Cycle Pluridisciplinaire d'Etudes Supérieures 3

Université Paris Sciences et Lettres

Mémoire de Recherche

Etude des stratégies optimales de stockage de déchets radioactifs à vie longue dans un environnement incertain

Auteur :
Gabriel Baratte

Enseignant Référent :
Bertrand Villeneuve

25 juin 2020

Table des matières

Chapitre 1

Introduction

Depuis les années 1970 et les deux chocs pétroliers, la France a fait le choix du « Tout Nucléaire » pour sa production électrique. Ce choix lui a donné une certaine indépendance dans la production de cette énergie, et lui a permis de moins dépendre des énergies fossiles et donc de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Depuis les années 1990, les trois quarts de l'électricité produite en France est d'origine nucléaire. Cette part est de 71,7 % en 2018. La production d'énergie issue du nucléaire est donc un enjeu crucial pour la France, d'autant plus que l'objectif fixé de réduire à 50 % la part du nucléaire dans la production d'électricité en 2035 implique que cette production va rester encore importante pour le pays pour de nombreuses années.

Parmi les enjeux liés au nucléaire civil, il y a avant tout la problématique de la gestion des déchets nucléaires. En effet, au long terme, l'accumulation des déchets nucléaires deviendra un problème de la plus haute importance. Ainsi, bien que la production nucléaire soit une solution aux émissions massives de gaz à effet de serre, elle donne naissance à une nouvelle difficulté : celle du traitement de quantités significatives de déchets particulièrement toxiques, et qui vont le rester très longtemps.

En effet, toutes les activités de production énergétique nucléaire sont à l'origine de production de déchets radioactifs et il n'existe, à ce jour, aucune solution définitive pour leur traitement. Les déchets radioactifs au centre de cette problématique sont ceux à vie longue (VL) de haute ou moyenne activité (soit respectivement les HA-VL et MA-VL) : ils vont être actifs et toxiques durant plusieurs milliers d'années et représentent un risque important et ce sur un très long terme. Les déchets à haute activité représentent en effet en 2018 0,3 % du volume des déchets radioactifs et 95 % de la radioactivité . Les volumes sont de l'ordre de 3800 m^3 à cette même date et pourraient atteindre 5 500 m^3 en 2030 [1] .

Techniquement, il existe deux modes de traitement des déchets nucléaires : (1) l'entreposage de longue durée en surface (dans des centres d'entreposage ou dans des centrales en activité) en subsurface (quelques mètres de profondeur sous le niveau naturel, ou dans des ancien puits de mine) ; ou (2) le stockage réversible ou irréversible en couche géologique profonde (des couches argileuses perméables et stables, entre 300 et 500 mètres sous terre). Le

1. cf. ANDRA, 2020 [2]

point de vue scientifique généralement accepté et repris dans les rapports officiels concernant la gestion des déchets privilégie, au long terme, la solution de stockage. On peut lire cela dans divers rapport scientifiques officiels : « Par opposition à un entreposage, intrinsèquement provisoire, un stockage réalisé sur des bases scientifiques et techniques solides représente une solution pérenne car il s'appuie sur des propriétés stables de la nature. » [2]. En effet, ce stockage est intéressant pour les déchets à haute activité et vie longue car leur radioactivité présente un dégagement thermique important, et une grand risque de pollution en cas de rupture du sarcophage de confinement du déchet. Les couches géologiques profondes représentent un environnement a priori stable pour des échelles de temps comparables à la durée de vie des déchets HA-VL / MA-VL (des milliers d'années). A ces profondeurs, ils sont à l'abris des changement géographiques, de l'érosion, et du climat de la surface, et dans le pire des cas, par exemple une rupture du confinement des déchets, la pollution sera contenue à cette profondeur. Enfin, ce stockage permet de s'affranchir des coûts et des difficultés liés à la surveillance et à la maintenance permanente que nécessitent les déchets entreposés. La solution trouvée à priori pour gérer ces déchets est donc, au long terme, de les enfouir dans des centres de stockage géologique profond. En France, la loi de 2006 relative à la gestion des matières et déchets radioactifs a en effet retenu cette solution, qui est, par ailleurs, la solution de référence pour la plupart des pays confrontés à cette problématique. Le projet principal français est le centre de stockage profond CIGEO, qui est à l'étude, et qui devrait accueillir ses premiers déchets à partir de 2025.

Cependant, comme le met en avant le rapport de la Cours des Comptes sur la gestion des déchets nucléaires, les décisions qui sont prises aujourd'hui dans le domaine du nucléaire emportent « des conséquences pour de nombreuses générations à venir. Il s'agit donc de choix comportant une forte dimension éthique. La loi dispose d'ailleurs à cet égard de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportées par les générations futures » [3]. Il invite donc à mettre en place un débat sur les décisions du court, moyen et long terme sur la gestion du combustible nucléaire usagé, débat qui doit reposer sur « des données économiques et environnementale » . On peut par ailleurs rajouter que ces analyses et modélisations économiques sont particulièrement importantes au vu des coûts et de l'échelle du projet : le coût total du programme Cigeo a été réévalué à 36 milliards d'euros [4]. Les montants sont assez considérables pour que les des analyses économiques apportent quelques éclairages sur les méthodologies d'évaluation. C'est dans ce premier type de données, économiques, que cherche à se placer le travail produit dans ce mémoire : l'idée est de modéliser différentes situations possibles liés aux coûts de ce projet d'enfouissement de déchets, pour apporter des éclairages aux décideurs publiques quant à ces situations.

Pour ce faire, nous reprendrons le modèle développé par Bertrand Villeneuve dans son article *Stratégie optimale de stockage de déchets radioactifs à vie longue sous contrainte de capacité* [5]. Le modèle de l'article montre que les caractéristiques thermiques des déchets et la forme des différents coûts d'enfouissement, et d'entreposage conditionnent une séquence

2. Dans le rapport de 2019 de la Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs, cf [5]

3. cf. [3] , page 11

4. cf. [3]

5. cf. [7]

particulière pour la gestion des déchets. En effet, comme cela a déjà été évoqué plus haut, au long terme, c'est le stockage perpétuel qui est privilégié. Cependant, au cours terme, le modèle de l'article montre, en prenant en compte la thermique des déchets, qu'un arbitrage peut être fait entre ces deux stratégies : on se retrouve à avoir pour tout déchet, avant le stockage perpétuel, une séquence d'une certaine durée d'entreposage, pour permettre aux déchets de refroidir. A la suite de cette séquence de refroidissement en surface, le déchet est stocké définitivement. Tout le développement de l'article étudie la durée optimale d'entreposage avant le stockage selon différentes contraintes.

L'article laissait de côté un point important, qui revient constamment quand on parle de nucléaire - et qui forme le point de départ de ce mémoire - : le risque, et l'incertitude quant à l'avenir. En effet, comme on peut le lire dans le rapport de 2018 de l'assemblée nationale sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires ([1]), « aucune autre activité humaine ne génère un risque d'une telle ampleur » [6]. Au-delà de cette affirmation "choc", ce rapport soulève le fait que les récents incidents nucléaires et en particulier l'accident de Fukushima ont montré que dans le domaine du nucléaire, la confiance n'est jamais suffisante et qu'il est nécessaire de « ne plus se contenter de concevoir l'envisageable, mais de concevoir l'impossible , de ne pas se préparer au probable mais au pire. » [7]. La vocation de ce mémoire est de s'insérer, à un son humble échelle, dans cette approche, en essayant d'intégrer, et de modéliser cet aléa, ce risque dans le modèle de l'article, qui l'éludait complètement.

En effet, le modèle de base de l'article est purement déterministe. L'idée est alors « d'augmenter » le modèle en travaillant à la marge de celui-ci, pour y ajouter de l'incertitude, en faisant varier des conditions qui étaient déterminées à l'origine. Forcement, en complexifiant le modèle, en y rajoutant des hypothèses, on arrive à des solutions plus complexes, qui ne sont pas toujours utilisables telles-quelles. Cette approche a plutôt pour intérêt d'apporter des éclairages sur le modèle de base, et d'affiner les intuitions que l'on peut avoir sur la stratégie à adopter dans la gestion des déchets nucléaires.

Dans un premier temps nous présenterons le modèle déterministe de base, puis nous analyserons successivement deux cas particuliers de situations d'incertitude, sur la forme du coût de stockage, puis sur la forme du coût d'entreposage.

6. [1], Première Partie - I
7. [1], Première Partie - I.A.1-2

Chapitre 2

Le modèle de base

Dans cette section, nous allons présenter le modèle de stratégie d'enfouissement de déchets nucléaires à vie longue (VL) de haute ou moyenne activité (soit respectivement les HA-VL et MA-VL [1]), mis en place par Bertrand Villeneuve dans son article [7]. Le modèle est posé dans le but d'optimiser les coûts de gestion des déchets en fonction de l'arbitrage temporel fait entre entreposage temporaire et stockage définitif.

2.1 Unités, Taux et Paramètres

On se place en temps continu, où l'unité de temps est l'année. L'une des hypothèses simplificatrice importante est que les déchets nucléaires sont envisagés comme un stock, fixe dans le temps, que l'on va gérer de manière uniforme : on ne différencie pas les colis, il n'y a pas de flux entrant de déchets.

Le stock de déchets suit la séquence suivante : tout d'abord il subit un entreposage pour une certaine durée, durée qui est une variable de décision du modèle. Ensuite le déchet est mis en stockage géologique profond, de manière définitive. Il est important de noter la différence entre l'entreposage (temporaire, en surface) et le stockage (solution de long terme, et définitif).

2.1.1 Les variables de coût

Les coûts de l'entreposage sont les suivants, exprimés en m^3 par an :

— Coût de mise en place : c_E^0, en [€$\cdot m^{-3}$]
— Coût de maintien en entrepôt par unité de temps : c_E, en [€$\cdot m^{-3}$]

On peut donc poser une formule modélisant le Coût Total Actualisé $E(T)$ de maintient dans l'entrepot entre la date 0 et T :

1. cf. ref. [3], section I.II.B pour des détails sur la classification des déchets

Proposition 1 (Coût total actualisé du maintient en entrepôt).

$$E(T) = c_E^0 + \int_0^T c_E^{-rt}\, \mathrm{d}t$$

On peut remarquer la présence d'un facteur d'actualisation, pour t unités de temps : le facteur e^{-rt}, dans lequel r est le taux d'actualisation, c'est à dire la décote pour une période infinitésimale dt est rdt par unité monétaire.

Pour ce qui est du stockage, les coûts sont exprimés en m^3.
On a :

— le coût par unité de volume du stockage : c_s, , en [€$\cdot m^{-3}$]

C'est le seul coût qui modélise le stockage, il est représenté constant (il ne dépend pas de r notamment) pour faciliter la modélisation.

2.1.2 Le refroidissement

L'une des hypothèses innovante du modèle est la suivante : elle prends en compte les caractéristiques physiques des déchets HA-VL et MA-VL . Il permet d'affiner de manière réaliste le paramètre du coût de stockage.
L'hypothèse faite est que, avec le temps, un volume de déchet stocké nécessite moins d'espace de stockage. C'est un phénomène progressif et limité. On pose pour le modéliser, un facteur de réduction du volume :

$$\rho(T) = 1 - a(1 - e^{-\alpha T})$$

Le paramètre α modélise la vitesse de refroidissement, dans le sens où plus le colis est froid, moins on a besoin de volume dans le centre de stockage pour le stocker. Le paramètre a modèlise les limitations de la réduction en besoin de volume apportée par le refroidissement : On peut voir que $\rho(0) = 1$ et $\rho(+\infty) = 1 - a$ Donc, si $a < 1$, le bénéfice à attendre de l'entreposage est limité.

Tout ceci permet d'affiner le coût de stockage. On obtient en effet le coût de stockage d'une unité de déchet refroidie pendant une durée T, exprimée en euros à la date T : $c_S \cdot \rho(T)$

2.2 Modélisation de la stratégie optimale déterministe et non contrainte de stockage

C'est la situation de base du modèle : on peut entreposer et stocker aussi longtemps que l'on souhaite, le stockage et l'entreposage sont disponibles à tout moment.

2.2.1 La fonction de coût

On modélise alors une stratégie : la mise en entrepôt pendant T unités de temps, suivit d'un stockage perpétuel. On introduit la fonction de coût de cette stratégie, qui dépend de la durée T d'entreposage.

Proposition 2 (Fonction de Coût)**.**

$$C(T) := E(T) + c_S \cdot \rho(T) \cdot e^{-rT}$$

Noter qu'on a introduit un facteur d'actualisation du coût de stockage.

Pour bien comprendre de quoi on parle, on peut illustrer cette stratégie graphiquement, avec des valeurs crédibles pour les différents paramètres du modèle. Ces valeurs sont issues de l'article [2].

$$r = 5\% \, a = 95\% \, \alpha = 10\% \, c_s = 1, c_E = 5\%$$

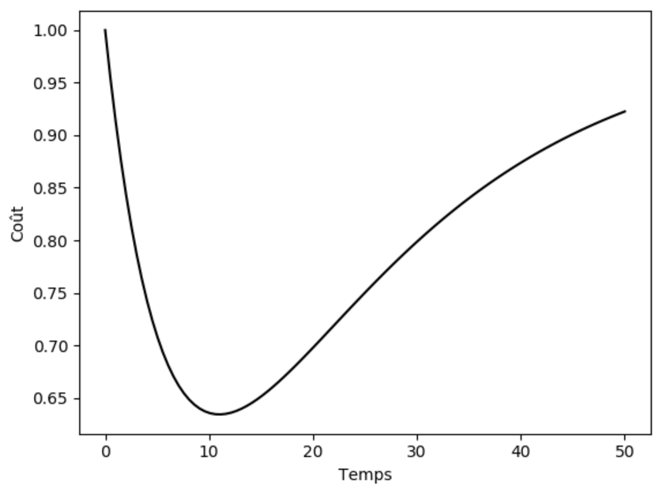

FIGURE 2.1 – Coût en fonction du temps d'entreposage en années.

La forme de cette fonction de coût illustre bien l'intérêt des hypothèses du modèle.En effet, si entrepose trop tôt : les colis sont trop chauds, et ont besoin de plus d'espace de stockage, donc coûtent plus cher à stocker. Attendre est dans un premier temps intéressant pour optimiser les coûts. Cependant, l'entreposage est cher au long terme : il génère un coût d' entretient, de sécurité des installations d'entreposage, que l'on paye pour chaque unité de temps où le colis est entreposé. Le stockage est une solution de long terme, qui ne demande qu'un coût de mise en place. Ainsi, garder des déchets en entreposage au long terme est moins intéressant que les stocker. Cela explique la forme quasi-convexe de la fonction de coût. La forme de la fonction est crédible : l'entreposage n'est en effet pas une solution intéressante au long terme, ce qui explique pour le stockage est la solution envisagé pour le long terme par les pouvoirs publiques.

2. cf. [7], page 5.

2.2.2 Durée optimale d'entreposage

On résout le programme en remarquant que la fonction de coût est quasi-convexe ($C(T)$ est croissant puis décroissant), on a donc une durée optimale d'entreposage unique. On cherche la durée optimale T^* d'entreposage en résolvant la condition du premier ordre.

$$C'(T) = e^{-rT}c_E - rc_s e^{-rT}(1-a) - a(r+\alpha)c_s^{-(r+\alpha)T} = 0$$

En multipliant par e^{-rT} et en inversant, on obtient :

Proposition 3 (Temps optimal déterministe et sans contraintes d'entreposage).

$$T^* = \frac{1}{\alpha}\ln\left(\frac{a(r+\alpha)c_s}{c_E - rc_s(1-a)}\right)$$

On pourrait étudier mathématiquement comment les différents paramètres de ce temps optimal influent sur celui ci, mais ce n'est pas le sujet ici, et ces paramètres sont étudiés dans l'article qui présente ce modèle ([7] , page 6).

2.3 La modélisation de l'incertitude

On va utiliser une méthode pour insérer de l'incertitude sur certaines variables, avec des "noeuds de chances" : à une certaine date T du futur, la date étant donnée, un évènement peut survenir avec une probabilité p (ou bien ne pas survenir avec une probabilité $1-p$). Dans le cas ou l'évènement se produit, cela change la valeur d'un des paramètres du modèle. Par la suite, on recherche le temps optimal de stockage, en présence d'incertitude de plusieurs manières différentes, et on observe quels pourraient être le meilleur choix du décideur publique en amont de ce risque, ou face aux conséquences de l'évènement si celui-ci se produit effectivement. On va poser plusieurs hypothèses, pour voir comment influe le risque sur différents paramètres du modèle (les coûts d'entreposage ou de stockage) sur les décisions optimale du décideur public. L'idée est donc de "probabiliser" le modèle de base, pour l'étudier hors d'un cadre purement déterministe.

Chapitre 3

Hypothèse d'un saut de coût : un gain de technologie

3.1 Intérêts de la démarche.

Le rapport de la Cour des Comptes met en avant les grandes incertitudes quant aux estimations des coût du projet CIGEO : c'est un projet inédit, sur le temps long, sensible au progrès technique et scientifique, et aux évolutions de la politique énergétique, ce qui le rend très complexe à chiffrer, au vu des multiples scénarios possibles. Dans les conclusions de la partie sur l'estimation du coût du stockage [1], le rapport met en avant l'importance de fournir des études complémentaires sur, d'un côté, le risque (l'aléa négatif) lié aux déchets radioactifs, mais aussi d'un autre côté sur ce qui est appelé les "opportunités" futures : une opportunité est définie comme « toute occasion favorable qui peut aboutir à l'amélioration des résultats ou des performances du système » ; c'est à dire, de l'aléa positif. Incorporer et étudier, au sein du modèle, les conséquences d'un tel aléa positif de manière théorique a donc un intérêt, et peut permettre au décideur publique d'affiner ses intuitions quant aux coûts du projet, et à l'arbitrage temporel à faire entre entreposage et stockage.

Ainsi, dans un premier temps, nous allons étudier la possibilité d'un saut de coût, sur la valeur c_s "coût par unité de volume du stockage". Ainsi, l'hypothèse de cette partie est que, dans le futur, on a une probabilité de baisse de coût du volume de stockage, qui peut être due à une évolution dans les technologies liées au stockage des déchets, un progrès dans les méthodes de mise en confinement des déchets, etc...

L'idée est de probabiliser le modèle de l'article et d'étudier dans quelle mesure l'incertain de l'avenir, et en particulier ici, la possibilité d'une réduction des coûts dans le futur, le fait changer, et influe les décisions au présent. Comme expliqué en 2.3 , on suppose qu'à un certain moment dans le futur, à une date T_D arrive une divergence : avec une certaine probabilité p connue,la valeur du coût par unité de volume du stockage passe de c_s à c_{s-}, tel que $c_s > c_{s-}$, et avec la probabilité $1 - p$, elle reste la même. Ainsi, dans le futur, on a une probabilité de baisse de coût. T_D est connu dans ce modèle, hypothèse peu réaliste mais pratique.

1. cf [3], page 78

3.2 Modélisation du saut de coûts.

3.2.1 Les cas déterministes

Généralités :

On peut tout d'abord observer la forme des fonction des coûts selon la valeur de c_s. Les deux fonctions de coûts pour deux valeurs du coût de stockage sont :

$$C_1(T) = E(T) + c_s\rho(T)e^{-rT} \; et \;\; C_2(T) = E(T) + c_{s-}\rho(T)e^{-rT}$$

On illustre cela avec une application crédible, toujours avec les mêmes valeurs que dans le Chapitre 2 :

$$r = 5\%, a = 95\%, \;\alpha = 10\%, \;c_s = 1, \;c_{s-} = 0,75, \;c_E = 5\%$$

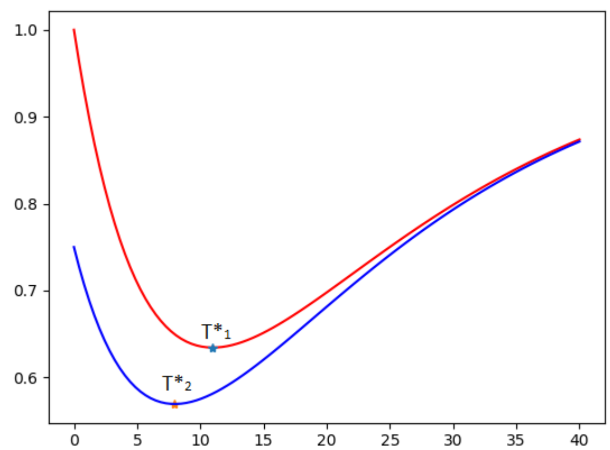

FIGURE 3.1 – Les deux courbes associées aux deux valeurs c_s (en rouge) et c_{s-} (en bleu). Ici, $c_{s-} = 0,75$. On voit l'existence de deux minimums, un associée à c_s, T_1^* et un associée à c_{s-}, T_2^*. Ces minimums sont définis par la Proposition 3 en 2.2.2

On peut remarquer dans un premier temps que quelque soit la valeur de $c_{s-} < c_s$, par la forme de la fonction de coût, on a toujours $T_2^* < T_1^*$ et $min\ C2(T) < min\ C_1(T)$: quelle que soit la baisse de coût du stockage,on aura un temps optimal de mise en stockage intervenant plus tôt et on aura un coût total de l'exploitation des déchets plus faible. Voir aussi Figure 3.1

Le cas $p = 0$: c'est le cas de base, la variable c_s est une constante : on a la certitude que le coût c_s ne changera pas. On a la fonction de coût :

$$C_1(T) = E(T) + c_s\rho(T)e^{-rT}$$

On connaît dans ce cas l'existence d'un T optimal, appelé T_1^* (de la même manière que dans la partie 2.2.2)

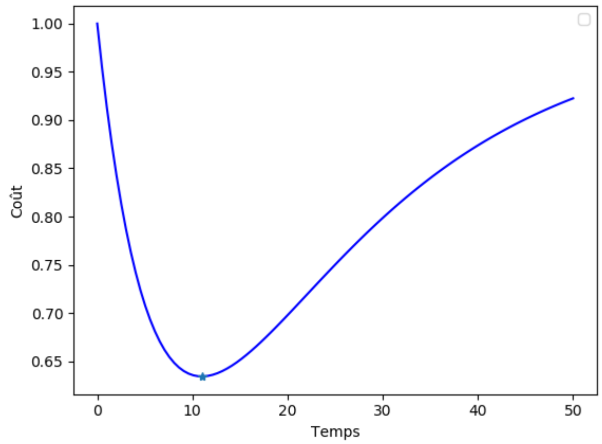

FIGURE 3.2 – Un exemple pour le cas $p = 0$, on voit T_1^* , l'étoile en bleu.

Le cas $p = 1$: c'est le second cas de base, on a la certitude que le changement de coût aura lieu. On a la fonction de coût :

$$C \colon \begin{cases} \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R} \\ T \longmapsto \begin{cases} E(T) + c_s \rho(T) e^{-rT} & \text{si } T \in [0, T_D] \\ E(T) + c_{s-} \rho(T) e^{-rT} & \text{si } T > T_D \end{cases} \end{cases}$$

La fonction de coût dans le cas $p = 1$ est discontinue, selon la valeur T_D, elle aura la forme visible sur la Figure 3.3, en fonction de la valeur de T_D.

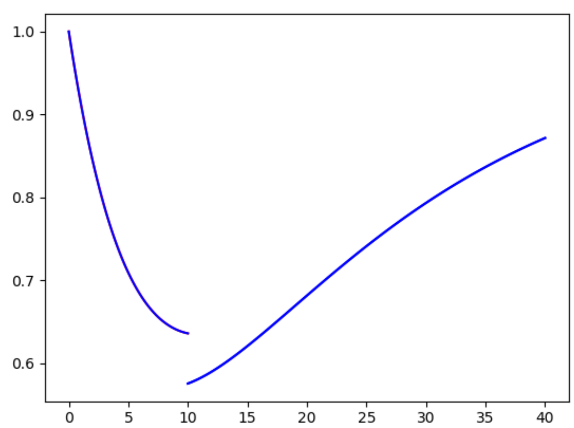

FIGURE 3.3 – Un exemple pour le cas $p = 1$, avec $T_D = 10$. Dans ce cas, il est clair qu'il faut investir dès que le changement de technologie a lieu. A noter que le fait que la date $T_D (= 10)$ et le minimum de la fonction de coût (pré-changement de technologie) soient très proches est une pure coïncidence de cette illustration, dû à la valeur de T_D utilisée pour l'illustration.

3.2.2 Dans l'incertitude

Le cas $p \in]0,1[$: c'est le cas intéressant. Comment réagir face à l'incertitude ? Avec une certaine probabilité, la fonction de coût va avoir une certaine forme, et avec une probabilité 1-p, une autre forme, comme visible sur la Figure 4.

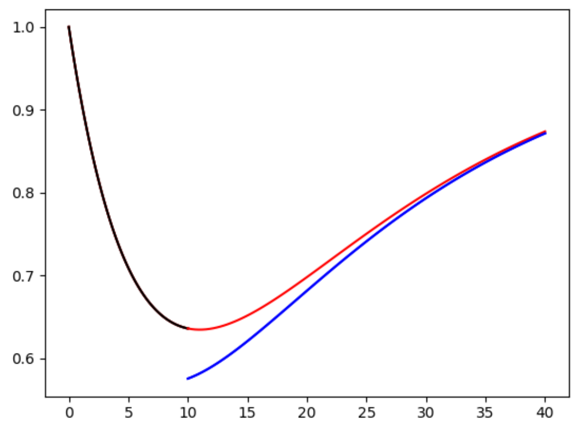

FIGURE 3.4 – pour $T_D = 10$ En rouge la courbe dans la cas où l'événement "pas de baisse du coût" se réalise et en bleu le cas où l'événement "baisse du coût" se réalise". A nouveau le fait que T_D soit proche du minimum de la fonction de coût initiale est une coïncidence.

C'est là où des hypothèses de modélisation du comportement du décideur entrent en jeu : On peut tout d'abord penser que le décideur va chercher à maximiser en fonction de l'espérance de la valeur du coût de stockage. La situation se rapproche en fait du cas $p = 1$: la fonction de coût est de la forme :

$$C_E : \begin{cases} \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R} \\ T \longmapsto \begin{cases} E(T) + c_s\rho(T)e^{-rT} & \text{pour } T \in [0, T_D] \\ E(T) + (pc_{s-} + (1-p)c_s) * \rho(T)e^{-rT} & \text{pour } T > T_D \end{cases} \end{cases}$$

On remarque que $(pc_{s-} + (1-p)c_s) \in [c_{s-}, c_s]$ et on peut remarquer aussi que la fonction

$$C_3 : T :\mapsto E(T) + (pc_{s-} + (1-p)c_s) * \rho(T)e^{-rT}, \forall T \in \mathbb{R}_+$$

possède un minimum dont on nomme l'argument T_3^*, et tel que $T_2^* < T_3^* < T_1^*$.

Dans le raisonnement suivant, le décideur cherche à maximiser en fonction de l'espérance de gain, c'est à dire de maximiser C_E que l'ont vient de définir : C'est un raisonnement "en amont", on ne sait pas quel événement va se réaliser et on cherche à limiter nos pertes. On cherche à maximiser sur une espérance. Ce raisonnement est en fait similaire au cas où $p = 1$: la fonction est discontinue, et la partie de la fonction en $T > T_D$ est définie avec comme valeur du coût de stockage, une moyenne (pondérée) de c_s et de c_{s-}. Ainsi, on raisonne sur une fonction discontinue, dans laquelle le second morceau représente, comme dans le cas $p = 1$, une baisse du coût de stockage, mais simplement, une baisse moins importante. Naïvement, on trouve plusieurs cas, selon la valeur de T_D :

Si $T_D < T_3^*$: Dans ce cas, le point optimal est clairement T_3^* (En effet le décideur maximise bien l'espérance ici)

Si $T_D \in [T_3^*, T_1^*]$:le point optimal est en T_D

Si $T_D > T_1^*$:le point optimal est en T_D, sauf si on dépasse un certain point, appelé T_F, qui correspond à $T_F = min\{\ T \mid C_3(T) > C_1(T_1^*)\ \}$, Comme on peut le voir Figure 3.5 : en fait, quand $T_D > T_F$, le point optimal est T_1^*, car le décideur connaît T_D

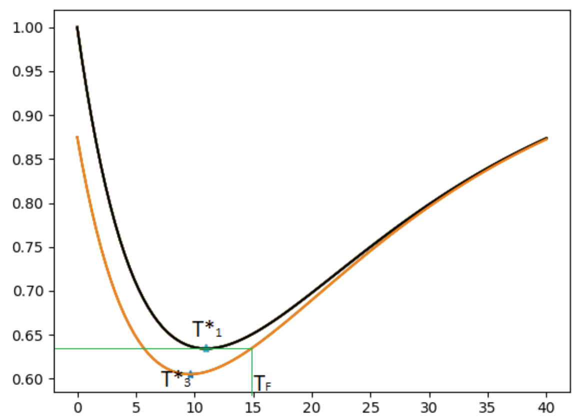

FIGURE 3.5 – On peut voir que dès que $T_D > T_F$, le point qui minimise la fonction de coût est toujours T_1^* quelque soit l'événement qui se réalise : Le changement de technologie intervient "trop tard" pour être intéressant. Dans ce cas, l'attente n'a pas d'intérêt, dès le minimum local atteint en T_1^*, il faut stocker.

On peut en fait voir que le raisonnement précédent, en fonction de l'espérance de la fonction de coût est "mauvais", ou tout du moins pas optimal en pratique : si le décideur attend systématiquement que l'événement se réalise pour prendre sa décision, il fera dans la plupart des cas un meilleur choix qu'en raisonnant en terme d'espérance. C'est ce que l'on peut voir par la suite.

On raisonne de manière contingente : l'objet de l'optimisation est alors un temps optimal T^* si on a une baisse de coût et un temps optimal sans baisse de coût. A nouveau, cela dépend de la date T_D. Selon cette date, le raisonnement du décideur revient à mettre en place un plan, en amont, qui détermine ce qu'il faut faire en fonction de l'évènement qui se réalise. Ici, le décideur attend la révélation de l'évènement pour prendre une décision, on ne s'intéresse plus à l'espérance

Graphiquement on peut alors voir :

Si $T_D < T_2^*$: L'événement est assez tôt pour que le décideur sache quel événement se réalise avant que l'optimal de chaque événement ne soit atteint, donc si l'événement "Baisse de c_s" (passage de c_s à c_{s-}) se réalise, alors l'optimal est T_2^*, et si le coût ne change pas, l'optimal est T_1^*. Dans ce cas, l'incertain n'empêche pas de prendre une décision optimale

Si $T_D \in [T_2^*, T_1^*]$: Dans ce cas, le point optimal est clairement T_D si l'événement "Baisse de c_s" se réalise et dans le cas contraire, c'est T_1^* qui est optimal.

On peut à nouveau définir dans ce cas un point T_{F_2}, diffèrent du T_F précèdent, mais défini selon le même principe : $T_F = min\{\ T \mid C_2(T) > C_1(T_1^*)\ \}$.

Si $T_D \in [T_1^*, T_{F_2}]$,le point optimal est en T_D

Si $T_D > T_{F_2}$, le point optimal est T_1^*. A nouveau, ce point T_{F_2} modélise juste le moment à partir duquel le changement de technologie intervient trop tard pour être intéressant : il est donc optimal de stocker dès T_1^*.

3.3 Analyse du Modèle :

De ces expérimentations, on peut retenir que pour la variable c_s, l'ajout d'un noeud de chance fait varier le comportement du décideur :

Avec le raisonnement contingent,

On peut voir facilement que cela peut, selon l'événement qui se réalise, lui permettre de faire un choix qui, au moins bien, limite les pertes et au mieux, est réellement optimal : Dans tout les cas où $T_D < T_1^*$, on a vu avec ce second raisonnement, que quoi qu'il advienne, le décideur a toujours intérêt à attendre que l'un des deux événement se réalise avant de prendre une décision optimale. Dans le cas contraire, $T_D > T_1^*$, et même avec une révélation négative sur l'évènement, on a pu mettre en place un "plan de contingence", qui guide le décideur à prendre une bonne décision. Avec les hypothèses du modèle, en raisonnant de manière contingente, les conséquences négatives de l'incertitude sont donc contrôlées.

On a aussi pu voir que la méthode qui est à priori intuitive lorsque l'on raisonne dans l'incertain, c'est à dire réfléchir en espérance, est biaisée. Dans ce cadre, il apparaît que l'on ne prend pas en compte une dynamique d'apprentissage (la révélation de l'évènement) qui est pourtant utile dans ce cas précis. Ainsi, une analyse fine montre que le seul cas où le raisonnement en espérance fait prendre une meilleure décision par rapport à attendre la réalisation de l'évènement, est le cas où $T_D \in [T_1^*, T_{F_2}]$, seulement si l'évènement "pas de changement de c_s" se réalise, ce qui est un cas très limité.

En fait, dans une dynamique d'optimisation, le raisonnement en espérance apporte des éléments qui peuvent fausser l'interprétation. En effet en optimisant sur une espérance, on optimise sur une situation qui est en fait "virtuelle", qui n'arrivera jamais, une situation de coût intermédiaire entre le meilleur cas et le pire cas, mais qui n'aura jamais lieu effectivement. Ainsi, le temps "optimal" T_3^* n'est en rien optimal quelque soit l'évènement qui se réalise. Raisonner en fonction de ce temps "optimal" apparaît alors assez absurde. C'est en particulier visible si T_D intervient avant T_3^* (l'argmin de la fonction en espérance) : l'évènement déjà été révélé, on a une information en plus : on sait définitivement sur quelle branche on se trouve, et on peut alors raisonner de manière contingente.

Plus largement, on peut aussi voir que le fait que T_D, soit un paramètre déterminé fait que raisonner en amont sur une espérance de gain n'aide pas à prendre une décision : comme on connaît précisément T_D, il est facile de modéliser tout les cas de figure et de se préparer, en amont, à la réalisation ou non de l'évènement.

Une des améliorations possibles de ce modèle, ou une manière de l'utiliser en pratique serait d'avoir une date T_D non pas déterminée, mais inconnue. Si la valeur T_D est incertaine, alors la décision à prendre dès que que l'ont a dépassé le temps T_1^* alors que T_D n'a pas encore eu lieu est alors incertaine : le plus sécuritaire serait alors stocker à T_1^*, mais cela pourrait faire passer à côté d'un gain financier si T_D a lieu avant T_{F_2}. Dans ce cadre, un calcul d'optimisation en terme d'espérance pourrait aider à limiter cette potentielle perte financière.

3.4 Conclusion :

Ce travail nous a apporté des éclairages méthodologiques :

Il a montré les difficultés liés au fait de raisonner en espérance, les biais engendrés, et nous a montré qu'insérer de l'incertitude dans le modèle ne donne pas de résultats très nets, mais plutôt des éléments d'éclairages sur l'attitude à adopter face à l'incertain.

Il nous pousse aussi à s'interroger sur la manière de modéliser correctement la décision d'optimisation du décideur, en particulier à se demander si l'outil "espérance" est réellement une bonne représentation du comportement du décideur dans un environnement risqué.

Dans le cadre du raisonnement contingent, les hypothèses posées permettent de modéliser précisément les attitudes à adopter face à un potentiel gain de coût. Cependant, on peut penser que, avec les hypothèses posées, le gain potentiel apportée par l'opportunité que représente un changement de coût de stockage restera limité (le gain ne pourra pas être extrêmement grand). Ainsi, modéliser cette opportunité est intéressant, en particulier pour s'assurer du bon financement du projet dans le meilleur et dans le pire cas, mais cela ne représente pas quelque chose de fondamental pour le plan d'enfouissement.

On peut arguer que, dans le cadre d'un projet risqué comme un projet d'entreposage et de stockage de déchets dangereux, le simple risque de perte financière (limitée) n'est pas la principale préoccupation du décideur : il y a risque à attendre pour stocker, lié à la sécurité de l'entreposage, un risque faible, mais dont les coûts et conséquences négatives pourraient être extrêmement élevés . On peut d'emblée supposer que en pratique, le décideur aura tendance à favoriser une solution "de sécurité" (c'est à dire stocker le plus tôt possible) plutôt que prendre le risque d'entreposer plus longtemps dans l'espoir de faire un gain financier dans l'hypothèse d'un changement de technologie.

Il serait donc plus intéressant de modéliser ce risque lié à l'entreposage, en limitant la durée de celui, ou en ajoutant un possibilité d'accident dans l'entreposage, quelque chose d'assez risqué et réaliste qui pousse le décideur à modifier son comportement, ce que nous allons observer par la suite.

Chapitre 4

Un Problème d'entreposage

4.1 Intérêt de la démarche

Nous allons aborder maintenant le fait d'insérer de l'incertitude avec les coûts et les modalités de l'entreposage. L'idée derrière cela est de regarder comment un le risque d'un accident grave possible ("probable" ?) à l'entreposage pourrait impacter les décisions du décideur public.

En effet, le rapport de la Cour des Comptes évoque le risque inhérent à l'entreposage, en insistant sur son augmentation avec le temps. Il note ainsi une forme de "dégradation des conditions d'entreposage" [1] des déchets radioactifs, qui s'accompagne avec une hausse du risque à la fois sécuritaire et de sûreté. La lecture du Rapport de la commission d'enquête de l'Assemblée Nationale sur la sûreté des installations nucléaires -[1]- apporte des précisions sur les faiblesses de l'entreposage. Elles sont multiples. Dans un premier temps, l'entreposage, en France, se fait principalement en piscines, qui servent notamment au refroidissement du combustible. On peut lire dans le rapport [1], page 127 : "Les piscines d'entreposage avaient été décrites par certains observateurs comme vulnérables et la vérification de leur protection constituait l'une des motivations de la création de cette commission d'enquête. En effet, les conséquences environnementales et sanitaires du dénoyage d'une piscine de refroidissement du combustible usé seraient extrêmement graves. Une telle situation pourrait conduire à un incendie auto-entretenu de zirconium et à la fusion du combustible se trouvant dans le bassin.", avec pour conséquence "le relâchement dans l'environnement d'une grande quantité d'isotopes radioactifs contenus dans le combustible". Les risques que présentent ces piscines sont donc important, ils peuvent avoir des conséquences catastrophiques, et ont, de plus, des sources multiples :

Ces piscines présentent un risque en terme de sécurité : le rapport évoque notamment "l'éventualité d'une perte d'étanchéité d'une gaine de combustible usé", de nature accidentelle. Dans une telle hypothèse, la difficulté à détecter et à localiser précisément la barre de combustible concernée au milieu de la grande quantité de déchets contenus dans la piscine présente un vrai risque. Il en est de même pour "une fissure qui affecterait l'étanchéité du

1. cf [3], page 78

bassin" [2]. Un autre risque est lié au fait que l'entreposage en piscine est "actif", dans le sens où l'eau des piscines doit être constamment refroidie. L'interruption accidentelle de ce refroidissement peut alors être catastrophique.

Ces piscines présentent aussi un risque en terme de sûreté,(c'est à dire d'actes malveillant contre celles-ci) qui est particulièrement mis en avant dans le rapport. Il évoque plusieurs possibilités d'actes malveillant ciblant ces piscines, en particulier des attaques à l'explosif, et la très grande vulnérabilité des sites français face à des possibles attaques aériennes [3]. Les conséquences de ce type d'actes malveillant, comme le dénoyage des piscines, seraient alors de nature catastrophique.
Naturellement, il est clair que le stockage géologique profond, bien que comportant d'autres risques, permet de s'épargner tout les risques précédemment évoqués pour l'entreposage, ce qui est une des raisons pour laquelle cette solution est largement privilégiée à long terme.

A la lumière de toutes ces informations, et tant l'entreposage semble représenter un point faible en terme de sécurité et de sûreté dans le cycle de retraitement du combustible, il semble donc pertinent et réaliste de modéliser un risque sur l'entreposage en particulier une possibilité d'incident et de voir de quelles manières ce risque peut influencer la décision publique sur la durée de cet entreposage.

4.2 Le modèle dans l'incertitude

On reste sur un cas de figure similaire au précédent : On a a nouveau la fonction de coût

$$C(T) = E(T) + c_s\rho(T)e^{-rT}$$

dans laquelle le coût d'entreposage jusqu'au temps T est

$$E(T) = c_E^0 + \int_0^T c_E e^{-rt}\,\mathrm{d}t$$

tel que c_E est une constante, de même de que c_E^0
A nouveau, on va procéder en mettant en place un noeud de chance : à un date T_D déterminée du futur, un incident va se produire avec une probabilité $p \in]0,1[$ (le coût d'entreposage devient alors c_{E1}) : on modélise le fait qu'un accident d'entreposage implique de remettre en question la doctrine d'entreposage, avec des coûts très élevés liés à ces changements de doctrine, d'installations, etc.., et de payer les coûts liés à l'accident. C'est une hypothèse assez simplificatrice, pas nécessairement très réaliste si on regarde en détails, mais pratique pour la modélisation. On peut aussi penser cela comme une augmentation si forte des coûts à l'entreposage que le stockage immédiat devient le plus logique, ce qui va en effet apparaître dans le modèle.

2. cf [1], page 127
3. cf [1], Deuxième partie - III - A et B

Donc très simplement, après l'incident, le coût d'entreposage par unité de volume de stockage devient très grand.

Avec une probabilité $1 - p$, le coût ne change pas.

On nomme donc la variable associée au cas de changement de coût de l'entreposage c_{E1}, tandis que c_E est le coût constant associé à l'entreposage dans un cadre normal, hors accident. Les hypothèses données plus haut justifient de poser $c_{E1} > c_E$.

On va tout d'abord raisonner en Espérance, toujours en suivant l'intuition la plus naturelle dans l'incertain.

Dans cette situation, on modélise nos coûts par une nouvelle fonction $E_i(T)$ qui dépend de l'espérance de la variable aléatoire associée au coût d'entreposage. On a donc finalement

$$E_i(T) = c_E^0 + \int_0^{T_D} c_E e^{-rt}\,\mathrm{d}t + p * \int_{T_D}^{T} c_{E1} e^{-rt}\,\mathrm{d}t + (1-p) * \int_{T_D}^{T} c_E e^{-rt}\,\mathrm{d}t$$

pour $\forall T > T_D$.

On va alors optimiser la nouvelle fonction de coût liée à cette incertitude :

$$C_i(T) = E_i(T) + c_s \rho(T) e^{-rT}$$

On peut résoudre la condition du 1er ordre pour obtenir le temps optimal d'entreposage :

Finalement, on a

$$T_i^* = \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{a(r+\alpha)c_s}{((1-p)c_E + pc_{E1}) - rc_s(1-a)}\right)$$

C'est le temps optimal d'entreposage sous incertitude, en raisonnant en espérance.

Évidemment, pour obtenir des conclusions de ces formules, une étude numérique semble nécessaire, pour mesurer à quel point l'ajout de l'incertitude influe sur le comportement du décideur.

Pour revenir à des considérations plus théoriques, on peut simplement conclure que si l'ont suit ce raisonnement, l'impact d'un accident sur T_i^* dépendra tout simplement des valeurs relatives de p et de la hausse de coût en cas d'accident : on voit donc que si la probabilité est vraiment très faible et l'estimation du coût de l'accident et du changement d'installation d'entreposage n'est pas très élevée, l'impact pourra être négligeable.

On peut aussi comparer cela avec une situation où on attendrait la date de révélation pour prendre une décision et optimiser à partir de là, et comparer les intérêts des deux approches du point de vue du décideur, à l'image de ce qui a été fait en Chapitre 3 : comparer une approche en espérance et une approche contingente.

On aura donc plusieurs approches, avec plusieurs optimaux associés à ces différentes approches ; la première étant une approche très prévoyante : on n'attend pas la révélation pour optimiser : on anticipe avec les informations dont on dispose. La seconde étant plus flexible, plus réactive : on attend la révélation pour prendre la décision.

On peut remarquer que si on obtient un $T_i^* > T_D$, alors le temps optimal de stockage prévu en amont de la révélation aura lieu après la révélation : cela signifie que on pourrait être plus flexible et réactif en attendant simplement la date de révélation T_D, et en prenant une décision après coup. Bien qu'on soit dans un cas d'accident, où il parait imprudent d'attendre la révélation pour prendre un décision, analyser cette possibilité reste pertinent.

Ainsi, on peut raisonner de manière contingente.

Nous allons regarder ce dernier point : selon la date T_D, et selon quel évènement se réalise, quel est le choix optimal à réaliser :

La forme de la fonction de coût est toujours quasi-convexe (croissant puis décroissant), il existe donc toujours un minimum. On va définir plusieurs points pour faciliter l'analyse :

T^*, le temps optimal associé à la courbe de coût dépendant de c_E

T_1^*, le temps optimal associé à la courbe de coût dépendant de c_{E1}

et bien sûr, T_1^*, définit précédemment, le temps optimal du raisonnement en espérance.

On peut vérifier très facilement que $T^* > T_i^* > T_1^*$

On peut le voir sur cet exemple :

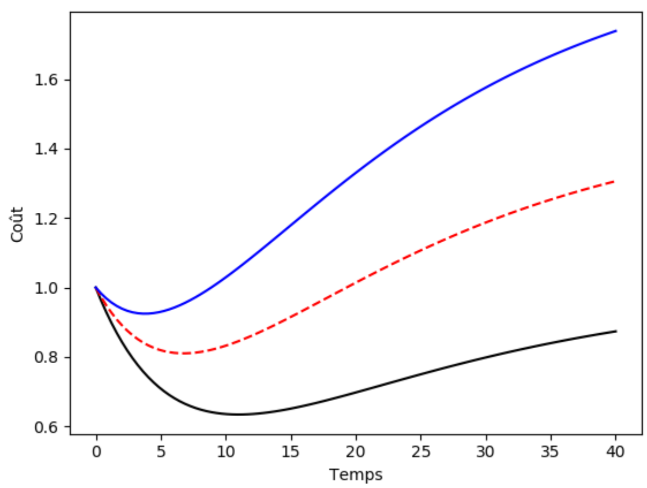

FIGURE 4.1 – Avec des valeurs arbitraires pour illustrer : on a ici $c_{E1} = 2 * c_E$ et $p = 1/2$ on peut voir en rouge et en pointillés la courbe d'espérance de coût associée à ces valeurs, et en noir la courbe de coût réel associé au coût c_E et en bleu la courbe de coût associée à c_{E1}.On voit bien les trois temps optimaux, arguments des minimum de ces courbes : $T_1^* < T_i^* < T^*$

Les différentes stratégies vont dépendre de la date T_D relativement aux temps optimaux cités plus hauts :

Si $T_D > T^*$: on a clairement, quelque soit la réalisation de l'événement, T^* comme temps optimal : l'accident arrive après le temps optimal de fin d'entreposage, donc les déchets sont déjà stockés et cet accident n'a aucun impact.

Si $T_D \in [T_i^*; T^*]$: La situation est plus fine et dépend évidemment de la réalisation de l'événement : Si l'accident n'a pas lieu, alors la meilleure décision est alors d'attendre T^* pour enfouir.

Si l'accident à lieu, rétrospectivement, le meilleur temps d'enfouissement aurait été juste avant l'accident. Une fois que l'accident s'est produit, la forme des fonctions de coût implique que la meilleure décision à prendre est alors d'enfouir dès que l'accident se produit. Plus encore, une meilleure décision, et une décision plus prudente que d'attendre l'accident aurait alors été d'enfouir n'importe quand entre le moment où la courbe de coût est inférieur au coût juste après l'accident : l'exemple suivant illustre cela :

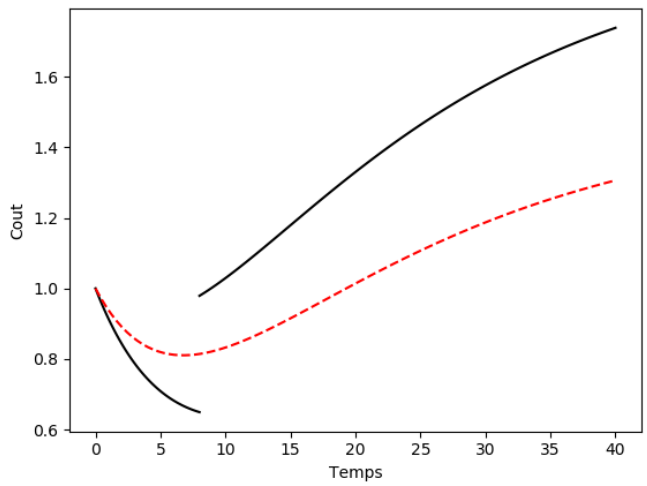

FIGURE 4.2 – Dans le cas où l'accident se produit effectivement, avec des valeurs arbitraires pour illustrer : on a ici $c_{E1} = 2 * c_E$ et $p = 1/2$ on peut voir en rouge et en pointillés la courbe d'espérance de coût associée à ces valeurs, et en noir la courbe, discontinue en T_D, de coût réel dans le cas où l'accident intervient. On a bien ici : $T_D \in [T_i^*; T^*]$. On peut y voir que, dans ce cas précis, une meilleure décision que d'attendre l'occurrence de l'accident est d'enfouir dans l'intervalle $]min\left\{ T \; |C(T) < C(T_D^+)\right\}; T_D[$. On peut noter ici que suivre le raisonnement en espérance est un meilleur choix dans ce cas, enfouir en T_i^* étant un meilleur choix que d'enfouir en T_D^+ .

Si $T_D \in [T_1^*; T_i^*]$: Si l'accident n'a pas lieu, évidemment, la meilleure décision est alors d'attendre T^* pour enfouir. Si l'accident a lieu, alors la forme des fonctions de coût implique à nouveau que la meilleure décision à prendre à ce moment là est d'enfouir dès que l'accident se produit, en T_D^+ . On peut voir facilement que à nouveau, rétrospectivement, il aurait mieux fallu enfouir n'importe quand dans l'intervalle $]min\left\{ T \; |C(T) < C(T_D^+)\right\}; T_D[$, et en particulier en T_D^-. La différence avec la situation précédente est que cette fois, le raisonnement en espérance n'est pas meilleur car il faut enfouir après que l'accident se produit : on a en effet $T_D < T_i^*$.

Si $T_D < T_1^*$ et que l'accident a lieu, la meilleure stratégie est alors d'attendre T_1^* pour enfouir. Encore une fois,il existe une meilleure stratégie, plus prévoyante, qui aurait été d'enfouir dans l'intervalle $]min\left\{ T \; |C(T) < C(T_1^*)\right\}; T_D[$, c'est à dire dès que la valeur du coup est inférieure à au coût optimal dans la situation où l'accident se produit. Dans cette dernière situation, on voit donc que à nouveau le raisonnement par espérance n'est pas optimal, et ce, quel que soit la réalisation de l'événement, on a encore $T_D < T_i^*$, donc si on attend T_i^*, l'occurrence de l'événement "accident ou non" aura déjà été révélée, il vaudra mieux prendre une décision en fonction de cette occurrence. Ce dernier cas est tout de même intéressant, car on est dans une situation, où, alors même que l'accident a eu lieu, il est plus intéressant d'attendre pour enfouir. Pour bien comprendre, on peut regarder cette illustration :

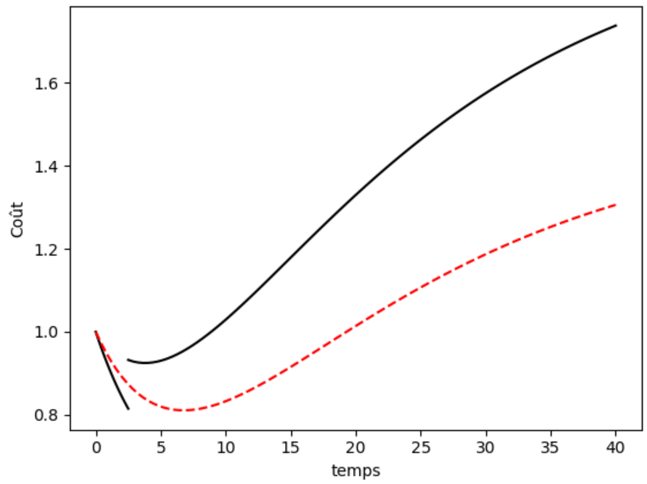

FIGURE 4.3 – Avec les mêmes paramètres que la Figure 4.2. On peut voir que, comme $T_D < T_1^*$, alors effectivement, si l'accident se produit, attendre permettra d'atteindre le minimum local en T_1^*, qui est un optimum dans la situation où l'accident s'est déjà produit.

4.3 Analyse du modèle

On voit donc qu'en fonction du placement de T_D, les décisions sont très différentes. A nouveau, le raisonnement par espérance semble inadapté à ce cas ou T_D est déterminé. Dans les cas où l'accident se produit ou non, l'analyse précédente, contingente, des solutions donne des éclairages quant-à l'attitude à adopter face à cet accident, si il se produit.

Cependant, pour bien analyser ce modèle, il faut prendre en compte un certain nombres de points. Dans le cadre d'un accident d'entreposage, on peut penser que, en pratique, du point de vue du décideur, il est souhaitable de ne pas attendre la révélation pour prendre une décision, et donc de ne par raisonner de manière contingente. Cela est notamment dû au fait que l'ont estime mal les dégâts dûs à un accident nucléaire tel que celui ci. Ils peuvent être variés et sur le très long terme. On peut alors penser que le décideur se doit d'être prudent quand il gère des déchets nucléaires. Dans ce cadre, dans ce modèle où T_D est déterminé à l'avance il est alors évident que enfouir juste avant T_D est toujours le choix le plus prudent : on sait qu'un accident risque d'arriver, on adopte un comportement très prudent dans ce cadre de gestion de déchets nucléaires, et donc on évite l'accident en stockant (on considère toujours que l'ensemble des déchets est un stock fixe, et que les déchets sont indifférenciés).La seule exception étant si T_D intervient après T^*, où alors il est clair que stocker en T^* est le meilleur choix : l'accident ne se produit alors pas.

Un problème du modèle est toujours le déterminisme de T_D, qui est peu crédible en réalité, et qui empêche de fournir une analyse vraiment pertinente sur l'attitude à adopter face au risque.

4.4 Développement

4.4.1 Une approche naïve

Pour se ramener à un cas plus crédible, on peut penser que T_D résulte d'une estimation probabiliste, et est situé dans un intervalle de confiance pouvant être estimé : on a alors pas une certitude sur la date T_D, simplement une présomption, c'est alors que le décideur se doit d'être prudent.

Alors, dans certains cas, faire confiance au raisonnement en espérance peut être utile, bien que pas toujours optimal, mais est au moins prudent. On a pu voir que c'est le cas si $T_D \in [T_i^*; T^*]$: si on s'attend à un accident dans ce laps de temps, une décision prudente semble être d'enfouir en T_i^*, car si on attend l'occurrence de l'accident et qu'il se produit effectivement, on fera face à ses conséquences, ce qui n'est pas souhaitable. Mais même dans ce cas, le raisonnement en espérance n'aide pas non plus beaucoup dans ce cas, il n'éclaire pas précisément sur l'attitude à adopter face à cette nouvelle incertitude, qui n'est pas modélisée de manière très formalisée.

4.4.2 Avec une loi de Poisson

Pour obtenir quelque chose de plus intéressant, on peut aussi partir dans une autre direction : au lieu de probabiliser l'accident comme précédemment, on peut simplement probabiliser la date T_D de manière fine. L'approche est donc différente que ce qu'on a pu regarder précédemment. Cette fois ci, on considère qu'en temps infini, la probabilité qu'un accident arrive est de 1. On ne mets plus de probabilité sur l'occurrence ou non de l'accident. A la place, on défini T_D comme une variable aléatoire suivant une loi de Poisson de paramètre λ. On pose donc $T_D \hookrightarrow P(\lambda)$.

L'utilisation d'une loi de poisson est naturelle, celle-ci étant particulièrement pertinente pour modéliser les évènements rares comme les accidents. L'interprétation que l'on en fait dans cette situation est alors que le décideur peut avoir de bonnes estimations empiriques pour modéliser une date potentielle d'accident, qui est l'espérance de cette loi de poisson, et donc aussi son paramètre. La logique dans ce raisonnement en espérance est alors d'enfouir peu avant lambda, l'espérance de cette loi. La chose que l'on peut alors modéliser, c'est l'espérance du coût total face à ce type d'incertitude :

$$\mathbb{E}[C(T_D)]$$

c'est à dire :

$$\mathbb{E}[E(T_D) + c_s\rho(T_D)e^{-rT_D}] = \mathbb{E}[c_E^0 + \frac{c_E}{r}(1 - e^{-rT_D}) + c_s(1 - a(1 - e^{-\alpha T_D})e^{-rT_D}]$$

Avec les définition des fonctions données dans le chapitre 1, ce qui se calcule simplement, en utilisant le fait que $\mathbb{E}[e^{-rT_D}] = e^{-\lambda(1+e^{-r})}$ et le fait que $\mathbb{E}[e^{-(r+\alpha)T_D}] = e^{-\lambda(1-e^{-(r+\alpha)})}$.

Finalement, on trouve :

$$\mathbb{E}[C(T_D)] = c_E^0 + \frac{c_E}{r}(1 - e^{-\lambda(1+e^{-r})}) + c_s(e^{-\lambda(1+e^{-r})}(1-a) + ae^{-\lambda(1-e^{-(r+\alpha)})})$$

Ce qui, par cet outil de modélisation différent, peut donner une indication au décideur public sur le coût qu'il peut espérer tirer de la séquence d'exploitation des déchets dans une situation de relative incertitude.

4.5 Conclusion

Face à une situation où le risque d'un accident peut être catastrophique, ce modèle demande à être regardé avec finesse, car il n'est pas exempt de failles.

Le raisonnement par espérance est rendu particulièrement faux à cause de l'extrême que peut atteindre un accident, en terme de probabilité et de conséquences. En effet, avec une probabilité extrêmement faible d'accident, et ce même si les conséquences en terme de coût sont très importants, on peut avoir une situation où la modélisation en espérance néglige complètement ce risque, bien plus que ce que le décideur public, dans sa position qui lui impose une immense prudence, n'est prêt à assumer.

De même, on a raisonné de manière contingente dans cette partie. Ce qui nous permet de mettre en place des éclairages quant à la hauteur du risque financier en cas d'accident à différentes dates, et de l'anticiper efficacement. Cependant ce type de raisonnement pouvait se justifier dans le chapitre 3, car on sait que le gain potentiel associé au saut de technologie était nécessairement assez limité. Le décideur peut donc se permettre de penser qu'il peut attendre la révélation pour prendre une décision. Or, dans le cadre d'un accident, ce type de raisonnement parait moins naturel : tout d'abord, bien qu'on ait modélisé un coût donné lié à l'accident, en réalité on peut penser que ce coût est difficilement estimable, pire encore, il pourrait être extrêmement élevé, au point où, pour des raisons évidentes, le décideur public n'aurait en aucun cas intérêt à attendre la réalisation de l'évènement pour prendre une décision : si la réalisation est négative, le bilan pour le décideur serait catastrophique.

On peut donc retenir que bien que même en utilisant des outils de modélisations divers et complexes, on subit toujours un biais important lié au caractère catastrophique et difficilement commensurable d'un accident, ainsi qu'un biais lié au caractère extrêmement peu probable de ce type d'évènement.

Pour ce qui est de la modélisation en loi de poisson, on peut retenir que cette autre manière assez simple de représenter une incertitude peut être intéressante pour évaluer le coût de l'exploitation des déchets dans un contexte de risque.

On peut néanmoins penser à une extension qui pourrait être intéressante et réaliste à ce modèle serait d'ajouter un risque au fait d'enfouir trop tôt : les colis sont trop chauds, ce qui peut être un facteur de risque au stockage. Cela peut justifier le fait que le décideur ne soit pas extrêmement prudent face au risque de garder longtemps les colis en entreposage (en les stockant très tôt par exemple), car il doit prendre en compte le risque associé au fait de stocker trop tôt des colis encore chauds. On pourrait alors avoir des solutions intermédiaires prenant en compte un risque d'accident si on stocke trop tôt et un risque si on stocke trop tard.

Chapitre 5

Conclusion

Ce travail a consisté à développer un modèle simple et purement déterministe de gestion de déchets radioactifs en ajoutant, à la marge, de l'incertitude. Cet ajout se justifie en particulier pour le risque d'un accident, qui est au coeur du débat sur la gestion du combustible nucléaire, ainsi que sur les prévisions de coûts d'un tel programme. On en a tiré un certain nombre de résultats, en particulier des éclaircissement sur l'attitude à avoir, pour le décideur public, face à un accident ou une opportunité positive, en fonction de sa date d'arrivée, et ce de manière contingente. On a aussi bon outil pour mesurer la perte totale engendrée par ces changements potentiels dans le futur, si ils interviennent. Les résultats sont assez sommaires, mais peuvent, éclairés par des données réalistes, être pratiques pour mesurer et anticiper les risques de pertes, ou de gain financiers liés aux situations d'incertain, et mieux les prendre en compte dans le chiffrage des coûts du projet CIGEO.

D'un autre côté, on a pu aussi observer que le raisonnement intuitif face à l'incertitude, raisonner en espérance, était systématiquement biaisé et qu'il donnait de mauvaises indications sur l'attitude à avoir face aux différents changements de coûts dans le futur. L'outil espérance apparaît inadapté pour modéliser le comportement du décideur face à ce type de situations, et tout particulièrement les situations de risques exceptionnels, avec des valeurs extrêmes de p et des coûts. L'une des choses que ce travail ne résout pas, c'est donner un éclairage clair, quantifié, une modélisation exacte de l'attitude à adopter en amont de l'accident, pour l'éviter et conserver une marge de sécurité face à cet accident : l'outil espérance ne fonctionne pas vraiment pour donner cette information. On comprends bien que face au risque d'accident, le décideur doit adopter une attitude prévoyante, mais on n'a pas modélisé correctement cette attitude, les simplification du modèle (en particulier le déterminisme de T_D) ne le permettant pas.

Ce que l'ont peut rajouter sur l'augmentation "à la marge" du modèle que l'on a fait dans ce travail, c'est que cette démarche permet corriger l'aspect purement déterministe du modèle de base, et d'avoir des intuitions quantitatives plus fines des différentes situations possibles. Cependant, ajouter du risque comme on l'a fait en probabilisant le modèle, c'est corriger un défaut du modèle simple de départ, mais en y ajoutant des hypothèses, en complexifiant l'analyse, et alors on obtient nécessairement des résultats moins simples et moins clairs. Le modèle que l'ont a développé n'est donc absolument pas meilleur que le modèle plus simple de base. Le travail que l'on a fait ne se veut donc pas nécessairement exact, ni précis, mais simplement vient en complément du modèle de l'article de base. Il est important de garder cela à l'esprit en utilisant les résultats de ce mémoire.

L'une des choses que l'on a largement laissé de côté dans cette modélisation est le biais lié à l'estimation des probabilités et l'estimation de coûts liés à un risque d'accident. C'est un sujet assez développé dans la littérature sur le risque lié au nucléaire. Sans estimation correcte de ces valeurs de probabilité et de coût, les intégrer dans une modélisation - comme on le fait dans ce mémoire - est assez vain. Or, de nombreux articles [1] développent l'idée que l'approche en probabilité pour traiter le risque nucléaire subit de nombreux biais, que ce soit dans le calcul ou dans la perception de ces probabilités. De même, l'estimation des coûts liés à un accident nucléaire et très complexe tant cet accident peut avoir des conséquences variés et à très long terme, d'autant plus avec la place centrale du nucléaire dans la société, qui fait que ce risque d'accident peut revêtir un caractère systémique et avoir des conséquences sur la société toute entière [2].

Ainsi, en utilisant ce type de modèle probabilisé, il faut bien garder ces biais à l'esprit pour espérer en tirer un analyse pertinente : on ne sait pas mesurer la précision, des probabilités calculés d'accident, tout comme des coûts de ces accidents, et ainsi les applications pratiques de ce type de modèle atteignent rapidement leurs limites et ne peuvent servir qu'à affiner les intuitions.

5.1 Remerciements

Ce mémoire a été dirigé par Monsieur Bertrand Villeneuve, que je tiens à remercier chaleureusement pour son appui et son accompagnement sans failles tout au long de ce travail, et ce, malgré le contexte difficile de fermeture des universités.

1. En particulier [4]
2. Voir aussi [6]

Bibliographie

[1] Rapport de la commission d'enquête de l'assemblée nationale sur la sûreté des installations nucléaires, 2018. [Disponible en ligne].

[2] Andra. Inventaire national des matières et déchets radioactifs, 2020. [Disponible en ligne].

[3] Cours Des Comptes. L'aval du cycle du combustible nucléaire, 2019. [Disponible en ligne].

[4] François Lévêque. Le risque d'accident nucléaire majeur : calcul et perception des probabilités. 2013.

[5] Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs. Rapport d'Évaluation n° 13, 2019. [Disponible en ligne].

[6] Pierre Picard. L'évaluation économique du risque nucléaire . July 2013.

[7] Bertrand Villeneuve. *Stratégie optimale de stockage de déchets radioactifs à vie longue sous contrainte de capacité*. Revue Economique, 2013.