

**La décision d'investissement et son financement
dans un environnement institutionnel
en mutation : le cas d'un équipement
électronucléaire**

Marie-Laure GUILLERMINET

Cahier N° 02.09.35

Septembre 2002

Centre de Recherche en Economie et Droit de l'ENergie – CREDEN

Université de Montpellier I

Faculté des Sciences Economiques

BP 9606

34 054 Montpellier Cedex France

Tel. : 33 (0)4 67 15 83 32

Fax. : 33 (0)4 67 15 84 04

e-mail : mlg@sceco.univ-montp1.fr

La décision d'investissement et son financement dans un environnement institutionnel en mutation : le cas d'un équipement électronucléaire

Marie-Laure Guillerminet*

Résumé

Nous analysons les conséquences de la remise en cause de l'hypothèse d'indépendance des décisions d'investissement et de financement, sur le choix d'investir d'une entreprise productrice d'électricité d'origine nucléaire dans un marché européen s'ouvrant à la concurrence. Cette entreprise qui peut s'endetter sur le marché financier est soumise à l'impôt et peut faire faillite. Nous montrons que son opportunité d'investissement totalement irréversible en auto-financement devient en partie réversible pour des décisions d'investissement et de financement interdépendantes.

Mots clés : Déréglementation, Investissement, Option réelle, Financement optimal, Prix de revient, Electricité

Classification JEL : D92, G32

Je remercie Jacques Percebois et les participants de l'International Real Option Workshop de l'Abo Akademi University [2002] et du Research Workshop on Recent Topics in Real Options Valuation de la Donau-Universität et de la Vienna University of Technology [2002], plus particulièrement Luis Alvarez, pour leurs commentaires constructifs. Je reste néanmoins seule responsable d'éventuelles erreurs.

1 Introduction

Le contexte institutionnel de l'industrie électrique française est marqué par la Directive européenne du 19 décembre 1996. En France le producteur était auparavant intégré dans un monopole naturel public. Or les articles 4, 5 et 6 de la Directive électrique ouvrent le secteur de la génération aux producteurs indépendants. Contrainte de plus à la séparation comptable de ses activités, Electricité de France (EdF) va devenir un producteur indépendant. La Directive ne prévoit pas le type de modification de la structure industrielle qu'entraîne l'ouverture à la concurrence. Nous envisageons, par référence au cas britannique, l'émergence du pool électrique européen dont l'existence ne sera pas obligatoirement concrétisée. Cependant si le pool est la

*CREDEN-LASER, Adresse : CREDEN, Université Montpellier I, UFR Sciences Economiques, Espace Richter, Avenue de la Mer, B.P. 9606, 34054 Montpellier cedex 1, France, Tél : +33-4-67-15-83-32, Fax : +33-4-67-15-84-04, E-mail : mlg@sceco.univ-montpl.fr

structure industrielle retenue, il ne sera pas créé avant l'ouverture totale du secteur de la génération, probablement en 2006. Ce constat coïncide avec la question du renouvellement du parc des centrales prévue vers 2010, soit la fin de la durée de vie des tranches nucléaires de 900 et de 1300 MW, puisque la production française est à 80% d'origine nucléaire.

Sur le pool, EdF qui détient le parc des centrales nucléaires ne conserve pas forcément son statut d'établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC). Elle peut financer tout nouvel équipement nucléaire par autofinancement ou par emprunt : le capital se compose d'actions et d'obligations ordinaires. Quelle incidence l'ouverture du capital de l'entreprise productrice d'électricité peut-elle avoir sur sa décision d'investir dans un équipement nucléaire incrémental ?

La théorie des options réelles initiée par Henry [1974] et Arrow et Fisher [1974] permet d'évaluer toute opportunité d'investissement comme une option réelle composée d'options d'expansion et de flexibilité du capital. Elle suppose son autofinancement, i.e. l'hypothèse de Modigliani et Miller [1958] de séparation des décisions d'investissement et de financement. Or, en finance, la théorie du compromis (ou théorie du *Trade-Off*, cf. Myers [1977]) la remet en cause : Leland [1994] a ainsi évalué en incertitude le montant optimal de la dette qui maximise la valeur de l'entreprise. Pour mettre en évidence l'incidence du financement du projet sur son acceptation par l'entreprise, nous travaillons à partir d'un investissement autofinancé totalement irréversible : l'option réelle se réduit à une option d'achat. L'interaction entre les décisions optimales d'investissement et de financement se traduit par l'ajout d'une option de vente à cette option d'achat, à laquelle est identifiée l'opportunité d'investir, est exercée (section 2). Sur le pool, la décision d'investissement n'est plus obligatoirement retardée, comme en autofinancement, par rapport à celle déterminée par le critère de la valeur actuelle nette, obtenue dans le cas du monopole (section 3). En conclusion, l'investissement financé par emprunt n'est plus totalement irréversible (section 4).

2 Les caractéristiques de l'investissement et de son financement

2.1 L'évaluation du projet nucléaire par la théorie des options réelles

2.1.1 L'évolution du prix de revient

L'évolution du cadre institutionnel prend en compte la décentralisation de la politique électrique qui fait suite à l'ouverture à la concurrence européenne du secteur. Elle est schématisée par le passage de l'entreprise du monopole intégré réglementé au pool concurrentiel. Le régulateur a pour objectif l'efficacité productive et allocative et rend le marché contestable puisque la réglementation monopolistique au coût du service présente deux limites principales : l'effet Averch-Johnson de surcapitalisation et l'inefficacité financière. Nous constatons que l'environnement certain de l'entreprise productrice devient incertain. L'unique source d'incertitude que

nous isolons est le prix de revient, seul paramètre que l'entreprise ne contrôle pas en partie et qui pourtant guide sa décision d'investissement. Il rend compte de la structure industrielle et qui constitue l'autofinancement du projet.

- **Certaine en monopole** - Le mouvement du prix de revient, qui caractérise l'entreprise publique, en monopole, réglementée au coût du service pour éviter tout abus de sa position dominante, est le suivant :

$$\frac{dp}{p_t} = \bar{\mu} dt, \quad (1)$$

où la tendance du taux de variation de l'évolution $\bar{\mu}$ est, par définition, négative ($\bar{\mu} < 0$) : le prix de revient baisse suite à la diminution du coût marginal en développement.

- **Incertaine sur le pool** - Sur les exemples britanniques de l'Electricity Pool of England and Wales, et depuis le 1 avril 2001 du New Electricity Trading Arrangements, le prix du pool est unique pour toute entreprise génératrice. Il est établi à partir du coût marginal de la dernière centrale appelée par le pool sur la base d'un système d'enchères par ordre de mérite. L'évolution aléatoire du prix de revient qui caractérise le pool suit un mouvement brownien géométrique :

$$\frac{dp}{p_t} = \bar{\mu} dt + \sigma dz, \quad (2)$$

où $\bar{\mu} < 0$ et la volatilité $\sigma > 0$ caractérise le risque de l'activité de l'entreprise.

2.1.2 Définition des différents coûts

- **Durée de vie infinie** - La durée d'exploitation des réacteurs est estimée par la DIGEC [1997] de 30 à 50/60 ans (40 ans pour les réacteurs N4) et nous la considérons comme infinie.

- **Équipement standardisé** - La composition du parc nucléaire installé d'EdF est telle que son expérience cumulée est évaluée à 600 "années-réacteurs". Il n'y a pas eu d'accident depuis celui de Tchernobyl le 26 avril 1986 qui aurait pu augmenter de façon aléatoire les coûts suite à un renforcement des normes de sûreté nucléaire. Le capital initial, qui comprend la construction, la R&D et le démantèlement (soit 15% du coût complet d'investissement, cf. DIGEC [1997]), est constant et normalisé à K .

- **Le fonctionnement en base** - La structure des coûts du nucléaire français en fait un équipement compétitif en base : la production est, compte tenu du taux de disponibilité des centrales nucléaires, constante et normalisée à l'unité. De plus, si seul le prix de revient est incertain, le prix de l'uranium étant constant, le coût marginal est normalisé à zéro. Le flux de trésorerie courant du projet se réduit au prix de revient.

- **La concurrence n'est pas prise en compte** - Les normes de sûreté nucléaire maintiennent l'entreprise productrice d'électricité d'origine nucléaire sous le contrôle du régulateur. L'équipement nucléaire incrémental n'est une opportunité d'investir que pour EdF, ce qui élimine tout effet stratégique qui modifierait la valeur du projet (Trigeorgis [1996, p. 134]). Le nucléaire ne commence à être concurrencé en base que par les cycles combinés au gaz : l'expansion du capital est totale (Dixit et Pindyck [1998]).

• **L'irréversibilité totale de l'équipement** - Cette irréversibilité implique un coût totalement irrécupérable. L'entreprise a l'opportunité d'acheter le capital sans avoir celle de le revendre en cas de retournement des conditions de marché. L'investissement est totalement irréversible et expansible, propriété qui définit l'opportunité comme une option réelle assimilable à une option d'achat.

2.1.3 Flexibilité de la décision d'investir

Les industries de réseau servent l'intérêt collectif et sont soumises aux missions de service public. La transposition de la Directive prévoit que l'Etat planifie les investissements de production sur la base d'un bilan prévisionnel pluriannuel des besoins en capacités de production. Il accorde des autorisations d'exploitation et si ces dernières ne répondent pas aux objectifs fixés, procède à des appels d'offres après avis de la Commission de Régulation de l'Electricité et du gestionnaire du réseau de transport. En revanche, l'entreprise conserve la programmation de l'investissement. Elle a l'opportunité d'investir dans un équipement nucléaire, et elle peut, à tout moment, décider d'investir ou d'attendre. Il s'agit alors pour l'entreprise de déterminer la date optimale de son investissement et de décider de son financement.

Ces trois caractéristiques d'incertitude, d'irréversibilité et de flexibilité permettent d'obtenir la valeur actuelle nette étendue (VANE, cf. Trigeorgis [1996]) du projet qui intègre à sa valeur actuelle nette (VAN) la valeur d'attente d'informations supplémentaires sur le futur. La VAN et la VANE définissent respectivement les seuils de déclenchement de l'investissement en monopole et sur le pool. Leur différence s'exprime par la prime d'option¹ Δ , dont la valeur dépend des degrés de réversibilité et d'expansion du capital (Abel et al. [1996], Dixit et Pindyck [1998]). En autofinancement, l'option réelle est une option d'attente (ainsi définie d'après les termes du choix, l'attente et l'investissement) qui se compose d'une seule option d'achat. L'investissement ainsi défini est totalement irréversible et expansible. Il est caractérisé par une prime d'option positive : $\Delta > 0$. Notre problématique consiste à montrer les conséquences de la remise en cause de l'hypothèse de Modigliani et Miller [1958] de l'indépendance des décisions d'investissement et de financement sur la valeur de la prime d'option Δ . Or Abel et al. [1996], Dixit et Pindyck [1998] ont mis en exergue que Δ n'est pas toujours positive pour un investissement en partie réversible.

¹A la suite de Trigeorgis [1996], nous appelons la différence entre la VANE et la VAN prime d'option, concept que nous distinguons de la prime de risque du titre financier.

2.2 Caractéristiques du financement

2.2.1 Le financement par projet dû aux risques

L'industrie nucléaire est confrontée à des risques économiques spécifiques, même si ces risques sont diversifiables par les investisseurs comme le prouve la privatisation de British Energy² en 1996 au Royaume-Uni. Ils sont intégrés au calcul économique par le biais de leurs primes. La possibilité du financement de ces équipements nucléaires n'est plus alors remise en question. Nous allons nous concentrer sur le partage du financement de tout équipement nucléaire entre fonds propres et emprunt, i.e. déterminer les seuils d'investissement de l'entreprise électrique endettée. Les risques sont assumés pour chaque projet d'investissement, dont le financement se fait via une structure juridique qui lui est dédiée, la société-projet (Lescoeur et Penz [1999]). Il n'y a donc pas d'interaction financière avec l'entreprise, terme que nous conservons par abus de langage.

2.2.2 Interdépendance entre décisions d'investissement et de financement

• **La théorie du compromis** - La théorie du compromis (Myers [1977]), considère deux imperfections du marché qui sont la fiscalité et la faillite. Dans le prolongement de la théorie de Modigliani et Miller [1958], elle ajoute à l'effet de levier deux effets dus à l'endettement : l'effet fiscal (les intérêts de la dette sont des charges déductibles du bénéfice imposable par l'impôt sur les sociétés) et le risque de faillite³ (la probabilité de défaillance augmente avec l'endettement). Ainsi l'entreprise maximise la valeur de son projet en fonction de son endettement : les décisions de financement et d'investissement sont alors interdépendantes. Cette situation est envisageable pour EdF, soumise à l'impôt et confrontée à un environnement de plus en plus concurrentiel où se produisent des faillites d'entreprises (e.g. celles en 2001 des deux "utilities" PG&E et SocalEd sur le pool californien CalPX et celle du courtier en énergie Enron).

La valeur actuelle (VA) de l'entreprise endettée $V(p_t)$ est la somme de la VA de l'entreprise autofinancée p_t , de la VA du gain fiscal $TB(p_t)$ et de la VA du coût de faillite $C(p_t)$, mais également celle de la VA de la dette $D(p_t)$ et de la VA des fonds propres $E(p_t)$:

$$V(p_t) = p_t + TB(p_t) - BC(p_t) = D(p_t) + E(p_t). \quad (3)$$

Selon cette théorie du compromis, il n'est pas rationnel que l'entreprise autofinance l'équipement, ce qui souligne le caractère capitalistique de la technologie nucléaire.

²Le parc de production de British Energy n'est pas composé exclusivement de centrales nucléaires, qui de plus ont été amorties en partie avant la privatisation de l'entreprise.

³Nous assimilons la défaillance (la cessation de paiement) et la faillite (la procédure judiciaire), que nous distinguons d'une situation de difficultés financières.

• **Hypothèses de financement** - Nous supposons, à la suite de Modigliani et Miller [1958], Merton [1974], Brennan et Schwartz [1978], Leland [1994] que :

* les activités de production de l'entreprise restent inchangées par sa structure de financement. Cette hypothèse écarte tout problème de substitution d'actifs : les actionnaires ne peuvent pas choisir des activités plus risquées pour l'entreprise pour accroître la valeur des fonds propres au détriment de la valeur de la dette et ainsi détourner cette valeur à leur profit au détriment des créanciers (Harris et Raviv [1991]). En effet, les impôts et les coûts de faillite influencent la structure optimale du capital, même en cas de substitution possible d'actifs⁴. Nous retrouvons la conclusion de Mauer et Triantis [1994] selon laquelle la flexibilité de financement n'a, pour l'essentiel, pas d'effet sur la politique de production de l'entreprise ;

* les décisions concernant cette structure de financement ne sont plus modifiables une fois qu'elles sont prises. Cette hypothèse élimine tout problème d'agence entre les acteurs⁵ : il n'y a donc pas d'émission de dette supplémentaire (au détriment des prêteurs actuels), ni de réduction de la dette à la marge (ces rachats se faisant au détriment des actionnaires actuels), même si les coûts de refinancement sont nuls ;

* l'entreprise s'endette uniquement au moment d'investir, i.e. que sa dette est indépendante du temps (cf. également Black et Cox [1976]). Le remboursement total in fine permet de considérer que la maturité de la dette est infinie. Nous supposons alors que les coûts de refinancement sont nuls. Le remboursement de la dette se fait à coupon constant C : la politique de dividendes est rigide ;

* l'endettement optimal se détermine pour deux imperfections de marché selon la théorie du compromis. L'impôt sur les sociétés (IS) τ , $1 < \tau < 0$, est égal à 37,77% pour EdF. L'entreprise fait faillite pour un prix de revient $p_t \notin p_B$, mais la situation de faillite effective est évaluée pour $p_t \equiv p_B$. Le coût de la faillite effective, qui comprend le coût de l'intervention de l'autorité judiciaire, est paramétré à α , $1 < \alpha < 0$. La valeur de marché de l'entreprise est alors inférieure au montant de la dette : $V(p_B) = (1 - \alpha) p_B < D(p_B)$. Lors de la faillite, la propriété de l'entreprise est transférée des actionnaires aux obligataires : la responsabilité des actionnaires est limitée et $E(p_B) = 0$;

* la dette est risquée, i.e. que les obligations sont sans clause de protection. Cette hypothèse implique que le prix de faillite p_B est obtenu de façon endogène. L'accroissement du risque de l'activité de l'entreprise σ augmente la valeur des fonds propres $E(p)$, tout en abaissant celle de la dette $D(p)$. Les actionnaires ont intérêt à augmenter ce risque, au détriment des obligataires, de façon à maximiser la valeur des fonds propres du projet : $\frac{dE(p)}{dp} \Big|_{p=p_B} = 0$.

⁴L'influence de cet effet est comparable à celle du risque σ de l'activité de la société-projet sur la valeur des fonds propres et la valeur de la dette.

⁵Ces problèmes d'agence sont néanmoins pris en compte par la théorie du compromis revisitée, extension de la théorie du compromis.

Par cette possibilité de transfert de propriété du capital de l'équipement, nous nous apercevons que s'endetter revient à acheter une option de vente sur les fonds propres du projet⁶. En s'endettant, les actionnaires cèdent une partie de la propriété des fonds propres aux créanciers. Ils récupéreront cette propriété en remboursant la dette. La valeur des fonds propres est donc égale à la valeur de cette option de vente pour les actionnaires. *Ce n'est qu'après avoir exercé son option réelle (en investissant) que l'entreprise possède cette option financière (en s'endettant).*

3 Le degré de réversibilité du projet : le calcul de la prime d'option

L'entreprise endettée de façon optimale cherche à déterminer le prix à partir duquel elle investit. L'entreprise adopte une démarche par rétroaction. Elle calcule tout d'abord le montant optimal de la dette qui maximise la valeur de son projet. Elle détermine ensuite le prix seuil de déclenchement de son investissement dans cet équipement de valeur maximale. Elle évalue ainsi son option financière avant son option réelle : l'opportunité est une option composite (Brennan et Schwartz [1985]), puisque l'ajout de l'option de vente des fonds propres accroît la valeur de l'option réelle d'achat. La différence entre le prix de revient seuil en incertitude (sur le pool) et celui obtenu par le critère de la VAN en environnement certain (en monopole) caractérise le degré de réversibilité du projet financé par endettement.

3.1 Le cas du monopole

Le mouvement du prix de revient qui définit un secteur monopolistique réglementé au coût du service, a été exprimé en (1) de la façon suivante : $\frac{dp}{p_t} = \bar{\mu} dt$, où $\bar{\mu} \neq 0$. Nous particularisons la règle de la VAN, en considérant qu'en environnement certain, l'entreprise qui investit connaît la valeur optimale de sa dette, la valeur maximale des gains fiscaux qu'elle réalise en s'endettant et le coût maximum que provoquerait sa faillite. L'intérêt d'une telle règle est de servir de base de comparaison pour le seuil d'investissement déterminé dans le scénario incertain du pool où cette règle particulière est également appliquée.

• **Résolution de $V^*(p)$ au prix courant** - La valeur courante du projet endetté de façon optimale $V^*(p)$ est égale à celle de l'équipement autofinancé, i.e. le prix de revient courant, à laquelle s'ajoute le gain fiscal net du coût de faillite. L'entreprise maximise cette valeur optimale actualisée du projet nette du coût initial du capital :

$$V^*(p_t) = \max_t E \left[\left(p_0 e^{\bar{\mu} t} + \tau \frac{C^*}{r} - \alpha p_B^* - K \right) e^{-rt} \right]. \quad (4)$$

Puisque $\bar{\mu} \neq 0$, l'entreprise décide de son investissement et de son financement en $t^* = 0$ car

⁶La fonction de valeur des fonds propres est donc convexe : $\frac{\partial^2 E(p)}{\partial p^2} > 0$.

$V^*(p_1) \leq V^*(p_0)$. La valeur optimale du projet (4) se réécrit :

$$V^*(p_0) = \max \left\{ p_0 + \tau \frac{C^*}{r} - \alpha p_B^* - K; 0 \right\}. \quad (5)$$

• **Détermination de p_B^* comme seuil d'investissement** - Ce prix de cession de l'actif p_B^* est évalué pour le niveau optimal de dette connu par l'entreprise au moment de son investissement, i.e. à $t^* = 0$. Si l'entreprise fait faillite à la date initiale, la valeur de son capital est transférée à ses créanciers :

$$K = V^*(p_B^*) = D^* = \frac{C^*}{r}.$$

La valeur de l'entreprise endettée s'exprime également à l'aide de la relation (5) comme :

$$V^*(p_B^*) = K = p_B^* + \tau K - \alpha p_B^* \Leftrightarrow p_B^* = \frac{1 - \tau}{1 - \alpha} K = p_0^* = p_{VAN}^*. \quad (6)$$

Le prix de faillite p_B^* correspond dans le cas de la VAN au prix de revient seuil de déclenchement de l'investissement p_{VAN}^* .

• **Détermination de la structure de financement** - La décision d'acceptation ou de refus du projet étant prise à la date initiale $t^* = 0$, la valeur de projet endetté de façon optimale est obtenue pour $p_0 > p_B$ à partir des expressions (5) et (6) :

$$V^*(p_0) = p_0 + \tau \frac{C^*}{r} - \alpha \frac{1 - \tau}{1 - \alpha} K.$$

Soit θ , la proportion optimale de la valeur de la dette dans la valeur de l'entreprise : $0 \leq \theta \leq 1$. Nous pouvons récrire la valeur du projet endetté :

$$V^*(p_0) = p_0 + \tau \theta V^*(p_0) - \alpha \frac{1 - \tau}{1 - \alpha} K \implies \theta = \frac{1}{\tau} \left[1 - \frac{p_0 - \alpha \frac{1 - \tau}{1 - \alpha} K}{V^*(p_0)} \right] < 1.$$

Cette proportion exprime le choix de financement de l'entreprise : si l'investissement est retenu, elle s'endette à hauteur d'un pourcentage θ de la valeur du projet.

• **La règle d'investissement** - La décision d'acceptation ou de refus du projet est prise à la date $t^* = 0$: elle résulte d'une stratégie "*now or never*". Nous avons déterminé en (6) le prix de revient optimal qui déclenche l'investissement : $p_{VAN}^* = \frac{1 - \tau}{1 - \alpha} K$, où $p_{VAN}^* > K$ si $\tau < \alpha$.

La valeur du projet nucléaire dépend de la règle d'investissement et de son financement :

$$V^*(p_0) = \begin{cases} 0 & \text{si } p_0 \leq p_{VAN}^* = \frac{1 - \tau}{1 - \alpha} K \\ & \text{avec } D^*(p_0) = 0; \\ p_0 - \frac{1 - \tau}{1 - \alpha} K & \text{si } p_0 > p_{VAN}^* \\ & \text{avec } D^*(p_0) = \theta V^*(p_0). \end{cases}$$

Proposition 1 *En présence des deux imperfections de marché des capitaux que sont l'impôt sur les sociétés et le risque de faillite de l'actif pour la théorie du compromis, l'entreprise en monopole peut s'endetter de façon optimale.*

a. *L'entreprise investit si le prix de revient initial est supérieur au prix seuil et elle finance alors cet équipement nucléaire marginal en s'endettant à hauteur d'un pourcentage constant de sa valeur θ .*

b. *Ce seuil d'investissement est plus élevé que celui d'une entreprise autofinancée qui ne bénéficie pas d'économie fiscale ni ne risque d'être cédée aux obligataires, si le coût de la faillite de l'actif α est supérieur au taux d'imposition τ pour cette règle de la VAN particulière.*

La remise en cause de l'hypothèse de Modigliani et Miller [1958] de séparation des décisions de financement et d'investissement a un premier effet en monopole, celui de déplacer la frontière d'acceptation d'un projet financé par un endettement optimal par rapport au capital initial K , seuil d'acceptation du projet autofinancé.

3.2 Le cas du pool

Sur le pool, l'entreprise base ses croyances sur une évolution du prix de revient qui suit le mouvement brownien géométrique (2) : $\frac{dp}{p_t} = \bar{\mu}dt + \sigma dz$. Elle maximise la valeur du projet financé par une dette optimale :

$$V^*(p_t) = \max_{p_t} \{(1 - rdt)V^*(p_t) + E[dV^*]; 0\},$$

i.e. qu'elle doit résoudre l'équation différentielle ordinaire (EDO) : $rV^*(p_t)dt = E[dV^*] = dV^*$.

• **La valeur du projet $V(p)$** - Du fait de la propriété de séparabilité additive de la valeur en absence d'opportunité d'arbitrage, hypothèse nécessaire pour évaluer les options, il est équivalent de résoudre l'EDO suivante :

$$[rf(p_t) + c] dt = E[df] = df, \tag{7}$$

pour $f = TB(p_t)$, $f = BC(p_t)$ et $f = D(p_t)$, puisque l'expression de $V(p_t)$ est donnée en (3). La constante c représente le flux courant de la fonction f .

Les différentes solutions sont trouvées, après avoir récrit l'EDO par le lemme d'Itô, à l'aide des deux conditions aux bornes suivantes. Au prix de faillite p_B , l'entreprise ne bénéficie plus d'économie fiscale, subit le coût de la cession de la propriété du projet aux obligataires et la dette disparaît. En revanche, pour un prix suffisamment élevé ($p_t \rightarrow \infty$), l'entreprise est sûre de ne pas faire faillite et de réaliser une économie fiscale calculée sur les intérêts de la dette contractée. Elle ne supporte aucun coût de faillite et sa dette est perpétuelle et constante pendant toute la durée d'exploitation du projet (cf. Annexe 1).

Nous en déduisons la valeur du projet financé par emprunt⁷ :

$$V(p_t) = p_t + \tau \frac{C}{r} \left[1 - \left(\frac{p_t}{p_B} \right)^{\beta_N} \right] - \alpha p_B \left(\frac{p_t}{p_B} \right)^{\beta_N}, \quad (8)$$

qui dépend du coupon et du levier. Si $\alpha > 0$ ou $\tau > 0$, alors elle croît avec r et la tendance $\bar{\mu}$, et quand le risque de l'activité σ diminue. Nous interprétons $\left(\frac{p_t}{p_B} \right)^{\beta}$ comme la valeur actuelle d'une unité monétaire contingente à l'état futur de faillite (Black et Cox [1976, pp. 355-356]).

La valeur de la dette étant égale à :

$$D(p_t) = \frac{C}{r} + \left[(1 - \alpha)p_B - \frac{C}{r} \right] \left(\frac{p_t}{p_B} \right)^{\beta_N}, \quad (9)$$

nous déduisons de la relation (3) celle des fonds propres :

$$E(p_t) = V(p_t) - D(p_t) = p_t - (1 - \tau) \frac{C}{r} - \left[p_B - (1 - \tau) \frac{C}{r} \right] \left(\frac{p_t}{p_B} \right)^{\beta_N}.$$

• **Détermination endogène de p_B : la dette non protégée** - En s'endettant, l'entreprise a acheté une option de vente sur les fonds propres. La pente de la courbe représentative de cette option nous permet d'exprimer la condition de collage entre la valeur du projet et la dette contractée. Green [1984] a montré qu'elle est convexe pour un prix p_B déterminé de façon endogène, i.e. pour une obligation risquée. Par hypothèse, les actionnaires maximisent la valeur des fonds propres. La condition de dérivabilité est exprimée à $p_t = p_B$:

$$\frac{dE}{dp} \Big|_{p_t=p_B} = 1 + \beta_N \left[(1 - \tau) \frac{C}{r} \frac{1}{p_B} - 1 \right] = 0,$$

et permet de déterminer de façon endogène la valeur de faillite p_B telle que :

$$p_B = (1 - \tau) \frac{C}{r} \left(\frac{\beta_N}{\beta_N - 1} \right). \quad (10)$$

En paramétrant les expressions suivantes :

$$\begin{cases} m = \frac{\left[\frac{(1-\tau)\beta_N}{r(\beta_N-1)} \right]^{-\beta_N}}{1-\beta_N}; \\ h = \left(1 - \beta_N - \frac{\alpha(1-\tau)\beta_N}{r} \right) m > 0; \\ g = [1 - \beta_N + (1 - \alpha)(1 - \tau)\beta_N] m > 0, \end{cases}$$

et en remplaçant p_B par son expression (10), nous obtenons la valeur du projet endetté :

$$V(p_t) = p_t + \tau \frac{C}{r} \left\{ 1 - h \left(\frac{C}{p_t} \right)^{-\beta_N} \right\} \quad (11)$$

⁷Du fait des conditions aux bornes de $f(\cdot)$, nous ne retenons que la racine négative :

$\beta_N = \frac{1}{2} - \frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}$, qui augmente avec σ et avec la baisse de $\bar{\mu}$ ou de r .

et la valeur de la dette :

$$D(p_t) = \frac{C}{r} \left\{ 1 - \left(\frac{C}{p_t} \right)^{-\beta_N} g \right\}. \quad (12)$$

Le coupon optimal, inférieur au coupon maximal ($C^* < C_{\max} = p_t [(1 - \beta_N) g]^{\frac{1}{\beta_N}}$), maximise la valeur du projet $V(p_t)$ exprimée par (11) :

$$C^* = p_t [(1 - \beta_N) h]^{\frac{1}{\beta_N}}. \quad (13)$$

Nous évaluons le prix de faillite (10) pour le coupon optimal (13) :

$$p_B^* = p_t \left(\frac{h}{m} \right)^{\frac{1}{\beta_N}}. \quad (14)$$

• **La structure optimale de financement** - La dette optimale (11) est déterminée de façon endogène par :

$$D^*(p_t) = \frac{C^*}{r} \left\{ 1 - \left(\frac{C^*}{p_t} \right)^{-\beta_N} g \right\}.$$

Nous remplaçons dans cette expression le coupon et le prix de faillite par leur valeur optimale (13) et (14) :

$$D^*(p_t) = p_t [(1 - \beta_N) h]^{\frac{1}{\beta_N}} \frac{1}{r} \left\{ 1 - \frac{1}{(1 - \beta_N) h} g \right\}.$$

Pour obtenir la valeur optimale des fonds propres ou le levier optimal, nous devons calculer la valeur optimale du projet (8) :

$$V^*(p_t) = p_t \left\{ 1 + \frac{\tau}{r} [(1 - \beta_N) h]^{\frac{1}{\beta_N}} \frac{\beta_N}{\beta_N - 1} \right\}. \quad (15)$$

La valeur optimale des fonds propres devient égale à :

$$E^*(p_t) = V^*(p_t) - D^*(p_t) = p_t \left\{ 1 - \frac{1}{r} [(1 - \beta_N) h]^{\frac{1}{\beta_N}} \left[1 - \frac{1}{(1 - \beta_N) h} (g - \tau \beta_N h) \right] \right\}.$$

Nous exprimons les propriétés de cette structure optimale d'endettement à partir du levier optimal qui ne dépend pas du prix de revient courant p_t :

$$L^* = \frac{D^*(p_t)}{V^*(p_t)} = \frac{(1 - \beta_N) h - g}{r [(1 - \beta_N) h]^{\frac{\beta_N - 1}{\beta_N}} - \tau \beta_N h} < 1.$$

Nous trouvons des résultats conformes à ceux attendus :

- l'entreprise ayant une activité peu ou très risquée (selon la valeur de σ) paie, à l'optimum, un coupon élevé et supérieur à celui d'une entreprise dont l'activité est de risque moyen ;
- à l'optimum, le levier d'une entreprise dont l'activité est plus risquée est toujours inférieur à celui d'une entreprise moins risquée ;

- le levier optimal est inférieur à 100%, même quand le coût de faillite est nul. Ce résultat corrobore celui obtenu par Brennan et Schwartz [1978].

Les résultats empiriques établis par Leland [1994] donnent une valeur au levier optimal :

- si l'activité de l'entreprise est peu ou moyennement risquée et si le coût de faillite α est moyen, $L^* \in [75\%; 95\%]$;
- si le risque de l'activité et le coût de faillite α sont élevés et :
 - * si le taux d'IS est de 35%, $L^* \in [50\%; 60\%]$;
 - * si le taux d'IS est de 15%, $L^* \in [5\%; 25\%]$.

• **La décision optimale d'investissement** - L'entreprise investit quand la valeur de son option d'investissement est égale à la valeur du projet (condition de continuité) :

$$V^*(p^*) = p^* - K + \frac{\tau}{r}C^* - \alpha p_B^*. \quad (16)$$

* **La règle d'investissement** : L'expression de l'opportunité d'investissement financée de façon optimale $V^*(p^*)$ est aussi donnée en (15). Nous réécrivons (16) pour donner le prix de revient seuil de déclenchement de l'investissement :

$$p^* = \left\{ \frac{(1 - \tau) \beta_N}{\left(1 - \beta_N - \frac{\alpha(1-\tau)\beta_N}{\tau}\right)^{\frac{1}{\beta_N}} [-\tau - \alpha\beta_N(1 - \tau)]} \right\} K,$$

qui est positif pour : $0 > \beta_N > -\frac{\tau}{\alpha(1-\tau)}$.

La valeur du projet financé par l'emprunt dépend de la règle d'investissement :

$$V^*(p_t) = \begin{cases} 0 & \text{si } p_t \leq p^* \\ & \text{avec } D^*(p_t) = 0; \\ p \left\{ 1 + \frac{\tau}{r} [(1 - \beta_N) h]^{\frac{1}{\beta}} \frac{\beta_N}{\beta_N - 1} \right\} & \text{si } p_0 > p^* \\ & \text{avec } D^*(p_t) = p_t [(1 - \beta_N) h]^{\frac{1}{\beta}} \frac{1}{r} \left\{ 1 - \frac{1}{(1 - \beta_N) h} \right\}. \end{cases}$$

* **La valeur de la prime d'option Δ** est égale à la différence entre p^* et p_{VAN}^* :

$$\Delta = \frac{(1 - \tau) \beta_N}{\left(1 - \beta_N - \frac{\alpha(1-\tau)\beta_N}{\tau}\right)^{\frac{1}{\beta_N}} [-\tau - \alpha\beta_N(1 - \tau)]} - \frac{1 - \tau}{1 - \alpha}. \quad (17)$$

Proposition 2 *L'entreprise en concurrence sur le pool investit au-delà d'un prix seuil p^* qui peut être inférieur, égal ou supérieur à celui déterminé dans le cas certain p_{VAN}^* .*

La prime d'option Δ peut être négative. L'entreprise investit dans un projet de VAN négative pour connaître, dès à présent, le taux d'imposition et le coût de faillite de son actif et définir ainsi sa structure de financement.

Corollaire 3 *La prime Δ diminue quand la tendance du prix de revient $\bar{\mu}$ et le taux d'intérêt r diminuent. Elle baisse également pour une hausse du risque de l'activité de l'entreprise σ . Le seuil de déclenchement de l'investissement p^* se rapproche alors de celui déterminé dans le cas certain p_{VAN}^* (cf. preuve en Annexe 2).*

L'écart entre les seuils d'investissement de l'entreprise en monopole et sur le pool dépend des valeurs du taux d'IS, du coût de faillite et des paramètres du taux d'évolution du prix de revient. Une prime d'option Δ dont la valeur peut être négative, positive ou nulle met en exergue qu'un projet par nature irréversible devient réversible (Abel et al. [1996], Dixit et Pindyck [1998]) quand son financement est pris en compte.

4 Conclusion et extensions

4.1 Conclusion

Dans cet article, nous avons caractérisé la déréglementation par l'incertitude du taux de variation du prix de revient. De plus, dans cet environnement, l'entreprise recourt à l'endettement pour financer son investissement. L'entreprise a l'opportunité d'investir dans un équipement nucléaire qui est assimilable à une option réelle d'attente totalement irréversible si elle le finance en fonds propres, i.e. sous l'hypothèse de Modigliani et Miller [1958] de séparation des décisions d'investissement et de financement. En finance, cette hypothèse est remise en cause par la théorie du compromis qui met en exergue l'interaction entre les décisions d'investissement et les décisions de financement. Cette théorie nous sert à évaluer l'opportunité d'investissement ainsi que son endettement, puisque l'entreprise établit la structure de financement au niveau du projet pour isoler les risques nucléaires et financiers.

Nous constatons que la dette optimale augmente la valeur du projet par rapport à celle qu'il acquiert en autofinancement, puisque les intérêts de la dette sont déductibles des impôts et que l'équipement en question peut être cédé. L'option réelle n'est plus une option d'attente, définie par les termes du choix en autofinancement : l'attente ou l'investissement. La prise en compte du levier optimal ajoute une option financière de vente à l'option réelle d'achat qui accroît la valeur de l'opportunité : cette option est composite. Cette option de vente évalue la flexibilité du projet installé, i.e. qu'elle définit en partie la capacité de réaction de l'entreprise face aux événements incertains. Elle est exercée pour un prix de cession de l'actif qui est le prix de faillite déterminé de façon endogène p_B .

Nous montrons que l'introduction de la dette optimale modifie la valeur de la prime d'option Δ : elle n'est plus toujours positive, valeur qui définit une opportunité totalement irréversible. Un projet financé par emprunt de façon optimale est partiellement réversible. La possibilité que la valeur de la prime d'option soit négative révèle que le caractère en partie réversible de l'opportunité d'investissement financée par un emprunt optimal. En effet, l'emprunt implique l'existence d'une faillite, possibilité de cession de l'actif aux créanciers.

La valeur de la prime d'option Δ pour la théorie du compromis :

Société-projet	Autofinancée	Endettée de façon optimale
Valeur de Δ	$\Delta > 1$	$\Delta = ?$
Capital	irréversible	partiellement réversible

L'entreprise attend avant d'investir que la valeur de son projet compense la valeur d'attente d'informations supplémentaires sur les conditions futures du marché. Ces informations concernent également les conditions de son financement.

Une valeur de la prime d'option négative signifie que l'entreprise investit pour une VAN de son projet électronucléaire négative. Roberts et Weitzman [1981] ont interprété cette anticipation de l'entreprise comme le fait qu'elle cherche à détenir une information certaine dans le futur. Cette information concerne les caractéristiques de son financement : le taux d'imposition et le coût de cession de l'actif, les deux imperfections du marché des capitaux retenues par la théorie du compromis et qui s'imposent à l'entreprise. Elle détermine ainsi son prix de faillite et la valeur de l'option de vente sur ses fonds propres. Une fois l'option de vente évaluée, elle peut en déduire sa règle d'investissement.

4.2 Extensions

4.2.1 Le paiement des dividendes aux actionnaires

Nous avons jusqu'à présent posé implicitement l'hypothèse de Brennan et Schwartz [1978] qu'il n'y a pas de flux de sortie de trésorerie, hypothèse vérifiée sur un marché parfait des capitaux. Mais ces flux existent en marché imparfait des capitaux : ce sont les dividendes versés aux obligataires, et/ou les paiements d'intérêt après impôt, qui restent inférieurs au financement par fonds propres.

Si comme nous l'avons supposé l'entreprise adopte une politique de dividendes rigide, elle définit un pourcentage fixe de dividendes par rapport aux flux de trésorerie : elle assure la stabilité des dividendes, ou au moins leur évolution graduelle. Pour en tenir compte, nous admettons à la suite de Leland [1994] l'existence d'un flux de sortie de trésorerie d'une valeur proportionnelle à la valeur de l'actif. L'évolution du flux de trésorerie (2) devient égale à :

$$\frac{dp}{p_t} = \left(\bar{\mu} - d \right) dt + \sigma dz,$$

où d correspond au montant des dividendes payés aux obligataires, proportionnellement à la valeur du coupon de la dette C . Si $d > 0$, les flux de dividendes peuvent être fixés par rapport au coupon :

$$d = (1 - \tau)C + c,$$

où c est une constante. Nous constatons alors que le levier optimal diminue.

4.2.2 L'existence de problèmes d'agence potentiels

Le taux d'endettement effectif fluctue autour du taux de rendement cible. Cette variation prend la forme, en l'absence de coût de transaction, d'une restructuration par ajustements continus du coupon de la dette C de façon à maximiser la valeur de l'entreprise quand le prix de revient varie. Le coupon de la dette n'est plus statique dans le temps. Aucun rachat (ou émission) de dette n'étant souhaité par les actionnaires (ou les obligataires), son réajustement se fait par renégociation de la dette : il tient compte des coûts d'agence.

Références

- [1] Abel A.B., Dixit A.K., Eberly J.C., Pindyck R.S. (1996).- "Options, the Value of Capital, and Investment", *Quarterly Journal of Economics*, CXI (3), pp. 753-777.
- [2] Arrow K.J., Fisher A.C. (1974).- "Environmental Preservation, Uncertainty and Irreversibility", *Quarterly Journal of Economics*, 88, pp. 312-319.
- [3] Black F., Cox J. (1976).- "Valuing Corporate Securities : some Effects of Bond Indenture Provisions", *Journal of Finance*, 31, pp. 351-367.
- [4] Brennan M., Schwartz E. (1978).- "Corporate Income Taxes, Valuation, and the Problem of Optimal Capital Structure", *Journal of Business*, 51 (1), pp. 103-114.
- [5] Brennan M., Schwartz E. (1985).- "Evaluating Natural Resource Investments", *Journal of Business*, 58 (2), pp. 135-157.
- [6] DIGEC (1997).- *Les "coûts de référence" en production électrique*, Sous la direction de Batail J., Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, Secrétariat d'Etat à l'industrie, DGMP.
- [7] Dixit A.K., Pindyck R.S. (1994).- *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, Princeton.
- [8] Dixit A.K., Pindyck R.S. (1998).- "Expandibility, Reversibility, and Optimal Capacity Choice", *NBER Working Paper* n°6373.
- [9] Green R. (1984).- "Investment Incentives, Debt and Warrants", *Journal of Financial Economics*, 13, pp. 115-136.
- [10] Guillerminet M.L. (2002).- *La décision d'investissement et son financement dans un environnement institutionnel en mutation : application de la théorie des options réelles au cas du nucléaire*, Thèse pour le Doctorat, Université Montpellier 1.
- [11] Harris M., Raviv A. (1991).- "The Theory of Capital Structure", *Journal of Finance*, XLVI (1), pp. 297-355.
- [12] Henry C. (1974).- "Investment Decisions under Uncertainty : the Irreversibility Effect", *American Economic Review*, 64 (6), pp. 1006-1012.

- [13] Leland H.E. (1994).- “Corporate Debt Value, Bond Covenants, and Optimal Capital Structure”, *Journal of Finance*, XLIX (4), pp. 1213-1252.
- [14] Lescoeur B., Penz P. (1999).- “La problématique du financement des investissements électronucléaires”, *Revue d’Economie Financière*, 51, “Le financement des infrastructures”, pp. 167-182.
- [15] Mauer D.C., Triantis A.J. (1994).- “Interactions of Corporate Financing and Investment Decisions : a Dynamic Framework”, *Journal of Finance*, XLIX (4), pp. 1253-1277.
- [16] McDonald R., Siegel D. (1986).- “The Value of Waiting to Invest”, *Quarterly Journal of Economics*, CI (3), pp. 707-727.
- [17] Merton R.C. (1974).- “On Pricing Decisions Contingent Claims and the Modigliani-Miller Theorem”, *Journal of Financial Economics*, 5, pp. 241-249.
- [18] Modigliani F., Miller M.H. (1958).- “The Cost of Capital, Corporation Finance and the Theory of Investment”, *American Economic Review*, 48 (3), pp. 261-297.
- [19] Myers S.C. (1977).- “Determinants of Corporate Borrowing”, *Journal of Financial Economics*, 5, pp. 147-175.
- [20] Roberts K., Weitzman M. (1981).- “Funding Criteria for Research, Development and Exploration Projects”, *Econometrica*, 49 (5), pp. 1261-1288.
- [21] Trigeorgis L. (1996).- *Real Options*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

5 Annexes

5.1 Annexe 1 : résolution de l’EDO (7)

Du fait de la propriété de séparabilité additive de la valeur en absence d’opportunité d’arbitrage (AOA)⁸, il est équivalent de résoudre l’EDO suivante (7) :

$$rf(p_t) + c = \frac{E[df]}{dt} = \frac{df}{dt},$$

pour $f = TB(p_t)$, $f = BC(p_t)$ et $f = D(p_t)$, puisque $V(p_t) = p_t + TB(p_t) - BC(p_t) = E(p_t) + D(p_t)$ (cf. (3)). La constante c représente le flux courant de la fonction f .

Si les indices ne désignent plus que les dérivées, nous pouvons récrire l’EDO avec le lemme d’Itô :

$$\frac{1}{2}\sigma^2 p^2 f_{pp} + \bar{\mu} p f_p + r f + c = 0. \quad (18)$$

Nous savons que la solution recherchée est de la forme : $f(p) = A_0 + A_1 p^\beta$.

⁸Il est équivalent de supposer l’AOA du marché ou la séparabilité additive de la valeur, hypothèses nécessaires pour évaluer les options.

Calculons les dérivées :

$$\begin{cases} f_p = A_1 \beta p^{\beta-1}; \\ f_{pp} = A_1 \beta (\beta - 1) p^{\beta-2}. \end{cases}$$

En remplaçant ces valeurs dans (18), nous obtenons la relation :

$$A_1 \beta (\beta - 1) \frac{1}{2} \sigma^2 p^\beta + A_1 \beta \bar{\mu} p^\beta + r (A_1 p^\beta + A_0) + c = 0.$$

Nous écartons la solution triviale $p = 0$:

$$A_1 \left[\beta (\beta - 1) \frac{1}{2} \sigma^2 + \beta \bar{\mu} + r \right] = 0 \text{ et } r A_0 + c = 0 \iff A_0 = -\frac{c}{r}.$$

Si $A_1 \neq 0$, $\frac{1}{2} \sigma^2 \beta^2 + \left(\bar{\mu} - \frac{1}{2} \sigma^2 \right) \beta + r = 0$ pour les deux racines suivantes :

$$\begin{cases} \beta_N = \frac{1}{2} - \frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} < 0; \\ \beta_P = \frac{1}{2} - \frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} > 0. \end{cases}$$

La solution de cette EDO est égale à :

$$f(p) = A_0 + A_1 p^{\beta_N} + A_2 p^{\beta_P}.$$

Nous calculons la valeur du projet (3) : $V(p) = p + TB(p) - BC(p) = E(p) - D(p)$, en reprenant les différentes fonctions f : $f = TB(p_t)$, $f = BC(p_t)$ et $f = D(p_t)$. Pour obtenir une valeur du projet finie (cf. infra les conditions aux bornes de $f(\cdot)$), nous n'allons retenir que la racine négative β_N . Nous constatons que l'augmentation de σ entraîne celle de β_N et que celle de la tendance $\bar{\mu}$ ou du taux d'intérêt r diminue β_N :

$$\boxed{\frac{\partial \beta_N}{\partial \bar{\mu}} = \frac{\left(-\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} + \frac{1}{2} \right) - \sqrt{\left(\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}}{\sigma^2 \sqrt{\left(\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}} < 0} \quad (19)$$

Preuve : $\sqrt{\left(\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} > \left(-\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} + \frac{1}{2} \right) \quad \square$;

$$\boxed{\frac{\partial \beta_N}{\partial r} = -\frac{1}{\sigma^2 \sqrt{\left(\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}} < 0} \quad (20)$$

$$\boxed{\frac{\partial \beta_N}{\partial \sigma} > 0} \quad (21)$$

Preuve : $\frac{\partial \beta_N}{\partial \sigma} > 0$ est du même signe que $\frac{\partial \beta_N}{\partial \Sigma}$ où $\Sigma = \sigma^2$:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Sigma}{\partial \sigma} = 2\sigma > 0 \\ \frac{\partial \beta_N}{\partial \Sigma} = \frac{2\bar{\mu}\sqrt{\left(\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} + 2\left[\bar{\mu}\left(\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right) + r\right]}{\sigma^3\sqrt{\left(\frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}} > 0 \end{cases}$$

$\frac{\partial \beta_N}{\partial \Sigma} = 0$ pour les deux racines $r = \bar{\mu} \neq 0$ et $r = 0$.

Alors $\frac{\partial \beta_N}{\partial \Sigma} > 0$ en dehors des racines, i.e. pour $r > 0$ et $r = 0$.

a) Le gain fiscal

Nous obtenons l'expression suivante du gain fiscal, $TB(p) = f(p)$:

$$TB(p) = A_0 + A_1 p^{\beta_N} + A_2 p^{\beta_P}.$$

Le gain fiscal se définit comme un coût évité par la non imposition du coupon de la dette, qui croît avec le prix de revient. Au prix de faillite p_B , la propriété du projet est cédée aux obligataires et la dette disparaît. L'entreprise ne bénéficie plus alors d'économie fiscale. En revanche, pour un prix suffisamment élevé, l'entreprise est sûre de ne pas faire faillite et de réaliser une économie fiscale calculée sur les intérêts de la dette contractée. Nous résumons ces deux conditions de continuité concernant le financement de la façon suivante :

– quand $p \rightarrow \infty$, le gain fiscal dépend du montant actualisée de la dette :

$$TB(p) \rightarrow \tau \frac{C}{r} = A_0 + A_2 p^{\beta_P} \implies \begin{cases} A_0 = \tau \frac{C}{r}, \\ A_2 = 0. \end{cases}$$

– quand $p = p_B$, il n'y a pas de gain fiscal par définition :

$$TB(p_B) = 0 = \tau \frac{C}{r} + A_1 p_B^{\beta_N} \implies A_1 = -\tau \frac{C}{r} p_B^{-\beta_N}.$$

La valeur du gain fiscal à la période courante est égale à :

$$TB(p) = \tau \frac{C}{r} \left[1 - \left(\frac{p}{p_B} \right)^{\beta_N} \right], \quad (22)$$

où nous pouvons interpréter $\left(\frac{p}{p_B} \right)^{\beta}$ comme la valeur actuelle d'une unité monétaire contingente à l'état futur de faillite. Leland [1994, p. 1219] a repris l'explication de Black et Cox [1976, pp. 355-356] et il a explicité $\left(\frac{p}{p_B} \right)^{\beta} = \int_0^{\infty} \Phi(t, p, p_B) e^{-\bar{\mu}t} dt$, où $\Phi(t, p, p_B)$ est la fonction de densité du premier passage instantané de p au prix de revient limite p_B .

b) Le coût de faillite

Le coût de faillite $BC(p) = f(p)$ est solution de l'EDO (18) et s'écrit :

$$BC(p) = A_0 + A_1 p^{\beta_N} + A_2 p^{\beta_P}.$$

Les conditions aux bornes précisent la proportion de la valeur de l'entreprise⁹ dépensée par la mise en faillite et l'absence de ce type de coût pour une entreprise non défaillante :

– quand $p \rightarrow \infty$, il n'y a pas de risque de faillite :

$$BC(p) \rightarrow 0 = A_0 + A_2 p^{\beta_P} \implies \begin{cases} A_0 = 0, \\ A_2 = 0. \end{cases}$$

– quand $p = p_B$, par définition : $BC(p_B) = \alpha p_B = A_1 p_B^{\beta_N} \implies A_1 = \alpha p_B^{1-\beta_N}$.

Nous obtenons le coût de faillite de l'entreprise :

$$BC(p) = \alpha p_B \left(\frac{p}{p_B} \right)^{\beta_N}. \quad (23)$$

c) La valeur du projet quand l'entreprise s'est endettée

Cette valeur est donnée par l'équation (8). Elle se déduit de l'expression (3) dans laquelle $TB(p)$ et $BC(p)$ sont remplacés par leur valeur (22) et (23) :

$$V(p) = p + \tau \frac{C}{r} \left[1 - \left(\frac{p}{p_B} \right)^{\beta_N} \right] - \alpha p_B \left(\frac{p}{p_B} \right)^{\beta_N}.$$

Elle dépend du coupon et du levier. Si $\alpha > 0$ ou si $\tau > 0$, alors elle croît avec r et la tendance $\bar{\mu}$, et quand le risque de l'activité σ diminue.

d) La dette

La valeur du projet est aussi égale à celle de la dette et des fonds propres (3). La valeur de la dette est solution de l'EDO (18) :

$$D(p) = A_0 + A_1 p^{\beta_N} + A_2 p^{\beta_P}.$$

La dette est perpétuelle et constante pendant toute la durée d'exploitation du projet. Quand l'entreprise fait faillite, les créanciers récupèrent la valeur de son capital nette du coût de faillite. Les conditions aux bornes sont les suivantes :

– quand $p \rightarrow \infty$, $D(p) \rightarrow \frac{C}{r} = A_0 + A_2 p^{\beta_P} \implies \begin{cases} A_0 = \frac{C}{r}, \\ A_2 = 0. \end{cases}$

– quand $p = p_B$, la valeur de l'entreprise lors de la faillite est nette du coût de faillite :

$$D(p_B) = (1 - \alpha) p_B = \frac{C}{r} + A_1 p_B^{\beta_N} \implies A_1 = \left[(1 - \alpha) p_B - \frac{C}{r} \right] p_B^{-\beta_N}.$$

⁹Nous avons caractérisé la valeur de l'entreprise autofinancée par le prix de revient.

La valeur de la dette (9) est égale à :

$$D(p) = \frac{C}{r} + \left[(1 - \alpha)p_B - \frac{C}{r} \right] \left(\frac{p}{p_B} \right)^{\beta_N}.$$

e) Les fonds propres

La valeur de la dette (9) déduite de la valeur du projet (8) donne celle des fonds propres :

$$E(p) = V(p) - D(p) = p - (1 - \tau) \frac{C}{r} - \left[p_B - (1 - \tau) \frac{C}{r} \right] \left(\frac{p}{p_B} \right)^{\beta_N}.$$

5.2 Annexe 2 : preuve du corrolaire (3)

La prime d'option Δ est exprimée dans l'équation (17). Elle est égale à :

$$\Delta = \frac{(1 - \tau) \beta_N}{\left(1 - \beta_N - \frac{\alpha(1 - \tau) \beta_N}{\tau} \right)^{\frac{1}{\beta_N}} [-\tau - \alpha \beta_N (1 - \tau)]} - \frac{1 - \tau}{1 - \alpha}.$$

Soit

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \beta_N} = \frac{(1 - \tau)}{\left(1 - \beta_N - \frac{\alpha(1 - \tau) \beta_N}{\tau} \right)^{\frac{1}{\beta_N}} [-\tau - \alpha \beta_N (1 - \tau)]} \left[1 + (1 - \tau) \left(\frac{\ln \left(1 - \beta_N - \frac{\alpha(1 - \tau) \beta_N}{\tau} \right)}{\beta_N} + \frac{1 + \frac{\alpha(1 - \tau)}{\tau}}{\left(1 - \beta_N - \frac{\alpha(1 - \tau) \beta_N}{\tau} \right)} \right) + \frac{(1 - \tau) \alpha \beta_N}{[-\tau - \alpha \beta_N (1 - \tau)]} \right]$$

Nous constatons que :

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \beta_N} < 0.$$

Preuve : $\frac{\partial \Delta}{\partial \beta_N} = 0$ pour les deux racines $\tau < 0$ et $\tau = 1$.

Alors $\frac{\partial \Delta}{\partial \beta_N} < 0$ entre les racines, i.e. pour $\tau \in [0; 1[$ □.

D'après les expressions (19), (20) et (21) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta_N}{\partial \bar{\mu}} &< 0 \\ \frac{\partial \beta_N}{\partial r} &< 0 \\ \frac{\partial \beta_N}{\partial \sigma} &> 0 \end{aligned}$$

Nous pouvons donc en déduire que :

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{\partial \Delta}{\partial \bar{\mu}} &= \frac{\partial \Delta}{\partial \beta_N} \frac{\partial \beta_N}{\partial \bar{\mu}} > 0 \\ \frac{\partial \Delta}{\partial r} &= \frac{\partial \Delta}{\partial \beta_N} \frac{\partial \beta_N}{\partial r} > 0 \\ \frac{\partial \Delta}{\partial \sigma} &= \frac{\partial \Delta}{\partial \beta_N} \frac{\partial \beta_N}{\partial \sigma} < 0 \end{aligned}}$$

LISTE DES CAHIERS DE RECHERCHE CREDEN*

- 95.01.01** *Eastern Europe Energy and Environment : the Cost-Reward Structure as an Analytical Framework in Policy Analysis*
Corazón M. SIDDAYAO
- 96.01.02** *Insécurité des Approvisionnements Pétroliers, Effet Externe et Stockage Stratégique : l'Aspect International*
Bernard SANCHEZ
- 96.02.03** *R&D et Innovations Technologiques au sein d'un Marché Monopolistique d'une Ressource Non Renouvelable*
Jean-Christophe POUDOU
- 96.03.04** *Un Siècle d'Histoire Nucléaire de la France*
Henri PIATIER
- 97.01.05** *Is the Netback Value of Gas Economically Efficient ?*
Corazón M. SIDDAYAO
- 97.02.06** *Répartitions Modales Urbaines, Externalités et Instauration de Péages : le cas des Externalités de Congestion et des «Externalités Modales Croisées»*
François MIRABEL
- 97.03.07** *Pricing Transmission in a Reformed Power Sector : Can U.S. Issues Be Generalized for Developing Countries*
Corazón M. SIDDAYAO
- 97.04.08** *La Dérégulation de l'Industrie Electrique en Europe et aux Etats-Unis : un Processus de Décomposition-Recomposition*
Jacques PERCEBOIS
- 97.05.09** *Externalité Informationnelle d'Exploration et Efficacité Informationnelle de l'Exploration Pétrolière*
Evariste NYOUKI
- 97.06.10** *Concept et Mesure d'Equité Améliorée : Tentative d'Application à l'Option Tarifaire "Bleu-Blanc-Rouge" d'EDF*
Jérôme BEZZINA
- 98.01.11** *Substitution entre Capital, Travail et Produits Energétiques : Tentative d'application dans un cadre international*
Bachir EL MURR
- 98.02.12** *L'Interface entre Secteur Agricole et Secteur Pétrolier : Quelques Questions au Sujet des Biocarburants*
Alain MATHIEU

* L'année de parution est signalée par les deux premiers chiffres du numéro du cahier.

- 98.03.13** *Les Effets de l'Intégration et de l'Unification Économique Européenne sur la Marge de Manœuvre de l'État Régulateur*
Agnès d'ARTIGUES
- 99.09.14** *La Réglementation par Price Cap : le Cas du Transport de Gaz Naturel au Royaume Uni*
Laurent DAVID
- 99.11.15** *L'Apport de la Théorie Économique aux Débats Énergétiques*
Jacques PERCEBOIS
- 99.12.16** *Les biocombustibles : des énergies entre déclin et renouveau*
Alain MATHIEU
- 00.05.17** *Structure du marché gazier américain, réglementation et tarification de l'accès des tiers au réseau*
Laurent DAVID et François MIRABEL
- 00.09.18** *Corporate Realignments in the Natural Gas Industry : Does the North American Experience Foretell the Future for the European Union ?*
Ian RUTLEDGE et Philip WRIGHT
- 00.10.19** *La décision d'investissement nucléaire : l'influence de la structure industrielle*
Marie-Laure GUILLERMINET
- 01.01.20** *The industrialization of knowledge in life sciences Convergence between public research policies and industrial strategies*
Jean Pierre MIGNOT et Christian PONCET
- 01.02.21** *Les enjeux du transport pour le gaz et l'électricité : la fixation des charges d'accès*
Jacques PERCEBOIS et Laurent DAVID
- 01.06.22** *Les comportements de fraude fiscale : le face-à-face contribuables – Administration fiscale*
Cécile BAZART
- 01.06.23** *La complexité du processus institutionnel de décision fiscale : causes et conséquences*
Cécile BAZART
- 01.09.24** *Droits de l'homme et justice sociale. Une mise en perspective des apports de John Rawls et d'Amartya Sen*
David KOLACINSKI
- 01.10.25** *Compétition technologique, rendements croissants et lock-in dans la production d'électricité d'origine solaire photovoltaïque*
Pierre TAILLANT
- 02.01.26** *Harmonisation fiscale et politiques monétaires au sein d'une intégration économique*
Bachir EL MURR
- 02.06.27** *De la connaissance académique à l'innovation industrielle dans les sciences du vivant : essai d'une typologie organisationnelle dans le processus d'industrialisation des connaissances*
Christian PONCET

- 02.06.28** *Efforts d'innovations technologiques dans l'oligopole minier*
Jean-Christophe POUDOU
- 02.06.29** *Why are technological spillovers spatially bounded ? A market orientated approach*
Edmond BARANES et Jean-Philippe TROPEANO
- 02.07.30** *Will broadband lead to a more competitive access market ?*
Edmond BARANES et Yves GASSOT
- 02.07.31** *De l'échange entre salaire et liberté chez Adam Smith au « salaire équitable » d'Akerlof*
David KOLACINSKI
- 02.07.32** *Intégration du marché nord-américain de l'énergie*
Alain LAPOINTE
- 02.07.33** *Funding for Universal Service Obligations in Electricity Sector : the Case of Green Power Development*
Pascal FAVARD, François MIRABEL et Jean-Christophe POUDOU
- 02.09.34** *Démocratie, croissance et répartition des libertés entre riches et pauvres*
David KOLACINSKI
- 02.09.35** *La décision d'investissement et son financement dans un environnement institutionnel en mutation : le cas d'un équipement électronucléaire*
Marie-Laure GUILLERMINET