentation des futurs possibles et probabilisés, et d'en déduire un système d'actualisation efficace, tant pour mesurer les bénéfices prudentiels qu'assurantiels de ces projets.

La fragilité des paramètres évoqués ci-dessus et l'absence de cette cohérence globale incitent d'autant plus à compléter l'analyse de l'intérêt de Cigéo en s'intéressant d'une part à l'optimisation des dimensions importantes pour sa réussite -options industrielles encore ouvertes, stratégie de recherche et développement, fiscalité et développement local - et d'autre part à l'adaptation de sa gouvernance aux enjeux nouveaux d'une phase opérationnelle.

Les conditions de réussite de Cigéo

Maîtrise industrielle – recherche et développement sur les déchets –développement local et fiscalité

Cigéo est un grand projet industriel complexe sur une durée atypique de plus d'un siècle, un ouvrage « tête de série unique » au confluent de multiples enjeux. La réussite de sa mise en œuvre industrielle implique donc que le projet soit le plus simple possible, avec une chaîne de décision lisible, mobilisant toutes les compétences industrielles de la filière, et conçu pour atteindre des objectifs clairs : protéger les générations lointaines en garantissant la sécurité des travailleurs et des populations pendant son fonctionnement. Les responsabilités industrielles, financières et sûreté opérationnelle doivent être identifiées, avec des processus décisionnels sécurisés. Il faudra en particulier dans cette vision de simplification et de robustesse interroger les travaux prévus de la tranche 1 et Phipil et leur optimisation.

La recherche et développement associée aux déchets vie longue devrait, en plus d'une veille internationale sur d'autres géologies, permettre de garder ouvertes deux options importantes et complémentaires de Cigéo pour les générations futures : sur l'ELD d'une part (en distinguant HA et MA-VL, et les différents MA-VL ; avec les dimensions liées produits-matrice-colis-entreposage), et d'autre part l'utilisation-transmutation du Plutonium et de l'Uranium avec la Génération 4.

La concertation avec les territoires devra permettre un développement local efficace, en s'appuyant sur une fiscalité maîtrisée.

Par ailleurs, l'examen de l'ESE spécifique au volet transport rappelle combien le projet Cigéo s'inscrit dans un territoire et qu'il est essentiel de mener au cœur des processus de décision et de concertation, des analyses coûts-bénéfices socio-économiques et des analyses de risques pour optimiser les choix techniques structurants en objectivant ce qui est fait pour réduire les impacts environnementaux et sociaux pour les territoires et les générations présentes. L'ESE du volet transport gagnerait à être plus détaillée en adoptant une approche par composante des infrastructures de transport, de manière à mieux expliquer le pourquoi de certains choix en particulier ceux pris pour la Liaison Intersites.

Une gouvernance adaptée à une nouvelle phase industrielle

Il s'agit de piloter un processus par étapes sur un siècle, avec de multiples enjeux, de multiples acteurs et parties prenantes, et de multiples instances de concertation, d'avis, et de décisions. Il

faudra s'assurer de la lisibilité de cette gouvernance, de sa simplification à chaque fois que c'est possible, et de sa pertinence au regard des objectifs : sûreté aujourd'hui comme demain, maîtrise des coûts et des délais, développement local, ouverture d'options utiles pour les générations futures. Cette gouvernance devra être garante que le processus de gestion du projet tout au long de sa vie se fera dans le sens de l'intérêt général, en prenant en compte toutes ses dimensions sanitaires, environnementales, sociales et économiques, par des évaluations socio-économiques à la hauteur des enjeux. Cela passe sans doute par la claire distinction entre les différents niveaux logiques qui sont au cœur de l'exercice démocratique appliqué à ces choix techniques : décision politique, pilotage industriel et opérationnel, organisation de la recherche et développement et de l'expertise scientifique et technique transverse, concertation avec les parties prenantes avec un rôle spécifique pour la concertation locale avec les territoires.

Annexe : Contre-expertise du Volet Transport du projet Cigéo

Cette annexe reprend le contenu du rapport de contre-expertise portant sur le volet transport de Cigéo.

La contre-expertise a pour objectif de procéder à une analyse de l'Évaluation Économique et Sociale (ESE) des infrastructures de transport du projet global Cigéo afin de déterminer si cette étude permet d'éclairer l'État sur le choix des infrastructures proposées et si elle est conforme aux dispositions législatives et réglementaires relatives à l'évaluation des projets de transport (instruction du Gouvernement du 16 juin 2014¹¹, référentiel méthodologique du 27 juin 2014¹², mis à jour en 2019, fiches-outils de 2019¹³).

Le document analysé correspond à la pièce 13 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage des déchets radioactifs Cigéo. Elle a comme objectif principal de présenter l'évaluation comparative des alternatives de transport pour le projet global Cigéo avec comme but celui de déterminer les options de transport les plus adaptées au projet pour assurer la desserte du centre de stockage Cigéo et maintenir la continuité des réseaux locaux impactés par Cigéo. Le volet transport est donc une composante du projet global Cigéo et n'a pas de raison d'exister en dehors de ce projet.

Néanmoins, du fait de l'important montant d'investissement que représente le volet transport (265 millions d'euros de coût initial) et de l'impact de l'infrastructure de transport pour les territoires et les populations locales qui en font un facteur déterminant de l'acceptation sociale du projet global Cigéo, une évaluation spécifique du volet transport a été élaborée ce qui permet de mettre l'accent sur l'importance d'optimiser ces infrastructures que ce soit en termes de coût ou d'impact territorial et social.

Cette ESE est donc complémentaire de l'ESE présentée par l'ANDRA en août 2020 intitulée « Évaluation socioéconomique du projet global Cigéo : Solution de référence de stockage géologique profond retenue pour les déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue ».

Ce rapport de contre-expertise relatif aux infrastructures de transport du projet Cigéo est structuré autour de deux grands axes, une première partie qui présente les grandes étapes de l'ESE réalisée pour les infrastructures transport avec une série de commentaires de la part des contre-experts, ainsi qu'une seconde partie où sont abordés certains aspects de l'évaluation et du projet qui méritent une analyse plus détaillée.

Commentaire : Pour des projets d'infrastructure de grande taille, il est très intéressant d'adopter la pratique proposée dans le cadre du projet Cigéo et ainsi d'analyser un ou plusieurs aspects du projet de manière séparée comme cela a été fait pour le volet transport de Cigéo, et ainsi pouvoir s'assurer que les différentes composantes du projet sont optimisées en termes de coût pour la société (économique, environnemental et social).

¹¹ Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'Énergie (2014). Instruction du gouvernement du 16 juin 2014 relative à l'évaluation des projets de transport. Vol.12. NoDEVT1407546J, pp.87-90.

¹² Ministère de la transition écologique et solidaire ; Ministère chargé des transports (2014), Référentiel méthodologique pour l'évaluation des projets de transport. DGITM. [Note technique 270614.pdf \(ecologie.gouv.fr\)](#)

¹³ Ministère de la transition écologique et solidaire (2019), Fiches-outils du référentiel d'évaluation des projets de transport. [Évaluation des projets de transport | Ministère de la Transition écologique \(ecologie.gouv.fr\)](#)

1 Présentation de l'ESE des infrastructures de transport du projet global Cigéo

1.1 Analyse stratégique des infrastructures de transport

L'objectif principal du volet transport est l'acheminement des déchets nucléaires et autres inputs pour assurer l'exploitation du projet Cigéo.

Cigéo est un centre de stockage, réversible, de formation géologique profonde (500 m de profondeur) pour les déchets radioactifs français de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL), qui ne peuvent pas être conservés durablement en surface compte tenu de leur forte dangerosité et de la très longue durée pendant laquelle cette dangerosité perdure. Le site qui a été sélectionné pour Cigéo est situé dans la région Grand-Est, au sein des départements de la Meuse et de la Haute-Marne et des communes de Bonnet, Bure, Cirfontaines-en-Ornois, Guillaumé, Gondrecourt-le-Château, Houlaincourt, Horville-en-Ornois, Mandres-en-Barrois, Ribeaucourt, Saint-Joire et Saudron.

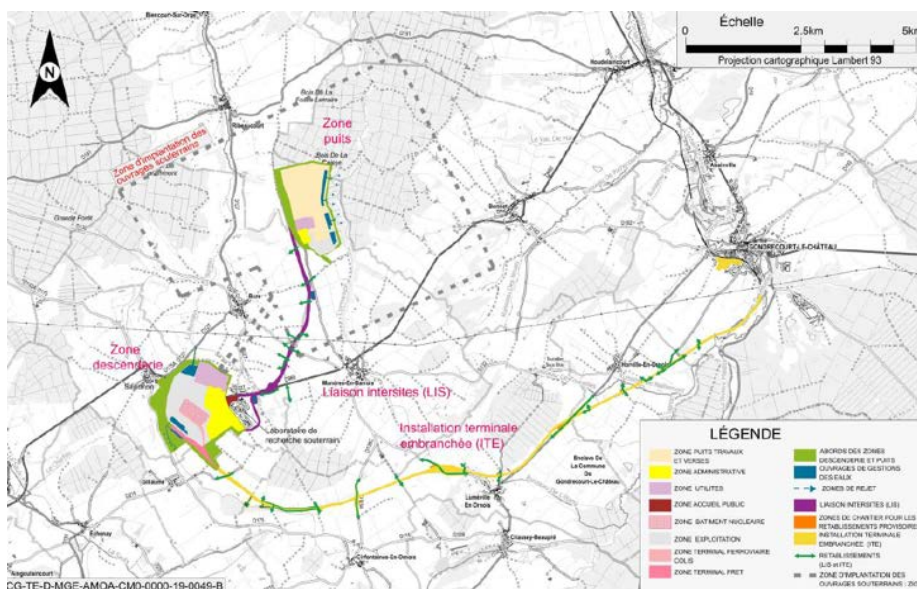
Comme illustré sur la figure suivante, le projet Cigéo se compose principalement de :

- une zone descendrière (ZD) en surface qui permet la réception des colis de déchets radioactifs envoyés par les producteurs, à leur contrôle et à leur préparation pour le stockage avant transfert dans l'installation souterraine pour leur stockage ;
- une zone puits (ZP) en surface, dédiée aux installations de soutien aux activités réalisées dans l'installation souterraine et en particulier aux travaux de creusement ;
- une zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS), comprenant des quartiers de stockage des colis de déchets radioactifs, des zones de soutien logistique (ZSL) et leur accès depuis la surface.

Mais également sont comprises au projet Cigéo, 4 infrastructures principales de transport qui font l'objet de l'ESE analysée :

- une liaison ferroviaire qui permet de relier le réseau ferré national à la ZD et qui comprend : la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 jusqu'à Gondrecourt-le-Château, une plateforme logistique dans cette commune ;
- la création d'une Installation Terminale Embranchée (ITE) de Gondrecourt-le-Château à la ZD ;
- une liaison intersites (LIS) en surface, reliant la ZP à la ZD, comprenant un convoyeur, une voie dédiée à la circulation des poids lourds (PL) et une voie pour la circulation des véhicules légers (VL) ;
- la déviation de la route départementale D60/960 pour rétablir le transit local.

Figure 6 : Installations du centre de stockage et infrastructures de transport du projet Cigéo



Source : Document d'ESE des infrastructures de transport du projet global Cigéo, pp. 10.

Par la suite, sont présentées une par une, chacune des infrastructures de transport avec leurs options de référence. Pour cela, l'infrastructure de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 et l'ITE sont considérées comme une seule même composante du projet appelée liaison ferroviaire.

Commentaire : De manière générale, la présentation proposée dans l'ESE est claire, rigoureuse et pédagogique et elle répond aux exigences de la réglementation en présentant en premier l'option de référence de chacune des composantes du volet transport et dans un second temps, l'option projet. Néanmoins, il est souvent plus facile pour le lecteur d'appréhender l'analyse stratégique, composante par composante, logique qui est adoptée dans la présentation ci-dessous.

Liaison ferroviaire

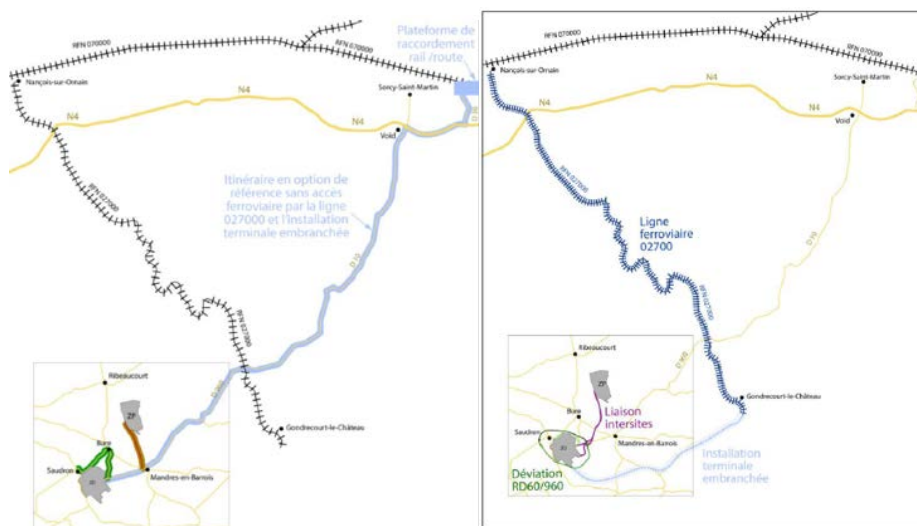
En l'absence de liaison ferroviaire, les colis acheminés par convois ferroviaires depuis leurs sites d'entreposage devraient être transbordés vers des poids lourds à partir d'une plateforme à construire à proximité de la Commune de Sorcy-Saint-Martin (Meuse) sur la ligne ferroviaire Paris-Strasbourg (RFN 070000), pour ensuite être transportés par voie routière (empruntant successivement les routes, D36, N4, D10 et D60/960) jusqu'au site de déchargement qui devrait être prévu à cet effet dans la ZD. Au total, cela représenterait un trajet de 42 km supposant la réalisation des infrastructures suivantes : embranchement ferroviaire sur le réseau ferré national et construction de la plateforme de transbordement et de son accès à la route D36 et création de plateforme de déchargement dans la ZD.

Avec l'option projet et la liaison ferroviaire, les colis seraient acheminés par voie ferroviaire Paris-Strasbourg (RFN 070000) jusqu'à un embranchement ferroviaire à proximité de la commune de Nançois-sur-Ornain, pour ensuite être transportés sur la voie ferrée 027000 remise à niveau à cet effet, et finalement emprunter, sans rupture de charge, au niveau de la commune de Gondrecourt-le-Château, la nouvelle installation ferroviaire à construire, l'ITE pour 14 km. Au total, entre Nançois-sur-Ornain et la ZD, le trajet ferroviaire serait de 49,8 km. Néanmoins, pour pouvoir comparer avec l'option de référence, il est nécessaire comme cela est correctement fait dans l'ESE, de prendre en compte l'origine des colis qui arrivent en provenance de la Hague directement sur Nançois-

sur-Ornain, alors que ceux qui arrivent en provenance de Bugey et de Marcoule devront prolonger leur trajet entre Sorcy-Saint-Martin et Nançois-sur-Ornain.

La figure suivante juxtapose les représentations de l'option de référence et de l'option projet pour la composante de liaison ferroviaire.

Figure 7 : Option de référence et projet liaison ferroviaire du projet Cigéo



Source : Document d'ESE des infrastructures de transport du projet global Cigéo, pp. 44 et 50

Commentaire : Il est important de souligner que le trajet proposé pour la liaison ferroviaire minimise au maximum l'impact sur le territoire en réutilisant d'anciennes voies ferrées abandonnées ou démantelées et que de ce fait, des 49,8 km qui seraient mis en exploitation, seulement 4 km correspondent à un nouveau tracé.

Liaison intersites (LIS)

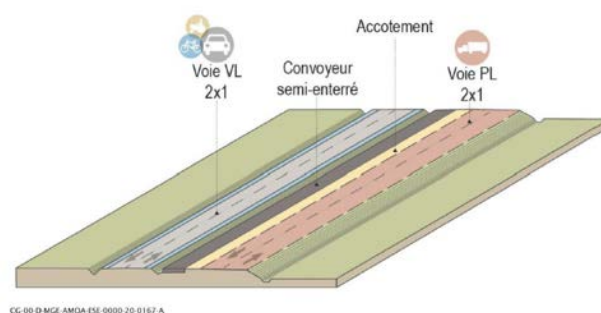
En l'absence de la LIS qui permet de connecter la ZD y la ZP distantes de 3 km à vol d'oiseau, l'option de référence proposée est la mise à niveau du réseau routier existant qui permettrait le transport de matériel (en particulier d'argile) et de personnes depuis la ZD par la route D60/960 jusqu'à l'embranchement avant la commune de Mandres-en-Barrois avec un chemin agricole qui doit être mis à niveau, l'ancienne voie romaine, qui permettrait d'accéder à la ZP. Au total, cela représenterait un trajet routier de 5,4 km.

Avec la LIS, les marchandises et personnes transiteraient directement de la ZD à la ZP en empruntant l'une des 3 composantes de la LIS (voir figure ci-dessous):

- le convoyeur à bande transporteuse semi-enterré pour acheminer les matériaux (notamment l'argile excavée de la ZD à la ZP) ;
- la voie routière privée pour la circulation des poids lourds ;
- la voie routière publique pour le transport du personnel et des visiteurs, ainsi que le transit local.

La LIS a une longueur d'environ 5 km.

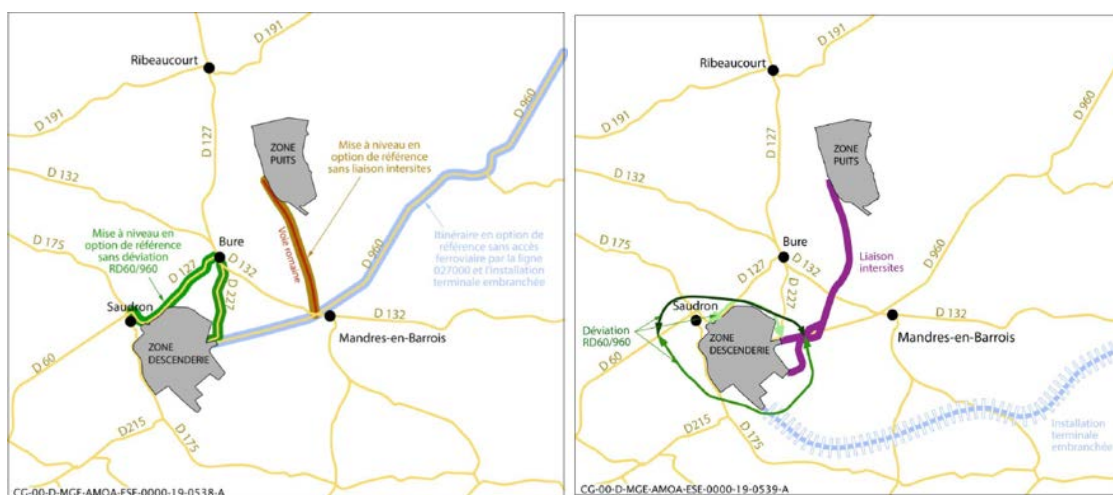
Figure 8 : Schéma de principe de de la liaison intersites (LIS) du projet Cigéo



Source : Document d'ESE des infrastructures de transport du projet global Cigéo, pp. 55

Dans la figure suivante, sont représentées l'option de référence et l'option projet pour les composantes de liaison intersites et de déviation de la route D60/960 du projet global Cigéo.

Figure 9 : Options de référence et projet pour la liaison intersites (LIS) et la déviation routière de la D60/960 dans le cadre du projet Cigéo



Source : Document d'ESE des infrastructures de transport du projet global Cigéo, pp. 44 et 50

Commentaire : L'ESE n'apporte pas une explication suffisamment détaillée de pourquoi a été retenue, comme option de projet, cette triple infrastructure pour la LIS (convoyeur, voie poids lourds y voie véhicules légers). Ce point est repris dans la partie 2 de ce rapport.

Rétablissement du réseau routier local

Finalement, du fait de la construction de la ZD, le transit local serait interrompu par la D60/960 qui doit être rétabli.

Dans l'option de référence, les véhicules légers et poids lourds devront emprunter les autres voies existantes en fonction de leur provenance et destination. Par exemple, un véhicule se rendant de Mandres-en-Barrois à Saudron devra se dévier de la D60/960 par la D132 (ou la D227) en rentrant dans la Commune de Bure, pour ensuite emprunter la D127. Au total, son trajet serait de 5,8 km.

Pour pouvoir rétablir le transit local, 3 options de projet sont proposées : Selon l'option retenue, la distance parcourue entre Mandres-en-Barrois et Saudron serait plus ou moins longue. Dans le cas de l'option de proximité, elle serait de 5,1 km, soit 700 m de moins que dans l'option de projet.

Commentaire : L'ESE n'aborde pas de manière détaillée la comparaison des différentes options de projet entre elles et avec l'option de référence dans le cadre du rétablissement routier de la D60/960. Ce point est repris dans le chapitre 2 de ce rapport.

1.2 Analyse des effets

Dans le chapitre d'analyse des effets de l'ESE sont abordés les différents impacts du projet, sur les déplacements, sociaux, économiques et environnementaux, d'abord de manière qualitative puis certains de ces effets sont quantifiés en utilisant les valeurs tutélaires disponibles à cet égard de manière à calculer les indicateurs socioéconomiques : la Valeur Actuelle Nette Socioéconomique (VAN-SE), la VAN-SE par euro investi et le Taux de Rentabilité Interne Socioéconomique (TIR-SE).

Finalement, sont présentés, conformément à la réglementation en la matière, une ventilation de la VAN-SE par acteurs, ainsi qu'un test de sensibilité des indicateurs socioéconomiques et une description des modalités de financement du projet.

Dans le tableau suivant, est présenté un résumé des effets pris en compte dans l'ESE du volet transport du projet global Cigéo.

Tableau 10 : Effets pris en compte dans l'ESE

EFFET	SENS DE L'EFFET	MONETARISATION	COMMENTAIRE
Effets sur les déplacements			
Déplacements locaux sans lien avec le centre de stockage Cigéo	Effet positif qui dépend de l'option de projet retenue pour le rétablissement de l'itinéraire routier de la D60/960.	Effet monétarisé	Pertinent
Déplacements locaux en relation avec le centre de stockage Cigéo	Effet positif ou négatif en fonction de la provenance et de la destination des usagers	Effet monétarisé	Pertinent
Déplacements entre la ZD y la ZP	Effet positif avec une réduction des distances parcourues et des coûts de transport avec la LIS en comparaison avec l'option de référence	Effet monétarisé	Doit être détaillé en fonction du type de déplacement : personnes, matériaux de construction, argile
Déplacements entre le centre de stockage Cigéo et l'extérieur de la région	Effet négatif en niveau des distances parcourues, mais qui est positif en termes de réduction des coûts de transport du fait du report modal de la route au ferroviaire avec la construction de la liaison ferroviaire	Effet monétarisé	A bien été pris en compte le fait que les déchets ont plusieurs provenances.
Effets sociaux			
Emploi durant la phase de chantier	Effet positif : Mobilisation continue de 550 employés sur les 4 ans de construction	Effet NON monétarisé	Devrait être déduit du montant investi dans l'option projet (264,8 M€ ₂₀₁₈ HT), le montant à investir dans l'option de référence (115,1 M€ ₂₀₁₈ HT).
Retombées locales	Effet positif du moment que les acteurs économiques locaux seront prêts et formés pour participer y bénéficier du développement économique amené par le projet Cigéo	Effet NON monétarisé	Description très générale, pas spécifique aux infrastructures de transport

Sécurité du transport en général	Effet positif : du fait d'un report modal de la route vers le ferroviaire et d'une réduction des distances parcourues par les PL et VL	Effet monétarisé	Pertinent
Sécurité du transport des déchets radioactifs	Effet neutre du fait de la maîtrise des risques liés au transport qui passe par la robustesse des emballages, la fiabilité des opérations de transport des substances radioactives et la préparation aux situations d'urgence et leur gestion. Pas d'impact attendu en cas d'accident ni par la modalité routière ni ferroviaire	Effet nul	La position de l'Andra est que les deux modes de transport sont sécurisés, néanmoins le train nous semble offrir un avantage supplémentaire face à un risque potentiel de terrorisme du fait de moins dépendre du facteur humain. Cet impact serait positif et favoriserait l'option de projet.
Effets environnementaux			
Bruit	Effet positif de réduction des niveaux de bruit dans l'option projet par rapport à l'option de référence	Effet monétarisé	Pertinent
Pollution atmosphérique	Effet positif de réduction des niveaux de pollution atmosphérique dans l'option projet par rapport à l'option de référence	Effet monétarisé	Pertinent
Emission de gaz à effet de serre	Effet positif de réduction des niveaux d'émission de gaz à effet de serre dans l'option projet par rapport à l'option de référence Compensation des émissions annuelles de plus de 2400 français	Effet monétarisé	Pertinent
Biodiversité	Effet négatif mitigé par des actions d'évitement et des mesures compensatoires	Effet NON monétarisé	Description très générale, pas spécifique aux infrastructures de transport
Occupation des sols, agriculture et sylviculture	Effet négatif faible après prise en compte de mesures d'évitement, de réduction et de compensation. Sont réutilisées au maximum des installations existantes	Effet NON monétarisé	Pertinent
Eaux souterraines et eaux superficielles	Effet négatif faible après prise en compte de mesures d'évitement, de réduction et de compensation	Effet NON monétarisé	Pertinent
Qualité de l'air	Effet positif sur la qualité de l'air dans l'option projet par rapport à l'option de référence	Effet NON monétarisé	Pertinent
Cadre de vie	Effet positif sur la qualité du cadre de vie dans l'option projet par rapport à l'option de référence	Effet NON monétarisé	Pertinent
Paysage	Effet négatif faible hormis les remblais pour l'ITE après prise en compte de mesures d'évitement, de réduction et de compensation	Effet NON monétarisé	Pertinent. Cet effet a été a priori pris en compte dans les processus de concertation et le choix des infrastructures de transport.
Effets économiques			
Effets sur les entreprises locales (BTP, etc.)	Effet potentiel positif durant les 4 ans de la construction et du fait de l'entretien des installations	Effet NON monétarisé	Pertinent

Effets sur le fonctionnement du centre de stockage Cigéo	Effet positif avec des options projet qui minimisent par rapport aux options de référence les coûts de transport, les ruptures de charge, le nombre d'intervenants dans la chaîne du transport et permet des gains en termes de sécurité	Effet partiellement monétarisé	Peu explicite dans l'ESE. Ces effets devraient être détaillés.
Effets sur le réseau routier départemental	Effet positif des options projet par rapport aux options de référence quant à l'efficacité de déplacement des usagers du réseau routier départemental	Effet monétarisé	Pertinent
Effets sur la desserte du territoire	Effet positif des options projet qui pourraient permettre l'utilisation de la voie ferrée 027000 et de l'ITE par d'autres utilisateurs, ainsi que l'accès au transit local de la voie VL de la LIS	Effet NON monétarisé	Pertinent car effet probablement assez marginal

Source : contre-expertise

Commentaire : De manière globale, l'identification, la description et prise en compte des effets à être valorisés sont considérés comme pertinents dans le cas de l'ESE analysée, qui évite généralement le double piège de surestimer les effets du volet transport du projet Cigéo en prenant en compte des effets dû au projet Cigéo indépendamment des infrastructures de transport, ainsi que de ne pas comparer systématiquement l'option projet à l'option de référence. Néanmoins, il est suggéré de réviser et préciser les cas suivants :

- Pour le calcul de l'emploi durant la phase du chantier, qui est proportionnel à l'investissement, devrait être déduit du montant investi dans l'option projet (264,8 M€₂₀₁₈HT), le montant à investir dans l'option de référence (115,1 M€₂₀₁₈HT).
- Dans le cas des effets sur la biodiversité et les retombées locales, la description est très générale et n'est pas spécifique à l'impact des infrastructures de transport.

A noter qu'aucun de ces 3 effets n'est pris en compte dans l'analyse quantifiée et donc son résultat est inchangé.

1.3 Synthèse de l'évaluation

Comme synthèse de l'évaluation est présenté principalement le résultat de deux analyses, l'analyse monétarisée et celle du degré d'atteinte des objectifs du volet transport. Ci-dessous sont reproduits les résultats de ces 2 analyses.

Tableau 11 : Ventilation par poste de la VAN socioéconomique des infrastructures de transport du projet global Cigéo (en millions d'euros 2018 actualisés en 2019)

Coût (-) ou avantage (+)	Millions d'euros ₂₀₁₈
Investissement initial	-123,7
Dont investissement initial en option de projet	-216,8
Dont investissement initial en option de référence (coûts éludés)	+93,1
Entretien courant, exploitation et renouvellement	-20,0
Dont entretien courant, exploitation et renouvellement en option de projet	-40,0
Dont entretien courant, exploitation et renouvellement en option de référence (coûts éludés)	+20,1
Gain de temps des usagers de la route	+8,1
Coût d'usage des véhicules routiers	+171,0
Coût de transport ferroviaire	-1,7
Sécurité des transports	+0,5
Congestion routière	+0,1
Bruit des transports	+0,02
Pollution atmosphérique	+0,04
Émission de gaz à effet de serre (CO ₂)	+1,7
Total (VAN-SE) hors coût d'opportunité des fonds publics	+ 36,1
Coût d'opportunité des fonds publics (COFP)	+0,7
Total (VAN-SE) avec coût d'opportunité des fonds publics	+ 36,8

Source : Document d'ESE des infrastructures de transport du projet global Cigéo, pp. 99

Quant à l'analyse monétarisée, la conclusion proposée dans le document d'ESE, pp.98, est la suivante :

« Ce calcul socioéconomique établit que la réalisation des infrastructures de transport proposées dégage un bénéfice socioéconomique positif de 36.8 millions d'euros₂₀₁₈ pour la collectivité dans son ensemble ».

Commentaire : L'ESE du volet transport du projet global Cigéo a adopté le parti-pris de présenter la comparaison de l'option de référence versus l'option de projet à partir d'une analyse coûts-avantages (où les bénéfices de l'option de projet proviennent de l'économie des coûts de la réalisation de l'option de référence), alors que la logique de l'analyse du volet transport du projet global Cigéo réside à rechercher l'option de transport de moindre coût socioéconomique. Une alternative possible aurait été de présenter une analyse de comparaison de coûts de l'option projet versus l'option de référence. Strictement, le résultat quantifié obtenu serait le même, mais cela permettrait d'éviter de conclure comme dans l'ESE analysée à la génération d'un bénéfice socioéconomique positif. Strictement, la conclusion de l'ESE devrait être formulée dans le sens que l'option projet retenue permet de minimiser les coûts socioéconomiques de la réalisation du projet global Cigéo au niveau de sa composante transport. Notre recommandation ne va pas dans le sens de modifier l'ESE si ce n'est de (i) réviser la conclusion de l'analyse quantifiée, ainsi que (ii) d'évaluer l'opportunité d'adopter une analyse de comparaison de coûts plutôt que d'analyse coûts-avantages dans des cas similaires dans le futur.

Commentaire : Dans l'ESE analysée, les résultats de l'évaluation monétarisée sont uniquement ventilés par poste et par acteurs, mais ne sont pas analysés par composante du volet transport ce qui ne permet pas d'appréhender les bénéfices qu'apporte chacun des éléments du volet transport au bilan global : liaison ferroviaire, LIS et rétablissement de l'itinéraire routier D60/960. Ce point est repris plus en détails dans la partie 2 de ce rapport.

Cette analyse monétarisée s'accompagne de tests de sensibilité. Ces tests montrent que l'économie de coût obtenue avec l'option de projet n'est pas forcément très robuste à une variation de certaines variables du projet. Par exemple, dans le cas d'une variation simultanée du coût d'investissement de + 10 % et d'une demande de transport de colis radioactifs de – 10 %, la VAN devient pratiquement nulle (1.7 M€ au lieu de 36.1 M€ dans le scénario de base).

Commentaire : Les résultats de l'évaluation monétarisée ne sont pas forcément robustes à une variation de certaines variables du projet. A partir d'une augmentation des coûts d'investissement de 16.1%, la VAN devient négative, soulignant l'importance de la maîtrise des coûts d'investissement initial des infrastructures de transport. Néanmoins, l'ESE du volet transport ne présente pas une analyse systématique des risques qui permette d'éviter ces dérives potentielles. Ce point est repris plus en détails dans la partie 2 de ce rapport.

Finalement, l'ESE conclut sur le degré d'atteinte des objectifs des infrastructures de transport du projet global Cigéo considérant comme satisfaisant l'impact du projet en matière d'adéquation aux besoins du projet Cigéo, son inscription dans l'environnement naturel et sa contribution en matière de lutte contre le changement climatique et très satisfaisant son inscription dans l'environnement humain, du fait que le choix des infrastructures de transport en grande partie résulte d'une concertation étendue avec les parties prenantes au projet.

Tableau 12: Degré d'atteinte des objectifs des infrastructures de transport du projet global Cigéo

Objectif	Degré d'atteinte
Adéquation aux besoins du projet global Cigéo	++
Inscription dans l'environnement humain	+++
Inscription dans l'environnement naturel	++
Contribution aux objectifs de la Nation en matière de lutte contre le changement climatique	++

Échelle de lecture : + : assez satisfaisant ++ : satisfaisant +++ : très satisfaisant

Source : Document d'ESE des infrastructures de transport du projet global Cigéo, pp. 102

Commentaire : Le tableau qui résume le degré d'atteinte des objectifs du projet est de difficile interprétation et subjectif. Il est d'abord important de rappeler que l'option de projet doit être comparée avec l'option de référence quant au degré d'atteinte des objectifs. Pourquoi affirmer que l'inscription dans l'environnement humain de l'option de projet est très satisfaisante plutôt que satisfaisante ou assez satisfaisante.

2 Analyse de certains aspects de l'ESE des infrastructures de transport du projet global Cigéo

Par la suite, certains points de l'analyse de l'ESE sont repris plus en détails.

2.1 Analyse par composante des infrastructures de transport (liaison ferroviaire, LIS et rétablissement de l'itinéraire routier D60/960)

Le volet transport comprend trois grandes composantes (Liaison ferroviaire, LIS et rétablissement de l'itinéraire routier D60/960), qui si bien ne sont pas parfaitement séparables, pourraient très bien être réalisées sans que l'autre composante le soit ce qui supposerait de choisir l'option de référence pour les autres composantes. Or, dans l'ESE, les impacts ne sont pas ventilés par composante, ce qui rend impossible d'apprécier l'économie de coûts respective générée par chaque composante du projet.

En particulier, il est impossible d'apprécier à partir de l'information présentée dans l'ESE si la LIS engendre une économie de coût par rapport à son option de référence. Dans le cas de la liaison ferroviaire, l'économie de coût que représente le changement modal du transport routier au train semble plus importante, ce qui expliquerait le résultat global de VAN positive.

Strictement ce qu'il faudrait faire pour avoir une vision plus éclairée quant à la convenance des différentes composantes du volet transport, serait de comparer la VAN globale (des 3 infrastructures) avec la VAN d'effectuer uniquement la liaison ferroviaire et la déviation routière de la D60/960 mais sans la LIS ou alors, de manière équivalente, d'évaluer la VAN marginale de réaliser la LIS en sachant que la liaison ferroviaire et la déviation de la D60/960 vont être réalisées.

Commentaire : De manière à pouvoir réellement appréhender les bénéfices qu'apporte chacun des éléments du volet transport au bilan global, les contre-experts recommandent d'adopter une approche par composante des infrastructures de transport.

2.2 Alternatives de projet pour la LIS

De manière générale, la composante du projet LIS mériterait de développements complémentaires dans l'ESE pour expliquer l'option de projet retenue qui se compose de 3 infrastructures distinctes :

- un convoyeur à bande transporteuse semi-enterré pour acheminer les matériaux (notamment l'argile excavée de la ZD à la ZP) ;
- une voie routière privée pour la circulation des poids lourds ;
- une voie routière publique pour le transport du personnel et des visiteurs, ainsi que le transit local.

En effet, une question assez naturelle qui se pose est de savoir pourquoi ne pas se limiter à une seule voie routière qui permette le transport de l'ensemble des matériaux et personnel et pourquoi la construction d'un convoyeur et d'une route pour les véhicules légers.

Lors des auditions menées dans le cadre de cette contre-expertise, l'Andra a apporté plusieurs éléments pour expliquer le processus de décision qui avait amené au choix de l'option ci-dessus. En effet, l'Andra a expliqué que les choix des modes de liaisons intersites étaient le fruit d'une concertation conduite avec le territoire sur la base de différentes options ; concertation qui s'est

menée en deux temps : En 2016-2017, la première partie de la concertation a permis de définir le tracé de la LIS et ses caractéristiques techniques. En particulier, à la page 59 de la pièce 9 du dossier d'enquête publique du centre de stockage Cigéo (<https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference>), il est mentionné que :

« Suite à plusieurs ateliers de travail, les participants optent pour une bande transporteuse semi-enterrée associée à une route pour les poids lourds entre la zone puits et la zone descente. De plus, le territoire propose d'accoler à cet ensemble la voie publique d'accès à la zone puits depuis la route départementale RD960. »

La seconde partie de la concertation en 2018 a porté sur les aménagements requis pour rétablir la continuité des voies interrompues par la LIS.

En particulier, pour le choix du convoyeur, l'Andra nous a informé avoir étudié les bénéfices logistiques de convoyeurs à bande selon différentes variantes (convoyeur de plaine en surface en caisson béton ouvert, convoyeur de plaine en surface couvert, convoyeur en tranchée couverte dans une galerie technique, convoyeur de type « tapis volant » posé sur pilotis) et les avoir comparés avec des solutions de transport par route (engins roulants sur route de type semi-remorques d'une charge utile de 16 tonnes maximum et engins roulants sur itinéraire aménagé de type tombereaux articulés d'une charge utile de 39,5 tonnes).

A cette fin, différents critères ont été analysés afin de définir les avantages et les inconvénients de chaque solution :

- l'adaptabilité, l'évolutivité du tracé ;
- l'impact humain et les nuisances : émissions de poussières, impact sonore, flux routier, emprise y compris celle des parkings, impact visuel et paysager, consommation de terres agricoles et accès aux parcelles, servitudes, déplacement du gibier ;
- l'impact environnemental et impact carbone : consommation d'eau, émission de carbone, consommation de foncier ;
- la sécurité des travailleurs et maintenance : nécessité ou non de dissocier les flux, nécessité ou non d'équipement spécifique pour les interventions ;
- les agressions extérieures : vulnérabilité dans le cas d'accident de circulation ou agricole, accessibilité ou non, vulnérabilité aux projectiles et aux intrusions, dispositifs de surveillance ;
- le coût de l'investissement et de l'utilisation ;
- le délai de mise en œuvre ;
- le délai de remise en état suite à incident ;
- les avantages, inconvénients et risques de la solution ;
- l'hypothèse et conditions d'implémentation (prises en compte dans l'analyse).

Un autre questionnement relatif au convoyeur vient du choix de la localisation du site des verses près de la ZP plutôt que près de la ZD. En effet, le convoyeur sert principalement à acheminer l'argile extrait de la ZD (11 millions de m³) pour être stocké dans des verses localisées dans la ZP, pour être ensuite partiellement réacheminé (40 %) de la ZP à la ZD pour servir pour le remblayage des galeries au moment de la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo. Dans la pièce 6, volume II « Justification et description du projet global Cigéo » du dossier d'enquête publique du centre de stockage Cigéo, page 104 (<https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference>), l'Andra précise certains critères qui ont été pris en compte dans le processus de décision en particulier la préservation de la biodiversité, la réduction des nuisances aux habitants, le fait de limiter l'impact visuel des verses, de protéger la qualité de l'eau, de faciliter l'intégration paysagère, de limiter la surface au sol, entre autres.

Commentaire : Dans le cas de la LIS, une approche plus spécifique de calcul économique aurait sans doute permis de mettre en évidence que la solution retenue au cours des processus de concertation n'est pas nécessairement l'option la moins coûteuse en termes économiques et est, en grande partie, motivée par la réalité de bénéfices sociaux et environnementaux importants pour les territoires.

2.3 Alternatives de projet pour le rétablissement de l'itinéraire routier D60/960

Dans l'ESE, sont présentées 3 alternatives de tracé pour la déviation routière : une option de proximité qui longe la ZD (2 km de tracé neuf), une option qui passe au nord de la ZD et de la Commune de Saudron (3,55 km) et une option qui passe par le sud de la ZD au nord de la Commune de Guillaumé (5,1 km) (voir figure 4).

De manière générale, dans l'ESE très peu d'information est donnée sur les 3 alternatives et les avantages et inconvénients relatifs de ces options.

L'Andra explique cela par le fait que le Conseil départemental de Haute-Marne, maître d'ouvrage de cette opération, et maître d'ouvrage coopérant dans le cadre du projet global Cigéo, a lancé les études de définition des différentes options à partir de septembre 2020 et envisage une concertation avec le public pour le premier semestre 2021. Au jour d'élaboration de ce rapport, il n'existe pas d'analyse environnementale des 3 options de rétablissement qui ne seront présentées que lors de la concertation avec le public.

Une question posée par la contre-expertise est pourquoi ne pas avoir considéré comme option l'amélioration des caractéristiques des départementales existantes D132, D127 et D227 avec un contournement de Bure qui pourrait également desservir le transit local. La réponse de l'Andra souligne que, du fait des caractéristiques actuelles de ces départementales, cette option ne représenterait pas une économie de coûts d'investissement substantielle par rapport aux options déjà considérées et cela entraînerait des nuisances accrues aux habitants de Bure et des coûts de transport plus élevés du fait d'un trajet plus long.

Commentaire : Les contre-experts recommandent que les processus de concertation s'accompagnent d'une comparaison des coûts socio-économiques des différentes options de projet et de référence analysées, qui objectivent que les choix effectués ne répondent pas forcément seulement à une minimisation des coûts économiques mais prennent également en compte l'impact social et environnemental du projet sur les territoires et le coût que cela représente.

2.4 Impact du volet transport sur le territoire

Le volet transport, bien que ne représentant qu'un coût relativement « marginal » en comparaison au projet global Cigéo, a un impact important pour les territoires et les populations locales qui en font un facteur déterminant de l'acceptation sociale du projet global Cigéo.

Dans ce sens, chacune des installations du volet transport a fait l'objet ou fera l'objet d'un processus de concertation qui détermine en grande partie certains choix faits pour le projet. De la page 15 à la page 18, l'ESE du volet transport décrit les processus de concertation qui ont eu lieu et leur incidence et précise ceux qui restent à mener, que ce soit par le conseil départemental de la Haute-Marne pour la déviation de la route départementale D60/960 ou par la SNCF Réseau pour la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000.

En particulier dans le cas de l'ITE, le processus de concertation a permis de déterminer comment se fera le rétablissement des 17 chemins et 3 routes départementales interrompues par le passage de la voie ferroviaire.

Au niveau de l'impact du projet sur le territoire, un autre facteur à prendre en compte sont les aspects de sûreté et sécurité du transport en particulier des déchets nucléaires. Bien que l'Andra argumente que, du fait de l'application de la réglementation internationale, il n'y pas de différence pour le transport des déchets radioactifs ou des matières radioactives entre la route et la voie ferrée, dans le sens où ils bénéficient de dispositions similaires de sûreté d'une part et de sécurité d'autre part, il est fort probable que, quant au risque perçu par les populations, le transport ferroviaire soit préféré. En effet, le transport par voie ferrée a l'avantage de moins dépendre du facteur humain (moins de conducteurs), ce qui potentiellement limite les risques liés au terrorisme. Cet effet est positif pour l'option de projet en comparaison à l'option de référence.

Dans l'ESE du volet transport les impacts sur le territoire du projet Cigéo, qui fait l'objet du volume IV de l'Etude d'impact, pièce 6 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo (<https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference>), ne sont pas décrits avec précision, ce qui est cohérent avec le fait que ce sont des impacts liés à la réalisation du projet global Cigéo et pas au choix de la modalité de transport.

Quelques exceptions sont à noter mais elles restent marginales :

- l'utilisation de la ligne ferroviaire 027000 par quelques entreprises, en particulier celles qui l'utilisaient avant sa fermeture à la circulation ;
- la possible utilisation de l'ITE par des entreprises implantées localement ;
- la possible utilisation de la LIS par le transit local.

A noter que l'évaluation du volet transport ne prend pas en compte dans les prévisions de demande le potentiel trafic induit suite au projet global Cigéo, néanmoins ces impacts sont peu susceptibles de remettre en cause les conclusions de l'évaluation. Au contraire, une augmentation du trafic local favoriserait l'option de projet qui permet de séparer le transport des matériaux et personnel de Cigéo du trafic local.

Commentaire : Même si les infrastructures de transport ont un impact structurant sur le territoire, il est correct, comme cela est mentionné dans l'ESE du volet transport, de distinguer les impacts du volet transport et en particulier l'impact de l'option de projet versus celle de référence, des impacts du projet Cigéo dans son ensemble y compris les infrastructures de transport.

2.5 Lien du volet transport avec le projet Cigéo

L'ESE du volet transport a été réalisée de manière relativement séparée et indépendante de l'ESE du projet global Cigéo. A rapprocher les deux évaluations naissent certaines questions sur l'intégration du volet transport dans le calendrier global du projet Cigéo et sur le taux d'actualisation à utiliser pour l'évaluation du volet transport.

La construction des infrastructures de transport est prévue entre 2023 et 2025 (2026 – 2028 pour le convoyeur), alors que la décision d'autorisation de mise en service pour le transport des déchets MA-VL est prévue seulement en 2040 ce qui pose la question du report possible de la construction des infrastructures de transport dédiées en particulier dans le cas de la liaison ferroviaire.

Dans le cas de la LIS, en raison de la nécessité de créer un accès à la ZP du fait que le convoyeur sera utilisé pour le transport des verses entre 2025 et 2029 pour acheminer 2,5 millions de m³ d'argile, il semble que le moment optimal de sa construction soit bien au départ du projet. Il en est

de même dans le cas de la déviation de la D60/960 qui permet de rétablir l'itinéraire de la D60/960 dès le début du projet.

Dans le cas de la Liaison ferroviaire, il pourrait être avantageux *a priori*, en termes de coût d'opportunité des investissements à réaliser, de repousser la construction de la liaison ferroviaire. Néanmoins, la révision du tableur associé à l'ESE montre que le train sera très intensivement utilisé pour le transport de matériaux de construction (en 2028, est prévu le passage de 469 trains de matériaux à l'année), ainsi que pour l'acheminement des colis durant la phase industrielle pilote (Phipil). En effet, durant la Phipil, sont prévus des essais de démarrage inactifs, des essais actifs et une montée en régime de l'exploitation progressive et de la livraison d'une variété de colis jusqu'à la date d'autorisation de mise en service qui marque le début de la phase de fonctionnement (2040). Ceci explique pourquoi, dès 2035, circuleraient 31 trains de déchets alors que le maximum prévu en 2055 est de 77 trains sur l'année.

A noter que le conseil départemental de la Meuse a adopté une délibération le 17 décembre 2015 (N°28/2015) qui va dans le sens de construire les infrastructures de transport dès le début du projet Cigéo en précisant que :

- les matériaux nécessaires à la construction, ainsi que les colis radioactifs soient acheminés par voie ferrée ou par voie d'eau et que la construction de l'ITE doit être préalable à l'ouverture du chantier Cigéo et
- que les trafics d'engins de chantier et de matériaux entre la ZD et la ZP doivent se faire sans emprunter les routes départementales.

Une autre question est celle du taux d'actualisation à utiliser pour l'évaluation du volet transport. Dans le cas du volet transport, le taux d'actualisation retenu de 4 % est celui résultant de l'application des prescriptions de la fiche-outil de la Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM) intitulée « Prise en compte des risques dans l'analyse monétarisée », dans la version du 3 mai 2019, alors que dans l'ESE du projet global Cigéo sont utilisés divers taux d'actualisation (borne basse, intermédiaire et haute) en fonction du scénario de l'économie envisagé (KO ou OK) et avec des profils décroissants dans le temps.

Strictement, les deux évaluations devraient converger quant au taux d'actualisation à utiliser, il n'y a pas de raison d'utiliser des taux différents. A noter que plus les taux d'actualisation sont faibles, plus l'option projet proposée dans le volet transport devient intéressante par rapport à l'option de référence, car elle présente des coûts d'investissements plus forts mais des coûts d'opération plus faibles. A partir d'une analyse de sensibilité au taux d'actualisation, il est démontré que l'option de référence devient intéressante pour des taux supérieurs à 5,3 % de manière constante dans le temps alors que la plupart des taux d'actualisation envisagés dans l'ESE du projet global Cigéo sont inférieurs (le taux maximal envisagé est de 5,5 % mais il diminue dans le temps à 1,9 %).

Commentaire : Il est suggéré de mieux justifier dans l'ESE du volet transport le pourquoi du calendrier d'investissement proposé et de rajouter un test de sensibilité au taux d'actualisation en conformité avec l'ESE du projet global Cigéo.

2.6 Evaluation de la composante transport du projet global Cigéo

L'ESE du volet transport conclut sur le fait que l'option projet proposée est meilleure que l'option de référence et que donc le projet global Cigéo doit prévoir la construction et exploitation des infrastructures suivantes : Liaison, ferroviaire, LIS et déviation routière de la D60/960. Cette comparaison option de projet/option de référence se fait toujours en se plaçant dans le cas de la mise en œuvre du projet global Cigéo, et donc en supposant que les déchets sont acheminés par train des centres d'entreposage temporaire jusqu'à proximité du projet sur la ligne ferroviaire Paris-

Strasbourg (RFN 070000)¹⁴, ce qui nous apparaît comme pertinent d'un point de vue méthodologique.

Néanmoins, dans le cadre du projet global Cigéo, ce ne sont pas les seuls coûts de transport à considérer du fait qu'il est également nécessaire d'acheminer les déchets des centres d'entreposage temporaires actuels jusqu'au centre de stockage Cigéo en passant par Nançois sur Ornain. Ceci est correctement pris en compte dans l'ESE du projet global Cigéo ce qui explique que les coûts de transport du projet global s'élèvent selon des données transmises par les producteurs, à environ 1,472 millions d'euros₂₀₁₉ contre 606,8 millions d'euros₂₀₁₈ pour le seul volet transport¹⁵.

La figure suivante montre la chronique de transport des déchets MA-VL et HA.

Figure 10 : Chronique de transport des déchets du projet global Cigéo (en m3 de colis)



Source : Document d'ESE du projet global Cigéo, pp. 144

Du coup, dans l'ESE du projet global Cigéo, l'option de projet Cigéo est comparée à d'autres alternatives chacune avec ses coûts de transport, ce qui est cohérent.

- Dans le cas de l'option 2, si une technologie prospective se révèle optimale pour le stockage des déchets HA, ceux-ci seront transportés des centres d'entreposage temporaire au site de la technologie prospective, alors que les déchets MA-VL seront enfouis au centre de stockage Cigéo. A supposer, comme c'est le cas dans l'ESE du projet global, que le site de la technologie prospective est à la même distance des centres d'entreposage que Cigéo, les coûts de transport restent les mêmes que dans le cas de Cigéo (1,472 M€₂₀₁₉).
- Dans le cas de l'option 3, si une technologie prospective se révèle optimale pour le stockage des déchets HA mais aussi des MA-VL, certains colis MA-VL devront être retirés du site de stockage Cigéo pour être acheminés au site de la technologie prospective, alors que les autres colis HA et MA-VL qui n'avaient pas encore été entreposés dans Cigéo, seront acheminés directement des centres d'entreposage au site de la technologie prospective, les coûts de transport augmentent (1,582 M€₂₀₁₉).
- Finalement, dans le cas de l'option 4, il est possible que les déchets soient entreposés à long terme dans les centres d'entreposage et dans ce cas-là, les coûts de transports

¹⁴ Sorcy-Saint-Martin (option de référence) ou Nançois sur Ornain (option de projet).

¹⁵ Obtenu en ajoutant les coûts d'investissement 264.8 M€₂₀₁₈, aux coûts d'entretien et d'exploitation cumulés jusqu'en 2171 (129.0 M€₂₀₁₈), aux coûts de renouvellement (201.8 M€₂₀₁₈), aux coûts de démantèlement (11.2 M€₂₀₁₈).

sont considérés comme nuls en supposant que les centres d'entreposage se localiseront près des centres d'entreposage actuels.

Commentaire : Il est cohérent méthodologiquement que dans l'ESE du projet global Cigéo soient pris en compte les coûts de transport depuis les Centres d'entreposage temporaire jusqu'au projet Cigéo, alors que l'ESE du volet transport ne se concentre que sur la dernière partie du trajet de la ligne ferroviaire Paris-Strasbourg (RFN 070000) jusqu'au centre de stockage Cigéo.

2.7 Importance du pilotage du volet transport en coordination avec le projet global Cigéo

Dans tout grand projet, la qualité du pilotage est importante, mais dans le cas du projet global Cigéo et en particulier de son volet transport, celle-ci est d'autant plus cruciale qu'il existe plusieurs maîtres d'ouvrages. En effet, l'Andra a la charge de l'ITE et de la LIS, SNCF réseau est le maître d'ouvrages de la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 et le Conseil Départemental de la Haute Marne est celui de la déviation de la route D60/960.

L'Andra a donc la responsabilité comme maître d'ouvrage du centre de stockage Cigéo de coordonner les maîtres d'ouvrages coopérants, avec l'appui du service Insertion territoriale basé au Centre de Meuse Haute-Marne. Ce service comporte un poste dédié de coordonnateur des opérations préalables à la construction de Cigéo.

D'après les informations présentées par l'Andra lors de cette contre-expertise, cette coordination des maîtres d'ouvrages coopérants repose sur un ensemble de conventions¹⁶ qui régissent un budget, des jalons objectifs et dont le suivi est organisé par des comités de pilotage.

Sur le plan de la maîtrise des coûts, l'Andra établit un Plan à moyen terme (PMT) qui, sur une période de 5 années, suit le budget annuel prévisionnel des opérations, avec une consolidation fine sur l'année en cours entre le budget initial, le budget réalisé et celui révisé.

Commentaire : Les contre-experts recommandent que le processus de pilotage des infrastructures de transport du projet global Cigéo, comme le projet dans son ensemble, s'appuie sur une analyse précise et systématique des risques qui permette de limiter les risques de surcoût.

¹⁶ « Convention de maîtrise d'ouvrage de la déviation de la RD 60/960 » (CMHM/IT/18-0024)
« Convention relative au financement des études de la phase avant-projet de l'opération de mise à niveau de la ligne 027000 de Nançois-Tronville à Gondrecourt-le-Château dans le cadre du projet Cigéo » (20076706)

3 Conclusion

La pièce 13 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage des déchets radioactifs Cigéo, appelée « Evaluation Economique et Sociale (ESE) des infrastructures de transport du projet global Cigéo » a comme objectif principal de démontrer que les infrastructures de transport proposées dans le cadre du projet global Cigéo sont la solution qui optimisent les coûts économiques, environnementaux et sociaux en comparaison à d'autres alternatives possibles, mais toujours en se plaçant dans le cas de la mise en œuvre du projet global Cigéo, et donc en supposant que les déchets sont acheminés par train des centres d'entreposage temporaire jusqu'à proximité du projet sur la ligne ferroviaire Paris-Strasbourg (RFN 070000)¹⁷, ce qui nous apparaît comme pertinent d'un point de vue méthodologique.

Dans l'Evaluation Economique et Sociale du projet global Cigéo, sont comparées l'option de projet avec le centre de stockage Cigéo à d'autres alternatives sans Cigéo. Dans ce cas-là, les coûts de transport à prendre en compte, sont ceux du transport des déchets depuis les zones d'entreposage temporaires jusqu'au site de stockage de Cigéo. Ceci explique pourquoi dans l'ESE du projet global Cigéo les coûts de transport s'élèvent, selon des données transmises par les producteurs, à environ 1,472 millions d'euros₂₀₁₉ contre 606.8 millions d'euros₂₀₁₈ pour le seul volet transport¹⁸.

Le volet transport a 3 grandes composantes :

- une liaison ferroviaire qui comprend principalement la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 et la création d'une Installation Terminale Embranchée (ITE) pour pouvoir assurer l'acheminement des matériaux de construction, autres matériaux et des colis de déchets MA-VL et HA para voie ferroviaire et non par voie routière ;
- une liaison intersites (LIS) en surface qui permet d'optimiser le transport de matériaux, en particulier d'argile, et de personnes entre la Zone de Descenderie (ZD) et la Zone Puits (ZP), constituée d'un convoyeur, d'une voie dédiée à la circulation des poids lourds (PL) et d'une voie pour la circulation des véhicules légers (VL) ;
- la déviation de la route départementale D60/960 pour rétablir le transit local interrompu par la construction de la Descenderie.

De manière générale, l'évaluation réalisée pour le volet transport est claire, pédagogique et en conformité avec la régulation relative à l'évaluation des projets de transport. Elle présente par ailleurs le grand intérêt d'analyser certaines composantes ou décisions relatives au projet global Cigéo de manière plus détaillée permettant ainsi de s'assurer que ces différentes composantes sont optimisées en termes de coût pour la société. Dans les très grands projets ces approches sont incontournables.

De plus, cette évaluation du volet transport a le mérite de mettre l'accent sur l'impact de l'infrastructure de transport pour les territoires et les populations locales qui constituent un facteur déterminant de l'acceptation sociale du projet global Cigéo.

La principale critique des contre experts sur l'évaluation du volet transport de Cigéo porte sur le choix de ne pas dissocier suffisamment dans l'analyse les différents éléments de ce volet dont les enjeux et les contraintes apparaissent très différents. L'évaluation telle qu'elle est présentée ne permet pas à la lecture d'appréhender les bénéfices qu'apporte chacun des éléments au bilan global. Ce faisant il ne permet pas de comprendre les raisons des choix qui ont été faits : comme le

¹⁷ Sorcy-Saint-Martin (option de référence) ou Nançois sur Ornain (option de projet).

¹⁸ Obtenu en ajoutant les coûts d'investissement 264.8 M€₂₀₁₈, aux coûts d'entretien et d'exploitation cumulés jusqu'en 2171 (129.0 M€₂₀₁₈), aux coûts de renouvellement (201.8 M€₂₀₁₈), aux coûts de démantèlement (11.2 M€₂₀₁₈).

choix du convoyeur, de la voie de véhicules légers pour la LIS, des avantages et inconvénients des trois options proposées pour la déviation routière de la D60/960.

Dans le cas de la LIS, par exemple, une approche plus spécifique de calcul économique aurait sans doute permis de mettre en évidence que la solution retenue au cours des processus de concertation n'est pas nécessairement l'option la moins coûteuse en termes économiques et est, en grande partie, motivée par la réalité de bénéfices sociaux et environnementaux importants pour les territoires.

En conclusion, nous attirons l'attention sur l'importance de la qualité du pilotage que doit mener l'Andra dans la mise en œuvre du projet Cigéo en particulier pour le volet transport qui a trois maîtres d'ouvrages différents, l'Andra pour l'ITE et la LIS, SNCF réseau pour la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 et le Conseil Départemental de la Haute Marne pour la déviation de la route D60/960. Néanmoins, l'ESE du volet transport ne présente pas une analyse systématique des risques qui est essentielle pour aider au pilotage du projet.

Annexe technique

Soit un processus stochastique de croissance caractérisé par la séquence C_t de consommation agrégée, $t = 0, 1, \dots$. Soit X_t un coût ou un dommage monétarisé qui se matérialise à la date t . X_t est incertain à la date 0 et est potentiellement statistiquement corrélé à C_t . La valeur présente de ce coût futur est égal à :

$$P_{0t} = E_0 \left[\frac{X_t u'(C_t)}{u'(C_0)} \right]$$

où E_0 est l'opérateur d'espérance conditionnel aux informations disponibles à la date 0, et $u'(C_t)$ est l'utilité marginale de la consommation C_t . On a supposé un taux de préférence pure pour le présent égal à zéro. On suppose que $u'(C) = C^{-\gamma}$, où γ est l'aversion relative au risque et à l'inégalité.

Comme dans le rapport ESE, on fait l'hypothèse que les coûts ont une élasticité constante β aux variations de consommation, c'est-à-dire que $X_t = x_t C_t^\beta$, où x_t est ce que le rapport ESE dénomme le coût brut de l'année t . En normalisant $C_0 = 1$, on peut réécrire :

$$P_{0t} = x_t E_0 [C_t^{\beta-\gamma}]$$

On considère un processus markovien à deux régimes, $s=OK$ et $s=KO$, pour la croissance. Le taux de croissance dans le régime s est g_s . Si l'économie est dans le régime s à la date t , la probabilité de basculer dans l'autre régime à la date $t+1$ est noté p_s . Pour valoriser un coût se matérialisant dans un an, on a :

$$\begin{aligned} k_1(OK) &= E_0 [C_1^{\beta-\gamma} | s_0 = OK] = (1 - p_{OK}) e^{(\beta-\gamma)g_{OK}} + p_{OK} e^{(\beta-\gamma)g_{KO}} \\ k_1(KO) &= E_0 [C_1^{\beta-\gamma} | s_0 = KO] = (1 - p_{KO}) e^{(\beta-\gamma)g_{KO}} + p_{KO} e^{(\beta-\gamma)g_{OK}}. \end{aligned}$$

Pour une maturité de 2 ans, on a :

$$\begin{aligned} k_2(OK) &= E_0 [C_2^{\beta-\gamma} | s_0 = OK] = (1 - p_{OK}) e^{(\beta-\gamma)g_{OK}} k_1(OK) + p_{OK} e^{(\beta-\gamma)g_{KO}} k_1(KO) \\ k_2(KO) &= E_0 [C_2^{\beta-\gamma} | s_0 = KO] = (1 - p_{KO}) e^{(\beta-\gamma)g_{KO}} k_1(KO) + p_{KO} e^{(\beta-\gamma)g_{OK}} k_1(OK). \end{aligned}$$

Par récurrence, on obtient

$$\begin{aligned} k_{t+1}(OK) &= E_0 [C_{t+1}^{\beta-\gamma} | s_0 = OK] = (1 - p_{OK}) e^{(\beta-\gamma)g_{OK}} k_t(OK) + p_{OK} e^{(\beta-\gamma)g_{KO}} k_t(KO) \\ k_{t+1}(KO) &= E_0 [C_{t+1}^{\beta-\gamma} | s_0 = KO] = (1 - p_{KO}) e^{(\beta-\gamma)g_{KO}} k_t(KO) + p_{KO} e^{(\beta-\gamma)g_{OK}} k_t(OK). \end{aligned}$$

Les calculs des coûts actualisés de Cigéo et de l'ELD sont donc aisément obtenus à partir de ces formules de récurrence.

Les calculs sont plus compliqués pour estimer la valeur présente des dommages sanitaires et environnementaux de l'ELD, où

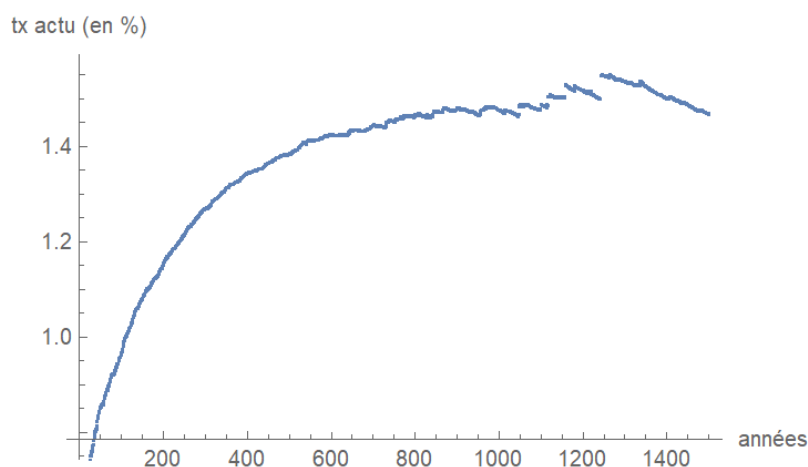
$$X_t = \begin{cases} 0 & \text{si } s_t = OK \\ dC_t & \text{si } s_t = KO. \end{cases}$$

Pour estimer cette valeur présente, nous avons utilisé la méthode de Monte-Carlo pour simuler 250.000 scénarii de croissance économique sur 2 millénaires. Pour chaque scénario, on a estimé

$$VP_0 = d \sum_{t=1}^{2000} Ind[s_t = KO] C_t^{1-\gamma},$$

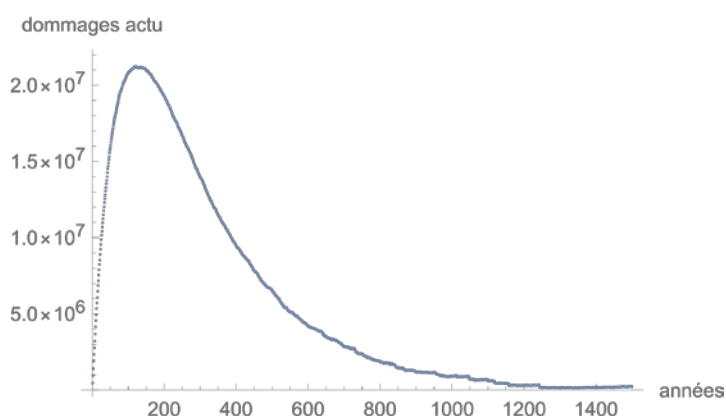
où $Ind[s_t = KO]$ prend la valeur 1 si $s_t = KO$, sinon elle prend la valeur 0. On prend ensuite la valeur moyenne de VP_0 sur les 250.000 simulations. On vérifie que l'horizon temporel de 2000 ans est suffisant en resimulant sur une durée de 3000 ans, et en vérifiant que les résultats restent inchangés. C'est dû au fait que le taux de croissance espéré de la consommation est suffisamment élevé pour que $C_t^{1-\gamma}$ converge vers zéro en espérance, comme on le voit à la Figure 2.

Figure 11 : Structure par termes des taux d'actualisation pour valoriser les dommages espérés dans l'option ELD.



Source : contre-expertise

Figure 12 : Valeur actualisée



Source : contre-expertise

Tables

Table des tableaux

Tableau 1 : Coûts fixes et coûts variables de Cigéo.....	18
Tableau 2 : Coûts actualisés en régime de croissance OK.....	25
Tableau 3 : Coûts actualisés en régime de croissance KO.....	25
Tableau 4 : Valeurs actualisées des coûts dans le cadre du système d'actualisation français.....	38
Tableau 5 : Valeurs actualisées des coûts si le régime OK est certain	39
Tableau 6 : Valeurs actualisées des coûts si le régime KO est certain	40
Tableau 7 : Valeurs actualisées des coûts dans le scénario de référence probabilisé.....	43
Tableau 8 : Valeurs actualisées des coûts dans le scénario markovien	45
Tableau 9 : Valeurs actualisées des coûts complets dans le scénario markovien.....	46
Tableau 10 : Effets pris en compte dans l'ESE.....	69
Tableau 11 : Ventilation par poste de la VAN socioéconomique des infrastructures de transport du projet global Cigéo (en millions d'euros 2018 actualisés en 2019)	72
Tableau 12: Degré d'atteinte des objectifs des infrastructures de transport du projet Cigéo.....	73

Table des figures

Figure 1 : Comparaison de Cigéo à l'option 3 dans le cas favorable de l'utilisation de la technologie prospective pour les déchets HA et MA-VL (scénario 3.1a).....	21
Figure 2 : Comparaison de Cigéo à l'option 4, dans le cas favorable de l'utilisation de la technologie prospective pour les déchets HA et MA-VL (scénarios 4.1d et 4.2).....	23
Figure 3 : Flux de coûts bruts de Cigéo et de l'entreposage de longue durée.	37
Figure 4 : Actualisation dans le scénario de référence probabilisé.....	42
Figure 5 : Structure par termes des taux auxquels actualiser les flux de coûts nets espérés des projets Cigéo et ELD, compte tenu d'une élasticité-PIB de 0,8.....	45
Figure 6 : Installations du centre de stockage et infrastructures de transport du projet Cigéo.....	66
Figure 7 : Option de référence et projet liaison ferroviaire du projet Cigéo.....	67
Figure 8 : Schéma de principe de la liaison intersites (LIS) du projet Cigéo	68
Figure 9 : Options de référence et projet pour la liaison intersites (LIS) et la déviation routière de la D60/960 dans le cadre du projet Cigéo	68
Figure 10 : Chronique de transport des déchets du projet global Cigéo (en m3 de colis).....	79
Figure 1 : Structure par termes des taux d'actualisation pour valoriser les dommages espérés dans l'option ELD.....	84
Figure 2 : Valeur actualisée	84