LA DECISION D'INVESTISSEMENT NUCLEAIRE :
L'INFLUENCE DE LA STRUCTURE INDUSTRIELLE

Marie-Laure Guillerminet

Cahier N° 00.10.19

Octobre 2000

Révisé en Juillet 2001

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 nucléaire : l'influence de la structure industrielle

Marie-Laure Guillerminet*

Résumé

Cet article se propose d'analyser le comportement d'investissement d'une entreprise qui produit en base de l'électricité d'origine nucléaire dans un marché européen qui s'ouvre à la concurrence. Dans ce contexte, la structure industrielle contrôlée par le régulateur conditionne la décision d'investir dans un équipement marginal : soit une structure de monopole intégré qui impose une réglementation au taux de rendement du prix de revient ; soit une structure de pool dans laquelle le régulateur intervient pour maintenir le prix de revient au niveau du coût marginal donné par la technologie dominante des Cycles Combinés au Gaz. En incertitude, l'entreprise retarde son investissement. Puisqu'elle n'est pas incitée à surcapitaliser sur le pool, il est donc préférable de le mettre en oeuvre plutôt que de maintenir un monopole.

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

Classification JEL : D92, L51, Q49

Je remercie Jacques Percebois et Jean-Christophe Poudou pour leurs commentaires constructifs. Je reste néanmoins seule responsable d'éventuelles erreurs.

1 Introduction

La Directive électrique européenne du 19 décembre 1996 modifie le contexte de l'industrie électrique en France, notamment en ouvrant le secteur de la production à la concurrence (articles 4, 5 et 6). Electricité de France (EdF), monopole national, va devenir un producteur indépendant dans un pool européen. Nous abordons l'aspect réglementaire par son impact sur le taux de variation du prix de revient. Ainsi la modification de la structure industrielle est prise en compte par quatre scénarios puisque la réglementation monopolistique au coût du service[1], même en cas de réajustement du taux de rendement, peut inciter l'entreprise à surcapitaliser selon l'effet

*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-montp1.fr

[1] Dans la littérature, sont indifféremment employés les termes de réglementation au coût du service, au taux de rendement ou de type "*cost-plus*".

Averch-Johnson. L'organisation du marché contestable qui se met alors en place ne sera connue qu'à l'ouverture totale du secteur, probablement en 2006. Nous envisageons l'émergence d'un pool européen qui peut cependant prendre deux formes possibles d'après les exemples britanniques de l'Electricity Pool of England and Wales, et depuis le 1 avril 2001 du New Electricity Trading Arrangements (NETA).

Ce constat de changement de la structure industrielle coïncide avec la question du renouvellement du parc des centrales prévue vers 2010, soit la fin de durée de vie des tranches nucléaires de 900 et de 1300 MW, puisque la production française est à 80% d'origine nucléaire. Nous nous posons la question de savoir si la modification du contexte institutionnel a une influence sur la décision d'investissement optimale de l'entreprise dans un projet nucléaire marginal.

Nous définissons le secteur de la production par quatre scénarios d'évolution du prix de revient et l'opportunité d'investissement comme étant totalement irréversible et expansible (section 2). Les trois caractéristiques d'incertitude, d'irréversibilité et de flexibilité dans la programmation de l'équipement permettent d'évaluer le projet à l'aide de la théorie des options réelles (cf. les revues de littérature de Dixit et Pindyck [1994], Trigeorgis [1996]). L'opportunité est assimilée à une option réelle d'attente, puisque l'entreprise choisit à tout instant d'attendre ou d'investir. Elle est composée d'une option d'achat. Dans les différents cas de réglementation, nous calculons le prix de revient à partir duquel il est optimal pour l'entreprise d'investir, en distinguant les cas de monopole (section 3) de ceux du pool (section 4). En environnement incertain, le projet est accepté si sa valeur compense la valeur d'attente d'informations supplémentaires concernant le futur, informations données par le prix de revient. L'option réelle intègre à la valeur actuelle nette (VAN) de l'équipement cette valeur d'attente dans la valeur actuelle nette étendue (VANE, cf. Trigeorgis [1996]). La VAN et la VANE définissent respectivement les prix seuils de déclenchement de l'investissement dans le scénario 1 et dans les trois autres scénarios. Le rapport de la VANE sur la VAN met en exergue le multiple de la valeur d'option ϕ (Dixit et Pindyck [1994]) dont la valeur est supérieure à 1 pour cet investissement (section 5).

2 Hypothèses

2.1 L'évolution de la structure industrielle

"*La concurrence est bénéfique quand elle introduit des produits nouveaux et utiles, élargit les marchés, abaisse les coûts de production, remplace des producteurs moins efficaces par des producteurs plus efficaces. Contrairement à ce que laissent entendre les textes de la Commission européenne qui ne distinguent pas assez les différentes formes de concurrence, elle peut être dommageable lorsqu'elle pousse à installer des capacités de production excédentaires ou à les renouveler prématurément pour prévenir l'entrée d'entreprises concurrentes. A ces gaspillages, s'ajoute la tentation de transgresser les règles du jeu en matière de sécurité et de législation du travail. Les services publics ne peuvent donc pas être abandonnés. Sous une forme ou sous une* *autre, une régulation publique est nécessaire*" (Henry [1997]).

Dans cette industrie de réseau, EdF a été une entreprise intégrée en monopole aux rendements croissants. Pour éviter tout abus de position dominante, l'autorité régulatrice en charge de l'optimum collectif, l'Etat, l'a réglementée au coût du service. Cette réglementation illustre la planification de la production à laquelle EdF a été soumise de 1946 à 1996. EdF a dû mettre en place le réseau électrique français, le monopole national étant le mieux à même de gérer la construction du parc de production de façon optimale (Bergougnoux [1987]). Ainsi, l'Etat contraint[2] l'entreprise à pratiquer un prix de revient dont l'évolution constante à la baisse a été fixée préalablement pour répondre à l'évolution planifiée de la demande en base et à l'objectif d'efficacité des coûts de production. Notons que la structure optimale du parc français inclut les centrales nucléaires comme équipements en base, y compris pour des raisons d'indépendance énergétique nationale. Le programme nucléaire lancé par le gouvernement Messmer en 1974 aboutit à la standardisation de cette technologie.

En état stationnaire, le taux de rendement de la réglementation monopolistique au coût du service est parfaitement déterminé : l'évolution du prix de revient est certaine. Ce cas déterministe (scénario 1) nous permet d'établir la règle d'investissement à partir du critère de la VAN. Il nous sert de base de comparaison avec les règles d'investissement en incertitude, pour les trois scénarios suivants, déduites du critère de la théorie des options réelles.

En fin de développement du réseau électrique, le régulateur ne connaît plus avec certitude le coût marginal en développement. L'état n'est pas stationnaire : l'évolution du prix de revient n'est connue qu'en moyenne, et peut subir un choc à la baisse suite à la révision à la baisse du taux de rendement par le régulateur. Par hypothèse, le processus réglementaire s'impose à l'entreprise qui ne peut pas intervenir pour influencer la décision du régulateur. Nous ne prenons pas en compte la période réglementaire et supposons que la probabilité d'occurrence de cette baisse du tarif est qualibrée sur toute cette période (scénario 2).

Deux exemples concrets de pool nous sont donnés par l'Angleterre et le Pays de Galles avec le Pool, puis le NETA. Le programme de privatisation du gouvernement Thatcher en 1989 a voulu éviter des modifications importantes de la qualité et du coût du service. Le fonctionnement du Pool est réglementé par un opérateur système, le Director General of Electricity Supply, qui doit s'assurer que le prix unique du Pool reflète le coût marginal de la dernière centrale appelée sur la base d'un système d'enchères par ordre de mérite. Par ce mécanisme d'équilibrage physique, "*Imbalance Settlement*", le prix qui diminue en tendance est volatil (scénario 3).

Les dysfonctionnements du Pool apparaissent dès 1992 : il n'incite pas à la baisse du prix de revient et entraîne une modification de l'ordre d'appel des centrales. En 1994, le régulateur a même imposé un plafond ("*price-cap*") sur le prix de revient du Pool. Les contrats de différences ("*Contracts for Difference*") permettent de le contourner (puisque seulement 20% du

[2] Cette contrainte nous permet d'expliciter l'hypothèse de monopole myope.

marché reste sur le Pool), en établissant des relations contractuelles sur la base d'un prix négocié hors Pool entre les clients éligibles et les producteurs indépendants, dont les équipements sont constitués presque exclusivement de cycles combinés au gaz (CCG). Pour se prémunir contre les fluctuations du prix de revient sur le marché spot, l'entreprise peut vendre de l'électricité sur la base de contrats bilatéraux ou multilatéraux, concernant un ou plusieurs échanges. Depuis 2001, ce mécanisme de contrats est centralisé sur le NETA, marché de contrats constitué à 90% par les contrats de long terme et à 8% par les contrats de court terme. Le mécanisme d'"*Imbalance Settlement*" est maintenu : le "*Balancing Mechanism*" gère 2% du marché. Ainsi, l'existence de ce marché concurrentiel peut favoriser l'entrée d'une technologie relativement réversible, peu capitalistique et facilement finançable, dont les délais de construction sont plus courts. Cette technologie des CCG, dominante sur le segment de la production, détermine alors le coût marginal en développement et l'évolution du prix de revient en tendance (scénario 4).

2.2 L'investissement de l'entreprise

L'environnement de l'entreprise est incertain, l'unique source d'incertitude étant le prix de revient p_t. Les prix du combustible et des intrants sont supposés constants.

Le capital spécifique envisagé est un équipement nucléaire en base, complètement irréversible et expansible. Il a un coût totalement irrécupérable : l'entreprise ne peut pas désinvestir si les conditions de marché deviennent défavorables. L'équipement en base produit une quantité constante que nous normalisons à 1. La technologie nucléaire française est standardisée et le coût du combustible est constant : les coûts de production sont normalisés à 0. La standardisation technique élimine[1] toute incertitude sur le coût initial du capital K et nous supposons que la durée de vie de cet équipement est infinie et que sa construction est instantanée. En revanche, nous constatons que le coût du capital bénéficie des économies d'échelle[3] et d'effets externes positifs d'une implantation sur un même site (cf. Lester et McCabe [1993]). Néanmoins nous pouvons admettre que le régulateur assure l'optimalité du parc national de production : il contraint EdF à programmer son investissement pour un nombre donné de tranches et à regrouper ses réacteurs sur les sites. Le projet incrémental ne modifie pas la valeur du parc existant de l'entreprise. De plus, du fait des risques nucléaires, le régulateur contrôle strictement le respect des normes de sécurité par l'entreprise qui possède de telles centrales. Ce dernier ne souhaite pas non plus voir une dispersion de la propriété de ces centrales et l'équipement nucléaire incrémental n'est une opportunité d'investir que pour EdF. Il n'y a donc pas d'effet stratégique à prendre en compte. Puisque le nucléaire ne commence à être concurrencé en base que par les CCG, l'effet de cette concurrence technologique se traduit par une modification de l'évolution du prix de revient. L'expansion du capital de l'entreprise est donc totale et le coût initial du capital K est constant.

[1] Ce n'est pas le cas de l'industrie nucléaire américaine, qui doit prendre en compte l'incertitude du coût du capital pendant la durée de construction de la centrale (Pindyck [1993]).

[3] Le kW installé coûte moins cher pour un programme de construction de 10 tranches que pour celui de 4 tranches (cf. DIGEC [1997, p. 28 et 78]).

Enfin, si le respect des missions de service public reste à la charge du régulateur, il n'en est plus de même pour la politique d'investissement qui est du ressort de l'entreprise. Elle conserve une certaine flexibilité dans la programmation de cet équipement dont la construction est approuvée par le régulateur.

L'hypothèse de Modigliani et Miller [1958] de séparation des décisions d'investissement et de financement est vérifiée. L'entreprise rationnelle neutre au risque cherche à maximiser la valeur de son projet, i.e. la valeur actualisée du flux de trésorerie, égal d'après nos hypothèses au prix de revient p_t, net du coût initial du capital K :

$$\max_{p_t} E\left\{(p_t - K)e^{-rt}; 0\right\}. \tag{1}$$

Les termes de son choix sont constitués soit par un supplément de valeur net d'escompte (si elle investit), soit par 0 (si elle attend) :

$$\max_{p_t} V(p_t) = \{(1 - rdt)\, V(p_t) + E[dV]; 0\}. \tag{2}$$

En marché complet, i.e. sous l'hypothèse d'absence d'opportunité d'arbitrage (nécessaire à l'évaluation de l'option), elle ne peut pas réaliser de plus-value, ce qu'exprime l'équation de Bellman :

$$rV(p_t)dt = E[dV] = dV. \tag{3}$$

3 Le cas du monopole : l'évolution contrôlée du tarif

3.1 Le cas déterministe : la règle "now or never"

Dans le scénario 1, le prix suit l'évolution certaine et décroissante du coût marginal en développement :

$$\frac{dp}{p_t} = \bar{\mu}dt \Longleftrightarrow p_t = p_0 e^{\bar{\mu}t},$$

où

$\bar{\mu}$ est la moyenne du taux de variation du prix : $\bar{\mu} \leqslant 0$;

p_0 est le prix de revient initial.

Dans ce cas déterministe, la règle d'investissement répond à une stratégie "*now or never*". La détermination du seuil d'investissement revient à décider de retenir le projet à la date optimale t^* (stratégie "*now*"). Si à cette date optimale t^* l'investissement n'est pas retenu, l'option disparaît : il n'y a pas de possibilité d'attente (stratégie "*never*"). Il est alors équivalent d'utiliser le critère néoclassique de la VAN (Dixit [1992]).

L'entreprise décide d'exercer ou non son option afin de maximiser la valeur (1) :

$$V(p_t) = \max_{p_t} E\left[(p_t - K)e^{-rt}\right] = \max_{p_t} E\left[(p_0 e^{\bar{\mu}t} - K)e^{-rt}\right].$$

Il existe toujours une date à laquelle il est optimal d'investir quels que soient la tendance et le taux d'actualisation, puisque $\lim_{t \to \infty} e^{\bar{\mu} - rt} = 0$ (McDonald et Siegel [1986]) : l'investissement est une meilleure politique que l'attente.

La tendance de l'évolution du prix est non positive, i.e. $\bar{\mu} \leq 0$, et le flux de trésorerie généré par le projet d'investissement p_t est soit constant, soit diminue en fonction du temps de service. La règle d'investissement est alors une règle "*now or never*" à la date initiale $t^* = 0$: il est optimal d'investir immédiatement si $p_0 \geq p^*_{VAN} = K$, sinon il n'est jamais optimal d'investir. La règle se résume ainsi :

$$\max \{p_0 - K; 0\}. \tag{4}$$

La décision d'acceptation ou de rejet du projet est prise en $t^* = 0$. L'investissement est toujours retenu pour $p_0 \geq p^*_{VAN} = K$. La valeur de l'entreprise $V(p_0)$ est maximale à la date optimale $t^* = 0$ de la prise de décision. Si $p_0 \leq K$, il n'est pas optimal pour l'entreprise d'investir. Comme l'entreprise suit une stratégie "*now or never*", l'entreprise ne peut pas conserver l'option et attendre pour investir. L'option disparaît et la valeur de l'entreprise reste inchangée et nulle puisque nous l'avons normalisée.

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

$$V(p_0) = \begin{cases} 0 \text{ si } p_0 \leq p^*_{VAN} = K\,; \\ p_0 - K \text{ si } p_0 \geq p^*_{VAN}. \end{cases}$$

Proposition 1 *Dans le cas d'une réglementation au coût du service stationnaire, le seuil d'investissement est déterminé par le critère de la VAN : il est égal au coût marginal du capital.*

La règle de la VAN est remise en cause en environnement incertain : "le recours au critère classique mène à des investissements, jugés optimaux *ex-ante* et qui s'avèrent excessifs *ex-post*" (Smeers [1997, p. 679]).

3.2 Le cas du choc aléatoire sur le prix de revient : l'action ad nutum du régulateur

Dans un contexte réglementaire de type "*cost-plus*" avec ajustement du taux de rendement (scénario 2), le prix de revient peut subir de façon aléatoire un choc à la baisse, suite à l'intervention du régulateur pour diminuer le tarif. L'entreprise n'anticipe cette action réglementaire que sous la forme d'une intervention complètement erratique. Le processus stochastique du prix de production combine un processus de Poisson au mouvement brownien géométrique :

$$\frac{dp}{p_t} = \bar{\mu} dt - dq,$$

où

$\bar{\mu}$ est la tendance du processus d'évolution, $\bar{\mu} \leq 0$;

q suit un processus de Poisson dont l'incrément $dq = \begin{cases} 0 \text{ avec la probabilité } (1 - \psi dt) \\ \varphi \text{ avec la probabilité } \psi dt \end{cases}$

q peut être interprété comme une fonction d'anticipation de la part de l'entreprise de l'intervention du régulateur ;

ψ est le taux d'occurrence moyen de cette intervention ;

φ est le pourcentage de baisse du prix de revient en cas d'occurrence d'un événement de Poisson, $0 < \varphi < 1$.

L'entreprise rationnelle neutre au risque cherche à maximiser sa valeur (2), i.e. à résoudre l'équation de Bellman (3) qui se récrit d'après le lemme d'Itô :

$$\bar{\mu} p_t V_p(p_t) - (\psi + r)V(p_t) + \psi V[(1 - \varphi)p_t] = 0,$$

équation différentielle ordinaire (EDO) dont nous trouvons la solution, i.e. la valeur de l'entreprise, sous la forme :

$$V(p_t) = A p_t^{\beta},$$

où la constante β est égale à :

$$\beta = -\frac{\bar{\mu} W\left(\frac{\ln(1-\varphi)\psi e^{\frac{(\psi+r)\ln(1-\varphi)}{\bar{\mu}}}}{\bar{\mu}}\right) - (\psi + r)\ln(1 - \varphi)}{\bar{\mu}\ln(1 - \varphi)}.$$

Soit $W\left(\frac{\ln(1-\varphi)\psi e^{\frac{(\psi+r)\ln(1-\varphi)}{\bar{\mu}}}}{\bar{\mu}}\right) = W(w)$, où $w > 0$ parce que $\bar{\mu} \leqslant 0$; $(\varphi, \psi) \in [0; 1] \times [0; 1]$ et $r > 0$. $W(.)$ est une fonction de Lambert définie comme l'inverse multivoque de la fonction $w \mapsto we^w$. La branche réelle principale est croissante à taux décroissant dans le quadrant positif : $W(0) = 0$ et $W_w(w) > 0$ pour $w > 0$ (cf. Corless, Gonnet, Hare, Jeffrey et Knuth [1996][4]).

Nous constatons que $\beta < 0$ pour $r > 0$.

Preuve : $r = 0$ est une racine de β et β est décroissante par rapport à r puisque :
$\frac{\partial \beta}{\partial r} = \frac{\ln(1-\varphi) - \frac{\ln(1-\varphi)W(w)}{1+W(w)}}{\bar{\mu}\ln(1-\varphi)} = \frac{1}{\bar{\mu}[1+W(w)]} < 0.$ ■

Or $V(p_t)$ doit vérifier la condition initiale $V(0) = 0$, solution intérieure qui détermine la région d'arrêt : quand le prix de revient est nul, le projet ne vaut rien. Nous pouvons en déduire que $A = 0$, i.e. qu'il n'est jamais optimal pour l'entreprise d'investir.

Proposition 2 *Dans le cas non stationnaire d'une réglementation au coût du service, l'entreprise est contrainte par la diminution du prix de revient et par un ajustement aléatoire à la baisse de ce prix. Il n'est jamais optimal pour l'entreprise d'investir dans ce contexte réglementaire.*

[4] Corless R.M., Gonnet G.H., Hare D.E.G., Jeffrey D.J. et Knuth D.E. [1996], "On the Lambert W function", *Advances in Computational Mathematics* 5, p. 329-359.

Les tarifs sont supposés pouvoir être modifiés à tout moment au cours de la période réglementaire, et non, comme c'est le cas dans la réalité, uniquement en début de période. L'entreprise n'intervient pas non plus pour décider avec le régulateur de la baisse du tarif.

L'incertitude devient trop importante pour que l'entreprise investisse : le prix seuil de déclenchement de l'investissement tend vers l'infini. Dans ce cas, l'entreprise qui choisit d'investir ne mène pas une politique d'investissement optimale et elle surcapitalise. Nous mettons ainsi en exergue l'effet Averch-Johnson.

4 Le cas du pool : la concurrence incite l'entreprise à baser son prix sur le coût marginal en développement

4.1 Le prix de revient fluctue comme le coût marginal et suit un mouvement brownien géométrique

L'évolution aléatoire du prix de revient est basée sur le coût marginal en développement de la production et reflète la concurrence sur le pool (scénario 3). Le taux de variation du prix de revient suit un mouvement brownien géométrique :

$$\frac{dp}{p_t} = \bar{\mu} dt + \sigma dz,$$

où

la tendance constante de ce processus ($\bar{\mu} \leqslant 0$) est donc telle que $\bar{\mu} < r$: la condition de McDonald et Siegel [1986] est vérifiée ;

la volatilité constante σ représente le risque de l'activité de l'entreprise, $\sigma > 0$;

z_t est un processus de Wiener standard.

L'entreprise rationnelle doit toujours maximiser sa valeur en résolvant le programme (2), i.e. à résoudre l'équation de Bellman (3). D'après le lemme d'Itô, elle se récrit :

$$\frac{1}{2}\sigma^2 p_t^2 V_{pp}(p_t) + \bar{\mu} p_t V_p(p_t) - rV(p_t) = 0.$$

La solution de cette EDO est de la forme suivante[1] : $V(p_t) = Ap_t^{\beta_P}$ puisqu'elle doit vérifier la condition intérieure initiale $V(0) = 0$ qui exprime qu'un prix nul entraîne une valeur de l'entreprise nulle, i.e. qu'il n'est pas optimal pour l'entreprise d'investir.

Elle vérifie aussi deux conditions aux bornes. La condition de continuité signifie qu'au moment d'investir, l'entreprise reçoit juste la recette nette de l'investissement :

$$V(p^*) = p^* - K.$$

[1] La racine positive $\beta_P = \frac{1}{2} - \frac{\bar{\mu}}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\bar{\mu}}{\sigma^2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}$.

La condition du second ordre est une condition technique de dérivabilité (l'univers est convexe : $V_p(p^*) > 0$) qui garantit la continuité entre la valeur de l'entreprise et l'option exercée :

$$V_p(p^*) = 1.$$

Ces deux conditions permettent de déduire que le prix de revient seuil p^* est égal à :

$$p^* = \frac{\beta_P}{\beta_P - 1} K = \phi K.$$

Il est optimal pour l'entreprise d'attendre quand le prix de revient p_t est inférieur au prix de déclenchement de l'investissement p^*. Elle investit dès que le prix p_t est supérieur au prix seuil p^*.

Sa valeur à tout instant t est fonction de sa décision d'investir ou d'attendre :

$$V(p_t) = \begin{cases} 0 \text{ si } p_t \leqslant p^* = \phi K, \\ \frac{1}{\beta_P} p_t \text{ si } p_t > p^*. \end{cases}$$

Proposition 3 (Dixit-Pindyck [1994]) *Pour une évolution du prix de revient log-linéaire sur le pool, l'entreprise investit plus tard que le monopole qui produit dans un environnement stationnaire.*

4.2 Le prix de revient fluctue autour du coût marginal selon un processus Ornstein-Uhlenbeck ou processus de retour à la moyenne

Depuis 1989, les producteurs indépendants sur le marché britannique se sont équipés à 80% de CCG qui ne présentent pratiquement aucun risque économique car ils sont contractualisés. Les CCG, qui fournissent la pointe et la semi-base, tendent à devenir compétitifs en base : cette technologie domine le segment de la production électrique (scénario 4). Le prix de revient du pool suit un processus de retour à la moyenne donnée par le coût marginal en développement des CCG, i.e. un processus d'Ornstein-Uhlenbeck :

$$dp = \eta(\bar{p} - p_t)dt + \sigma dz, \tag{5}$$

où

$\bar{p}$ est la tendance à long terme ou le coût marginal de long terme de production donnée par la filière de génération au gaz : c'est l'état régulier vers lequel tend le secteur de la production ;

η est la vitesse de convergence (force de rappel) du prix vers sa tendance de long terme ($\eta > 0$), i.e. la vitesse d'entrée des CCG dans le segment de la production ;

σ est la volatilité constante du marché ($\sigma > 0$) ;

z_t est un processus de Wiener standard.

i) Concurrence en base : les contrats à long terme du NETA - Le prix de revient fixé par ces contrats est certain : la volatilité est nulle, $\sigma = 0$, et son évolution (5) devient déterministe. A tout instant t, le prix courant p_t est connu en fonction du prix initial p_0 et du prix du gaz $\bar{p}$:

$$\frac{dp}{dt} = \eta(\bar{p} - p_t) \Longleftrightarrow \frac{dp}{dt} + \eta p_t = \eta\bar{p} \Longleftrightarrow p_t = (p_0 - \bar{p})e^{-\eta t} + \bar{p}.$$

L'entreprise choisit d'investir pour maximiser sa valeur (2) qui se récrit :

$$V(p_t) = \max_{p_t} E\left[\left((p_0 - \bar{p})e^{-\eta t} + \bar{p} - K\right) e^{-rt}\right]. \tag{6}$$

L'investissement est toujours une meilleure politique que l'attente (McDonald et Siegel [1986]) : $\lim_{t\to\infty}\left[(p_0 - \bar{p})e^{-(\eta+r)t} + (\bar{p} - K)e^{-rt}\right] = 0,\ \forall(\eta, r) \in \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}_+$.

Il faut distinguer un cas d'évolution décroissante ou constante du prix et un cas d'évolution croissante de ce prix de revient. Cela revient à comparer les coûts marginaux en développement du gaz et du nucléaire, i.e. à établir la compétitivité des deux types d'équipements. Une baisse du taux d'actualisation est plus favorable au nucléaire, investissement plus capitalistique, mais nous le supposons ici constant. Cette comparaison dépend donc du prix du gaz décrit par deux scénarios : "haut" et "bas", puisque 70% du coût en développement du CCG est constitué par le coût du combustible (DIGEC [1997]).

• La compétitivité du CCG : Cette compétitivité se réfère à la supériorité du coût marginal en développement du nucléaire sur le gaz. Ce cas est envisageable pour un scénario de prix du gaz "bas" et illustre le début de la concurrence en base du CCG sur le nucléaire. La tendance de l'évolution du prix de revient est non positive : $p_0 > \bar{p}$.

Dans ce cas déterministe, la règle d'investissement "*now or never*" à la date initiale $t^* = 0$ se résume comme en (4) par :

$$\max\{p_0 - K; 0\}.$$

Il n'est optimal d'investir immédiatement que si $p_0 > K$. Il n'est par contre jamais optimal d'investir si $p_0 \leqslant K$.

• La compétitivité nucléaire : Dans ce scénario de prix du gaz "haut", le coût marginal en développement du nucléaire est inférieur à celui du gaz. La tendance est positive, i.e. $p_0 < \bar{p}$.

Il existe une date d'échéance de l'option t^* telle que $V(p_{t^*}) > 0$ quel que soit le signe de $(p_0 - K)$:

$$t^* = \max\left\{\frac{1}{\eta}\ln\left[-\frac{(\eta + r)(p_0 - \bar{p})}{r(\bar{p} - K)}\right]; 0\right\}.$$

Preuve : nous déduisons t^* de la condition nécessaire et suffisante du programme (6) : $\frac{\partial V(p_t)}{\partial t} = -(\eta + r)\left(p_0 - \bar{p}\right)e^{-(\eta-r)t} - r\left(\bar{p} - K\right)e^{-rt} = 0$. ¥

L'investissement suit la même règle que dans le cas du monopole déterministe, i.e. qu'il est toujours optimal si $p_0 > K$. Mais il se détermine également en fonction d'un seuil exprimé à partir du seuil de l'état régulier $\bar{p}$:

$$p^* = \frac{\eta\bar{p} + rK}{\eta + r} > K \text{ pour } \bar{p} > K.$$

La règle d'investissement résulte d'une stratégie "*now or never*", cohérente avec la propriété d'évolution déterministe des prix des contrats :

- si $p_0 > p^* > K$, la décision d'investir est immédiatement retenue ;
- en revanche si $K < p_0 < p^*$, où $K < \bar{p}$, l'investissement est retardé à une date ultérieure $t^* > 0$ au-delà de laquelle il n'est plus optimal d'investir puisque le coût d'investissement diminue moins rapidement (d'un facteur e^{-rt}) que le flux de trésorerie (d'un facteur $e^{-(\eta+r)t}$) en termes actualisés.

Le projet n'est à nouveau retenu que pour $p_0 > K$. La valeur optimale de l'entreprise $V(p_t)$ dépend de la date optimale de prise de décision t^* :

$$V(p_t) = \begin{cases} 0 \text{ si } p_0 < K\,; \\ p_0 - K \text{ si } p_0 > \bar{p} > K \ (t^* = 0)\,; \\ \frac{\eta}{\eta+r}(\bar{p} - K)\left[\frac{r(\bar{p}-K)}{(\eta+r)(\bar{p}-p_0)}\right]^{r\frac{1}{\eta}} \text{ si } K < p_0 < p^* = \frac{\eta\bar{p}+\rho K}{\eta+\rho} < \bar{p} \\ \qquad (t^* = \frac{1}{\eta}\ln\left[\frac{(\eta+r)(p_0-\bar{p})}{r(\bar{p}-K)}\right] > 0)\,; \\ p_0 - K \text{ si } K \leqslant p^* = \frac{\eta\bar{p}+\rho K}{\eta+\rho} \leqslant p_0 < \bar{p} \ (t^* = 0). \end{cases}$$

Proposition 4 *a. Si le prix du gaz est conforme à un scénario de prix "bas" ($p_0 > \bar{p}$), les CCG sont compétitifs en base. L'entreprise investit dans une centrale nucléaire en fonction de la règle de la VAN et indépendamment du coût marginal en développement du gaz.*

b. Le nucléaire est compétitif en base pour un scénario de prix du gaz "haut" ($p_0 < \bar{p}$). L'entreprise investit pour un prix initial supérieur au coût du capital selon la règle de la VAN. Cet investissement est immédiat si ce prix est supérieur à un prix seuil $p^* = \frac{\eta\bar{p}+\rho K}{\eta+\rho}$, fonction du coût marginal en développement du CCG. Il est retardé à une date ultérieure optimale dans le cas contraire.

ii) Concurrence sur le pool - Le prix de revient est aléatoire ($\sigma \neq 0$ dans (5)) évolue en fonction d'un coût marginal de référence, celui du CCG. Ce coût en développement est une borne supérieure sur le marché spot mais aussi pour les contrats de court terme sur le NETA, les CCG servant la semi-base voire la base.

L'entreprise prend la décision qui vérifie l'équation de Bellman (3), ce qui revient à résoudre l'EDO :

$$\frac{1}{2}\sigma^2 V_{pp}(p_t) + \eta(\bar{p} - p)V_p(p_t) - rV(p_t) = 0, \tag{7}$$

dont la solution se cherche sous la forme : $V(p_t) = Ap_t^{\beta} f(p_t)$. A partir de la condition intérieure $V(0) = 0$, seule la valeur positive de β est prise en considération : $\beta = 1$.

De façon à obtenir la solution finie la plus simple, nous fixons la vitesse d'entrée η des CCG sur le segment de la production en fonction de la volatilité du marché σ et de la compétitivité de cette technologie, exprimée par le coût marginal en développement $\bar{p}$:

$$\eta = \frac{\sigma^2}{2\bar{p}}.$$

Finalement pour $p_t \leqslant \frac{\sigma^2}{2\eta} \equiv \bar{p}$, la solution de cette EDO se récrit (cf. Annexe A) :

$$V(p_t) = Ap_t F(1, 3; \frac{2\eta}{\sigma^2} p_t),$$

où $F(.)$ est une équation de Kummer dont la solution est la série hypergéométrique convergente.

Les conditions aux bornes, de continuité et de dérivabilité, sont récrites respectivement :

$$V(p^*) = Ap^* F(1, 3; \frac{2\eta}{\sigma^2} p^*) = p^* - K \tag{8}$$

(en investissant, l'entreprise reçoit la juste valeur du projet électronucléaire) et :

$$V_p(p^*) = Ap^* F_p(1, 3; \frac{2\eta}{\sigma^2} p^*) + AF(1, 3; \frac{2\eta}{\sigma^2} p^*) = 1 \tag{9}$$

(condition technique d'environnement convexe).

Donc, pour $\bar{p} = \frac{\sigma^2}{2\eta}$, le seuil optimal retenu est égal à (cf. Annexe B) :

$$p^* = \sqrt{\bar{p}K} < \bar{p}.$$

Ce seuil de déclenchement de l'investissement p^* est inférieur à la borne supérieure du prix de revient fixé par le CCG $\bar{p}$. Au-delà de ce seuil p^*, l'entreprise réalise le projet, mais en-deçà elle attend des informations supplémentaires sur le futur.

La valeur de l'équipement électronucléaire est déterminé par la règle d'investissement :

$$V(p_t) = \begin{cases} 0 \text{ si } p_t \leqslant p^* \equiv \sqrt{\bar{p}K} : \bar{p} > p^* > K \, ; \\ \left(-\sigma^2 \frac{K}{p^*} + \sigma^2 + \eta K\right) p_t F(1, 3; \frac{2\eta}{\sigma^2} p_t) \text{ si } \bar{p} > p_t > p^*. \end{cases}$$

Proposition 5 *Si le CCG est l'équipement le plus courant en pointe, il détermine en tendance la borne supérieure du prix de revient $\bar{p}$. L'entreprise réalise le projet nucléaire à partir d'un prix seuil $p^* = \sqrt{\bar{p}K}$ déterminé en fonction de cette borne, même s'il lui reste inférieur.*

Il faut cependant nuancer notre propos et noter que la technologie nucléaire a valeur d'option (e.g. Epaulard et Gallon [2000]). La maîtrise du nucléaire qui permet sa standardisation repose sur une expérience cumulée de 600 années-réacteurs. Arrêter le nucléaire conduit à réduire les termes du choix énergétique dans le futur. La question se pose en termes de compétitivité des CCG, le prix du gaz étant aléatoire, et en termes d'indépendance énergétique.

5 Conclusion

Nous comparons les prix de revient seuils des différents scénarios par rapport celui du scénario 1, cas de monopole en environnement certain. Ce prix seuil est déterminé par le critère de la VAN et il est égal au coût initial du capital : $p^*_{VAN} = K$. Dans les scénarios d'incertitude, le seuil d'investissement p^* est supérieur :

$$p^* = \phi p^*_{VAN}, \text{ avec le multiple de la valeur d'option } \phi > 1.$$

Nous corroborons ce résultat de McDonald et Siegel [1986], Dixit et Pindyck [1994] pour les différents scénarios que nous avons construits pour rendre compte des mutations institutionnelles. L'entreprise investit quand le rendement futur du projet est égal au coût du capital. En incertitude, ce rendement doit compenser la valeur de l'information sur le prix de revient futur. L'entreprise préfère être flexible et décide d'investir en fonction des informations recueillies.

Sur le pool, la valeur de ϕ dépend de la tendance $\bar{\mu}$ et de la volatilité σ de l'activité de l'entreprise (scénario 3) alors qu'elle dépend du coût marginal en développement du gaz $\bar{p}$, la vitesse d'entrée η des CCG dans le secteur de la production étant fixée par rapport à σ (scénario 4). Le seuil d'investissement p^* augmente avec la volatilité σ, mesure du degré de la concurrence dans le secteur. L'accroissement de l'incertitude abaisse d'autant moins l'investissement que l'entreprise est dans une structure concurrentielle. A la limite, l'incertitude n'a plus aucune influence sur l'investissement : une entreprise en concurrence pure et parfaite ne peut pas reporter un projet d'investissement car sinon l'opportunité d'investir serait exercée par un concurrent. L'incertitude a un effet deux fois plus important pour une entreprise dont le pouvoir de marché, mesuré par la différence entre le prix et le coût marginal de production, est supérieur au pouvoir de marché moyen (Guiso et Parigi [1996]). L'effet stratégique abaisse la valeur de ϕ. Or, l'industrie électrique restant soumise aux missions de service public, l'effet du pouvoir de marché est en partie contrecarré par la réglementation du marché, voire totalement dans le cas du nucléaire que nous avons envisagé.

6 Annexes

6.1 Annexe A : Détermination de la solution de l'EDO $V(p) = ApF(1, 3; \frac{2\eta}{\sigma^2}p)$:

Pour simplifier, nous n'écrivons plus ici l'indice temporel des variables. L'entreprise prend la décision vérifiant l'équation de Bellman, ce qui revient à résoudre l'EDO (7) :

$$\frac{1}{2}\sigma^2 V_{pp} + \eta(\bar{p} - p)V_p - rV = 0.$$

La solution de cette EDO se cherche sous la forme : $V(p) = Ap^{\beta} f(p)$, où A et β sont deux constantes telles que $f(p)$ est une solution à l'EDO.

Ecrivons les dérivées partielles :

$$\left\{\begin{array}{l} V_{pp} = Ap^{\beta}f_{pp} + 2A\beta p^{\beta-1}f_p + A\beta(\beta-1)p^{\beta-2}f\,; \\ V_p = Ap^{\beta}f_p + A\beta p^{\beta-1}f. \end{array}\right.$$

L'EDO s'écrit, après avoir simplifié par A :

$$p^{\beta}\left[\frac{1}{2}\sigma^2 f_{pp} + \eta(\bar{p}-p)f_p - (\eta\beta + r)f\right] + p^{\beta-1}\left[\sigma^2\beta f_p + \eta\bar{p}\beta f\right] + p^{\beta-2}\left[\frac{1}{2}\sigma^2\beta(\beta-1)\right] = 0,$$

et conduit au système suivant :

$$\left\{\begin{array}{l} \frac{1}{2}\sigma^2 f_{pp} + \eta(\bar{p}-p)f_p - (\eta\beta + r)f = 0 \\ \sigma^2\beta f_p + \eta\beta\bar{p}f = 0 \\ \frac{1}{2}\sigma^2\beta(\beta-1) = 0 \end{array}\right. \tag{10}$$

Nous pouvons déduire la valeur de β de la troisième équation (10) : $\beta = 0$ ou $\beta = 1$. A partir de la condition aux bornes $V(0) = 0$, seule la valeur positive de β est prise en considération : $\beta = 1$.

La deuxième équation (10) est alors égale à :

$$f_p = -\frac{\eta f}{\sigma^2}.$$

La première équation (10) devient :

$$\frac{1}{2}\sigma^2 f_{pp} - \left[\frac{\eta^2}{\sigma^2}(\bar{p}-p) + \eta + r\right]f = 0.$$

Soit le changement de variable suivant : $x = \frac{2\eta}{\sigma^2}p \Longleftrightarrow p = \frac{\sigma^2}{2\eta}x$. Si $f(p) = g(x)$, nous obtenons les dérivées partielles de f par rapport à p :

$$\left\{\begin{array}{l} f_p = \frac{\partial g(x)}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial p} = g_x\frac{2\eta}{\sigma^2} \\ f_{pp} = \frac{\partial g_x(x)}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial p} = g_{xx}\left(\frac{2\eta}{\sigma^2}\right)^2 \end{array}\right.$$

La première équation (10) se récrit :

$$g_{xx}x\eta + g_x\left(\frac{2\eta}{\sigma^2}\right)\left[-\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)x + \left(\sigma^2\beta + \eta\bar{p}\right)\right] - g\eta\beta = 0,$$

soit en divisant par η :

$$g_{xx}x + g_x\left[-x + \frac{2}{\sigma^2}\left(\sigma^2\beta + \eta\bar{p}\right)\right] - g\beta = 0.$$

Si nous appelons $B = \frac{2}{\sigma^2}\left(\sigma^2\beta + \eta\bar{p}\right) = 2\beta + \frac{2\eta}{\sigma^2}\bar{p}$, alors :

$$g_{xx}x + g_x(-x + B) - g\beta = 0. \tag{11}$$

Cette équation (11) est une équation de Kummer dont la solution est la série hypergéométrique convergente (puisque par définition le taux d'actualisation n'est pas supérieur au taux d'intérêt sans risque, $B - \beta > 0$ et donc la série est convergente pour $|x| \leqslant 1 \iff \left|\frac{2\eta}{\sigma^2}p\right| \leqslant 1$ $\Longrightarrow 0 \leqslant p \leqslant \frac{\sigma^2}{2\eta}$) :

$$F(\beta, B(\beta); x) = 1 + \frac{\beta}{B}x + \frac{\beta(\beta+1)}{B(B+1)}\frac{x^2}{2!} + \frac{\beta(\beta+1)(\beta+2)}{B(B+1)(B+2)}\frac{x^3}{3!} + ...$$

Finalement nous obtenons la solution de l'EDO que nous avons cherché sous la forme $V(p) = Ap^{\beta}f(p)$:

$$V(p) = Ap^{\beta}F(\beta, B; \frac{2\eta}{\sigma^2}p).$$

Avec les conditions posées sur les constantes $\beta = 1$ et $B = 2 + +\frac{2\eta}{\sigma^2}\bar{p}$, cette solution est égale à :

$$V(p) = ApF(1, 2 + \frac{2\eta}{\sigma^2}\bar{p}; \frac{2\eta}{\sigma^2}p).$$

Les conditions du premier et du second ordre nous permettraient de trouver la valeur de la constante A puisque la série hypergéométrique est à termes infinis, mais de façon probablement numérique. Pour expliciter analytiquement une frontière, nous allons poser $B \in \mathbb{N}^*$ et prendre le cas le plus simple :

$$B = 3 \Longrightarrow \frac{2\eta\bar{p}}{\sigma^2} = 1 \Longrightarrow \bar{p} = \frac{\sigma^2}{2\eta}.$$

$\bar{p}$ est la borne supérieure du prix de revient p_t : $0 \leqslant p_t \leqslant \frac{\sigma^2}{2\eta} \equiv \bar{p}$. La vitesse d'entrée η des CCG sur le segment de la production est fixée en fonction de la volatilité du marché σ et de la compétitivité de cette technologie, exprimée par le coût marginal en développement $\bar{p}$.

Donc la solution de l'ODE s'écrit :

$$\boxed{V(p) = ApF(1, 3; \frac{2\eta}{\sigma^2}p)}$$

6.2 Annexe B : le prix de revient seuil p*

- Détermination du prix de revient seuil p* :

Soit $F(1,3;x) = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + ... = 1 + 2!\left[\frac{x^2}{3!} + \frac{x^3}{4!} + ...\right] = 1 + \frac{2!}{x^2}\left[\frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + ...\right]$
$\Longrightarrow F(1,3;x) = 1 + \frac{2}{x^2}\left[e^x - 1 - x - \frac{x^2}{2}\right] = \frac{2}{x^2}[e^x - 1 - x]$.
La fonction de Kummer vérifiant les conditions au bord s'écrit :
$F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = 1 + \frac{2}{\left(\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*\right)^2}\left[e^{\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*} - 1 - \frac{2\eta}{\sigma^2}p^* - \frac{\left(\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*\right)^2}{2}\right] = \frac{\sigma^2}{2\eta^2 p^{*2}}\left[e^{\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*} - 1 - \frac{2\eta}{\sigma^2}p^*\right]$.
Nous dérivons cette fonction par rapport à p pour obtenir :
$F_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = -\frac{\sigma^2}{\eta^2 p^{*3}}\left[e^{\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*} - 1 - \frac{2\eta}{\sigma^2}p^*\right] + \frac{\sigma^2}{2\eta^2 p^{*2}}\left[\frac{2\eta}{\sigma^2}e^{\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*} - \frac{2\eta}{\sigma^2}\right]$
$\Longrightarrow F_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = -\frac{2}{p^*}F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + \frac{1}{\eta p^{*2}}\left[e^{\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*} - 1\right]$

$\Longrightarrow F_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = -\frac{2}{p^*}F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + \frac{1}{\eta p^{*2}}\frac{2\eta\sigma^2}{2\eta\sigma^2}\left[e^{\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*} - 1 - \frac{2\eta}{\sigma^2}p^* + \frac{2\eta}{\sigma^2}p^*\right]$
$\Longrightarrow F_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = -\frac{2}{p^*}F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + \frac{2\eta}{\sigma^2}F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + \frac{2}{\sigma^2 p^*}$
$\Longrightarrow Ap^*F_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = -2AF(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + \frac{2A\eta}{\sigma^2}F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*)p^* + \frac{2A}{\sigma^2}$
$\Longrightarrow Ap^*F_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + AF(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = -AF(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + \frac{2A\eta}{\sigma^2}F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*)p^* + \frac{2A}{\sigma^2} = 1$ (cf. (9)).

En remplaçant $F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*)$ par sa valeur exprimée par la condition de continuité (8) :
$-\frac{p^*-K}{p^*} + \frac{2\eta}{\sigma^2}(p^*-K) + \frac{2A}{\sigma^2} = 1$
$\Longrightarrow \frac{2\eta}{\sigma^2}p^{*2} + \left(\frac{2A}{\sigma^2} - 2 - \frac{2\eta}{\sigma^2}K\right)p^* + K = 0$

$$\boxed{\frac{2\eta}{\sigma^2}p^{*2} + \left(\frac{2A}{\sigma^2} - 2 - \frac{2\eta}{\sigma^2}K\right)p^* + K = 0} \qquad (12)$$

- Détermination de la constante A :

Pour trouver la valeur de la constante A en fonction de p^*, nous allons dériver la condition de dérivabilité (9) :

$F_{pp}(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = \frac{2}{p^{*2}}F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) - \frac{2}{p^*}F_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + \frac{2\eta}{\sigma^2}F_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) - \frac{2}{\sigma^2 p^{*2}}$.
Sachant que $\frac{\partial}{\partial p}\left[Ap^*F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*)\right] = Ap^*F_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + AF(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = 1$ (cf. (8)),
la dérivée seconde est égale à 0 :
$\frac{\partial^2}{\partial p^2}\left[Ap^*F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*)\right] = Ap^*F_{pp}(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + 2AF_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = 0$
$\Longrightarrow Ap^*F_{pp}(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = A\frac{2}{p^*}F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) - 2AF_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + Ap^*\frac{2\eta}{\sigma^2}F_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) - \frac{2A}{\sigma^2 p^*}$
$\Longrightarrow Ap^*F_{pp}(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + 2AF_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) = \frac{2A}{p^*}F(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) + Ap^*\frac{2\eta}{\sigma^2}F_p(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*) - \frac{2A}{\sigma^2 p^*} = 0$
$\Longrightarrow 2\frac{p^*-K}{p^{*2}} + \frac{2\eta}{\sigma^2}\left(1 - AF(1,3;\frac{2\eta}{\sigma^2}p^*)\right) - \frac{2A}{\sigma^2 p^*} = 0$ (cf. (8))
$\Longrightarrow 2\frac{p^*-K}{p^{*2}} + \frac{2\eta}{\sigma^2}\left(1 - \frac{p^*-K}{p^*}\right) - \frac{2A}{\sigma^2 p^*} = 0$
$\Longrightarrow A = \sigma^2 p^*\left[\frac{p^*-K}{p^{*2}} + \frac{\eta}{\sigma^2}\left(1 - \frac{p^*-K}{p^*}\right)\right]$
$\Longrightarrow A = \left[\sigma^2 - \sigma^2\frac{K}{p^*} + \eta p^* - \eta p^* + \eta K\right]$

$$\boxed{A = -\sigma^2\frac{K}{p^*} + \sigma^2 + \eta K} \qquad (13)$$

En substituant A par sa valeur (13) dans l'expression (12), nous obtenons le prix de revient de déclenchement de l'investissement p^* :

$$\boxed{p^* = \sqrt{\bar{p}K}}$$

Références

[1] Averch H., Johnson L.L. [1962], "Behavior of the firm under regulatory constraint", *American Economic Review* 52 (5), p.1053-1069.

[2] Bergougnoux J. [1987], "Les leçons de l'expérience du financement du programme électronucléaire français", Chapitre 8 in Terny G., Prud'homme R. (eds.), *Le financement des équipements publics de demain.*

[3] 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.

[4] Dixit A.K. [1992], "Investment and hysteresis", *Journal of Economic Perspectives* 6(1), p. 107-132.

[5] Dixit A.K., Pindyck R.S. [1994], *Investment under uncertainty*, Princeton, Princeton University Press.

[6] Epaulard A., Gallon S. [2000], "The prospects of nuclear power in Europe's deregulated energy markets using realoption theory to assess nuclear investment value", *Working Paper for the IAEE European Energy Conference.*

[7] Guiso L., Parigi G. [1999], "Investment and demand uncertainty", *The Quarterly Journal of Economics* 114 (1), p. 185-227.

[8] Henry C. [1997], "Concurrence et services publics dans l'Union Européenne", *Revue de l'Energie* 486, Service public et secteur de l'énergie : problématique, enjeux et politiques, p. 187-198.

[9] Lester R.K., McCabe M.J. [1993], "The effect of industrial structure on learning by doing in nuclear plant power operation", *RAND Journal of Economics* 24 (3), p. 418-438.

[10] McDonald R., Siegel D. [1986], "The value of waiting to invest", *The Quarterly Journal of Economics* CI (3), p. 707-727.

[11] Modigliani F., Miller M.H. [1958], "The cost of capital, corporation finance and the theory of investment", *American Economic Journal* 48 (3), p. 261-297.

[12] Pindyck R.S. [1993], "Investments under uncertain cost", *Journal of Financial Economics* 34, p. 53-76.

[13] Pindyck R.S. [1991], "Irreversibility, uncertainty and investment", *Journal of Economic Litterature* XXIX (3), p. 1110-1148.

[14] Smeers Y. [1997], "Evaluation des investissements électriques vers une évolution des méthodes", *Revue de l'Energie* 492, Compétitivité de l'énergie nucléaire, p. 674-682.

[15] Trigeorgis L. [1996], *Real options*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.

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