Stockage des déchets radioactifs en profondeur : que décider? quand décider?

Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, Phuong Hoai Linh Doan*, Thierry Duquesnoy**

@ 52377

Mots-clés: déchets radioactifs, nucléaire, politique énergétique, prospective, stockage

La date de Mise en Service Industriel (MSI) du centre français de stockage des déchets nucléaires les plus radioactifs, appelé Cigéo (Centre industriel de stockage géologique), est fixée par la loi. Cet article en propose une analyse originale. Le principal outil utilisé est une approche de type «coûts-bénéfices» qui vise à prendre en compte l'essentiel des facteurs quantifiables. L'approche retenue est d'agréger ces facteurs sous la forme d'une fonction de coût pour déterminer la date de MSI optimale. En règle générale, une date «au plus tôt» (qui est le choix du législateur) apparaît in fine, malgré son coût direct, comme une solution raisonnable. Nos résultats sont aussi évalués dans un environnement post-Covid.

1. Introduction : la gestion des déchets de haute et moyenne activités et le stockage en couches géologiques profondes

La question de la gestion des déchets radioactifs demeure une préoccupation importante de l'opinion publique par rapport au nucléaire. Les déchets radioactifs produits par les activités nucléaires (les réacteurs nucléaires, la recherche, la défense et la médecine) sont gérés en fonction de leur activité et de la durée de vie des radioéléments. Actuellement, les déchets de très faible, faible et moyenne activité à vie courte, qui représentent plus de 90 % du volume des déchets radioactifs français, disposent de sites de stockage spécialement aménagés pour les accueillir en surface. Les 10 % restant (les déchets à vie longue, notamment haute activité (HA) et

moyenne activité à vie longue (MAVL)) ne disposent pas encore de filière de gestion à long terme; ils sont entreposés dans des installations conçues à cet effet¹.

Ces déchets concentrent la quasi-totalité de la radioactivité et leur vie longue empêche de les stocker en surface ou à faible profondeur. La loi du 30 décembre 1991 a organisé la recherche dévolue à leur gestion à long terme. Celle du 28 juin 2006 a retenu le stockage en couches géologiques profondes (de l'ordre de quelques centaines de mètres) comme la solution de référence permettant d'assurer la sûreté de la gestion à long terme de tels déchets. Tout projet industriel induit des conséquences de différentes natures. Les coûts et avantages économiques directs sont comptabilisés (tant que faire se peut) en euros avec des méthodes de type comptabilité analytique de projet. Au-delà, de nombreux impacts relèvent d'autres domaines (santé, environnement, social...), à des échelles locales mais aussi parfois bien au-delà. Les économistes cherchent

^{*} Archytas.

^{**} CEA (cf. biographies p. 71-72).

aussi à évaluer ces impacts et les traduire en termes de valeur globale pour la société. Les méthodes sont très variées, jamais complètes, et consistent souvent à tenter de mesurer des externalités (par définition non monétaires). C'est le cas du stockage en profondeur destiné à protéger les générations futures contre tout impact radioactif. La «valeur sociale» du stockage des déchets radioactifs dépend du concept (c'est-à-dire du design du stockage industriel), du lieu et du rythme d'exécution du projet. Celui-ci est mené par l'ANDRA (Agence Nationale de gestion des Déchets Radioactifs), sous contrôle de l'Autorité de Sûreté Nucléaire. L'ASN et les pouvoirs publics (Direction générale de l'Énergie et du Climat du MTES) ont créé un Plan national de gestion des déchets et des matières radioactives, discuté avec de nombreuses parties prenantes, qui a donné lieu en 2019 à un débat national, sous l'égide de la Commission Nationale du Débat Public (CNDP). Les aspects scientifiques de ce projet sont suivis, pour le compte du Parlement, par la Commission Nationale d'Évaluation². Notre analyse se focalise sur le dernier point,

autrement dit sur l'impact du choix de la temporalité du stockage profond. La loi dispose en effet que la réalisation «rapide» du stockage est le meilleur choix pour la société. Par «rapide», il faut entendre que le déroulement de ce projet ne doit pas perdre de temps, et donc que des moyens suffisants doivent lui être alloués, sachant que le calendrier de réalisation est subordonné à un phasage précis, avec une grande importance donnée aux décisions de l'autorité de sûreté. Cette loi a été suivie d'une autre, en 2016, qui l'a précisée. Celle-ci a notamment disposé que la gestion des déchets de Haute Activité et à Vie Longue devait être organisée de façon réversible, et a défini la réversibilité comme «la capacité pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion».

En parallèle à ces lois, a été institué un «Plan national de gestion des matières et des

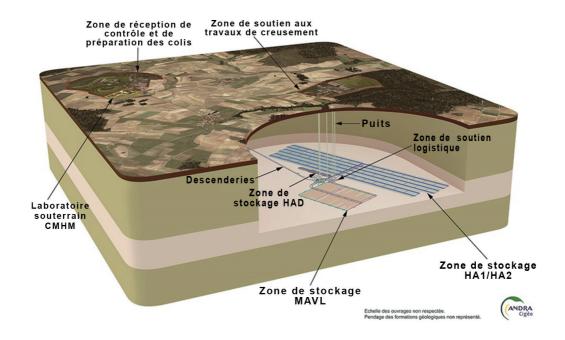


Figure 1. Schéma du stockage Cigéo

Source : ANDRA

déchets nucléaires» (PNGMDR) régulièrement mis à jour.

Pour ce qui concerne les déchets HAVL, le projet de stockage, dénommé Cigéo, a été développé depuis plus de vingt ans et sera implanté en limite de la Meuse et de la Haute-Marne. Il sera composé d'une zone souterraine à - 500 m (où seront stockés les déchets) et d'installations de surface réparties sur deux zones, ainsi que de liaisons entre la surface et le souterrain (voir Figure 1). Dans une première étape, en application de la loi de 2016, les déchets y seront déposés pendant une période de réversibilité de l'ordre de 100 ans. Le principe est de protéger l'homme et l'environnement du danger que représentent les déchets les plus radioactifs et à vie longue, tout en limitant les charges qui seront supportées par les générations futures. Une grande part des décisions d'ingénierie de stockage, mais aussi de calendrier de mise en œuvre, de techniques de manutention de Cigéo dérive des impératifs de sûreté. Ainsi, Cigéo est conçu pour que son impact soit très limité et ne présente pas de risque pour l'homme et l'environnement durant ses différentes phases. La sûreté de Cigéo repose en grande partie sur la couche géologique dans laquelle seront implantées les installations souterraines, ainsi que sur les choix de conception et dispositifs de sûreté³.

À ce jour, deux phases principales industrielles ont été positionnées dans le processus en cours : celle de l'ouverture d'une phase dite «industrielle pilote» (ou Phipil) et celle du passage à la phase industrielle proprement dite (ou Phase d'exploitation courante). Puis aura lieu une phase de surveillance, et enfin, quand celle-ci sera jugée avoir atteint ses objectifs, le site sera définitivement fermé.

Le processus est en cours. Après le dépôt en octobre 2019 du projet de développement du territoire, et du dossier de préinstruction de déclaration d'utilité publique, en décembre 2019, la prochaine étape consiste pour l'AN-DRA à déposer une Demande d'Autorisation de Création (DAC), analogue à un permis de construire pour ce type de projet. Ce dossier est très complet... et complexe, notamment en ce qui concerne l'intégration des diverses études d'impact. Notons que ces études comporteront un volet économique. Le dépôt du dossier DAC est annoncé fin 2020.

Les travaux pourraient commencer peu d'années après. Parmi les grands choix posés au gouvernement (et en amont, aux parlementaires), on note ainsi la date de mise en service (début de la Phipil) et celle du début de la phase industrielle. Au-delà, il est possible de s'interroger sur les liens entre le calendrier de stockage et la définition du concept de stockage (qui répond à un cahier des charges où les échéanciers jouent un rôle central). De façon encore plus générale, une question est d'évaluer au mieux, avec les outils économiques et les données disponibles. l'intérêt du stockage en couches géologiques profondes par rapport à l'autre stratégie possible : l'entreposage à long terme des déchets. Des pays comme le Canada ont opté pour cette voie. Ce sujet a été l'objet de débats importants lors de la préparation des lois de 2006 et 2016, sachant qu'à l'époque, peu d'arguments économiques ont été apportés sur ce point. Même si la décision a été prise, la solidité de cette décision et sa temporalité de mise en œuvre restent un point d'intérêt pour un questionnement économique.

2. Approches retenues pour interroger les choix des dates clés du projet de stockage

Cet article est construit en interrogeant de façon systématique les dates possibles pour les grandes étapes du stockage. La méthode utilisée est de construire un indicateur balançant les coûts et le bénéfice d'un choix de date (nous donnerons à cet indicateur le nom de «Fonction d'Utilité») et d'en mesurer les variations, positives ou négatives, pour des choix de dates différents : au plus tôt ou différés. L'approche est de nature «coûts-bénéfices», les bénéfices notamment peuvent s'interpréter comme la variation de l'utilité de la population à laquelle il

apparaît (ou non) possible d'apporter une solution sûre démontrée de gestion à long terme des déchets HAVL. Il s'agit donc d'interroger la rationalité économique des choix faits par la gouvernance du projet, via cet outil. Ce travail se positionne dans un domaine très peu visité par les économistes. Citons la thèse d'Aude Le Dars (2002) (plus «politique» sur les processus), celle d'Oana Ionescu-Riffaud (2011) (avec options réelles), les articles de Christian Gollier et Jean-Guy Devezeaux (2001) [4] et de Henri Loubergé (2001) [5] en France. Il faut aussi citer l'expertise de Jacques Percebois, qui fut membre de la CNE [1]. À l'étranger, très peu de travaux s'orientent vers un contenu économique de nature académique (AEN (2004), Lehtonen (2010), AEN (2013)). Ceux de l'AEN (Agence de l'Énergie Nucléaire de l'OCDE) sont essentiellement axés sur des compilations de coûts de stockage et des garanties sur les fonds dédiés afférents. On s'interroge ici sur l'économie de l'échéancier du stockage profond et des choix associés. Il nous apparaît que la présente recherche est la première qui s'interroge de façon organisée sur l'économie de l'échéancier du stockage profond et des choix en la matière⁴.

L'essentiel de notre approche repose sur une fonction agrégeant coûts et bénéfices que nous présentons dans la prochaine section. Toutefois, avant de développer ces outils, il est important de préciser certaines conséquences des choix qui ont été faits par la représentation nationale en décidant de mettre en œuvre à «court» terme (de l'ordre d'une décennie) un stockage profond accueillant les déchets HA et MAVL. Ceci au regard d'une stratégie, longuement discutée dans le cadre de la loi de 1991, qui aurait consisté à entreposer en surface (ou «sub-surface») ces déchets pendant des durées supérieures au siècle. Dans ce but, nous utilisons les outils standards du coût «brut» et du coût actualisé.

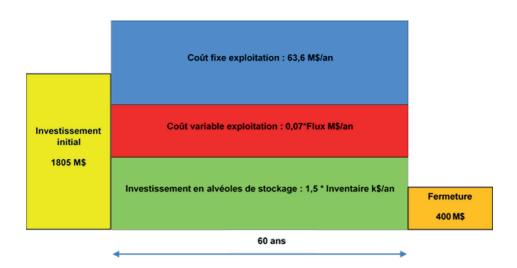


Figure 2. Échéancier des dépenses associées à un stockage de déchets radioactifs en couches géologiques profondes

Nota : Les flux sont en tonnes de matières lourdes/an, les montants en dollars de 2016. La référence à la monnaie américaine provient d'une étude internationale menée par l'AEN.

3. Une approche «standard» de la valeur économique de la date du stockage des déchets

3.1. Structure des coûts

Cette section présente des résultats obtenus sur un cas générique, qui cherche à représenter un pays nucléaire «moyen». Les postes des dépenses de la gestion à long terme des déchets radioactifs via le stockage sont pour simplifier les suivants :

- L'entreposage des déchets (généralement sur le lieu de production), leur désentreposage et le transport vers le lieu de stockage définitif. Le premier poste est principalement fixe (investissement nécessaire) et les autres sont essentiellement variables.
- Le stockage des déchets, lui-même structuré selon les postes :
- investissement, comprenant une partie fixe et une partie variable. La partie fixe correspond à l'investissement initial en installations de surface nécessaires aux travaux souterrains, à la réception des colis de déchets et à leur préparation pour le stockage et en infrastructures de liaison entre la surface et la zone souterraine de stockage. La partie variable est proportionnelle au volume de roches excavées, lui-même lié à l'inventaire des déchets à stocker. Ces dépenses variables sont réalisées de manière progressive au fur et à mesure des besoins (galeries de circulation et alvéoles de stockage).
- exploitation : ces frais se composent également d'une part fixe (exemple : effectif de maintenance, radioprotection, gardiennage...) et d'une part variable qui dépend du flux de déchets à gérer.
 - fermeture du centre de stockage.

Un exemple d'échéancier des dépenses associées à un stockage est illustré par la Figure 2. Le total des coûts est communément appelé «coût brut»⁵.

Ici, les combustibles sont traités et recyclés. Par rapport à la situation du pays, les déchets «historiques» issus des premières générations de réacteurs, de la recherche, des applications militaires ne sont notamment pas pris en compte ici, pour simplifier. Pour comparer avec les valeurs françaises, il y a une quinzaine d'années, le coût du projet de l'ANDRA a été estimé à 11,5 milliards d'euros (décret de 2005 – montant en euros de 2003). Il est actuellement estimé à de l'ordre de 25 milliards (montant arrêté par la ministre Ségolène Royal en 2015), ce qui est dû essentiellement à un effet d'inventaire et à une prise en compte différente des aléas.

Ce type de diagramme des coûts est très stylisé, et il vaut surtout par les pondérations des différentes phases d'exploitation d'un stockage profond. La phase de stockage elle-même est de très loin la plus longue, puisqu'elle peut atteindre près d'une cinquantaine d'années ou plus (ici 60 ans). Des durées plus longues encore sont possibles s'il est décidé, comme actuellement en France, d'observer le site au titre de la mise en œuvre potentielle de la réversibilité (consistant à vider le site de ses déchets). Ce type de diagramme permet, en y injectant des valeurs représentatives en ordre de grandeur, d'obtenir des résultats intéressants quant à l'économie de la gestion des déchets. Nous en citons 2 ci-après.

3.2. Optimiser la date du stockage : doit-on stocker ou entreposer à long terme?

Pour prendre en compte ces dépenses et leur échéancier, nous nous référons à un concept économique très classique : celui de coût actualisé, en prenant en compte un taux d'actualisation dont la valeur est assez complexe à fixer. Ce taux traduit le poids des années proches, la valeur actuelle nette diminuant avec ce taux, au fur et à mesure que les dépenses sont lointaines. En l'espèce, le calcul est original au sens où il concerne des dépenses et non un flux de services mesurables (par exemple une production d'électricité). Au plan public, il apparaît logique de retenir une valeur basse du taux d'actualisation, ce qui donne de l'importance aux coûts lointains. Un taux faible permet de plus prendre en compte les intérêts des générations futures,

en suivant en cela la démarche proposée par Nicholas Stern pour la prise en compte économique du dérèglement climatique. Du point de vue des industriels qui ont la responsabilité de la gestion des déchets, il pourrait être proposé de retenir des taux plus élevés, en ligne avec les pratiques usuelles de l'industrie. L'écart entre ces taux publics et privés est de l'ordre de 5 points. Nous faisons ici le choix de raisonner en privilégiant une approche publique, avec des taux relativement faibles (voir plus loin, des taux de 3 et 5 %). Rappelons enfin que ces valeurs, qui servent essentiellement à alimenter la réflexion du décideur public, n'ont que peu à voir avec les taux de rendement retenus dans le cadre de la gestion des fonds dédiés à la réalisation du stockage (qui dépendent d'abord du marché de la monnaie et des choix des banques centrales).

Un premier résultat issu du diagramme de coût précédent est, en fonction des ordres de grandeur des coûts actualisés, que l'entreposage «indéfini» (quitte à renouveler les entrepôts tous les 100 ans par exemple) s'avère la

solution la moins chère. Le gain peut atteindre un facteur 10, tant les coûts d'entreposage sont plus faibles que les coûts de stockage. Voir la Figure 3 qui présente le coût actualisé (en valeur actuelle) du total de la gestion des déchets (coût cumulé : entreposage + stockage). Le coût de stockage diminue fortement si l'ouverture est décalée. Le coût d'entreposage apparaît peu sensible à la date de transfert des colis vers le stockage, l'essentiel des coûts actualisés étant dépensé en début de période.

Un facteur qui renforce ce résultat est que l'essentiel des déchets existe aujourd'hui et que ceux-ci sont entreposés dans des installations déjà construites, avec des coûts annuels modestes. Ainsi, toute analyse économique «standard» de la date de stockage optimale débouche sur le résultat que ce stockage doit être ouvert le plus tard possible.

Mais cette solution n'a pas été retenue par le législateur en 2006. Son choix, très structurant, pousse donc à amender les outils standards. Il peut être interprété comme une première

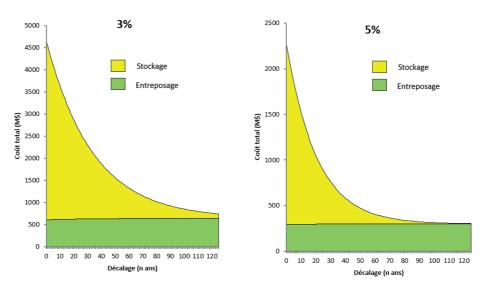


Figure 3. Coût actualisé de gestion (entreposage + stockage) pour deux taux d'actualisation, en fonction du décalage de la date de stockage

Nota : Les coûts sont actualisés sur la base des coûts bruts détaillés dans la Figure 2. En tenant compte de l'actualisation, la Figure 3 montre que le surcoût du stockage décidé rapidement serait de l'ordre de 4 Mrds (avec un taux de 3 %) et de 2 Mrds (avec un taux de 3 %) par rapport à une solution de recours massif à l'entreposage de longue durée.

façon de mesurer l'utilité sociale d'un stockage «rapide» : cette utilité est au moins égale au surcoût de la mise en œuvre du stockage par rapport à une stratégie d'entreposage de longue durée. Toutefois, une analyse plus précise montre que ce résultat, concernant la France, doit être nuancé par le fait que les opérations sont en cours et que les dépenses annuelles de l'ANDRA apparaissent proches du montant correspondant à la désactualisation du coût du stockage. Si on fait l'hypothèse que ces dépenses sont peu ou prou fixes, le calcul économique standard devient nettement plus favorable à une ouverture rapide du stockage. Les dépenses de l'ANDRA chaque année seraient juste compensées par le glissement d'un an du projet si l'on était dans un monde fictif 1°) en indécision perpétuelle 2°) sans création de valeur industrielle par les travaux de recherche et de conception de l'Agence (pure logique de maintien des compétences). On peut aussi interpréter ce choix comme la résultante de la volonté de placer les déchets en couches géologiques profondes «le plus vite possible», ce qui revient à donner une valeur à la rapidité à laquelle les déchets seront gérés de cette façon. Une telle valeur n'a pas été stipulée par la représentation nationale ou le gouvernement. Mais on conçoit que s'il devenait possible d'évaluer la préférence pour le présent — ou pour la rapidité — du stockage, il deviendrait alors aussi possible de façon équivalente de définir un «taux d'actualisation» spécifique à cette activité. Ce taux décrirait essentiellement la perte de valeur sociale induite par un décalage d'un an du stockage. Tant que l'on suppose que ce taux reste modeste (quelques points), le résultat économique présenté ci-dessus reste vrai. Ce qui est la conséquence du faible niveau des coûts d'entreposage. Dès lors que ces taux se rapprocheraient, s'égaliseraient ou même s'inverseraient (la préférence pour un stockage rapide devenant majeure), le résultat changerait en faveur du stockage géologique.

3.3. Optimiser la chronique propre du stockage

Un second résultat est que les choix de phasage des opérations internes du stockage français sont assez éloignés d'un calcul d'optimum. La loi de 1991 a été traduite par l'étude d'un projet de stockage unique pour les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MAVL). Or les dates de stockage au plus tôt des déchets les plus potentiellement dangereux (HA) ne permettent pas à notre génération de mettre en œuvre industriellement la solution de gestion de long terme : ces déchets sont chauds (la puissance d'un colis de CSD-V de 700 kg de verre est comparable à celle d'un radiateur électrique) et peu stockables avant 2060 à 2080. Cette notion de stockabilité étant elle-même duale : elle mêle en effet des impacts de la thermique sur la démonstration de sûreté et sur l'état physique de la couche d'argilite avec des considérations sur les coûts de stockage. En ce sens, il y a plutôt une zone de durée limite d'entreposage avant stockage, qu'il devient de plus en plus difficile de raccourcir, qu'une durée absolue à partir de laquelle tout devient possible sans surcoût. Il a ainsi été décidé, d'une part, de mettre en œuvre bien avant cet horizon une phase pilote (cf. supra), et, d'autre part, de commencer par stocker les déchets MAVL. S'ensuit un échéancier étalé sur une période très longue, au cours de laquelle le stockage des déchets de moyenne activité est mené «en attendant» celui des déchets HA, avec des coûts fixes importants (radioprotection, surveillance, gardiennage...). Industriellement, il aurait été significativement moins onéreux de planifier un stockage permettant une coactivité (MAVL et HA stockés en même temps), sur une durée totale très nettement plus courte. Les gains associés en coûts bruts seraient de l'ordre de 20 % sur le coût brut total du projet. Les gains en coût actualisé liés à un démarrage nettement plus tardif auraient été plus grands encore. Mais une attente de plusieurs décennies n'est ni l'esprit ni la lettre de la loi de 1991, ni a fortiori celui et celle de la loi de 2006.

Nous avons par ailleurs identifié une autre source potentielle de gain économique, laquelle serait de changer le diagramme des flux en supprimant une relation (implicite) qui a présidé à la conception du stockage. Cette relation porte sur le flux annuel de déchets stockés (il s'agit ici essentiellement des déchets HA), lequel correspond grosso modo au flux annuel issu du parc (déchargement des combustibles usés) des décennies auparavant. Le dimensionnement qui a été réalisé actuellement est de fait calqué sur le rythme auquel les colis vitrifiés deviendront stockables, après la période de refroidissement requise. Le flux correspond donc au flux de production des colis à Orano/La Hague plusieurs décennies auparavant. Cette approche est issue de la volonté de stocker dès que jugé possible. Nos travaux, qui restent indicatifs, suggèrent qu'un rythme double d'activité du stockage raccourcirait la durée d'activité du site et permettrait des effets d'échelles (toutefois assez modérés), le tout permettant des économies de l'ordre de 10 % sur le coût brut total du projet. Par contre, le gain pourrait s'avérer faible sur le coût actualisé (les coûts annuels étant plus élevés et la fermeture arrivant plus vite), même si au total la période d'exploitation est plus courte. Ceci toutefois au «prix» d'une attente supplémentaire avant de débuter le stockage des déchets HA.

Ces considérations ne s'opposent pas aux choix de conception et d'échéanciers effectués par l'ANDRA, elles montrent simplement que la décision de débuter le stockage des déchets dans la dizaine d'années qui vient induit des coûts significatifs, tout d'abord de par la proximité des dépenses et ensuite, car le choix de stocker les déchets MAVL (les seuls aptes au stockage rapide) induit une durée de stockage et des opérations longues, donc plus coûteuses, avec l'arrivée des déchets HA seulement à la fin du siècle. Il faut y voir la conséquence de la volonté du Parlement, des gouvernements successifs et des industriels d'apporter une solution satisfaisante à la question, dans des délais comparables à ceux de l'exploitation des réacteurs. Par ailleurs, il faudrait distinguer entre ce que serait la conception d'un

programme de gestion partant de zéro (situation implicite des calculs précédents) et la situation française actuelle qui est déjà engagée vers le stockage : dans ce cas, l'avantage économique d'une remise en cause du calendrier serait significativement moindre du fait notamment des coûts échoués. En pratique, sauf à remettre le stockage à des temps lointains, les ordres de grandeur des écarts temporels de stratégies compatibles avec la loi sont du milliard d'euros, ce qui reste modeste eu égard au coût total du programme. Nous renvoyons pour cela à la thèse de Linh Doan [6].

4. Une nouvelle approche économique de la temporalité du stockage

Ces premiers résultats montrent que la décision de construire un stockage des déchets HAVL à brève échéance n'allait pas de soi économiquement, selon l'approche standard illustrée ci-dessus. C'est une solution onéreuse pour les propriétaires des déchets : de par la loi, les propriétaires de déchets (les «producteurs») rentrent dans un cadre «pollueurs-payeurs» qui les contraint à provisionner des fonds suffisants pour faire face aux dépenses au moment requis (c'est l'article 20 de la loi du 26 juin 2006). En pratique, ces fonds ont été largement constitués avant le vote de la loi et cette condition semble satisfaite de façon robuste (dès lors que les ordres de grandeur du

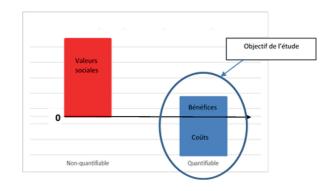


Figure 4. Utilité d'un stockage rapide pour la société

budget total restent contenus). De nombreux rapports de la Cour des comptes portent sur le sujet (voir bibliographie). Cette solution induit de par sa rapidité que le stockage ouvrira alors que les déchets les plus potentiellement dangereux ne sont pas encore aptes au stockage (d'où un considérable allongement de la période d'exploitation qui ne correspond pas à l'optimum industriel). Mais cette décision s'explique par la volonté de traiter la question maintenant, à tout le moins par la construction du site et sa mise en exploitation, alors que les générations qui ont bénéficié de l'électricité nucléaire sont là pour le faire. L'action rapide a donc une forte utilité sociale.

De la sorte, l'utilité sociale d'un stockage profond «rapide» nous apparaît comporter deux éléments de natures différentes :

- Des impacts économiquement mesurables et de signes différents, tels que les coûts du projet, les risques pendant l'exploitation, l'éventuel gain dû à la vente des brevets sur la technique du stockage... Nous proposerons aussi d'y ajouter un terme sur l'augmentation de la faisabilité sociale concernant l'énergie nucléaire et le renouvellement du parc. Ces impacts quantifiables sont figurés en bleu (Figure 4).
- Cette valeur sociale d'un stockage rapide évoquée ci-dessus : ce projet contribuera à l'égalité intergénérationnelle en limitant le report de charges sur les générations futures. Ce terme est difficile à quantifier économiquement, mais il semble raisonnable de présumer que cette valeur sociale est positive (elle est illustrée en rouge, Figure 4).

En présence des termes non quantifiables, l'utilité totale d'un stockage rapide ne pourrait donc pas être correctement quantifiée en termes monétaires. En conséquence, notre objectif ici ne peut aller au-delà d'une analyse partielle de l'utilité d'un stockage profond à partir des facteurs quantifiables et d'observer sa sensibilité selon la date de mise en service de l'installation. Au minimum, si la décision d'un stockage rapide est basée plutôt sur des critères politiques et sociaux que sur une approche économique, il est toujours intéressant

de tenter une approche en ordre de grandeur de ces derniers critères. Le gain économique issu d'un décalage du programme sera, en module, inférieur à la dégradation de la valeur sociale comme nous le révèle le choix de la représentation nationale. Nous pourrons donc approcher un minorant de cette valeur sociale.

En se basant sur la structure de coût du projet Cigéo et sur l'arrêté du 15 janvier 2016 relatif au coût afférent à sa mise en œuvre, nous proposons ici une fonction d'utilité qui intègre les principaux coûts (entreposage, stockage, R&D) et bénéfices quantifiables (vente des brevets technologiques, maintien de l'option nucléaire via son renouvellement) en fonction de sa date de mise en service. Nous avons aussi tenté de prendre en compte les coûts d'éventuels accidents en entreposage et à la mise en stockage. Cette fonction permettra surtout de comparer les ordres de grandeur de ce poste, selon différents calendriers.

4.1. Démarche théorique

La démarche théorique met en jeu analytiquement les différents coûts et bénéfices que l'on pourra dériver par rapport au paramètre faisant l'objet de la décision (c'est-à-dire par rapport à la date de MSI du stockage profond). Ceci pour connaître la variation de la valeur actuelle nette du projet avec sa date de MSI.

Premièrement, dans le cas d'un décalage dit «à profil temporel rigide» (c'est-à-dire que l'échéancier interne du stockage lui-même est inchangé) de n années, le premier effet est de prolonger la période du refroidissement préalable des déchets, et ce faisant d'augmenter le coût d'entreposage. L'opération d'entreposage doit être maintenue jusqu'à la mise en stockage du dernier colis de déchets; le coût d'entreposage pour un décalage de n années est donc calculé comme ci-dessous :

$$E(n) = E(0) + A \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{(1+r)^{t_{fermeture} + i - t_0}}$$

Où *E*(0) présente le coût d'entreposage des déchets radioactifs à vie longue jusqu'à

la fermeture du stockage profond si tout se déroule comme prévu (MSI de référence ici en 2031), $t_{fermeture}$ la date de fermeture potentielle du stockage profond, t₀ l'année actuelle (les calculs ont retenu l'année 2018) et r le taux d'actualisation. Dans ce modèle, A est le coût annuel (ici ce coût «de service» comprend une quote-part de l'investissement initial et le coût d'exploitation annuel) de l'entreposage. Cette approche, qui peut paraître complexe, est issue du choix de pouvoir coupler ce modèle avec d'autres exploités à l'I-tésé, qui reposent sur un tel formalisme. En l'occurrence, elle apparaît ici pénalisante sur l'entreposage des déchets portés à l'inventaire de Cigéo. En effet, les entrepôts existent déjà dans leur quasitotalité, de sorte que les coûts afférents à l'entreposage des colis de déchets existants sont très faibles.

Le deuxième coût à prendre en compte est la dépense consacrée aux activités de recherche. En France où des programmes importants sont en cours pour préparer la MSI du stockage profond, les impacts de changements de dates sur le projet, en particulier les dépenses de R&D, sont différents selon l'optique retenue. Si l'on part d'une situation où une date plus tardive s'explique par des reprogrammations graduelles et successives du projet, alors la sensibilité des dépenses annuelles de R&D est faible : les programmes se poursuivent, sont complétés et étendus, notamment dans le souci de mieux expliquer les choix de concepts et leurs conséquences, ainsi que de disposer de compétences toujours au meilleur niveau et en nombre correctement dimensionné. Ainsi, les activités annuelles de recherche dans le laboratoire souterrain de Bure sont stables, ou en croissance modérée, alors que le projet industriel a fait l'objet de reprogrammations qui ont abouti historiquement à des décalages de fait de la MSI. Rappelons que Cigéo (qui n'avait à l'époque pas encore ce nom) devait ouvrir en 2025, lorsque la loi de 2006 a été instruite. Quelques années supplémentaires ont été nécessaires pour s'assurer de la robustesse et de la complétude du projet, avec des exigences croissantes des parties prenantes. Soit alors l'expression ci-après :

$$R(n) = R(0) + A' \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{(1+r)^{t_p+i-t_0}}$$

Où R(n) est la somme des coûts R&D pour un décalage de n années, R(0) la dépense jusqu'à la date MSI prévue du stockage profond (t_n) et A' la dépense R&D annuelle.

À l'inverse de ces décalages de fait (subis répétitivement au cours du temps), si on postulait un choix de date de MSI d'emblée tardive, explicable comme un report significatif et décidé en une étape, les dépenses annuelles de R&D en support au projet pourraient être adaptées dans la durée et avec une bonne prévisibilité du calendrier : elles diminueraient donc pendant une première période, mais seraient poursuivies plus longtemps. Il faut noter que ce type de scénario est actuellement étudié par l'ANDRA, au titre de scénario alternatif, avec une MSI du centre qui serait décalée d'emblée d'une quarantaine d'années.

Le poste principal est le coût du stockage profond (incluant comme toujours ici investissement initial, exploitation et fermeture) avec :

$$S(n) = \frac{S(0)}{(1+r)^n}$$

Avec S(n) le coût du stockage profond, actualisé à l'année de référence initiale, pour le cas d'un décalage de n années et S(0) la dépense actualisée initialement prévue.

Nous avons considéré également les coûts d'un éventuel «accident radiologique» survenu en entreposage. La littérature en matière de prise en compte économique des accidents nucléaires est assez fournie, par contre elle porte très peu sur les déchets [21].

Le décalage du stockage peut être considéré comme augmentant la durée d'entreposage et donc les risques⁶. Pour l'entreposage, ce poste de coût est calculé par la somme d'un coût physique M₁ et d'un coût humain M₂. Le premier a été défini de façon très pénalisante et inclut toutes les dépenses qui seraient liées à la récupération et la reprise des colis entreposés,

à la décontamination et au démantèlement de l'ancien entreposage, à la construction d'une nouvelle installation, ainsi qu'à un coût «d'image» des territoires impactés. Le coût humain comptabilise les potentiels effets sur la santé. Il s'agit principalement de prendre en compte des décès et des maladies induites, comme pour tous les accidents dans les autres industries. Le facteur psychologique peut aussi être pris en compte. Il est difficile d'évaluer ce coût humain, et des règles sont parfois établies en la matière, surtout dans les pays de culture anglo-saxonne, mais pas seulement. Une question spécifique au nucléaire, qui a été débattue notamment dans le projet ExternE de la Commission européenne, est de savoir s'il est pertinent ou non de «pénaliser» le nucléaire d'un facteur d'aversion supplémentaire. Les travaux qui ont alors été menés — dans le cas des réacteurs — ont montré que même avec une pénalisation lourde (facteur 10) les coûts totaux des projets étaient peu sensibles aux impacts des accidents. Le coût humain est donc mal connu, a fortiori dans le temps, ce qui nous a amenés à le probabiliser, plutôt que de retenir une valeur unique. Nous l'avons spécifié comme suit:

$$\frac{dM_2}{M_2} = \alpha dn + \sigma_1 dW_n^1$$

Avec M_2 le coût humain en cas d'accident en entreposage, α la dérive positive de la valeur de la vie humaine 2 %/an [9] et σ sa volatilité.

Supposer une dérive positive de la valeur de la vie humaine signifie que la valeur de la vie augmente avec la richesse (approximée par le PIB). Autrement dit, la mesure économique de la sévérité de la défaillance de l'entreposage sur la vie humaine s'accroîtrait tendanciellement. De plus, malgré que la tendance soit positive, l'addition dans la formule d'un «bruit géométrique brownien» implique qu'on accepte la possibilité des régressions aléatoires de la valeur de la vie humaine, à cause d'une décroissance ou crise économique éventuelle, par exemple.

Le coût des accidents éventuels en entreposage en valeur actualisée serait alors exprimé par l'équation :

$$AE(n) \approx AE(0)$$

$$+ \sum_{i=1}^{n} Probabilit\acute{e}_{accident} \frac{\left[M_{1} + M_{2}(t_{0}) \cdot \exp(\alpha(t_{fermeture} + i - t_{0})) \right]}{(1+r)^{t_{fermeture} + i - t_{0}}}$$

Avec AE(n) le coût des accidents éventuels en entreposage en cas d'un décalage de la date MSI de n années et AE(0) le coût des accidents si tout se déroule comme prévu, M_1 le coût physique (supposé constant) et M_2 le coût humain dépendant de la durée du décalage.

Concernant le risque lié au stockage géologique, la Commission Nationale d'Évaluation a noté dans son avis de mars 2013 que Cigéo est capable de «suffire à abaisser la nocivité des déchets à un niveau tel qu'elle ne pose plus de problème pour les populations vivant au-dessus du stockage». On supposera donc ici qu'après la fermeture définitive, la probabilité que Cigéo puisse être à l'origine des rejets dangereux est négligeable. Par contre, pendant la phase d'exploitation (au moins une centaine d'années), Cigéo reste ouvert, donc présente en théorie aussi des risques de rejets dangereux (suite à un incendie, ou à la chute de colis, par exemple). Toutefois, à la différence des autres usines traitant des produits radioactifs, la principale fonction de Cigéo est de confiner la radioactivité contenue dans les déchets pendant toute la période d'exploitation, en situation normale comme accidentelle. Un tel cahier des charges nous a conduits à présumer que le terme M', (coût humain) en cas d'accident dès la mise en stockage serait négligeable. Le coût des accidents éventuels, pendant l'exploitation du stockage en valeur actualisée, est donc exprimé uniquement en fonction du coût «physique» M', par l'équation:

$$AS(n) = \sum_{i=t_p+n}^{t_{fermeture}+n} 10^{-5} \frac{M'_1}{(1+r)^{i-t_0}}$$

Avec t_p et $t_{fermeture}$ qui sont respectivement la date de MSI et celle de fermeture prévues

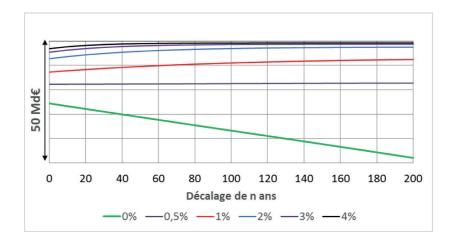


Figure 5. Termes quantifiables de la fonction d'utilité selon le décalage de la MSI par rapport à la date de stockage au plus tôt

pour Cigéo. M'_1 est le coût physique (supposé constant) des conséquences de l'accident⁷.

Le sixième coût à considérer est en fait un éventuel produit de la vente des brevets technologiques relatifs au concept et à la mise en œuvre du stockage profond. Ces ventes seraient dues à l'avance de la MSI du projet français par rapport aux autres pays. Il est supposé suivre une distribution brownienne avec une tendance négative $-\beta$; avec β égal au taux du développement technologique dans les autres pays (de l'ordre de 2 %/an [10]) et un paramètre de volatilité σ_2 comme indiqué ci-dessous :

$$\frac{dV}{V} = -\beta dn + \sigma_2 dW_n^2$$

La «fonction d'utilité» du stockage, interprétée ici comme une différence coûts-bénéfices, s'écrit par l'équation suivante :

$$F(n) = \sum B\acute{e}n\acute{e}fices - \sum Coûts$$

Avec :

$$F(n) = V(n) - \left[E(n) + AE(n) + S(n) + AS(n) + R(n)\right]$$

Après un paramétrage des variables dont on trouvera le détail dans la thèse de Linh Doan, nous avons calculé différentes valeurs de la fonction d'utilité, pour différentes dates de mise en service (en pratique, par rapport à la date de 2031) et selon différents taux d'actualisation. Le coût du stockage pris en référence ici est de l'ordre de 25 milliards d'euros, en cohérence avec l'arrêté du 15 janvier 2016. C'est ce que présente la Figure 5.

Ce graphique est figuré sur une échelle arbitraire (on ne connaît pas la valeur absolue de l'utilité d'une stratégie de stockage⁸) et décrit l'évolution de la valeur de l'utilité en fonction de la date de début du stockage. Chaque division verticale représente une valeur actuelle de 10 milliards d'euros.

Rappelons (c'est un truisme) que seuls les arguments quantifiables décrits supra sont ici pris en compte. En ce sens, nous sommes ici près d'une approche coût-bénéfice.

On remarque qu'avec des taux «usuels» d'actualisation (≥1 %), le bilan «coût-bénéfices» est croissant en fonction de la durée du décalage de la date MSI du stockage profond : plus on retarde et plus élevée est la valeur de l'utilité. Le décalage des valeurs à l'année de départ (intersection des courbes avec l'axe vertical) est simplement lié au fait que les dépenses n'étant pas immédiates, les valeurs totales actualisées diffèrent selon les taux. Cette analyse économique conserve

donc les caractéristiques de l'approche simplifiée présentée plus haut et pousserait, seule, à décaler le stockage définitif, dès lors que les coûts d'entreposage sont faibles au regard des coûts du stockage à long terme. Cet effet est renforcé par le fait que la puissance thermique des déchets HA diminue avec le temps. Plus les déchets HA sont refroidis, plus les coûts de stockage pourront être réduits (par exemple, par réduction d'espacement entre les colis et/ ou les alvéoles de stockage). L'étude fine de ce sujet n'est pas l'objet de cet article. Une décision d'entreposage «sine die» est en effet de l'ordre de 10 fois moins onéreuse qu'un stockage «rapide». Cet ordre de grandeur est très rustique et dépend notamment des paramètres économiques tels que l'actualisation. Il faut toutefois noter que les déchets historiques disposent actuellement tous de lieu d'entreposage (parfois en cours de modification, dans le cadre d'opérations de reprise des anciens colis). À nouveau, ce résultat éclaire la décision de stockage comme un choix plus onéreux, qui traduit la volonté de notre génération à agir sans délai excessif vis-à-vis des suivantes. Ce positionnement date de l'origine de la production d'électricité nucléaire, ou presque, et est la ligne suivie par les industriels bien avant la loi de 2006.

Il faut toutefois examiner les ordres de grandeur de la sensibilité de l'utilité (telle qu'ici mesurée) à la date de stockage. Les effets ne sont pas d'une grande ampleur, dès lors que les taux d'actualisation sont supérieurs au pour cent. Pour un taux qui serait nul, les impacts d'un décalage sont plus sensibles et correspondent à l'augmentation du coût de l'entreposage, qui croît logiquement avec sa durée. C'est ainsi le choix du taux d'actualisation du projet qui prime, de façon majeure, sur le résultat en termes de stratégie temporelle de la gestion des déchets. On constate principalement que pour des valeurs supérieures au pour cent, l'effet du décalage est positif sur l'utilité. Mais, dans le même temps, plus on choisit des taux significatifs en module (2, 3, 5 % et plus) et plus la valeur actuelle nette du programme (en fait, son coût) diminue, sous l'effet de cette même actualisation. Au final.

plus les taux s'élèvent et plus l'intérêt du décalage est proportionnellement important... mais plus le total de la valeur actuelle nette diminue, entraînant avec elle la valeur absolue du gain vers des montants qui restent significatifs, mais ne dépassent pas quelques milliards d'euros, sur un programme de plusieurs dizaines de milliards en coût brut (entreposage compris).

On peut conclure que, même si le choix d'un taux d'actualisation est complexe et n'a été l'objet d'aucune décision publique, et quel que soit ce choix, l'analyse présentée ne milite pas de façon radicale pour une mise en service la plus lointaine possible du stockage, au vu des résultats quantifiés. Ce qui n'est pas un résultat entièrement intuitif et dérive du paramétrage avec des valeurs suffisamment proches de la réalité.

Enfin, ce résultat a été établi en supposant que toutes les dépenses «glissent» dans le temps en bloc. Or certaines d'entre elles sont déjà largement engagées, en particulier la recherche et la conception de l'ANDRA. Celles-ci ne sont certainement pas commandables selon une logique «on-off», tant les compétences mobilisées demandent des moyens et de la constance dans les programmes. Ce point a été évoqué plus haut. Il tempère encore (avec un impact de l'ordre du milliard d'euros) le résultat précédent, en faveur donc d'un maintien des objectifs temporels.

Le paragraphe suivant permet aussi de compléter et d'amender très significativement les résultats acquis en première partie, en prenant en compte un «effet externe», portant sur le parc électrique.

4.2. Lien avec le système électrique

On prend à présent en compte le lien entre la disponibilité d'un système de gestion à long terme des déchets radioactifs et le renouvellement du parc nucléaire. Celui-ci est apprécié via l'effet que l'existence d'un site de stockage (ou, à tout le moins, l'engagement industriel

du processus) aurait sur l'acceptation politique de l'option de renouveler le parc.

Ainsi, si l'on se réfère à la déjà ancienne étude Eurobaromètre de 2008 [11] (le dernier sondage que nous connaissons sur l'acceptabilité du nucléaire, en fonction de la démonstration ou non de la faisabilité d'une filière de gestion à long terme des déchets, date de 2008), dans une situation sans perspective de solution sûre pour la gestion des déchets radioactifs, une majorité relative (50 %) des Français se déclarait opposée à l'énergie nucléaire. Certes, 50 % d'opinions favorables ne pourraient pas garantir la possibilité de renouveler le parc électronucléaire, quelle que soit sa compétitivité par rapport aux autres énergies. Par contre, il apparaissait que la moitié des détracteurs français reverraient leur position si une solution sûre pour les déchets radioactifs était trouvée. 75 % se diraient alors «favorables» à ce type d'énergie et ce taux pourrait permettre une décision plus aisée de renouvellement du parc nucléaire.

Cette étude est ancienne, mais aucune après elle n'a abordé le sujet des déchets avec ce détail. Depuis, l'opinion est passée par des fluctuations (notamment pendant la période d'après le tsunami au Japon et l'accident majeur de la centrale de Fukushima-Daichi). Actuellement, l'opinion semble favorable au maintien du nucléaire. Ainsi, le récent sondage de BVA fait à la demande d'Orano9 montre-t-il que, si les Français ont du mal à se prononcer sur l'avenir de l'énergie nucléaire que ce soit en France ou dans le monde, ils la perçoivent comme une énergie du présent et de l'avenir : un peu plus de la moitié pense que sa part va rester stable ou même progresser en France (54 %) et dans le monde (61 %).

Dans cette seconde enquête, la question des déchets apparaît intimement liée au nucléaire et c'est l'argument principal contre cette énergie : 56 % des sondés s'expriment en ce sens (avec l'argument du risque d'accident pour 52 % des sondés). Il est ainsi clair que si une démonstration de la possibilité d'une solution

était en bonne voie, elle serait de fait un facteur favorable au renouvellement du parc.

Ainsi, on peut supposer une plus forte opposition au nucléaire en cas de décalage de la phase industrielle pilote du stockage profond et donc d'absence de perspective claire d'une gestion sûre. Dans une telle situation, le remplacement des moyens de production serait assuré essentiellement par des sources renouvelables, dans la continuité, et au-delà, de la politique actuelle qui vise à atteindre 50 % de nucléaire en 2035. Or, ces énergies, qui atteignent déjà un stade de développement significatif, sont et seront encore globalement plus coûteuses que le nucléaire de série pendant au moins les deux prochaines décennies10. Pour disposer d'une évaluation du coût du nucléaire de série, le lecteur pourra se référer à l'article de Jean-Guy Devezeaux et Michel Berthélémy paru début 2020 [20].

Dans ces conditions, le coût de la production de l'électricité augmentera, par rapport à un renouvellement partiel du parc par des nouveaux réacteurs EPR2. Il faut donc alors ajouter dans la fonction d'utilité un autre terme qui représente la perte actualisée des revenus résultant du changement de production nucléaire par des sources renouvelables (en sus du programme en cours dans le cadre de la loi de transition, c'est-à-dire en allant vers un système électrique sans nucléaire au mitan du siècle). Elle est calculée par la formule ci-dessous :

$$P(n) = n * 2GW * 7 * \frac{10^6 MWh}{GW} * \frac{l}{MWh} * \sum_{i=0}^{19} \frac{1}{(1+r)^i}$$

Le chiffre de 2 GW est le taux de renouvellement annuel du parc nucléaire que nous retenons, en prenant ici en compte l'objectif de 50 % du nucléaire. Pour des raisons de lissage du parc, nous avons posé le passage par cette valeur en 2040 (et non 2035), mais ce choix ne change pas les résultats en ordre de grandeur. Chaque GW produit de l'ordre de 7 TWh/an. *l* est la différence de coût entre une source renouvelable et le nucléaire (coût global sur l'ensemble du parc, incluant les coûts de

système). On suppose aussi que les centrales d'énergie renouvelables sont amorties sur une période d'au moins 20 ans. Il est malaisé de définir la valeur de l, tant les études peuvent différer à ce sujet, certaines d'entre elles proposant des parcs «100 % EnR» à l'horizon 2050 et calculant que ces scénarios sont les moins chers. Sans rentrer dans une analyse comparative de ces scénarios, rappelons que l'essentiel de l'écart de valeur est constitué dans les deux prochaines décennies (et non en 2050), ceci d'autant plus que le taux d'actualisation retenu est élevé. Des évaluations dynamiques très complètes de ce type de scénarios ont été établies avec le modèle européen PRIMES, pour la France, sous l'égide de la SFEN [23].

Notre analyse indique que lorsque *l*≥1 €/ MWh, c'est-à-dire que le bénéfice de la production nucléaire est supérieur à celui des énergies renouvelables d'au moins de 1 €/ MWh, avec des taux d'actualisation «usuels» (taux de l'ordre de 5 %), la fonction d'utilité est décroissante en cas du décalage ($\frac{dF}{du} \le 0$). Il convient alors de maintenir, comme prévu, la mise en service de la phase pilote industrielle pour contribuer à garder l'option nucléaire (en décidant du renouvellement). Rappelons qu'un écart de 1 €/MWh est très faible eu égard aux ordres de grandeur des coûts de production actualisés (plusieurs dizaines d'euros/MWh) et des coûts de système (presque du même ordre, pour des taux de pénétration importants). Ce résultat a été établi en partant d'une causalité parfaite entre l'existence d'un stockage et la possibilité de renouveler le parc nucléaire. La réalité est plus complexe et un abattement doit être pratiqué. Même en imaginant un facteur 2 à 5 (dénotant un avantage modeste lié à l'existence d'une filière de gestion à long terme), on retrouve qu'un avantage de quelques euros serait suffisant pour entraîner la réalisation rapide de la phase de démonstration industrielle de Cigéo. Ce seuil de 1 euro/MWh ne signifie pas que tout écart de coût complet du système électrique avec ou sans nouveau nucléaire doit être porté au crédit de l'existence d'un projet de stockage. Il est clair que celle-ci ne serait qu'un facteur favorable. En toute logique, il faudrait donc diminuer cet écart apparent, pour tenir compte d'un facteur d'entraînement inférieur à un. On pourrait choisir de façon assez arbitraire (de nouveaux travaux seraient nécessaires à cette fin) d'en retenir entre 20 et 50 %. Plus simplement, nous proposons de rappeler que les coûts complets du MWh des différents moyens de production sont de plusieurs dizaines d'euros, ce qui valide un ordre de grandeur des écarts de coûts significativement supérieur au seuil d'un euro que nous avons obtenu. Par contre, nos résultats numériques montrent qu'on aurait toujours intérêt à décaler la phase d'exploitation courante du stockage profond.

Ce sujet est particulièrement d'actualité. En effet, la dynamique propre au parc électronucléaire, dans un climat de quasi-stabilité de la demande, de choix politique d'accroître la part des EnR et de retards de décision successifs, a débouché sur le fait qu'une certaine logique «court-termiste» pouvait aisément se satisfaire d'un allongement de la durée d'exploitation des réacteurs, sans nouvelle construction. Mais il a aussi été montré [20] que si un programme de plusieurs paires de réacteurs n'est pas lancé dans les toutes prochaines années, alors les efforts de l'industrie pour sortir des grosses difficultés des constructions de Flamanville et Olkiluoto auront été vains. Et la France. qui dispose de la dernière industrie nucléaire européenne, verra sa branche nucléaire disparaître graduellement au profit des industriels étrangers (principalement chinois et russes). Cette autre composante d'une décision d'engagement du stockage est difficile à évaluer, mais en la matière, l'«unité de compte» est la dizaine de milliards. La décision devrait être prise sous peu (l'objectif est 2021, ce qui pourrait s'accorder avec les plans de redémarrage de l'économie «post-Covid») et l'engagement de la première phase industrielle de Cigéo pèsera selon qu'il est effectif ou non.

4.3. Prise en compte de l'incertitude sur la croissance économique

L'actuelle crise de Covid-19 nous rappelle que rien ne garantit une stabilité de l'économie et de la croissance. Une des questions souvent posées dans ce cadre est de s'interroger, en cas de récession durable, sur la capacité de nos successeurs à dégager les moyens attendus pour continuer le programme de stockage... ou pour le mettre en œuvre, si celui-ci est positionné dans un futur lointain. Ainsi, opter pour la mise en œuvre d'une solution de long terme ne peut être entièrement dépendant d'une philosophie de l'avenir qui se caractérise par une justification de taux d'actualisation de plusieurs points, en avenir certain.

Pour traiter ce sujet, dans la ligne des travaux de Christian Gollier sur l'économie du long terme [24], nous avons construit un modèle dans lequel le taux de croissance est stochastique.

Pour ce faire, écrire une fonction de façon analytique imposerait de simplifier très fortement les chroniques de dépenses du projet et empêcherait l'application de taux d'actualisation variable dans le temps. Nous approchons donc le calcul de la dérivée de la fonction d'utilité en écrivant directement sa variation en fonction d'un écart de la date de MSI du stockage profond.

$$\Delta F(n) = \sum \Delta B\acute{e}n\acute{e}fices - \sum \Delta Coûts$$

$$\Delta F_{\text{avant-Phipil}}(n) = \Delta V(n) - [\Delta E(n) + \Delta A E(n) + \Delta S(n) + \Delta A S(n) + \Delta R(n) + \Delta P(n)]$$

$$\Delta F_{\text{après-Phipil}} (n) = \Delta V(n) - [\Delta E(n) + \Delta A E(n) + \Delta S(n) + \Delta A S(n) + \Delta R(n)]$$

La différence entre $\Delta F_{\text{avant-Phipil}}(n)$ et $\Delta F_{\text{après-Phipil}}(n)$ est le terme $\Delta P(n)$. Comme décrit plus haut, la phase industrielle pilote de Cigéo (Phipil) est supposée être une étape importante pour garder l'option nucléaire.

Concernant le choix du taux d'actualisation, la formule Ramsey du taux d'actualisation $r=\delta+\gamma*\mu$ (δ :taux d'impatience; γ :utilité marginale; μ : taux de croissance) suppose que le taux de croissance μ est connu et constant. Le projet de stockage profond se déroulera sur plus d'un siècle, et la conjoncture récente vient de nous rappeler que, sur une période d'une telle durée, la vision d'un taux de croissance connu et constant apparaît irréaliste. Il paraît donc pertinent d'introduire un effet précaution à la formule précédente, effet qui porte sur les incertitudes sur l'économie du long terme, ce qui tend à réduire le taux d'actualisation en fonction du temps [13].

Nous supposons alors que le taux de croissance de l'économie à long terme est inconnu aujourd'hui et qu'il pourrait prendre différentes valeurs avec des probabilités associées¹¹. Nous avons construit 3 situations économiques possibles en fonction de l'incertitude sur la croissance économique à long terme (faible, moyenne et forte incertitude) conduisant à 3 taux d'actualisation, tous décroissants dans le temps mais à différentes vitesses (calculs établis par la formule proposée par Daniel Lebègue). Nos évaluations sont menées pour chacun de ces taux d'actualisation afin de s'assurer de leur robustesse en fonction des évolutions économiques possibles sur le long terme. La Figure 6 présente les facteurs d'actualisation résultants. Ces facteurs permettent, en multipliant une valeur (resp. une dépense) économique future par le facteur de l'année, d'obtenir une valeur actuelle nette. Il décrit ainsi l'atténuation des valeurs futures, au fur et à mesure de leur éloignement dans le temps.

Dans le cas où l'incertitude sur le long terme est forte, le facteur d'actualisation sera (en module) plus élevé. Cela signifie que les implications futures de nos décisions «pèseront» d'autant plus sur notre appréciation du futur que des menaces pèsent aussi sur la croissance des prochaines décennies. En d'autres termes, plus l'avenir est incertain, plus il faut faire des efforts dans le présent.

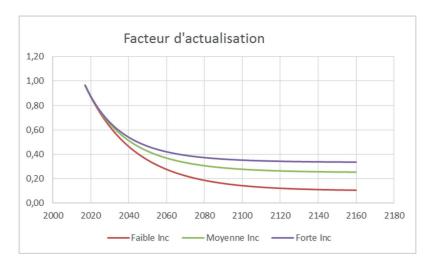


Figure 6. Facteur d'actualisation pour 3 scénarios économiques différents

Via cette approche, nous avons obtenu des résultats numériques qui permettent d'éclairer la prise de décision publique à court terme :

- L'intérêt de décider dès maintenant la phase Phipil est renforcé. Dans tous les scénarios, si 1 MWh d'électricité d'origine nucléaire est, en ordre de grandeur, au moins 1 € moins cher qu'une énergie renouvelable (coûts de système compris), cette phase devra être mise en place comme prévu pour maintenir l'option nucléaire. Sinon, il serait économiquement préférable de reporter tout le projet.
- En cas de faible incertitude sur le long terme, après la mise en service de la phase industrielle pilote, on retrouve qu'il n'y aurait pas d'intérêt économique à continuer immédiatement la phase d'exploitation courante. Ceci est effectif dans 90 % des cas.
- L'épidémie actuelle provoque deux changements par rapport aux anticipations précédentes. D'une part, le taux de croissance anticipé pour les années futures est moindre, et, d'autre part, la volatilité de la croissance future s'accroît, les risques de nouvelles difficultés (sanitaires ou sociales) apparaissant supérieurs. D'après nos résultats, ces deux phénomènes poussent à démarrer les actions de stockage des déchets rapidement.

Pour préciser le second alinéa, un retard de 5 ans pourrait aboutir à un gain maximal de 8 % du coût actualisé de la phase d'exploitation courante, soit environ 250 M€, dans le cas sans aléa. Pourtant, plus le niveau d'incertitude augmente, plus il apparaît préférable de maintenir nos efforts pour un stockage rapide et continu. Par exemple, en cas de forte incertitude sur la croissance dans le futur, un report de 5 ans de l'ensemble du projet pourrait entraîner une perte jusqu'à 400 M€. Par ailleurs, s'il était anticipé comme particulièrement difficile de faire redémarrer le projet après un report significatif à cause des pertes de compétences ou même de la diminution éventuelle de la faisabilité sociale, un processus immédiat et continu du stockage profond offrirait d'autres avantages en évitant ce risque. Ce risque, bien que difficile à quantifier, ne doit ainsi pas être ignoré lors de la prise de décision.

Ces résultats trouvent d'autant plus de sens que la question de la prise en compte des incertitudes a été une constante au sein du débat national sur la gestion des déchets (et des matières) radioactifs de 2019¹². Sans remettre en cause le principe de prudence (sinon de précaution) qui prévaut en la matière, on constate que l'analyse économique pousse ici à l'action, et non l'inverse.

5. Conclusion

Le stockage géologique profond est maintenant une solution reconnue internationalement pour la gestion à long terme des déchets radioactifs à vie longue. La décision de la mise en place de ces projets est influencée par des considérations techniques, sociales et politiques, elle est donc naturellement différente selon les pays. En France, la loi du 28 juin 2006 a aussi retenu cette solution et prévu une ouverture rapide à «brève» échéance, soit d'ici 15 à 20 ans, l'objectif étant d'éviter le report de charge sur les générations futures. La mise en œuvre du stockage apparaît ainsi de nature à procurer une utilité (ou valeur) publique importante. Dans d'autres pays, l'utilité publique peut être différente car elle dépend de la stratégie énergétique, du concept de stockage retenu, du lieu d'implantation des ouvrages et du rythme envisagé pour l'exécution du projet. Notre analyse ici présentée se focalise sur le dernier point, autrement dit sur le choix de la temporalité (ou de la chronologie) du stockage profond.

En nous focalisant essentiellement sur le cas de la France, nous proposons ici un outil d'évaluation économique qui est défini en référence à une chronique de stockage et permet d'explorer des choix alternatifs de chroniques en «testant» la valeur de l'utilité du stockage selon des «expériences de pensée» consistant à décaler et modifier plus ou moins cette chronique.

Une première gamme de résultats, établie sur un modèle simplifié, a tout d'abord montré que la solution de loin la plus économique est d'entreposer à long terme les déchets. C'est-à-dire de repousser très loin dans le temps l'ouverture d'un stockage en couches géologiques profondes. Cette stratégie a été étudiée au titre de la loi de 1991. La représentation nationale a décidé en 2006 de lui préférer le stockage profond à court terme. Cette dernière décision révèle donc une valeur sociale totale forte de la mise en œuvre d'un stockage «au plus tôt» : vu les ordres de grandeur, cette valeur excède le coût complet actualisé du stockage. Sinon,

dans un monde fictif régi par une économie très comptable, le stockage serait déclaré non rentable et serait donc reporté. Le coût associé à l'entreposage des déchets pendant un ou plusieurs siècles est de l'ordre du dixième de celui du stockage (ratio qui dépend toutefois significativement du taux d'actualisation retenu). L'analyse économique résout cet apparent paradoxe en ajoutant un terme manquant et non observable : la valeur sociale du stockage. Avec les ordres de grandeur connus, la valeur sociale de la stratégie de stockage à court terme en vigueur excèderait 90 % du coût du projet, pour des taux d'actualisation «usuels».

Ce résultat (privilégiant l'entreposage) évalue une situation où les déchets attendent en entrepôts et où l'ensemble des actions à mener pour leur gestion à long terme doit être décidé. Ce n'est plus le cas aujourd'hui en France, tant les 30 ans de travaux de l'ANDRA ont permis d'avancer le projet (on notera d'ailleurs que la R&D et les travaux de conception ne sont pas inclus dans le modèle simplifié utilisé ici). Une politique de «stop & go» optant aujourd'hui pour l'entreposage, outre qu'elle serait contraire à la loi, entraînerait des coûts échoués considérables.

Mais surtout, les paramètres à inclure dans une approche visant à intégrer le plus possible de coûts et bénéfices sociaux dépassent largement le seul coût du projet.

Ainsi, de façon plus complète, nous avons proposé une évaluation de la chronique de stockage en intégrant le plus possible de paramètres quantifiables, même si la valeur sociale totale échappe à l'analyse économique¹³. Les paramètres pris en compte sont — outre les coûts du projet (entreposage, stockage) — la dépense du maintien des compétences nécessaires, le bénéfice de la vente éventuelle de technologie (brevets) rendue possible par l'avance française dans la réalisation du projet, les risques d'accident en entreposage ou en stockage et finalement la valeur du maintien de l'option nucléaire. Cette évaluation a permis de nuancer très fortement le premier résultat privilégiant l'entreposage, ceci même

sans avoir besoin de supposer une valeur sociale (en sus des postes ci-dessus) considérable pour le lancement rapide des opérations de stockage.

Nos «tests» de l'impact économique de décalages d'échéancier ont pour objectif d'éclairer les conséquences économiques portant sur des décalages potentiels du projet de stockage, qu'ils soient décidés par la représentation nationale, le gouvernement, le maître d'ouvrage, ou induits par d'autres causes (délais de recherche et conception, nouvelles questions techniques spécifiques au projet, exigences de sûreté ou augmentation en complexité des processus d'autorisation provenant par exemple d'un besoin de temps pour que le dialogue entre parties prenantes s'établisse correctement, priorisation par le gouvernement...). Ce travail n'a bien entendu pas pour objet de mettre en cause le calendrier de stockage, mais de l'interroger, avec des outils économiques.

Nous avons mis en évidence un résultat d'importance. Notre calibrage montre en effet que, dès lors que la perspective d'une solution durable s'affirme pour la gestion des déchets, via la décision puis la mise en œuvre du stockage et la démonstration de sa faisabilité par l'exemple, la pérennité de l'«option» nucléaire (que l'on peut exercer ou non) s'accroît. Conserver cette option nucléaire pour les prochaines décennies est susceptible d'entraîner une valeur sociale significative, suffisante pour justifier économiquement la démonstration de la faisabilité d'un stockage le plus tôt possible. Dans nos calculs, ce résultat est acquis pour un écart de compétitivité, coûts de système compris, même faible entre le nucléaire et ses compétiteurs (quelques euros/MWh suffisent¹⁴). Il est notamment fortement induit par le synchronisme des dates de décision de renouvellement du parc de réacteurs français et d'ouverture du stockage. Ce résultat est lié à ce que la faisabilité sociotechnique du renouvellement du parc serait meilleure, dès lors qu'une solution de long terme pour la gestion des déchets radioactifs serait en voie de démonstration crédible. Plus précisément, avec

les données actuelles, l'étude réalisée confirme au plan économique que la phase industrielle pilote (avec son potentiel de démonstration) devrait rapidement être mise en place, dès lors que nous prenons en compte son rôle dans la faisabilité sociale du recours au nucléaire dans la durée, toujours sous réserve de maîtrise des coûts des nouveaux réacteurs. Et nous rappelons que la décision du renouvellement du parc presse, au plan industriel.

Le 2^e choix de temporalité porte sur le lancement plus ou moins rapide de la phase d'exploitation courante, appelée à suivre la phase pilote. Notre analyse de l'intérêt économique de lancer cette seconde phase, de stockage industriel «dans la foulée» de la phase pilote, est à ce stade plutôt nuancée. En situation de croissance économique tendancielle et sans aléa, l'intérêt «purement économique» de lancer l'exploitation n'est pas prouvé. Il est toutefois important de noter que la décision d'enclencher ou non l'exploitation courante après la phase pilote, à prendre d'ici une vingtaine d'années, pourra être affinée après l'analyse des résultats de la réalisation de cette phase et l'acquisition de nouvelles informations. Il devrait être alors possible de prendre la meilleure décision, laquelle fera aussi intervenir des critères autres qu'économiques.

Nous avons construit un modèle où ce taux de croissance est probabilisé et peut devenir durablement très faible, voire négatif. Les nouvelles interrogations sur la croissance économique suite à l'épidémie de Covid renforcent la probabilité de telles hypothèses. Nous montrons alors l'importance du niveau d'incertitude sur l'économie à long terme. Plus le niveau d'incertitude augmente, plus il apparaît préférable de maintenir nos efforts pour un stockage rapide et continu. Par ailleurs, si l'on anticipe un taux de croissance futur de l'économie faible, alors l'avantage d'attendre se justifie de moins en moins, favorisant d'autant un stockage débutant rapidement (ce qui est dû à la baisse du taux d'actualisation à retenir alors). Si l'on cumule ces deux phénomènes (respectivement incertitude forte et anticipation d'une croissance en espérance plus faible), on renforce

donc les arguments en faveur d'une décision rapide. Par ailleurs, le renouvellement du parc nucléaire fait partie des programmes potentiels pour assurer la relance de l'économie. Ce qui augmente d'autant la valeur du stockage. Il faut d'ailleurs remarquer que la réalisation puis l'exploitation du stockage est très largement nationale et que la valeur importée au sein des travaux et matériel est très faible : ces caractéristiques positionnent aussi favorablement ce type de projet dans une perspective de relance de l'activité économique.

Ces dernières approches montrent que, dès lors qu'un souhait de l'exécutif en faveur d'une option nucléaire maintenue dans la durée est affiché et que l'incertitude sur la croissance augmente, deux caractéristiques des temps actuels, il apparaît plutôt justifié de lancer la construction du projet Cigéo. Ceci tant en ce qui concerne l'évaluation économique supra que la cohérence de l'ensemble, via la faisabilité du renouvellement du parc. L'argument éventuel exposant que les priorités sont ailleurs en cas de difficultés économiques s'en trouve donc amoindri. Par ailleurs, l'ensemble des coûts est déjà provisionné dans des fonds dédiés, alimentés par les propriétaires (ou «producteurs») de déchets HAVL. L'ensemble des orientations actuelles est donc plus cohérent économiquement qu'il pourrait apparaître à l'aune du simple modèle présenté en tête de cet article. Dit autrement, il n'est pas besoin d'invoquer une valeur sociale se montant à des dizaines de milliards d'euros pour choisir une mise en œuvre rapide du stockage.

Bien entendu, une évaluation économique ne saurait résumer à elle seule les décisions concernant la gestion temporelle du stockage profond. D'autres facteurs, sociaux, politiques ou éthiques, interviennent également dans les processus de décision et la mise en œuvre des solutions. Ils sont sans doute largement à l'origine du choix de la représentation nationale française en faveur d'un stockage «rapide». Des travaux en ce sens seraient certainement très utiles, mais nécessiteraient un effort de collecte de données et de formalisation probablement

d'ampleur. Quoi qu'il en soit, il est patent que les études en sciences humaines et sociales (économie comprise) pourraient être développées avec intérêt et même avec une certaine «utilité sociale». Même si ces études ne sauraient qu'aborder bien partiellement le champ des décisions concernant la gestion temporelle du stockage profond.

RÉFÉRENCES

- [1] J. Percebois, «Faire les bons choix maintenant», Entretiens Européens, 18 juin 2018, https://www.entretiens-europeens.org/wp-content/uploads/2019/07/La-Lettre-EEN-2018-FR-Version-du-14-octobre.pdf
- [2] Commission Nationale d'Évaluation, CNE1 «Réflexions sur la réversibilité des stockages», juin 1998.
- [3] Commission Nationale d'Évaluation, «Rapports Annuels». Voir à ce titre le chapitre du dernier rapport (Rapport n° 13 de la CNE2) sur Cigéo : https://www.cne2.fr/images/M_images/cigeo
- [4] C. Gollier et J.-G. Devezeaux de Lavergne, «Analyse quantitative de la réversibilité du stockage des déchets nucléaires : valorisation des déchets», Économie et Prévision 149, Options Réelles, 2001, pp. 1-13.
- [5] H. Loubergé et al, "Long term risk management of nuclear waste: a real options approach", *Journal of Economic Dynamics and Control* 27, 2001, 157-180.
- [6] L. Doan «Prise en compte économique du long terme dans les choix énergétiques relatifs à la gestion des déchets radioactifs», Thèse soutenue le 7 décembre 2017, avec pour jury M. Patrice Geoffron (Professeur, HDR, Président), M. Jean-Guy Devezeaux de Lavergne (Directeur d'I-tésé, HDR, Directeur de thèse), M. Jacques Percebois (Professeur émérite, HDR, Rapporteur), M. Frédéric Lantz (Professeur, HDR, Rapporteur), M. Jan Horst Keppler (Professeur, HDR, examinateur), M. Luis Aparicio (Chargé de recherche à l'ANDRA, Examinateur), M. Jean-Paul Minon (Ancien directeur de l'ONDRAF, Examinateur), M. Norbert Ladoux (Professeur émérite, HDR, Examinateur).
- [7] L. Doan, "Economic assessment of the political and technical management of large public projects: The deployment schedule of the French deep geological repository of radioactive waste", *Revue d'Économie Industrielle* n° 166, 2019-2, pp. 65-90.
- [8] L. Doan, «Apport de l'analyse économique aux décisions sur la chronologie du stockage des déchets radioactifs en

- couches géologiques profondes», Lettre I-tésé n° 33, printemps 2018, pp. 18-21.
- [9] Commissariat général du plan, Marcel Boiteux, «Transports : choix des investissements et coût des nuisances», 2001.
- [10] Conseil économique pour le développement durable, «L'évaluation économique des scénarios énergétiques», 2013.
- [11] Commission européenne, Eurobaromètre spécial 297, «Attitudes à l'égard des déchets radioactifs», 2008.
- [12] IEA, NEA, OECD, "Projected costs of generating electricity", 2015.
- [13] Commissariat général du plan, Daniel Lebègue, «Révision du taux d'actualisation des investissements publics», 2005
- [14] Arrêté du 15 janvier 2016 relatif au coût afférent à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue.
- [15] Loi nº 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.
- [16] ANDRA, Présentation du projet Cigéo, http://www.cigéo.com/
- [17] Cour des comptes, «L'aval du cycle du combustible nucléaire : Les matières et les déchets radioactifs, de la sortie du réacteur au stockage», juillet 2019, https://www.ccomptes.fr/system/files/2019-07/20190704-rapport-aval-cycle-combustible-nucleaire.pdf
- [18] Cour des comptes, «L'Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs (ANDRA)», Rapport de 2015, https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/EzPublish/20160412-rapport-Andra-S2015-1801.pdf
- [19] J.-G. Devezeaux de Lavergne, M. Berthélémy, V. Faudon, «Quand décider d'un renouvellement du parc nucléaire?», Société Française d'Énergie Nucléaire (SFEN), 2019, http://www.sfen.org/sites/default/files/public/atoms/files/note_avril_renouvellement_du_parc.pdf
- [20] J.-G. Devezeaux de Lavergne, M. Berthélémy, «Coûts du nouveau nucléaire et éclairages sur l'économie du cycle», Responsabilité et Environnement, Janvier 2020, *Annales des Mines*, n° 97, pp. 35-47.
- [21] D. Finon, «L'économie du nucléaire revisitée. Leçons de l'apprentissage d'une technologie complexe par des accidents majeurs», 2012, *La Revue de l'Énergie*, n° 607, maijuin 2012, pp. 165-191.
- [22] AEN "Full Costs of Electricity Provison", OECD/NEA, Report N° 7441, 2018.

- [23] Société Française d'Énergie Nucléaire, «Le nucléaire français dans le système énergétique européen», 2019, http://www.sfen.org/sites/default/files/public/atoms/files/le_nucleaire_francais_dans_le_systeme_energetique_europeen_-_sfen_-_ppe.pdf
- [24] C. Gollier, "Discounting an uncertain future", 2002, *Journal of Public Economy*, n° 85, pp. 149–66.

NOTES

- 1. Données ANDRA.
- 2. Voir les nombreux rapports de cette Commission, renouvelée par la loi de 2015, qu'il s'agisse de rapports annuels ou de rapports spécifiques à certains sujets, comme celui dédié à la réversibilité [2].
- Cette brève description est issue des documents de l'ANDRA.
- 4. Ce travail a donné lieu à la thèse de Linh Doan et à plusieurs articles et conférences. Voir les références en fin d'article. Il faut aussi, depuis quelques années (suite à un article de la loi de 2006 sur les missions de la CNE), consulter les travaux de la Commission Nationale d'Évaluation (de la loi), qui portent aussi en partie sur certains aspects économiques du stockage... Et très largement sur les aspects scientifiques et techniques (voir ses rapports annuels).
- 5. Les valeurs sont issues d'une analyse internationale de l'Agence de l'Énergie Nucléaire de l'OCDE (voir notamment Agence de l'Énergie Nucléaire 2013. "The economics of the back end of the nuclear fuel cycle". AEN/OCDE, Paris, France). On a appliqué la méthode de linéarisation du coût moyen pondéré à partir des données de différents pays (France, Finlande, Suède, Corée, Canada, Espagne). Le «modèle de pays» résultant produirait de l'ordre de 200 TWh d'énergie nucléaire/an.
- 6. En pratique toutefois, cette façon de procéder est pénalisante, car c'est principalement lors des mouvements de colis que des accidents peuvent se produire (chutes notamment). Il faut toutefois se remémorer l'expérience de StocaMine, pour des déchets non identifiés comme radioactifs, qui a mis en évidence un accident sans mouvement de colis (incendie).
- 7. La conséquence principale serait de mettre en œuvre le retrait des colis. Une telle décision est techniquement faisable (c'est dans le cahier des charges de la réversibilité). Le «DOREC» de l'ANDRA décrit la mise en œuvre

d'une telle stratégie. Voir le «Dossier d'options techniques de récupérabilité» d'avril 2016 sur le site de l'ANDRA.

8. Si l'on s'intéresse aux seuls arguments développés plus haut, la somme est largement négative (les coûts priment de façon très nette sur les revenus, qui ne comptent ici qu'un seul poste, dès lors qu'on n'a pas intégré de tarification du service de stockage). Les coûts en module les plus élevés sont obtenus pour une actualisation nulle et augmentent avec la durée additionnelle d'entreposage.

- 9. https://www.bva-group.com/sondages/francais-nucleai re-sondage-bva-orano/
- 10. Ce résultat peut être analysé en comparant les coûts actualisés du kWh, comme par exemple dans l'étude IEA, NEA, OECD [12]. Mais les travaux économiques de ces dernières années montrent l'importance de considérer les moyens de production au sein d'un mix complet, et mettent en évidence des coûts (et bénéfices) autres que les coûts actualisés, notamment en cas de sources de production variables [22].
- 11. Pour plus de précisions, voir la thèse de Linh Doan. Le taux d'actualisation pivot autour duquel les études de sensibilité ont été effectuées est de 1,75 %, ce qui est issu d'une analyse statistique des dernières décennies.
- 12. Voir son compte rendu mis en ligne par la CNDP : https://pngmdr.debatpublic.fr/
- 13. Nous avons bien conscience de l'absence de prise en compte de paramètres majeurs, dont le plus important est la valeur, aux yeux de la société, d'avoir à une date donnée définie (puis achevée) la mise en œuvre d'une solution sûre à long terme de gestion des déchets. Ce type de paramètre ne nous est pas observable (en l'état actuel), de sorte que notre approche économique ne constitue qu'un apport partiel à la prise de décision. Notre travail permet toutefois, en évaluant les principaux autres paramètres, de donner une valeur minimale à cette utilité d'un stockage «rapide», dès lors que la décision prise est bien d'agir dès maintenant. Cette question est très proche dans sa nature de la quantification de la «préférence pour le présent» de la mise en œuvre du stockage, laquelle pourrait être traduite par un taux d'actualisation spécifique, portant sur une valeur du service de stockage. Une méthode pour approcher ce paramètre pourrait consister à procéder par enquête.
- 14. Actuellement, les coûts de systèmes des EnR augmentent avec leur part dans la production, et les coûts du nucléaire devraient descendre en dessous de 70 euros/MWh, après les grosses difficultés des chantiers de Flamanville et Olkiluoto, mais alors que les réacteurs EPR de Taïchan en Chine sont au rendez-vous. Ainsi, un écart

de cet ordre, ou supérieur, est très probable dans les décennies à venir.