

**R&D ET INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES
AU SEIN D'UN MARCHÉ MONOPOLISTIQUE
D'UNE RESSOURCE NON RENOUVELABLE**

Jean-Christophe POUDOU

Juin 1997

(1ère version Mai 1996)

Jean-Christophe POUDOU : Docteur, Maître de Conférences Montpellier 1

Centre de Recherche en Economie et Droit de l'ENergie

UNIVERSITE DE MONTPELLIER I
U.F.R. Faculté des Sciences Economiques
Espace Richter Avenue de la Mer B.P. 9606
34054 MONTPELLIER Cedex 1
Tel (33) 67 15 84 04 - Fax (33) 67 15 84 78
E-mail : creden@sc.univ-montp1.fr

R&D ET INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES AU SEIN D'UN MARCHE MONOPOLISTIQUE D'UNE RESSOURCE NON RENOUVELABLE

Jean-Christophe Poudou

RESUME

Ce document présente une analyse théorique du comportement de R&D et d'innovation technologique d'une " firme minière " en situation de monopole. Deux types d'innovations de processus d'extraction y sont proposés. D'une part la R&D débouchera sur des innovations "réductrices de coût ", c'est-à-dire qui permettent de compresser le coût unitaire par mètre foré. D'autre part, l'innovation impliquera " l'accessibilité " à des réserves jusqu'alors probables ainsi qu'une hausse du coût unitaire d'exploitation. Ces deux comportements d'innovations produisent des effets opposés en matière d'épuisement de la ressource, mais leur impact sur le prix d'offre est voisin. Enfin le choix technologique du monopole minier (entre les deux modalités proposées) n'est pas neutre du point de vue du bien-être collectif, les innovations "d'accessibilité " pouvant être, sous certaines conditions, considérées comme meilleures.

Mots clefs : Ressources épuisables, R&D, théorie du Monopole.

ABSTRACT

This working paper displays a theoretic analysis of the R&D and technological innovation behavior of a monopolistic " mining firm ". Two types of extraction process innovations are proposed. First R&D is assumed to lead to " cost reducing " innovations, i.e. that allow unitary per drilled meter cost compression. For the second type, innovation is assumed to imply " accessibility " to probable reserves and in the same time an increase in the unitary exploitation cost. These two innovation behaviors yield opposite effects in the matter of resource exhaustion but quite the same effects on the resource price. Finally technological choice of the mining monopoly (between the two types above) is not welfare neutral, under particular assumptions, " accessibility " innovations can indeed be seen as better.

Key words : Exhaustible resources, R&D, Monopoly theory.

Remerciements : Je tiens à exprimer tous mes remerciements Jacques PERCEBOIS (Université de Montpellier I) pour le temps consacré à la lecture des premières épreuves et pour les conseils et observations qui m'ont aidé dans la rédaction du document final. Je remercie également Bernard Sanchez, François Mirabel et Lédy Muluala (CREDEN) pour leurs remarques constructives.

Les opinions présentées dans ce document ne sauraient engager la responsabilité des institutions auxquelles appartiennent les auteurs.

R&D et Innovations Technologiques au sein d'un Marché Monopolistique d'une Ressource Non Renouvelable

En économie des ressources non renouvelables, la problématique de l'innovation est largement focalisée sur la pertinence tactique et stratégique d'une technologie "backstop" de substitution (voir HOEL M. (1978), DASGUPTA P., STIGLITZ J. (1986), HUNG N.M., QUYEN N.V. (1993)). Cependant, et notamment au sein de l'industrie pétrolière mondiale, les praticiens insistent sur le caractère central de la mutation technologique de l'appareil productif pour expliquer l'évolution des rapports de forces du côté offre. Peu d'économistes ont tenté (voir toutefois FARZIN Y. (1992)) de déceler les fondements des *comportements de R&D et d'innovation de processus d'extraction* au sein des marchés de ressources non renouvelables. Nous nous proposons ici de jeter les bases d'une telle analyse.

A la lumière des analyses factuelles et empiriques sur le sujet (cf. B. BOURGEOIS B. et J.-M. MARTIN (1991) ou J.L. KARNIK et J. MASSERON (1995) par exemple), nous pouvons proposer une *typologie binaire* pour les innovations de processus d'extraction.

De façon traditionnelle, les innovations technologiques de processus de production sont censées réduire le coût de production (*cost reducing process*). Dans la littérature générale (cf. TIROLE J. (1993) pour un survol), les effets de ces innovations sont largement étudiées selon la liaison qu'elles entretiennent avec la structure de l'offre. Au sein des industries minières on retrouve bien évidemment ce type de mutation technologique (cf. tableau 1). D'un point de vue général nous nommerons *innovations "réductrice de coût"* toute innovation qui induit une baisse du coût marginal d'exploitation ou d'extraction. Dans la section I nous analyserons la R&D et l'innovation de ce type de technologie par une firme minière.

Plus spécifique au caractère épuisable de la ressource, un certain nombre de technologies innovées au sein des industries minières sont destinées à valoriser un patrimoine minier inaccessible, c'est à dire permettre d'accéder à des réserves probables. Nous dénommerons les inventions qui obéissent à cette définition d'invention "améliorant l'accessibilité des réserves" ou par abus de langage "d'accessibilité".

Tableau 1. Impact des nouvelles technologies sur le coût moyen de production du baril de pétrole brut (\$/bl)

Technologies	à	offshore			Récupération assistée par injection			
	terre	conventionnelle	marginale	profonde	thermique	CO ₂	polymères	tensio-actifs
Coût moyen	8	12	18	30	15	20	17	30

D'après B. BOURGEOIS B. et J.-M. MARTIN (1991).

Nous nous centrerons ici sur les inventions d'accessibilité qui supposent de plus un accroissement du coût unitaire par mètre foré. Sur des bases réalistes, on peut supposer que ce type d'invention décrit un ensemble d'opportunités technologiques du fait même de la conceptualisation des réserves. Toute réserve de ressource non renouvelable est définie, on le sait par le diagramme de McKelvey (cf. par exemple PEARCE D., TURNER K. (1990)), suivant un concept d'accessibilité relié à la fois au coût de faisabilité économique et au degré de qualité géologique des gisements. Plus un gisement est difficile d'accès, plus sa rentabilité est faible, plus il est techniquement et géologiquement ardu de l'exploiter. C'est d'ailleurs sur cette base empirique que les principales modifications de la vision Hotellinienne de l'économie des ressources non renouvelables ont été élaborées (prises en compte des effets de stocks, de l'incertitude géologique, de l'exploration etc...). Dans notre esprit une invention d'accessibilité permet lors de son innovation de contrecarrer le déterminisme géologique en ce sens que les réserves (connues) identifiées comme inexploitable avant l'innovation deviennent productibles avec la nouvelle technologie au prix d'un accroissement du coût unitaire d'extraction. Dans l'histoire des techniques de forages, notamment dans l'industrie pétrolière, on retrouve ce genre d'innovation. La récupération assistée des hydrocarbures (R.A.H.) correspond exactement à la définition que nous avons donnée d'une innovation d'accessibilité. Cette technique consiste à stimuler le gisement par injections d'eau, de gaz ou par processus thermiques. Par ce biais des nappes inaccessibles le deviennent au détriment d'un surplus de coût variable de production. Le Tableau 2¹ nous donne une idée de l'importance d'une telle innovation lorsqu'on regarde les taux de récupération possibles (jusqu'à 75 % avec la méthode "Eau + tensio actif").

¹Pour un exposé plus détaillé à la fois des techniques de R.A.H., et des effets sur le taux de récupération et sur les coûts variables de production, on peut consulter TAKIN M. (1983). Dans l'ensemble ses sources corroborent celles du tableau 2.

Tableau 2. Méthode de récupération Assistée du pétrole brut

Méthodes	Taux de récupération (%)		Coût du baril additionnel (\$/b-1981)
	Avant	Après	
Injection d'eau	10 à 20	30 à 50	15
Injection d'eau et gaz	30	40	1 à 15
Injection de vapeur	10	60	10 à 35
Combustion <i>in-situ</i>	40	70	10 à 35
Gaz carbon. miscible	45	70	15 à 35
Hydrocarb. miscibles	45	75	20 à 35
Eau + tension actif	45	75	15 à 35
Eau + polymères	30	40	15 à 35

in MASSERON J. (1991), p. 119.

Bien évidemment il est possible d'affiner la typologie binaire proposée, afin de donner une description plus réaliste des technologies d'extractions mises en oeuvre par les firmes minières exploitantes. Toutefois notre propos ici étant de donner une analyse économique théorique de l'innovation minière, la typologie binaire proposée, si elle peut paraître un peu pauvre du point de vue réaliste, a tout de même le mérite de scinder en deux grandes catégories les technologies réalisables et par là couvrir une large part du "champ des possibles".

Le modèle de base qui va soutenir nos développements participe d'une logique de marché partiel d'une ressource non renouvelable. La demande marshallienne est connue sous sa forme inverse soit $p(q)$, où p est le prix de cette ressource et q les quantités consommées. Elle est de plus supposée normale c'est-à-dire que : $\forall q > 0, p'(q) < 0$. Du côté offre, une seule firme minière en monopole contrôle la production de la ressource. Elle détient des droits d'exploitation inaliénables sur un gisement de taille connue (S_0 ou S^0). La recette du monopole se note de façon traditionnelle $R(q) = p(q)q$, alors que la recette marginale s'écrit $m(q) = R'(q) = p'(q)q + p(q) > 0$. La technologie d'extraction est supposée linéaire, elle est donc représentée par des coûts d'extraction affines : $c(q) = cq > 0$. Ainsi le profit instantané du monopole s'écrit $R(q) - cq$. On suppose m monotone décroissante sur R_+ , sa réciproque m^{-1} existe alors. Si l'on note $h(q) = -p(q)/(qp'(q))$, l'élasticité prix de la demande, on sait que $m(q)$ ne sera positive que si $h(q) > 1$. De plus la condition $h'(q) \leq 0$ est suffisante pour assurer la décroissance de la recette marginale et donc la concavité du profit instantané. Notons $w(q) = R(q) - m(q)q$, le surplus net du monopole, fonction positive, monotone croissante de q , car $w'(q) = -m'(q)q > 0$. Enfin la firme

monopolistique est supposée avoir breveté une technologie "backstop" lui accordant la possibilité de produire un bien non épuisable parfaitement substituable à la ressource à un coût unitaire \bar{p} . Par le biais de ce brevet notre monopole détient un moyen de conserver une position monopolistique de long terme : nous le qualifierons de monopole complet, par opposition à un monopole menacé ou simplement pur (cf. HOEL M. (1978), (1983)). La production d'équilibre monopolistique à partir de cette technologie sera notée q_∞ et vérifiera $m(q_\infty) = \bar{p}$ (recette marginale égale coût marginal).

En ce qui concerne l'activité de R&D, elle entraîne un ensemble de coûts regroupés dans ce que l'on nomme les dépenses de recherche, de développement et de démonstration (RD&D) et investissements immatériels (en personnel notamment) supportés lorsque l'activité d'invention est lancée. L'invention devient alors une activité *productive* à part entière au même titre que l'extraction des ressources. Cette activité est donc soumise à une technologie d'invention qui permet de relier quantitativement des *inputs* à des *outputs* c'est-à-dire les inventions. Plusieurs approches sont envisageables¹, nous retiendrons ici celle de HUNG N.M., QUYEN N.V. (1993) qui proposent une technologie *déterministe* (sans incertitude) assez simple. Ils supposent que la dépense de R&D est un coût fixe irrécupérable K , ou encore l'enveloppe budgétaire nécessaire pour lancer un programme de R&D et inventer en date choisie. Tout ce passe comme si les chercheurs avaient, à tout moment, les moyens techniques de réaliser les inventions, mais que seul le commanditaire (l'innovateur) pouvait déclencher leur éclosion en effectuant une dépense en R&D. De ce fait :

"parce qu'un délai dans le démarrage du programme de R&D va réduire ses coûts actualisés, il est seulement optimal d'encourir la dépense en capital K exactement à la date à laquelle la backstop (ou en général l'invention) est désirée" in HUNG N.M., QUYEN N.V. (1993)², p. 48.

¹ Certaines cherchent à mettre à jour des *indicateurs et des mesures* de la performance de l'activité de recherche. FORAY D., LE BAS C. (1991) donnent un survol de ces approches qui s'avèrent être le plus souvent de nature empirique. D'autres approches plus théoriques, tentent d'appréhender la technologie d'invention (essentiellement "réductrice de coût") à partir des effets des dépenses de RD&D, sur la technologie de production finale. Ainsi, certains travaux stipulent qu'il existe en théorie un lien fonctionnel entre le coût unitaire de production du produit (ou de la ressource) et les dépenses de R&D. DASGUPTA P., STIGLITZ J. (1980) proposent une technologie d'invention où le coût unitaire de production est une fonction décroissante (convexe) de l'activité de R&D. Il est donc de plus en plus coûteux en R&D d'obtenir de nouvelles améliorations technologiques (baisse de coût) au travers des innovations. Cette approche suppose toutefois que les décisions d'invention se font sur des bases statiques. Par la suite, d'autres auteurs (cf. REINGANUM J. (1989)) ont mis l'accent sur la nature intimement dynamique des décisions d'invention et d'innovation. Suivant cette approche, les technologies d'invention relient les dates auxquelles ces inventions apparaissent et le montant de dépenses de recherche. Ces dernières sont alors supposées irrécouvrables (coûts fixes) c'est-à-dire non fonction du résultat technique de l'invention sur les coûts unitaires. Par abus de langage, on peut qualifier ces technologies de calendaires.

²Dans le texte : "Because a delay in starting the R&D program will reduce its discounted costs, it is only optimal to incur the capital expenditure K exactly at the time the backstop is needed".

HUNG N.M., QUYEN N.V. (1993) précisent que l'on peut aussi interpréter cette dépense comme étant un coût soit d'installation ou de diffusion de l'innovation, soit d'acquisition du brevet associé à l'invention. Pour toute date d'invention, le monopole devra s'acquitter d'un montant de dépense de R&D égal à K , mais c'est la perception actualisée de cette dépense $e^{-rt} K$ qui modulera sa décision d'invention.

Dans la section I nous allons traiter du comportement de R&D du monopole complet lorsqu'il envisage d'innover une technologie qui réduit son coût unitaire d'extraction, c'est-à-dire selon notre terminologie une technologie "réductrice de coût". Dans la section II nous traiterons d'innovations alternatives qui permettent, au détriment d'une hausse du coût unitaire d'extraction, d'accéder à des réserves soit irrécupérables soit probables, c'est-à-dire des technologies dite "d'accessibilité". Enfin la section III examinera les effets sur le bien-être collectif du choix technologique du monopole minier.

I Comportement d'Innovation du monopole complet dans le cadre d'une Invention "réductrice de coût"

On qualifie une technologie nouvelle de "réductrice de coût" du fait qu'elle permet d'extraire la ressource à un coût unitaire et marginal moindre (\underline{c}) que la technologie disponible au temps initial ($t=0$), dont le coût est de $\bar{c} > \underline{c}$. Pour écarter la solution triviale où la ressource naturelle n'est pas exploitée, on posera $\bar{p} > \bar{c} > \underline{c}$. L'invention "réductrice de coût" est disponible en une date τ si la dépense de R&D actualisée $K e^{-rt}$ est supportée en cette date, selon la technologie de R&D en vigueur (cf. *supra*). Nous allons ici analyser tout d'abord comment le monopoleur se comporte en matière de R&D et d'innovation, notamment par le choix de la date d'invention, puis nous verrons les impacts de cette innovation, si elle a lieu, sur la gestion du gisement de ressource.

1.1 Politique de R&D et d'innovation du monopole complet

Le monopole choisit un plan d'extraction $\{q_t\}_{t \geq 0}$, une date d'invention t et une date d'innovation t^i ainsi qu'une date d'épuisement de ses réserves T , qui lui permettent de maximiser le profit total actualisé net des coûts de R&D. Après épuisement de la ressource, la production à partir de la backstop est située au niveau q_∞ tel que recette marginale et coût marginal, \bar{p} , soient égaux. Le programme du monopole s'écrit :

$$\max_{(q, T, t, t^i)} \int_0^T e^{-rt} [R(q_t) - c_t q_t] dt + e^{-rt} \frac{w(q_\infty)}{r} - K e^{-rt} \quad (1)$$

s/c $q_t \geq 0, T \geq t^i \geq t \geq 0$

$$\dot{S}_t = \frac{dS_t}{dt} = -q_t, S_t = S_0 \text{ en } t = 0 \quad (2)$$

et

$$\begin{cases} c_t = \bar{c}, & \forall t < t^i \\ c_t = \underline{c} < \bar{c}, & \forall t \geq t^i \end{cases} \quad (3)$$

Dans ce problème on peut *a priori* scinder la période d'extraction en trois phases :

- une période pré-invention durant laquelle la firme extrait un certain montant de ressource $S^1 = \int_0^t q_t dt$, à un coût unitaire \bar{c} ,

- une seconde période intermédiaire (post-invention et pré-innovation) durant laquelle la firme extrait un certain montant de ressource $S^2 = \int_t^{t^i} q_t dt$, à un coût unitaire \bar{c} ,

- une période post-innovation au cours de laquelle la ressource restante $S_0 - (S^1 + S^2)$, au nouveau coût marginal $\underline{c} < \bar{c}$.

Une fois déterminées, les dates t, t^i, T et les niveaux des réserves à extraire, les règles d'exploitation des ressources dans les trois phases seront conformes au principe d'arbitrage de Hotelling¹ pour un monopole (cf. STIGLITZ J. (1976)), c'est-à-dire à la constance de la recette marginale nette actualisée. Ainsi quelle que soit la phase dans laquelle on se situera, l'extraction optimale, notée q_t^* , du monopoleur obéira aux relations :

$$\forall t \in [0, T], \forall j = a, i, p, m(q_t^*) - c_t = I^j e^{rt} \quad (4)$$

$$S^1 = \int_0^t q_t^* dt, \quad (5.a)$$

$$S^2 = \int_t^{t^i} q_t^* dt \quad (5.b)$$

où I^a, I^i, I^p sont respectivement les rentes de raretés actualisées dans les trois phases pré-invention, intermédiaire et post-innovation. Le problème de décision du monopole est alors de déterminer les niveaux optimaux t^*, t^{i*}, T^*, S^{1*} et S^{2*} , qui en outre obéissent aux relations (4) et (5). On peut alors récrire le programme ci-dessus sous la forme condensée suivante :

¹La détermination du principe d'arbitrage de Hotelling par l'application du principe du maximum de Pontryagin est désormais classique, cf. par exemple, HUNG N.M., QUYEN N.V. (1993)

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{s^1, s^2, t, t^i, T} \left[\Pi(S^1, 0, t; \bar{c}) + \Pi(S^2, t, t^i; \bar{c}) + \Pi(S_0 - S^1 - S^2, t^i, T; \underline{c}) + e^{-rT} \frac{w(q_\infty)}{r} - K e^{-rt} \right] \\ s/c \\ S_0 - S^1 - S^2 \geq 0, (S^1, S^2) \geq 0, t \geq 0, t^i \geq 0, T - t^i \geq 0, t^i - t \geq 0 \end{array} \right. \quad (6)$$

avec la forme générale (où \mathbf{S} est le stock générique) :

$$\Pi(\Sigma, \mathbf{q}, \mathbf{q}'; c) = \int_q^{q'} e^{-rt} [R(q_t) - cq_t] dt \quad s/c \quad \Sigma = \int_q^{q'} q_t dt, \mathbf{q} \leq t \leq \mathbf{q}' \quad (7)$$

Le Lagrangien du problème s'écrit :

$$\begin{aligned} L = & \Pi(S^1, 0, t; \bar{c}) + \Pi(S^2, t, t^i; \bar{c}) + \Pi(S_0 - S^1 - S^2, t^i, T; \underline{c}) + e^{-rT} \frac{w(q_\infty)}{r} - K e^{-rt} + \\ & + \mathbf{m}(S_0 - S^1 - S^2) + \mathbf{g}(T - t^i) + \mathbf{d}(t^i - t) \end{aligned} \quad (8)$$

Les variables non négatives \mathbf{m} , \mathbf{g} et \mathbf{d} sont des multiplicateurs de Kuhn-Tucker sur, respectivement, la contrainte de stock $S_0 - S^1 - S^2 \geq 0$, la contrainte de dates $T - t^i \geq 0$ et celle $t^i - t \geq 0$. On peut voir que ce programme non linéaire est concave¹ en les variables de décisions (S^1 , S^2 , t , t^i , T), les conditions de premier ordre seront donc suffisantes pour assurer l'optimalité des solutions. Ces conditions s'écrivent :

$$S^1 \left[\Pi_1(S^1, 0, t^*; \bar{c}) - \Pi_1(S_0 - S^1 - S^{2*}, t^{i*}, T^*; \underline{c}) - \mathbf{m}^* \right] = 0 \quad (9.a)$$

$$\Pi_1(S^1, 0, t^*; \bar{c}) - \Pi_1(S_0 - S^1 - S^{2*}, t^{i*}, T^*; \underline{c}) - \mathbf{m}^* \leq 0 \quad (9.b)$$

$$S^{2*} \left[\Pi_1(S^{2*}, t^*, t^{i*}; \bar{c}) - \Pi_1(S_0 - S^1 - S^{2*}, t^{i*}, T^*; \underline{c}) - \mathbf{m}^* \right] = 0 \quad (10.a)$$

$$\Pi_1(S^{2*}, t^*, t^{i*}; \bar{c}) - \Pi_1(S_0 - S^1 - S^{2*}, t^{i*}, T^*; \underline{c}) - \mathbf{m}^* \leq 0 \quad (10.b)$$

$$t^* \left[\Pi_3(S^1, 0, t^*; \bar{c}) + \Pi_2(S^{2*}, t^*, t^{i*}; \bar{c}) + rK e^{-rt^*} - \mathbf{d}^* \right] = 0 \quad (11.a)$$

$$\Pi_3(S^1, 0, t^*; \bar{c}) + \Pi_2(S^{2*}, t^*, t^{i*}; \bar{c}) + rK e^{-rt^*} - \mathbf{d}^* \leq 0 \quad (11.b)$$

$$\Pi_3(S^{2*}, t^*, t^{i*}; \bar{c}) + \Pi_2(S_0 - S^1 - S^{2*}, t^{i*}, T^*; \underline{c}) - \mathbf{g}^* + \mathbf{d}^* = 0 \quad (12)$$

$$\Pi_3(S_0 - S^1 - S^{2*}, t^{i*}, T^*; \underline{c}) - e^{-rT^*} w(q_\infty) + \mathbf{g}^* = 0 \quad (13)$$

$$\mathbf{m}^*(S_0 - S^1 - S^{2*}) = 0 \quad (14)$$

$$\mathbf{g}^*(T^* - t^{i*}) = 0 \quad (15)$$

$$\mathbf{d}^*(t^{i*} - t^*) = 0 \quad (16)$$

où P_i , $i=1,2,3$ représente la dérivée de P par rapport à son i -ème argument.

¹La preuve de la concavité en S du programme est liée à l'hypothèse de concavité du profit instantané du monopole. La concavité en τ , τ^i et en T est immédiate.

Les notations P_i sont les gains marginaux en profit réalisés par tout accroissement des réserves. Le long de la trajectoire optimale ces gains marginaux sont égaux aux rentes de rareté actualisées des réserves disponibles¹. On peut donc exprimer (9.a.), (9.b.), (10.a) et (10.b) en fonction des rentes de rareté optimales I^a, I^i, I^p :

$$S^{1*} [I^{a*} - I^{p*} - \underline{m}^*] = 0 \quad (17.a)$$

$$I^{a*} - I^{p*} - \underline{m}^* \leq 0 \quad (17.b)$$

$$S^{2*} [I^{i*} - I^{p*} - \underline{m}^*] = 0 \quad (18.a)$$

$$I^{i*} - I^{p*} - \underline{m}^* \leq 0 \quad (18.b)$$

De même on peut récrire les relations (11) à (13), (cf. annexe A pour les détails) :

$$\underline{t}^* \left[e^{-r\underline{t}^*} (w(a^{1*}) - w(b^{1*}) + rK) - \underline{d}^* \right] = 0 \quad (19.a)$$

$$e^{-r\underline{t}^*} (w(a^{1*}) - w(b^{1*}) + rK) - \underline{d}^* \leq 0 \quad (19.b)$$

$$e^{-r\underline{t}^{i*}} (w(a^{2*}) - w(b^{2*})) - \underline{g}^* + \underline{d}^* = 0 \quad (20)$$

$$e^{-r\underline{t}^*} [w(q_{T^*}^*) - w(q_\infty)] + \underline{g}^* = 0 \quad (21)$$

où $w(q) = R(q) - m(q)q$ est le surplus net instantané du monopoleur, a^{1*} la limite à gauche de q_t^* au point $t = \underline{t}^*$, b^{1*} la limite à droite de q_t^* au point $t = \underline{t}^*$, a^{2*} la limite à gauche de q_t^* au point $t = \underline{t}^{i*}$, et b^{2*} la limite à droite de q_t^* au point $t = \underline{t}^{i*}$, soit d'après (4) :

$$a^{1*} = m^{-1}(I^a e^{r\underline{t}^*} + \bar{c}), b^{1*} = m^{-1}(I^i e^{r\underline{t}^*} + \bar{c}) \quad (22)$$

$$a^{2*} = m^{-1}(I^i e^{r\underline{t}^{i*}} + \bar{c}), b^{2*} = m^{-1}(I^p e^{r\underline{t}^{i*}} + \underline{c}) \quad (23)$$

De la discussion des conditions (17) à (21) et après élimination des points contradictoires émergent deux solutions possibles $(\underline{t}, \underline{t}^i, S^1, S^2, T) = (0, 0, 0, 0, T_1)$ et $(\underline{t}, \underline{t}^i, S^1, S^2, T) = (\underline{t}, \underline{t}, S_1^1, 0, T_1)$, où $T_1 = \ln((\bar{p} - \underline{c})/I^p)/r$ et la date \hat{t} est solution de l'équation (avec $I^a = I^p$):

$$w(a^{1*}) - w(b^{2*}) + rK = 0 \quad (24)$$

Pour ces deux solutions il n'existe pas de brevet dormant c'est-à-dire que l'innovation et l'invention sont synchronisées. La première solution suppose une innovation immédiate alors que la seconde présente une innovation retardée. La solution optimale de ce programme résulte de la comparaison des deux solutions potentielles relativement au

¹Cela correspond à un résultat connu de contrôle optimal (cf HELMER J.-Y. (1972), p. 106). Si V est la fonction objectif, x l'état et I la variable adjointe à l'état x , alors, sur la trajectoire optimale x^* , $dV(x^*)/dx = I$.

niveau de profit total actualisé qu'elles procurent et au niveau de profit réalisable sans innover.

(i) Innovation immédiate

Les conditions pour que la solution $(t, t^i, S^1, S^2, T) = (0, 0, 0, 0, T_1)$ soit optimale s'écrivent :

$$I^a \leq I^p \quad (25.a)$$

$$w(a^{1*}) - w(b^{2*}) + rK \leq 0 \quad (25.b)$$

$$w(q_{T_1}^*) = w(q_\infty) \quad (25.c)$$

Le monopole innovera immédiatement la technologie "réductrice de coût" si d'une part il peut, grâce à cette technologie nouvelle, dégager une rente actualisée plus forte qu'avec l'ancienne technologie (relation (25.a)), et d'autre part (relation 25.b), si le gain en surplus net du producteur réalisé en innovant dès $t=0$, n'est pas en dessous du coût d'un délai marginal de cette invention (rK). De plus la production en date d'épuisement doit correspondre à l'output de longue période réalisé en monopole à partir de la technologie backstop. L'interprétation de (25.b.) est subtile. En effet, on peut s'apercevoir que $w(a^{1*})$ et $w(b^{2*})$ sont les surplus nets initiaux ($t=0$) réalisables avec, respectivement, la technologie \bar{c} , et la technologie nouvelle \underline{c} , soit $w(a^{1*}) = w(q_0^*(\bar{c}))$ et $w(b^{2*}) = w(q_0^*(\underline{c}))$. L'expression (25.b) signifie aussi que l'innovation sera réalisée immédiatement si le profit total actualisé net de la dépense de R&D, issu de l'extraction de la ressource à l'aide de la technologie \underline{c} , est au moins égal au profit total actualisé réalisable par l'extraction de la ressource à l'aide de l'ancienne technologie \bar{c} . En effet (cf. annexe A) si q_t^* obéit au principe d'arbitrage de Hotelling, soit la constance de la recette marginale actualisée¹ sur la période d'extraction d'un gisement, alors :

$$p(S_0, c) \equiv \Pi(S_0, 0, T(c); c) + e^{-rT(c)} \frac{w(q_\infty)}{r} = \frac{w(q_0^*(c))}{r} \quad (26)$$

où $q_0^*(c)$ est le niveau d'extraction initial et $T(c)$ la date d'épuisement du gisement lorsque la production s'effectue à partir d'une technologie quelconque c . Suivant (26), on peut récrire (25.b) :

$$p(S_0, \underline{c}) - p(S_0, \bar{c}) = \frac{w(q_0^*(\underline{c}))}{r} - \frac{w(q_0^*(\bar{c}))}{r} \geq K \quad (27)$$

$p(S_0, \bar{c})$ est donc le profit total actualisé optimal réalisable si l'on n'innove jamais, c'est-à-dire si l'on extrait toute la ressource S_0 avec la technologie \bar{c} . De même $p(S_0, \underline{c})$ est le profit total actualisé optimal réalisable (net coûts de R&D) si le monopole innove immédiatement, c'est-à-dire si l'on extrait toute la ressource S_0 avec la technologie \underline{c} . Il

¹Bien entendu si les coûts d'extraction sont indépendants du niveau de réserves *in situ*.

est alors certain qu'un niveau trop élevé de dépense de R&D requise peut violer (27) et induire un retard dans l'innovation. Ainsi pour un stock initial de ressource S_0 donné, il existe un niveau critique de dépense (requis pour découvrir l'invention) qui sature (27) soit :

$$w(q_0^*(\underline{c})) - w(q_0^*(\bar{c})) = r \bar{K} \quad (28)$$

Le niveau \bar{K} de dépense de R&D est celui pour lequel le profit total actualisé optimal réalisable avec "l'ancienne technologie" est au même niveau que celui réalisable avec la "nouvelle", une fois déduits les coûts de recherche. Pour ce niveau de dépense, le monopole est indifférent quant au choix de sa technologie. Seuls des arguments extra-économiques (par exemple, la quête d'un certain modernisme ou le besoin de financer une activité de recherche pour acquérir du savoir-faire *etc.*) vont influencer la décision d'innovation. Pour S_0 donné, si K est au dessus de \bar{K} , la condition (27) sera violée et la solution $t^*=0$ ne sera pas admissible.

La solution qui consiste à innover immédiatement la technologie "réductrice de coût" se traduit par une trajectoire de prix (et donc d'extraction) continue. Sur cette trajectoire optimale, le prix initial est fondé sur le coût marginal \underline{c} , c'est-à-dire qu'il se situe à un niveau plus bas qu'avec l'ancienne technologie \bar{c} . La dépense de R&D $K < \bar{K}$ est déboursée dès $t=0$. Plus cette dépense est faible ($K \searrow 0^+$) plus le profit total actualisé est élevé. En effet, à partir de l'équation (26), on constate que la variation du profit total actualisé net par rapport à la dépense de R&D s'écrit :

$$\frac{d[\mathbf{p}(S_0, \underline{c}) - K]}{dK} = -1 < 0$$

Le profit net des coûts de R&D est invariant en K , ce qui implique qu'il est préférable pour le monopole que la dépense requise de R&D soit d'une part en dessous du niveau critique \bar{K} et d'autre part la plus faible possible. Cependant, le montant brut de la dépense requise de R&D n'est pas contrôlé par le décideur, c'est un *paramètre* de décision. Il se peut donc que les caractéristiques techniques de l'invention "réductrice de coût" soient telles que sa découverte exige un investissement dans la recherche K surpassant le niveau critique \bar{K} . Dans ce cas là l'invention ne peut plus être réalisée immédiatement car la condition (27) est contredite.

On peut donner une interprétation différente de l'inégalité (27). Celle-ci exprime qu'au moment de l'invention, l'incitation à innover à la date initiale perçue par le monopole est plus forte que le coût total de la découverte de l'invention. En effet on peut définir l'incitation à innover (cf. TIROLE J. (1993)) par le profit additionnel généré par l'innovation. Pour un bien non épuisable (ou renouvelable à l'infini) et dans l'optique d'un monopole, l'incitation *instantanée* à innover une technologie de production moins coûteuse s'écrit :

$$\mathbf{g}^m = \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} m^{-1}(c) dc$$

car la recette marginale du bien en question est égale au coût marginal de production c . On constate que l'incitation *instantanée* à innover une technologie de production moins coûteuse est aussi le gain en surplus net du producteur réalisé par l'innovation, c'est-à-dire la différence entre les surplus nets après et avant la mutation technologique, soit :

$$\mathbf{g}^m = w(\underline{q}) - w(\bar{q})$$

où $m(\underline{q}) = \underline{c}$ et $m(\bar{q}) = \bar{c}$.

L'incitation (totale) à innover se mesure, quant à elle, par la valeur présente actualisée de cette mutation, soit :

$$\Gamma^m = \int_0^{\infty} e^{-rt} \mathbf{g}^m dt = \frac{1}{r} \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} m^{-1}(c) dc = \frac{w(\underline{q})}{r} - \frac{w(\bar{q})}{r}$$

L'épuisabilité d'un produit implique que son prix dépasse le coût marginal de production. Il s'ensuit que l'incitation à innover une technologie moins coûteuse est différente de \mathbf{G}^m . En effet contrairement au cas d'un bien non épuisable, l'incitation instantanée à innover n'est pas constante au cours du temps du fait de la trajectoire temporelle croissante de la recette marginale.

Si on note \mathbf{g}_t^m l'incitation instantanée à innover la technologie "réductrice de coût" en une date t , alors \mathbf{g}_t^m s'écrit :

$$\mathbf{g}_t^m = \int_{\underline{c} + I(\underline{c})e^{rt}}^{\bar{c} + I(\bar{c})e^{rt}} m^{-1}(x) dx$$

où $I(c)$ est la rente de rareté actualisée dégagée par la production monopolistique optimale de la ressource avec la technologie c .

On peut ici aussi exprimer l'incitation instantanée (en t) à innover comme étant la différence entre le surplus net du producteur après et avant la mutation technologique. Ainsi \mathbf{g}_t^m s'écrit :

$$\mathbf{g}_t^m = w(q_t^*(\underline{c})) - w(q_t^*(\bar{c}))$$

Si le monopole innove immédiatement alors son incitation à innover à la date $t=0$ s'écrit \mathbf{g}_0^m , soit :

$$\mathbf{g}_0^m = \int_{\underline{c} + I(\underline{c})}^{\bar{c} + I(\bar{c})} m^{-1}(x) dx = w(\underline{q}_0^*) - w(\bar{q}_0^*)$$

Ainsi selon (27), on peut écrire :

$$g_0^m \geq rK$$

L'incitation à innover à la date $t=0$ est au moins aussi forte que le coût d'un délai marginal de la date d'invention, c'est-à-dire rK .

L'incitation (globale) à innover la technologie "réductrice de coût" à la date $t=0$ s'écrit alors :

$$\Gamma^m = \int_0^{\infty} e^{-rt} g_0^m dt = \frac{w(q_0^*) - w(\bar{q}_0^*)}{r} \quad (29)$$

En comparant (27) et (29), il vient $\Gamma^m \geq K$. L'incitation à innover la technologie nouvelle à la date initiale, ressentie par le monopole, est plus forte que la dépense de R&D requise pour détenir immédiatement le brevet d'invention associé. C'est la condition pour que la firme innove cette technologie en $t=0$.

(ii) Innovation Non Immédiate

Avec la relation (24), les conditions d'optimalité de $(t, t^i, S^1, S^2, T) = (\underline{t}, \underline{t}, S_1^1, 0, T_1)$ s'écrivent :

$$I^a = I^p = \hat{I} \quad (30.a)$$

$$w(q_{T_1}^*) = w(q_{\infty}) \quad (30.b)$$

$$S_0 = \int_0^{\underline{t}} m^{-1}(\hat{I}e^{rt} + \bar{c}) dt + \int_{\underline{t}}^{\ln((\bar{p}-\bar{c})/\hat{I})/r} m^{-1}(\hat{I}e^{rt} + \bar{c}) dt \quad (30.c)$$

On sait que cela correspond aux cas où la dépense de R&D, K est supérieure au niveau critique \bar{K} (sinon (27) est contredite). Durant l'intervalle de temps $[0, \underline{t}]$, le monopole devra extraire la ressource avec la technologie \bar{c} impliquant que S_1^1 soit positif, soit d'après (5.a) :

$$S_1^1 = \int_0^{\underline{t}} q_t^* dt \quad (31)$$

La condition (24) indique qu'à la marge (et pour une date d'invention non nulle), le gain en profit total actualisé au sein de la période pré-invention, induit par un délai dans la recherche de l'invention doit être totalement compensé par une perte en bien-être actualisé de la période post-innovation.

Pour cette solution le monopole épuisera sa ressource de façon à conserver une rente de rareté actualisée constante sur $[0, T_1]$, c'est ce qu'exprime (30.a). Si $K > \bar{K}$ la solution $(\underline{t}, \underline{t}, S_1^1, 0, T_1)$ peut s'avérer être la solution optimale. On va en fait montrer que cette solution est toujours dominée par la décision de ne pas se lancer dans la R&D, c'est-à-

dire de ne jamais innover. Le profit total réalisable si le monopole n'innove pas $p(S_0, \bar{c})$ s'écrit aussi $w(\hat{q}_0^*(\bar{c}))/r$ d'après (26) et l'on notera \bar{I} la rente de rareté actualisée associée. Pour que la solution admissible $(\hat{t}, \hat{t}, S_1^1, 0, T_1)$ soit optimale il suffit que le profit total actualisé réalisable avec $t = \hat{t}$, soit supérieur à $p(S_0, \bar{c})$. Si l'on note le profit total actualisé réalisable avec $(\hat{t}, \hat{t}, S_1^1, 0, T_1)$:

$$\hat{p}(S_0, \hat{t}) \equiv \Pi(S_1^1, 0, \hat{t}; \bar{c}) + \Pi(S_0 - S_1^1, \hat{t}, T_1; \underline{c}) + e^{-rT_1} \frac{w(q_\infty)}{r} - e^{-r\hat{t}} K \quad (32)$$

nous devons alors vérifier que $\hat{p}(S_0, \hat{t}) > p(S_0, \bar{c})$, $\forall K \geq 0$. Cependant il est possible de récrire le profit $\hat{p}(S_0, \hat{t})$ compte tenu des conditions intertemporelles (4) sur l'extraction (avec $I^j = \hat{I}, \forall j = a, i, p$) en utilisant la même simplification que dans la relation (26) (cf. aussi annexe A). Il vient alors :

$$\hat{p}(S_0, \hat{t}) = \frac{w(\hat{q}_0^*)}{r} + e^{-r\hat{t}} \left[\frac{w(b^{2*})}{r} - \frac{w(a^{1*})}{r} - K \right] + e^{-rT_1} \left[\frac{w(q_\infty)}{r} - \frac{w(q_\infty)}{r} \right] \quad (33)$$

où $\hat{q}_0^* = m^{-1}(\hat{I}e^{r\hat{t}} + \bar{c})$ est le niveau d'extraction initial assuré par la solution $(\hat{t}, \hat{t}, S_1^1, 0, T_1)$. Or par définition de \hat{t} , cf. l'équation (24), le second terme du second membre de (33) est nul. Il vient donc :

$$\hat{p}(S_0, \hat{t}) = \frac{w(\hat{q}_0^*)}{r} \quad (34)$$

Pour tout problème *homogène* d'extraction optimale semblable à ceux traités ici (c'est-à-dire quand les coûts d'extractions sont indépendants des niveaux de réserves) la rente de rareté actualisée est décroissante en le niveau des réserves *in situ* soit $dI/dS < 0$ et décroissante en le niveau du coût unitaire d'extraction $dI/dc < 0$ (cf. annexe B). Ainsi on peut considérer les rentes de rareté actualisées comme des fonctions du niveau de réserve et du niveau de coût en vigueur. Alors d'après la condition du premier ordre (30.a), on peut écrire :

$$I^a = \hat{I}(S_1^1, \bar{c}) = \hat{I}(S_0 - S_1^1, \underline{c}) = I^p \quad (35)$$

et dans l'hypothèse où le plan de R&D est abandonné, on peut aussi écrire pour un niveau donné quelconque de réserves *in situ* S :

$$\bar{I}(S, \bar{c}) = \bar{I}(S_0 - S, \bar{c}) \quad (36)$$

Montrons que $\bar{I} < \hat{I}$. Si l'on suppose que $\bar{I} \geq \hat{I}$, alors en date \hat{t} on aura :

$$\bar{S}_1 = \int_0^{\hat{t}} m^{-1}(\bar{I}e^{rt} + \bar{c}) dt \leq S_1^1 = \int_0^{\hat{t}} m^{-1}(\hat{I}e^{rt} + \bar{c}) dt \quad (37)$$

Puisque $\bar{I} \geq \hat{I}$, (37) vérifie aussi les relations $dI/dS < 0$ et $dI/dc < 0$. Par contre pour la période au delà de \hat{t} on aura : $S_0 - \bar{S}_1 \geq S_0 - S_1^1$. Si le coût d'extraction demeure à son niveau initial il vient :

$$\bar{I}(S_0 - \bar{S}_1, \bar{c}) \leq \hat{I}(S_0 - S_1^1, \bar{c}) \quad (38)$$

ceci d'après $dI/dS < 0$. A l'inverse d'après la relation $dI/dc < 0$, il vient :

$$\hat{I}(S_0 - S_1^1, \bar{c}) < \hat{I}(S_0 - S_1^1, \underline{c}) \quad (39)$$

En combinant (38) et (39), on parvient à la relation contradictoire :

$$\bar{I} = \bar{I}(S_0 - \bar{S}_1, \bar{c}) < \hat{I}(S_0 - S_1^1, \underline{c}) = \hat{I} \quad (40)$$

Ainsi seule la relation $\bar{I} < \hat{I}$ est vraie, il vient alors :

$$\bar{q}_0^*(\bar{c}) = m^{-1}(\bar{I} + \bar{c}) > \hat{q}_0^* = m^{-1}(\hat{I} + \bar{c}) \quad (41)$$

Finalement la relation (41) implique :

$$\hat{p}(S_0, \hat{t}) < p(S_0, \bar{c}), \forall K \geq 0 \quad (42)$$

Selon l'inégalité (42) le profit total actualisé réalisable en choisissant une date d'innovation intérieure (soit \hat{t}) est inférieur à celui que permettrait d'obtenir l'extraction de la ressource sans innover. De ce fait il est optimal pour le monopole de ne pas innover si la dépense de R&D requise est supérieure à \bar{K} .

PROPOSITION 1

Pour une industrie minière monopolistique qui exploite une ressource non renouvelable et qui détient une technologie backstop, la décision d'innover une technologie "réductrice de coût" dépend de la dépense de R&D, notée K, permettant l'invention de cette technologie.

Il existe un seuil critique de dépense de R&D, noté \bar{K} , tel que :

(a) si $0 < K \leq \bar{K}$: l'innovation et la dépense de R&D sont réalisées dès la date initiale. L'extraction de l'intégralité de la ressource s'effectue avec la nouvelle technologie.

(b) si $K > \bar{K}$: l'innovation et la dépense de R&D ne sont jamais réalisées. L'extraction de l'intégralité de la ressource s'effectue avec la technologie disponible au départ.

Cette proposition nous donne un canevas simple pour comprendre le comportement de R&D et d'innovation "réductrice de coût" d'un monopole minier complet. Le comportement de l'innovateur est binaire. Soit l'invention qu'il peut

développer est suffisamment accessible du point de vue de l'investissement en R&D et l'innovation est introduite immédiatement, soit la dépense de recherche est trop lourde et la nouvelle technologie n'est jamais mise au point. En fait, il faut nuancer le caractère abrupt de la règle de comportement d'innovation, car celle-ci est fortement liée à la forme de la technologie d'invention. La dépense de R&D étant considérée comme un coût fixe irrécupérable, seul le facteur d'actualisation permet de compresser le coût de recherche par un retard de la date d'invention. Ainsi le coût marginal non actualisé d'un délai de la date d'invention, soit rK , est constant. C'est pour cela qu'il n'existe pas de solution intérieure pour la date d'invention optimale. Si l'on avait supposé une technologie d'invention du type "calendaire" (cf. *supra*) par exemple $K(t)$ où $K'(t) < 0$ alors une ou plusieurs solutions intérieures auraient pu exister.

Si l'on admet le raccourci qui consiste à présumer que seules les innovations majeures¹ induisent des plans de R&D très coûteux, la Proposition 1 nous permet de dire que seules les innovations incrémentales qui permettent de réduire les coûts au mètre foré vont à coup sûr être introduites. C'est aussi le constat que font les professionnels de l'industrie pétrolière. En effet les compagnies pétrolières qui exploitent des gisements locaux (comme l'AMERICAN OIL COMPANY, KUWAIT PETROLEUM COMPANY) possèdent des départements de R&D qu'elles financent à partir des revenus de leur extraction. Par exemple pour l'AMOCO ce département est l'AMOCO PRODUCTION RESEARCH, qui est chargé par la compagnie de mettre au point de nouvelles technologies, de nouveaux procédés dans les ensembles industriels de production (selon la terminologie de l'I.F.P. (1988)).

Du point de vue des praticiens la tendance actuelle de la R&D dans la production pétrolière est de suivre au plus près les besoins de l'outil de forage présent sur le champ. KOEN A.D. indique, dans l'Oil & Gas Journal, 5 Juillet 1993, p. 14, que² :

"Le plus souvent, la R&D de production interne se focalise sur des objectifs limités de court terme, par exemple en résolvant un problème spécifique sur un réservoir ou un champ spécifique pour un client spécifique."

Cette tendance n'est pas propre à l'industrie pétrolière mais correspond à l'intégration dans cette industrie de ce que FORAY D., ZUSCOVITCH E. (1991), p. 588, nomment "un nouveau système technique". En effet, les mutations technologiques de ces vingt dernières années correspondent, toutes industries confondues, à quatre grands types d'évolutions techniques celles "*des composants électroniques, la constitution des réseaux à intégration de services, le développement de l'automatisation intégrée de*

¹C'est-à-dire dont la généralisation au sein du processus de production d'une économie constitue une révolution industrielle.

²Dans le texte : "More often than not, in-house production R&D focuses on limited, short term goals, for example solving a specific problem in a specific reservoir or field for a specific client."

production et l'irruption des nouveaux matériaux" in FORAY D., ZUSCOVITCH E. *op.cit.* Ainsi dans les années 1990, les efforts de R&D dans l'Exploration/Production de l'AMOCO se situent dans la mise au point d'une assistance à la production par le biais de la sismique à trois dimensions (*3D seismic*) afin de mieux combiner les activités d'extraction et de recherche géophysique sur les champs et par ce biais de réaliser des économies d'échelles. Dans le domaine de la R&D pétrolière il apparaît que la proposition théorique 1 n'est pas en contradiction avec les faits stylisés de cette industrie minière.

1.2 Impact de l'innovation "réductrice de coût" (quand $K \leq \bar{K}$)

Comparativement à la situation sans innovation le comportement de R&D induit une réallocation des ressources le long de la trajectoire optimale. Si les opportunités technologiques sont favorables, c'est à dire si $K \leq \bar{K}$, l'innovation immédiate de la technologie "réductrice de coût" implique une modification des conditions de l'extraction par rapport à la situation où aucune innovation n'est réalisée. L'extraction étant continue et conforme au principe monopolistique d'arbitrage de Hotelling, la différence entre la mise en forme de ces deux trajectoires d'extraction ne résulte que dans le niveau du coût unitaire et marginal. Ainsi pour les deux alternatives (innover ou non) les conditions de l'extraction obéiront au système de relations :

$$\begin{cases} \forall t \in [0, T(c)], q_t^*(c) = m^{-1}(I(c) + c) \\ T(c) = \frac{1}{r} \ln \left(\frac{\bar{p} - c}{I(c)} \right) \\ S_0 = \int_0^{T(c)} q_t^*(c) dt \end{cases} \quad (43)$$

où $c = \underline{c}$ lorsque l'invention est réalisée, et $c = \bar{c}$ dans le cas contraire.

PROPOSITION 2

Si la dépense de R&D est "faible" ($K \leq \bar{K}$), l'innovation d'une technologie "réductrice de coût", $\underline{c} < \bar{c}$ implique (a) $I(\underline{c}) > I(\bar{c})$, (b) $T(\underline{c}) < T(\bar{c})$, (c) $q_0^*(\underline{c}) > q_0^*(\bar{c})$, (d) $\exists q \leq T(\underline{c}), \forall t < (>)q, q_t^*(\underline{c}) > (<)q_t^*(\bar{c})$.

Dans l'annexe B on montre que $dI/dc = -e^{-r\tilde{q}} < 0$ où $\tilde{q} < T(c)$, ce qui prouve le point (a) et d'après (43) induit directement le point (c) de la proposition car $m'(q) < 0$ et $-e^{-r\tilde{q}} > -1$. La preuve du point (b) s'effectue en différenciant $T(c)$ en c . Il vient :

$$T'(c) = -\frac{1}{r} \frac{I(c) - (\bar{p} - c)e^{-r\tilde{q}}}{(\bar{p} - c)I(c)} > 0, \text{ car } \tilde{q} < T(c) \quad (44)$$

Enfin (a), (b) et (c) impliquent l'existence d'une date q à partir de laquelle les trajectoires d'extraction (donc de prix) des deux alternatives se croisent (soit (d)), ceci afin que les contraintes d'épuisement des réserves (cf. (43)) soient saturées. Notons que l'on retrouve les résultats (a) et (b) de statique comparative dans HARTWICK J. (1989), ainsi que certains résultats de AMUNDSEN E.S. (1992).

La mise en œuvre d'une campagne de R&D réalisable ($K \leq \bar{K}$) permet à la firme innovatrice d'accroître le niveau de rente de rareté ainsi que ses profits totaux. Cependant cette situation réduit la durée de vie du gisement en rapprochant l'épuisement des ressources. Parallèlement si on considère que le brevet sur technologie limite (*backstop*) est dormant jusqu'à l'épuisement, l'innovation "réductrice de coût" amoindrit la période de gel de ce brevet.

Ces résultats nous conduisent à penser que les innovations "réductrices de coûts" s'appliqueront favorablement aux firmes minières dont les objectifs sont de *moyen terme*. La baisse des coûts d'exploitation (coûts techniques dans le jargon des pétroliers) entraîne une gestion intensive du gisement qui peut s'avérer néfaste vis à vis de la préservation des ressources.

Nous allons ici donner une *illustration numérique*¹ des propositions 1 et 2. La demande qui s'adresse au monopole propriétaire d'un vaste gisement de ressource pétrolière s'écrit, par exemple, $Q = a p^{-h}$, où Q est la quantité de ressource demandée, p le prix de cette ressource et h est l'élasticité-prix constante de la demande, égale à 2². On la calibre à la demande annuelle pétrolière en prenant la demande moyenne adressée à l'O.P.E.P. en 1991, soit 23,1825 M bl/j au prix du "Saudi Arabia Light" de 17,73 \$/bl³ -in OPEC Bulletin Avril 1991-. On parvient à la fonction du prix du pétrole offert, en \$/bl, $Q = 1619,7206 p^{-2}$. Sur des bases réalistes⁴, on considère que le monopole détient 77,4 % des réserves mondiales soit 842 693,4 Mbl ou 115437,45 MT. Supposons de plus que son taux d'actualisation annuel se situe à 7%. En ce qui concerne les coûts unitaires de production, nous prendrons les coûts techniques unitaires à terre au Moyen-Orient, pour d'une part les champs pétrolifères anciens (soit $c = 0,4$ \$/bl) et d'autre part les champs pétrolifères récents (soit $\bar{c} = 3$ \$/bl). Le coût de production unitaire de la technologie backstop est 55 \$/bl. L'innovation est supposée faire baisser le coût de 3 à 0,4 \$/bl. Les résultats des simulations sont données dans le tableau 3.

¹En tant qu'illustration ces simulations ne peuvent, bien entendu, constituer un ensemble de résultats prédictifs opérationnels.

²GIROD J. (1977) signale que l'élasticité-prix (de long terme) de la demande annuelle mondiale de pétrole brut a été estimée comme approximativement supérieure à 1. Cet auteur cite l'étude de HOUTAKKER H.S., KENNEDY M. de 1974.

³Ce prix représente une moyenne arithmétique des prix hebdomadaires du "panier OPEP" sur les 52 semaines de l'année 1991.

⁴Celles de l'O.P.E.P., cf. rapport annuel du Oil & Gaz Journal (1995), n°52.

Tableau 3. Simulation numérique

	$I(c)$ en \$/bl	$T(c)$ en années	$p(c)$ (si $K=0$) en M\$	$\bar{K} =$ $p(c) - p(\bar{c})$ en M\$	$q_0^*(c)$ en Mbl	q en années
$\underline{c}=0,4$ \$/bl	2,094	46,58	0,3755 10^7	0,1255 10^7	105 376,4	9,39
$\bar{c}=3$ \$/bl	0,748	60,59	0,2499 10^7		46 685,2	

Dans une optique plus spécifique aux industries de ressources non renouvelables, nous allons maintenant envisager la R&D de technologies "d'accessibilité" à des réserves irrécupérables ou probables.

II Comportement d'Innovation du monopole complet dans le cadre d'une Invention "d'accessibilité"

En relation avec l'activité d'exploration des sous-sols, certaines technologies de forage accroissent le rendement du gisement en récupérant des réserves jusqu'alors soit probables mais inaccessibles, soit gaspillées. Dans l'industrie pétrolière c'est le cas des techniques de récupération assistée des hydrocarbures. Cependant ces technologies que nous qualifions technologies "d'accessibilité" (cf. *supra*), peuvent induire une hausse sensible du coût par mètre foré ce qui les différencie de celles réductrices de coût. Notre préoccupation ici est de montrer de quelle façon et sous quelles conditions la firme en monopole complet va innover une technologie "d'accessibilité" des réserves probables. Nous définirons une invention "d'accessibilité des réserves" par un couple de paramètres (\bar{S}, \bar{c}) . Le paramètre \bar{S} (≤ 0) représente le montant de réserves nouvellement accessible lors de l'innovation en date t^I . Ce stock (exogène) de ressource vient s'ajouter aux réserves prouvées *in-situ*. Notons que ce gisement de réserves probables n'est accessible que si la date d'innovation est décidée comme étant antérieure à la date finale d'épuisement. Le paramètre \bar{c} correspond au coût unitaire d'extraction qui prévaut par suite de l'innovation. Ce coût sera supérieur à celui d'avant l'innovation (noté \underline{c}). Afin d'éviter une solution triviale (jamais d'extraction), on posera encore : $\underline{c} < \bar{c} < \bar{p}$.

2.1 Décision de R&D du monopole complet

Ce cadre d'analyse est le pendant de celui développé dans la section précédente pour une invention de type "accessibilité des réserves". Le problème du monopole minier est donc de déterminer une trajectoire d'extraction optimale, une date d'invention t , une date

d'innovation t^i et la date T d'épuisement des réserves, afin de maximiser le profit total actualisé sous contrainte d'épuisabilité de cette ressource. La firme peut s'approprier le brevet sur la technologie "d'accessibilité" via un plan de R&D autofinancé. La technologie de R&D est identique à celle décrite section I. Le programme du monopole est alors le suivant :

$$\begin{aligned} & \max_{(q_t, T, t^i, t)} \int_0^T e^{-rt} [R(q_t) - c_t q_t] dt + e^{-rT} \frac{w(q_\infty)}{r} - K e^{-rt} \\ & \text{s/c } q_t \geq 0, T \geq t^i \geq t \geq 0 \\ & \dot{S}_t = \frac{dS_t}{dt} = -q_t \\ & \begin{cases} S_0 = S^0 \\ S_{t^i} = S^0 - \int_0^{t^i} q_t dt + \bar{S} \end{cases} \end{aligned} \quad (45)$$

et

$$\begin{cases} c_t = \underline{c} < \bar{p}, \quad \forall t < t^i \\ c_t = \bar{c} < \bar{p}, \underline{c} < \bar{c} \quad \forall t, T > t \geq t^i \end{cases} \quad (46)$$

avec $w(q) = R(q) - m(q)q$, $m(q) = R'(q)$ et $m(q_\infty) = \bar{p}$.

A l'instar du problème d'innovation de la section I, la décision du monopole est *a priori* découpée en trois périodes (pré-invention, intermédiaire et post-innovation) où seront respectivement extraits les volumes de ressources S^1, S^2 et $S^0 - (S^1 + S^2)$. D'après le principe d'arbitrage de Hotelling et quelle que soit la phase (respectivement indiquée par a, i, p) dans laquelle on se situera, l'extraction optimale, notée q_t^* , du monopoleur obéira aux relations (4) mais pour une définition de c_t donnée par (46). En utilisant la définition (7) du profit partiel (exclusivement minier) entre deux dates, nous réécrivons le profit total actualisé du monopole complet sous la forme :

$$P \equiv \int_0^T e^{-rt} [R(q_t) - c_t q_t] dt + e^{-rT} \frac{w(q_\infty)}{r} - K e^{-rt}$$

\Leftrightarrow

$$P = \Pi(S^1, 0, t; \underline{c}) + \Pi(S^2, t, t^i; \underline{c}) + \Pi(S^0 - S^1 - S^2 + \bar{S}, t^i, T; \bar{c}) + e^{-rT} \frac{w(q_\infty)}{r} - K e^{-rt} \quad (47)$$

avec $S^1 = \int_0^t q_t dt$, $S^2 = \int_t^{t^i} q_t dt$, et

$$S_{t^i} = S^0 - S^1 - S^2 + \bar{S} = \int_{t^i}^T q_t dt \quad (48)$$

Par définition d'une ressource épuisable, $S^1 + S^2$ ne peut excéder la valeur initiale $S_0 = S^0$, on aura donc la condition $S^1 + S^2 \leq S^0$. Le problème du monopole est donc de déterminer quelles sont les valeurs (optimales) des variables non négatives $S^{1*}, S^{2*}, t^*, t^{i*}$ et T^* qui rendent maximal P , sous la contrainte $S^1 + S^2 \leq S^0$. Une fois les niveaux S^1 et S^2 déterminés, la trajectoire d'extraction optimale qui permet de l'atteindre est guidée par le principe d'arbitrage de Hotelling appliqué à la structure monopolistique. Sous forme condensée, le nouveau programme "d'innovation d'accessibilité" du monopole complet s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{S^1, S^2, t, t^i, T} \left[\Pi(S^1, 0, t; \underline{c}) + \Pi(S^2, t, t^i; \underline{c}) + \Pi(S^0 - S^1 - S^2 + \bar{S}, t^i, T; \bar{c}) + e^{-rT} \frac{w(q_\infty)}{r} - K e^{-rt} \right] \\ s/c \\ S^0 - S^1 - S^2 \geq 0, (S^1, S^2) \geq 0, t \geq 0, t^i \geq 0, T - t^i \geq 0, t^i - t \geq 0 \end{array} \right. \quad (46)$$

Le Lagrangien du problème s'écrit :

$$L = \Pi(S^1, 0, t; \underline{c}) + \Pi(S^2, t, t^i; \underline{c}) + \Pi(S^0 - S^1 - S^2 + \bar{S}, t^i, T; \bar{c}) + e^{-rT} \frac{w(q_\infty)}{r} - K e^{-rt} + \\ + \mathbf{m}(S^0 - S^1 - S^2) + \mathbf{g}(T - t^i) + \mathbf{d}(t^i - t)$$

Les variables non négatives \mathbf{m} , \mathbf{g} et \mathbf{d} sont des multiplicateurs de Kuhn-Tucker sur, respectivement, la contrainte de stock, $S^0 - S^1 - S^2 \geq 0$, la contrainte de dates $T - t^i \geq 0$ et celle $t^i - t \geq 0$. On peut voir que ce programme non linéaire est concave en les variables de décisions (S^1 , S^2 , t , t^i , T). Les conditions de premier ordre seront donc suffisantes pour assurer l'optimalité des solutions. Elles s'écrivent :

$$S^{1*} \left[\Pi_1(S^{1*}, 0, t^*; \underline{c}) - \Pi_1(S^0 - S^{1*} - S^{2*} + \bar{S}, t^{i*}, T^*; \bar{c}) - \mathbf{m}^* \right] \quad (47.a)$$

$$\Pi_1(S^{1*}, 0, t^*; \underline{c}) - \Pi_1(S^0 - S^{1*} - S^{2*} + \bar{S}, t^{i*}, T^*; \bar{c}) - \mathbf{m}^* \leq 0 \quad (47.b)$$

$$S^{2*} \left[\Pi_1(S^{2*}, t^*, t^{i*}; \underline{c}) - \Pi_1(S^0 - S^{1*} - S^{2*} + \bar{S}, t^{i*}, T^*; \bar{c}) - \mathbf{m}^* \right] = 0 \quad (48.a)$$

$$\Pi_1(S^{2*}, t^*, t^{i*}; \underline{c}) - \Pi_1(S^0 - S^{1*} - S^{2*} + \bar{S}, t^{i*}, T^*; \bar{c}) - \mathbf{m}^* \leq 0 \quad (48.b)$$

$$t^* \left[\Pi_3(S^{1*}, 0, t^*; \underline{c}) + \Pi_2(S^{2*}, t^*, t^{i*}; \underline{c}) + r K e^{-rt^*} - \mathbf{d}^* \right] = 0 \quad (49.a)$$

$$\Pi_3(S^{1*}, 0, t^*; \underline{c}) + \Pi_2(S^{2*}, t^*, t^{i*}; \underline{c}) + r K e^{-rt^*} - \mathbf{d}^* \leq 0 \quad (49.b)$$

$$\Pi_3(S^{2*}, t^*, t^{i*}; \underline{c}) + \Pi_2(S^0 - S^{1*} - S^{2*} + \bar{S}, t^{i*}, T^*; \bar{c}) - \mathbf{g}^* + \mathbf{d}^* = 0 \quad (50)$$

$$\Pi_3(S^0 - S^{1*} - S^{2*} + \bar{S}, t^{i*}, T^*; \bar{c}) - e^{-rT^*} w(q_\infty) + \mathbf{g}^* = 0 \quad (51)$$

$$\mathbf{m}^* (S^0 - S^{1*} - S^{2*}) = 0 \quad (52.a)$$

$$\mathbf{g}^* (T^* - t^{i*}) = 0 \quad (52.b)$$

$$\mathbf{d}^* (t^{i*} - t^*) = 0 \quad (52.c)$$

où P_i , $i=1,2,3$ représente la dérivée de P par rapport à son i -ème argument.

On remarque que les conditions (47) à (51) sont assez semblables aux conditions (10) à (13) du problème d'innovation "réductrice de coût" (cf. section I). De façon similaire, nous pouvons donc simplifier les conditions (47) à (51) :

$$S^{1*} [I^a - I^p - \mathbf{m}^*] = 0 \quad (53.a)$$

$$I^a - I^p - \mathbf{m}^* \leq 0 \quad (53.b)$$

$$S^{2*} [I^i - I^p - \mathbf{m}^*] = 0 \quad (54.a)$$

$$I^i - I^p - \mathbf{m}^* \leq 0 \quad (54.b)$$

$$\mathbf{t}^* [e^{-r\mathbf{t}^*} (w(a^{1*}) - w(b^{1*}) + rK) - \mathbf{d}^*] = 0 \quad (55.a)$$

$$e^{-r\mathbf{t}^*} (w(a^{1*}) - w(b^{1*}) + rK) - \mathbf{d}^* \leq 0 \quad (55.b)$$

$$e^{-r\mathbf{t}^{2*}} (w(a^{2*}) - w(b^{2*})) - \mathbf{g}^* + \mathbf{d}^* = 0 \quad (56)$$

$$e^{-rT^*} [w(q_{T^*}^*) - w(q_\infty^*)] + \mathbf{g}^* = 0 \quad (57)$$

Les niveaux d'extractions a^{1*}, b^{1*}, a^{2*} et b^{2*} sont définis par :

$$a^{1*} = \lim_{i \uparrow t^*} q_i^*, \quad b^{1*} = \lim_{i \downarrow t^*} q_i^*, \quad a^{2*} = \lim_{i \uparrow t^{2*}} q_i^*, \quad b^{2*} = \lim_{i \downarrow t^{2*}} q_i^*$$

où q_i^* est le niveau d'extraction optimale (cf. (4)).

Après examen de ces conditions, une seule solution $(S^1, S^2, \mathbf{t}, \mathbf{t}^i, T) = (S^0, 0, \mathbf{t}_2^{i*}, \mathbf{t}_2^{i*}, T_2^*)$ émerge. Sa description passe par la détermination d'une part des variables de décision $(\mathbf{t}_2^{i*}, T_2^*)$, et d'autre part de variables "auxiliaires" (multiplicateur, et rente) (I_2^*, \mathbf{m}^*) , avec $I^p = I_2^* < I^a$. Ces variables optimales sont solutions du système suivant :

$$\begin{cases} S^0 = \int_0^{\mathbf{t}_2^{i*}} m^{-1} (I_2^* + \mathbf{m}^*) e^{rt} + \underline{c} \, dt \\ \bar{S} = \int_{\mathbf{t}_2^{i*}}^{T_2^*} m^{-1} (I_2^* e^{rt} + \bar{c}) \, dt \\ T_2^* = \frac{1}{r} \ln \left(\frac{\bar{p} - \bar{c}}{I_2^*} \right) \\ w(b^*) - w(a^*) = rK \end{cases} \quad (58)$$

où $\mathbf{m}^* > (\bar{c} - \underline{c}) e^{-r\mathbf{t}_2^{i*}} > 0$, $a^* = a_1^* = m^{-1} (e^{r\mathbf{t}_2^{i*}} (I_2^* + \mathbf{m}^*) + \underline{c})$ et $b^* = b_2^* = m^{-1} (e^{r\mathbf{t}_2^{i*}} I_2^* + \bar{c})$

Les caractéristiques de cette solution sont multiples. La date d'invention et celle d'innovation sont concomitantes (pas de brevet dormant). Le stock initial (S^0) est entièrement exploité avant l'innovation. A partir de la date d'innovation, le niveau des réserves en terre est égal à la taille du gisement nouvellement accessible (soit \bar{S}). La trajectoire d'extraction n'est pas continue à la date d'innovation, elle subit un saut

supérieur d'autant plus conséquent que le niveau de dépense de R&D requis pour innover (K) est élevé. En effet d'après (58.4)¹, et puisque $w'(q) > 0$, alors $a^* < b^*$ tant que $K > 0$.

On va maintenant comparer cette solution à celle qui consiste à ne se lancer dans aucun plan de R&D. Pour ce faire nous allons dans un premier temps montrer que le niveau d'extraction b^* en t_2^{i*} est indépendant du niveau de dépense de R&D. Dans un deuxième temps nous comparerons les profits actualisés selon l'alternative choisie.

Notons les variables relatives à cette situation de "non innovation" par un indice supérieur "ni". La définition de la politique optimale monopolistique inhérente au cas sans innovation, est définie en section I par le système (43) pour $c = \underline{c}$. Si l'innovation n'est jamais réalisée, le profit total actualisé du monopole s'écrira donc :

$$P^{ni} = \int_0^{T^{ni}} e^{-rt} [R(q_t^{ni}) - \underline{c}q_t^{ni}] dt + e^{-rT^{ni}} \frac{w(q_\infty)}{r} \quad (59)$$

On sait de plus (cf. annexe A), que l'on peut récrire (59) sous forme "condensée" $P^{ni} = w(q_0^{ni})/r$.

b^* est en fait le niveau d'extraction *initial* de la période $[t_2^{i*}, T_2^*]$. A partir de l'équation (58.2) et en effectuant un changement de variable adéquat, on peut écrire :

$$\bar{S} = \int_{t_2^{i*}-t_2^*}^{T_2^*-t_2^*} m^{-1} (I_2^* e^{r(t+t_2^*)} + \bar{c}) dt = \int_0^{T'} m^{-1} (I' e^{rt} + \bar{c}) dt \quad (60)$$

avec $T' = (1/r) \ln((\bar{p} - \bar{c})/I')$ et $I_2^* = I' e^{-rt_2^*}$. Le troisième membre de (60) indique que le stock \bar{S} sera consommé sur une période $[t_2^{i*}, T_2^*]$ de la même façon que sur une période $[0, T']$. Les niveaux d'extraction selon les deux "modes de calcul" seront identiques car c'est la condition même de la cohérence dynamique de l'équilibre intertemporel². Ainsi b^* sera aussi le niveau initial d'extraction sur la période $[0, T']$, il est donc déterminé de façon indépendante du niveau de dépense de R&D car on peut le définir par :

$$b^* = \bar{b} = m^{-1} (I' + \bar{c}) \quad (61)$$

où I' est défini à partir du troisième terme de (60), de plus $d\bar{b}/dK = 0$.

D'après cette nouvelle définition de b^* , on voit que seul le niveau d'extraction a^* , c'est-à-dire juste antérieur à l'innovation, est sensible aux variations de K , la dépense de R&D requise. En effet d'après (58.4) et (61), il vient :

¹Par convention, la notation (58.4) indique la quatrième équation de (58) "en partant du haut".

²Un équilibre intertemporel dynamiquement cohérent implique qu'à tout instant le décideur ne dévie pas de sa politique optimale, cf. BASAR T. (1989) pour des précisions.

$$w'(\bar{b}) \frac{d\bar{b}}{dK} - w'(a^*) \frac{da^*}{dK} = r \Leftrightarrow \frac{da^*}{dK} = \frac{r}{m'(a^*)a^*} < 0 \quad (62)$$

(62) nous indique que le niveau d'extraction juste antérieur à la date d'innovation est décroissant en fonction du paramètre K .

Nous comparons maintenant la solution optimale définie par (58) et la solution alternative qui consiste à ne pas innover. Pour ce faire nous comparons les niveaux de profits actualisés P^* et P^{ni} , où P^{ni} est défini par (59) et P^* est tel que (cf. aussi (33) ou annexe A) :

$$P^* = \frac{w(q_0^*)}{r} - e^{-rt_2^*} \frac{w(a^*)}{r} + e^{-rt_2^*} \frac{w(b^*)}{r} - e^{-rt_2^*} K$$

or d'après (58.4), $e^{-rt_2^*} \frac{w(b^*)}{r} - e^{-rt_2^*} \frac{w(a^*)}{r} - e^{-rt_2^*} K = 0$, d'où :

$$P^* = \frac{w(q_0^*)}{r} \quad (63)$$

avec $q_0^* = m^{-1}(\mathbf{I}_2^* + \mathbf{m}^* + \underline{c})$.

Supposons dès lors que $P^* \geq P^{ni}$. D'après (59) et (63), il vient donc :

$$q_0^* \geq q_0^{ni} \Rightarrow \mathbf{I}_2^* + \mathbf{m}^* \leq \mathbf{I}^{ni} \quad (64.a)$$

Ainsi :

$$\forall t \leq \min\{t_2^{i*}, T^{ni}\}, q_t^* \geq q_t^{ni} \quad (64.b)$$

D'après (58.1) et (43) pour $c = \underline{c}$, on peut écrire :

$$S^0 = \int_0^{t_2^{i*}} q_t^* dt = \int_0^{T^{ni}} q_t^{ni} dt \quad (65)$$

D'après (64), (65) n'est vrai que si et seulement si :

$$t_2^{i*} \leq T^{ni} \quad (66)$$

La trajectoire d'extraction q_t^{ni} étant monotone, décroissante¹, à partir de (64) et (66) on montre directement que :

$$q_{t_2^{i*}}^* \geq q_{t_2^{i*}}^{ni} \geq q_{T^{ni}}^{ni} = q_\infty \quad (67)$$

Ici $q_{t_2^{i*}}^*$ est évalué avant l'invention, il est donc égal à a^* . D'après (67), on voit aussi que :

¹D'après l'extraction optimale, cf. (4) pour $c = \underline{c}$: $\forall t \geq 0, dq_t^{ni}/dt = r\mathbf{I}^{ni}e^{rt}/m'(q) < 0$.

$$-w(a^*) \leq -w(q_\infty) \quad (68)$$

De plus on sait que la solution optimale doit vérifier (58.4), d'où avec (61) il vient $w(\bar{b}) - w(a^*) = rK$, qui combiné à (67) donne la relation :

$$rK \leq w(\bar{b}) - w(q_\infty) \quad (69)$$

Ainsi P^* ne sera jamais inférieur à P^{ni} tant que la dépense de R&D requise K ne dépassera pas le seuil critique \bar{K} , défini en saturant l'inégalité (69) soit :

$$\bar{K} = \frac{w(\bar{b}) - w(q_\infty)}{r} \quad (70)$$

On peut maintenant énoncer la proposition regroupant les caractéristiques de la solution optimale.

PROPOSITION 3

Soit un monopole complet qui exploite un gisement de ressource non renouvelable de taille (S^0). Soit une invention d'accessibilité de paramètre (\bar{S}, \bar{c}) dont K est la dépense brute de R&D requise. Il existe un seuil critique de dépense de R&D requise noté \bar{K} , défini par (70) et tel que :

(a) si $K \leq \bar{K}$, le monopole innove cette invention en une date finie t_2^{i*} et épuise l'ensemble de ses réserves à une date T_2^* . Ces dates sont définies par le système (58). Le gisement initial (S^0) est épuisé en date d'innovation (t_2^{i*}), le gisement nouvellement accessible (\bar{S}) est épuisé en T_2^* , date en laquelle le monopole démarre sa production de substitut. A la date d'innovation la trajectoire de prix subit un saut inférieur d'autant plus grand que K se rapproche de \bar{K} . (cf. Figure 1).

(b) Si $K > \bar{K}$, le monopole n'innove jamais et exploite simplement le gisement initial jusqu'en date T^{ni} avec la technologie initiale.

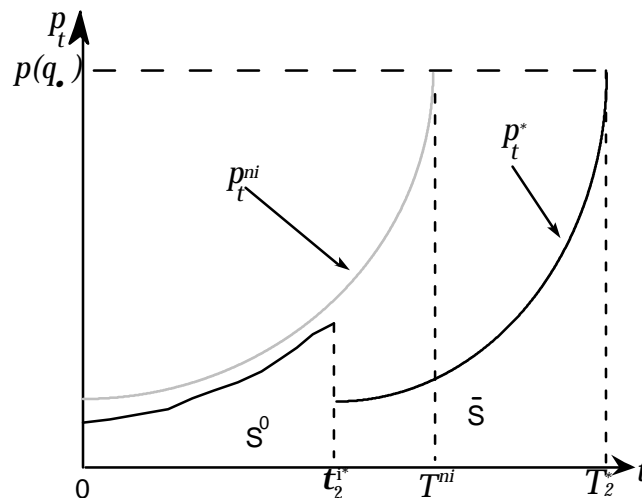


Figure 1. Trajectoire de prix du monopole complet. Proposition 3.a.

2.2 Impact de l'innovation "d'accessibilité" (quand $K \leq \bar{K}$)

Si $K \leq \bar{K}$ l'innovation d'une technologie d'accessibilité modifie l'allocation des ressources sur la trajectoire optimale et provoque une "cassure" dans la trajectoire des prix. Si l'on compare à la situation sans innovation, on peut voir que ce type d'innovation est diamétralement différent de l'innovation réductrice de coût. La proposition suivante relate les caractéristiques de la trajectoire optimale lorsque la R&D d'une technologie d'accessibilité des réserves probables est engagé.

PROPOSITION 4

Si la dépense de R&D est "faible" ($K \leq \bar{K}$), l'innovation d'une technologie "d'accessibilité" (\bar{S}, \bar{c}), où $\underline{c} < \bar{c}$, implique (a) $I^{ni} > I_2^* + \mathbf{m}^* > I_2^*$, (b) $T_2^* > T^{ni}$, (c) $\forall t, q_t^* > q_t^{ni}$

Les points (a) et (c) de la proposition 4 découlent directement des relations (64). Pour le point (c) et pour $t \geq t_2^{i*}$, il faut considérer que l'innovation accentue l'écart entre ces deux trajectoires d'extractions, car :

$$q_{t_2^{i*}}^{ni} < q_{t_2^{i*}}^* = a^* < b^* = q_{t_2^{i*}}^*$$

Pour le point (b), à partir de (43) pour $c = \underline{c}$, (58.3) et les définitions de a^* et b^* nous formons l'expression :

$$e^{r(T_2^* - t_2^{i*})} = \frac{\bar{p} - \bar{c}}{m(b^*) - \bar{c}}$$

qui est supérieure à 1 car $m(b^*) < \bar{p}$. De même, d'après le point (a) de la proposition 4 et le fait que $a^* < b^*$, nous formons la chaîne d'inégalités :

$$e^{r(T^{ni} - t_2^{i*})} = \frac{\bar{p} - \underline{c}}{m(a^*) - \underline{c}} \frac{I_2^* + \mathbf{m}^*}{I^{ni}} < \frac{\bar{p} - \underline{c}}{m(a^*) - \underline{c}} < \frac{\bar{p} - \underline{c}}{m(b^*) - \underline{c}}$$

La comparaison des rapports $(\bar{p} - \underline{c}) / (m(b^*) - \underline{c})$ et $(\bar{p} - \bar{c}) / (m(b^*) - \bar{c})$ nous donne¹ :

$$\frac{\bar{p} - \underline{c}}{m(b^*) - \underline{c}} < \frac{\bar{p} - \bar{c}}{m(b^*) - \bar{c}}$$

Donc $e^{r(T_2^* - t_2^{i*})} > e^{r(T^{ni} - t_2^{i*})}$, ce qui prouve que $T_2^* > T^{ni}$.

¹Si on suppose le contraire alors on parvient à la contradiction : $\bar{p} = m(q_\infty) < m(b^*) \Rightarrow q_\infty > b^*$.

Les propositions 3 et 4 décrivent le comportement de R&D d'une invention d'accessibilité du monopole complet. Une dépense requise de R&D trop élevée (en l'occurrence au delà du seuil \bar{K}) impliquera l'abandon de la R&D et l'extraction des ressources prouvées seulement. Si la R&D de l'invention d'accessibilité est abordable, alors l'invention et l'innovation s'effectueront en une date t_2^{i*} , induisant en ce point du temps une discontinuité à la baisse de la trajectoire de prix. L'équilibre du monopole complet innovateur d'une invention d'accessibilité se caractérise par plusieurs phénomènes notamment l'absence de brevet dormant et une discontinuité inférieure dans la trajectoire de prix. Le monopoleur peut choisir la date à laquelle il désire intégrer la nouvelle technologie dans son processus de production, il préférera attendre le moment le plus favorable en obéissant à la règle optimale (58.4). Cette règle indique que la firme devra innover à une date telle que le gain marginal issu de l'innovation d'accessibilité $w(a^*) - w(b^*)$, est égal au coût d'un délai marginal de la date d'innovation soit rK . Il n'est donc pas possible que la firme choisisse une date d'invention antérieure à celle d'innovation car alors elle violera cette règle. De fait, l'activité de R&D si elle est fiable implique ici une *certaine efficacité* dans l'activité de recherche au sens où dès qu'il est déposé le brevet est aussitôt exploité.

Le second phénomène intéressant retracé par la Proposition 3-(a) est la discontinuité vers le bas de la trajectoire de prix à la date d'innovation. En effet on voit que pour tout $K > 0$ et $K \leq \bar{K}$, $a^* > \bar{b}$ c'est-à-dire que le niveau d'extraction juste antérieur à la date t_2^{i*} est supérieur à celui juste postérieur à cette même date. Le monopole étant "faiseur de prix", le prix de la ressource est donc baissier à la date d'innovation. Ce phénomène peut paraître paradoxal car par définition l'invention d'accessibilité suppose une hausse du coût unitaire et marginal d'extraction. Nous avons vu dans la section I qu'une invention réductrice de coût induit un saut baissier du prix à la date d'innovation (initiale dans notre cas, cf. proposition 2.(c)) équivalent à la baisse du coût marginal. On pourrait donc s'attendre ici à une hausse du prix du fait de la définition de l'invention d'accessibilité, et pourtant le prix de monopole à la date d'innovation s'affaisse. Le phénomène qui conduit à cette chute du prix alors que le coût marginal d'extraction s'accroît est relié à la fois à l'accessibilité des réserves probables (c'est-à-dire du gisement de taille \bar{S}) inhérente à l'invention associée, ainsi qu'au niveau de la dépense requise de R&D pour breveter l'invention. On a vu (cf. (62)) que plus la dépense de R&D requise pour inventer sera élevée plus faible sera le niveau d'extraction pré-innovation (a^*) et donc plus important sera le prix. Il semble donc que le monopole minier va remanier sa politique d'extraction en vue d'acquérir la nouvelle technologie de façon à accumuler plus rapidement les profits. Par rapport à une situation où la R&D n'engendrerait pas de coûts, l'extraction avant l'innovation est bien au dessous du niveau \bar{b} ce qui implique, afin que soit saturée la contrainte d'épuisabilité du stock S^0 , que le taux d'extraction soit beaucoup plus fort

en certains points du temps, antérieurs à la date d'innovation. La R&D amplifie les premiers taux d'extractions et par ce biais les profits initiaux. Le monopole complet va ainsi *provisionner* sur ces profits initiaux la dépense de R&D qu'il effectuera plus tard, car celle-ci lui permet de "découvrir" de nouvelles réserves, sources de profits.

L'équilibre dépeint par la proposition 3 peut aussi s'interpréter comme un équilibre intertemporel à la Herfindhal sur deux gisements. En effet HERFINDHAL O.C. (1967) montre que des gisements ayant des coûts d'extraction marginaux différents mais tous constants sont exploités de façon strictement séquentielle dans l'ordre croissant des coûts d'extraction. C'est la solution que nous avons ici à savoir l'exploitation dans un premier temps du gisement prouvé étant donné la technologie d'extraction c , ensuite l'exploitation du gisement nouvellement accessible étant donné la technologie d'extraction \bar{c} , avec $\bar{c} > c$. En fait chez Herfindhal la différence des coûts d'extraction entre gisements provient exclusivement de caractères intrinsèques aux réserves (qualités des nappes, difficultés géologiques etc...), mais il n'est pas exclu d'introduire ces éléments inflationnistes dans le coût unitaire d'extraction \bar{c} post-innovation afin de rester conforme avec le cadre d'hypothèses de cet auteur. De ce fait, notre approche purement technologique ne rentre pas en conflit avec celle plus répandue d'une gradation des coûts d'extraction inhérente à la qualité des gisements.

Il faut aussi noter que si l'activité de R&D est conforme à la séquence d'extraction à la Herfindhal, elle en altère quelque peu les caractéristiques. En vertu de la séquence Herfindhal d'extraction, la trajectoire de prix se doit d'être continue par morceaux aux points de transition entre gisements au fur et à mesure des épuisements successifs. D'après la proposition 3, on voit bien que cette dernière caractéristique n'est pas respectée dans l'hypothèse d'une R&D coûteuse, le prix déclinant vers un niveau inférieur en date d'innovation. L'activité de R&D d'une invention d'accessibilité altère la séquence d'extraction à la Herfindhal du fait qu'elle implique un *transfert de richesse* actualisé avant l'innovation afin de pouvoir financer la R&D.

D'un point de vue pratique, il est permis de tirer quelques enseignements de ce phénomène, notamment dans l'estimation de la formation des anticipations des prix des énergies. En effet la prise en compte des activités *endogènes* d'innovation des producteurs de ressources non renouvelables¹ peut permettre "d'aplanir" les projections fortement croissantes des règles hotelliniennes de $r\%$. SLADE M.E. (1982) parvient à cette conclusion en expliquant que des trajectoires de prix des ressources décroissantes peuvent survenir si l'on intègre la mutation technologique dans l'estimation.

¹Par exemple dans les prospections économétriques de long terme sur les corrélations entre prix d'offre et prix de demande des énergies. Cette prise en compte pouvant passer par l'introduction de variables de dépense de R&D de la part des firmes minières, et/ou des firmes consommatrices d'énergies.

Dans la section III nous allons voir que le choix technologique du monopole minier entre les deux types d'innovations n'est pas neutre pour la collectivité dans son ensemble.

III. Choix Technologique du monopole minier et bien-être collectif

Le comportement d'innovation du monopole minier est-il neutre du point de vue du bien-être collectif ? C'est à cette question que nous allons donner une réponse dans cette section en analysant les effets en termes de "welfare" du choix technologique du monopole complet. Cette réponse ne se basera pas sur un schéma global de comparaison entre des ensembles de projets de R&D¹, mais plutôt sur le rapprochement entre les deux types d'inventions "réductrice de coût" et "d'accessibilité des réserves". Selon le critère du bien-être social nous tenterons de fournir la direction d'une éventuelle réglementation du monopole en matière de choix technologique.

Afin de mettre en exergue les effets directs sur la sphère des consommateurs du choix technologique de la firme, nous allons supposer que le monopole complet est en face de deux projets de R&D rentables équivalents du point de vue de leur profitabilité. Ainsi à la date initiale, le monopole est en face d'un choix technologique *neutre du point de vue du profit futur actualisé*, c'est-à-dire que la firme peut investir une dépense de capital K dans la R&D d'une invention soit réductrice de coût, soit d'accessibilité, et l'innovation qui en résultera n'induera pas de distorsion dans le profit total. Les comportements de R&D et d'innovation de ces deux types d'inventions ayant été étudiés dans les deux sections précédentes (Propositions 1 et 3). Cependant l'hypothèse de neutralité de l'innovation sur le profit futur va induire une condition supplémentaire sur les paramètres des nouvelles technologies. En effet si c^0 et S^0 sont respectivement le coût unitaire d'extraction et la taille du gisement pré-invention, alors le profit total actualisé du monopole complet (si le coût de production du substitut est \bar{p}) s'écrit $\Pi^0 = w(q_0^0)/r$, où $q_0^0 = m^{-1}(I^0 + c^0)$, où la rente de rareté actualisée I^0 vérifie $S^0 = \int_0^{T^0} m^{-1}(I^0 e^{rt} + c^0) dt$ et la date d'épuisement obéit à $T^0 = \ln((\bar{p} - c^0)/I^0)/r$.

Si le monopole minier décide d'innover la technologie réductrice de coût $c < c^0$, il devra s'engager dans une dépense de R&D requise K , l'équilibre qui en résultera obéira à la proposition 1. Si K est en deçà du niveau critique $\bar{K} = (w(q_0^R) - w(q_0^0))/r$ alors l'innovation de la technologie nouvelle sera immédiate (en date $t=0$) et la trajectoire

¹A ce sujet le lecteur pourra se rapporter au numéro spécial de la revue Resources and Energy "Special Issues on Energy R&D" (1990), vol. 11, n° 2., notamment FISHELSON G., KROETCH B. (1990).

d'extraction, notée $\{q_t^R\}$, obéira à (45) (cf. supra, pour $c = \underline{c}$). Le profit total actualisé du monopole innovateur de l'invention réductrice de coût ainsi définie s'écrit directement $\Pi^R = (w(q_0^R)/r) - K$, où $K \leq \bar{K}$.

Par contre si le monopole décide plutôt d'innover une invention d'accessibilité de paramètres (\bar{S}, \bar{c}) telle que $\bar{c} > c^0$ et $\bar{S} > 0$, alors selon la proposition 3, si $K \leq \bar{\bar{K}} = (w(\bar{b}) - w(q_\infty))/r$ où \bar{b} vérifie (61), la politique optimale d'extraction obéira à (58) pour $\mathbf{m}^* = \mathbf{m}^A$ et $\mathbf{I}_2^* = \mathbf{I}^A$. Le profit total actualisé du monopole innovateur de l'invention d'accessibilité s'écrit (cf. 63), $\Pi^A = w(q_0^A)/r$, où $\{q_t^A\}$ est la trajectoire d'extraction optimale associée.

Afin que l'hypothèse de neutralité sur le profit futur de l'innovation soit respectée, les paramètres des inventions $(\underline{c}, \bar{c}, \bar{S})$ doivent vérifier $\Pi^R = \Pi^A$ et $K \leq \min(\bar{K}, \bar{\bar{K}})$.

On voit d'après les définitions de \mathbf{P}^A et \mathbf{P}^R que si la dépense de R&D requise pour acquérir l'un des deux brevets est négligeable alors la comparaison des trajectoires d'extractions, et donc l'évaluation du bien-être social relatif aux deux innovations seront directes. A des fins de simplifications, nous allons considérer que la dépense K est *effectivement nulle*. Bien que peu réaliste cette hypothèse permet d'obtenir rapidement une indication sur la nature du problème de l'impact du choix technologique du monopole sur le bien-être. Formellement cette hypothèse s'écrit $K=0$. Il vient directement que $q_0^A = q_0^R \Leftrightarrow \mathbf{I}^A + \mathbf{m}^A + c^0 = \mathbf{I}^R + \underline{c}$, pour que la neutralité sur le profit soit respectée. Si l'on se donne les paramètres technologiques \underline{c} et \bar{S} , il existera pour chacune de leur valeur, un niveau de coût $\bar{c} \equiv \bar{c}(\underline{c}, \bar{S})$ qui obéit à cette relation. Intuitivement on conçoit que plus vaste sera le stock de réserves récupérables, plus fort sera le niveau de coût post-innovation induisant la neutralité de l'innovation d'accessibilité ($\partial \bar{c} / \partial \bar{S} > 0$), et que la réduction du coût \underline{c} entraînera la réduction de \bar{c} ($\partial \bar{c} / \partial \underline{c} > 0$). En effet on peut montrer qu'en différentiant le système (58) (où $\mathbf{m}^* = \mathbf{m}^A$ et $\mathbf{I}_2^* = \mathbf{I}^A$) on a :

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{S}} \left[\int_{t^A}^{T^A} \frac{1 - e^{r(t-t^A)}}{m'(q_t^A)} dt - \frac{q_\infty}{r} \frac{\mathbf{I}^A - (\bar{p} - \bar{c})e^{-rt^A}}{(\bar{p} - \bar{c})\mathbf{I}^A} \right] = 1$$

Le crochet ci-dessus étant positif, $\partial \bar{c} / \partial \bar{S} > 0$. En procédant de même on détermine $\partial \bar{c} / \partial \underline{c} > 0$.

On va maintenant montrer que la trajectoire d'extraction lorsque l'invention d'accessibilité est innovée est toujours non inférieure à celle lorsque l'innovation est réductrice de coût, soit :

$$\forall t, q_t^A \geq q_t^R \Leftrightarrow p(q_t^A) \leq p(q_t^R) \quad (71)$$

En effet on a vu que $I^A - I^R \leq I^A + m^A - I^R = \underline{c} - c^0 < 0$ et d'après les proposition 2.(b) et 4.(b) , ainsi que la relation (66), il vient :

$$t^A < (>) T^R < T^0 < T^A \quad (72)$$

La trajectoire d'extraction R^1 avant épuisement va décroître toujours plus rapidement que la trajectoire A car :

$$\forall t \leq \min(t^A, T^R), \begin{cases} \frac{d(m(q_t^R) - \underline{c})}{dt} = \dot{m}^R = r I^R e^{rt} \\ \frac{d(m(q_t^A) - c^0)}{dt} = \dot{m}^A = r(I^A + m^A) e^{rt} \end{cases}$$

et comme $I^A + m^A < I^R$ la recette marginale nette R va croître plus rapidement que celle de la situation A, soit $\dot{m}^R > \dot{m}^A$. Cette dernière inégalité suffit à prouver que sur la période $[0, T^R]$, la trajectoire d'extraction A ne sera jamais inférieure à la trajectoire R, soit (71). De plus puisque pour tout $t \in T^R$, $q_t^R = q_\infty$, et que (cf. (72)) $T^R < T^A$, après épuisement dans le scénario R la trajectoire d'extraction A est non inférieure à q_∞ . Ainsi (71) est confirmé pour tout $t \in \hat{I}R_+$.

La figure 2 illustre le positionnement relatif des trajectoires de prix A, R et sans innovation (0). Notons ici que la position relative des dates T^R et t^A , soit $t^A < T^R$, supposée par la figure 2 n'est pas anodine mais constitue un résultat. En effet d'après les contraintes d'épuisabilité sur le gisement initial, il vient :

$$S^0 = \int_0^{t^A} q_t^A dt = \int_0^{T^R} q_t^R dt$$

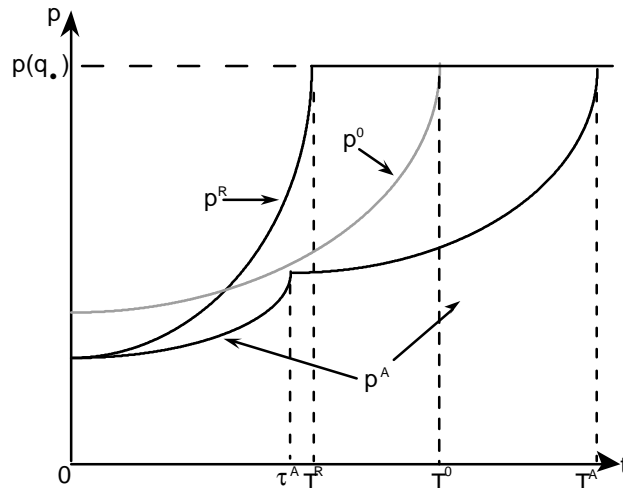


Figure 2. Trajectoires de prix des scénarios A, R, et 0 lorsque $K=0$.

¹La dénomination "trajectoire d'extraction R" (resp. A) signifie la trajectoire d'extraction lorsque l'innovation réductrice de coût (resp. d'accessibilité) est réalisée.

Et en vertu de (71) la double égalité précédente n'est vraie qu'à condition que $t^A < T^R$.

A partir de (71) on va montrer que l'impact sur le bien-être collectif de la solution d'innovation d'accessibilité est meilleur que celui de l'innovation réductrice de coût. Pour ce faire nous prenons comme indice du bien-être collectif la somme totale actualisée du surplus des consommateurs et des profits du producteur minier. En notant W^A cet indice dans l'alternative d'une innovation d'accessibilité par le monopole minier et W^R dans l'autre alternative (réductrice de coût), on définit :

$$W^A = \int_0^{T^A} e^{-rt} v(q_t^A) dt + \frac{v(q_\infty)}{r} e^{-rT^A} + \Pi^A \quad (73.a)$$

et

$$W^R = \int_0^{T^R} e^{-rt} v(q_t^R) dt + \frac{v(q_\infty)}{r} e^{-rT^R} + \Pi^R \quad (73.b)$$

En formant la différence $W^A - W^R$, il vient :

$$W^A - W^R = \int_0^{T^R} e^{-rt} [v(q_t^A) - v(q_t^R)] dt + \int_{T^R}^{T^A} e^{-rt} v(q_t^A) dt + \frac{v(q_\infty)}{r} (e^{-rT^A} - e^{-rT^R}) + \Pi^A - \Pi^R$$

où $v(q) = u(q) - p(q)q$, est le surplus net des consommateurs¹ (où $p(q)$ est leur demande inverse), et $u(q) = \int_0^q p(x) dx$ est le surplus brut.

Puisque les deux types d'innovations sont supposés être neutres du point de vue du monopole, il vient :

$$W^A - W^R = \int_0^{T^R} e^{-rt} [v(q_t^A) - v(q_t^R)] dt + \int_{T^R}^{T^A} e^{-rt} v(q_t^A) dt + \frac{v(q_\infty)}{r} (e^{-rT^A} - e^{-rT^R}) \quad (74)$$

D'après (71) et le fait que $v'(q) > 0$, le premier terme de la triple somme de (74) (second membre) est toujours positif. La somme des second et troisième termes du second membre de (74) est aussi positive car on peut récrire $\frac{v(q_\infty)}{r} (e^{-rT^A} - e^{-rT^R}) / r$ sous la forme :

$$\frac{v(q_\infty)}{r} (e^{-rT^A} - e^{-rT^R}) = - \int_{T^R}^{T^A} e^{-rt} v(q_\infty) dt \quad (75)$$

(75) dans (74) implique :

$$W^A - W^R = \int_0^{T^R} e^{-rt} [v(q_t^A) - v(q_t^R)] dt + \int_{T^R}^{T^A} e^{-rt} [v(q_t^A) - v(q_\infty)] dt \quad (76)$$

¹Ce surplus net est croissant $q > 0$: $v'(q) = -p'(q)q > 0$.

Etant donné qu'avant épuisement la trajectoire d'extraction A est au dessus du niveau de production de long terme q_∞ , le second terme du second membre de (76) est une somme positive, on en déduit donc que $W^A - W^R > 0$.

PROPOSITION 5

L'effet du choix technologique d'une firme minière en situation de monopole (complet) entre une innovation réductrice de coût et une innovation d'accessibilité sur le bien-être social n'est pas neutre. Si la R&D est sans coût et si les projets sont équivalents (neutralité sur les profits futurs) le bien-être social réalisable à partir du projet d'accessibilité des réserves est supérieur à celui réalisable à partir du projet réducteur de coût.

Le résultat précédent est très fort car il montre que le choix technologique du monopole minier en matière d'innovation sur le forage n'est pas neutre quant aux effets sur le bien-être social de l'économie consommatrice de ressource tant que la dépense de R&D associée à la découverte de l'invention est négligeable. La décision du monopole d'innover une technologie d'accessibilité des réserves probables provoque un gain en bien-être social plus élevé que celui issu de la décision d'innover une technologie réductrice de coût. C'est là un résultat radicalement différent de ceux dégagés en économie des ressources non naturelles où le principal type d'innovation de processus de production induisant des effets positifs sur le bien-être est la réduction du coût de production.

Il découle de notre résultat qu'un Etat (ou une agence mandatée par les instances publiques) représentant les consommateurs et concédant des droits d'exploitation des ressources non renouvelables à une seule firme minière, se doit d'être vigilant quant à la politique technologique de celle-ci. Si l'activité de R&D se trouve être une activité peu coûteuse et si les effets respectifs des deux alternatives d'inventions sur les profits futurs du monopole minier sont neutres, l'agence de contrôle se doit d'inciter ou de contraindre le monopole minier à adopter l'alternative d'un plan de R&D ayant pour but de mettre au point une innovation d'accessibilité. Un *corollaire intuitif* à la proposition 5 est que si la profitabilité du projet de R&D d'accessibilité est *inférieure* dans une certaine limite à celle de l'innovation réductrice de coût ($\Pi^R > \Pi^A > C > 0$), l'effet du choix technologique du monopole sur le bien-être social restera conforme à celui notifié dans la proposition 5.

La proposition 5 peu paraître paradoxale lorsque l'on sait que la politique d'extraction A est toujours plus prodigue que la politique R . La nature de ce paradoxe provient du fait que le critère du bien-être social retient comme préférable une situation pour laquelle la ressource est exploitée en quantité plus importante à toute solution alternative. En effet

l'équivalence des projets de R&D ainsi que la nullité du coût de la recherche impliquent la supériorité des niveaux d'extraction de la politique A sur la politique R. La réduction du coût d'extraction unitaire résultant du choix R par le monopole induit une amplification de la rareté ressentie par la firme vis-à-vis de la ressource, et donc une accélération du rythme d'extraction. On observe ce phénomène sur la figure 2 en remarquant que la pente de la trajectoire de prix (p^R) de la politique R est toujours plus forte, pour $t \in \mathcal{I}^R$, que celle de la politique A. La clef de cette situation paradoxale provient du fait que la politique A procure une rente de rareté actualisée plus faible que la politique R du fait de l'élargissement des réserves accessibles après innovation. Même si la politique d'extraction A est globalement plus dispendieuse en ressource que la politique R, l'amplification des réserves éloigne la date d'épuisement et incite le monopole à produire à un niveau plus élevé qu'avec la technologie réductrice de coût. De plus même si la production (avant épuisement) est en volume plus forte, la progression du rythme d'exploitation est moins soutenue qu'avec la politique R. La collectivité préférera donc toujours que la firme en place étende les réserves *in situ* plutôt qu'elle exploite un stock de ressource moindre à un coût d'extraction plus faible.

En termes d'implications sur la politique publique à mener pour contrôler le comportement d'innovation du monopole¹, il est évident que l'agence représentant les consommateurs devra mettre en place des mesures afin d'inciter ou de contraindre la firme à diriger sa recherche vers la mise au point de technologies d'accessibilité. Les moyens de cette politique sont multiples.

L'instauration d'un schéma qualitatif de taxe/subvention peut pertinemment contraindre le monopole à modifier sa politique de R&D dans le sens souhaité par l'agence. Si l'information que détient l'agence de contrôle sur la nature de la R&D du monopole est parfaite et si ce dernier opte pour une innovation réductrice de coût, un *schéma forfaitaire de taxe* induisant une modification du profit net actualisé rompra l'équivalence des projets de R&D à l'avantage du projet A. Cette solution est évidemment contingente à la possibilité qu'a réellement l'agence d'observer la nature des dépenses de R&D et leur affectation dans le processus de recherche. En filigrane apparaît alors l'éventualité d'une manipulation d'information de la part du monopole quant à la réalité de ses activités de recherche surtout si la profitabilité du projet R est légèrement supérieure à celle du projet A ($\Pi^R > \Pi^A > C > 0$). Il surgit alors un problème de sélection adverse subit par l'Etat qui ne peut connaître *a priori* les véritables préférences du monopole en matière de R&D et donc décider *ex ante* de la politique fiscale à mener. Un moyen de résoudre ce problème serait d'établir un contrat de concession d'exploitation stipulant des pénalités

¹Si l'on émet l'hypothèse "héroïque" d'un monopole altruiste le problème du contrôle s'étiole irrémédiablement. Si le monopole est public, après nationalisation par exemple, la politique d'extraction et de R&D ne sera plus conforme à la règle de gestion du monopole privé de maximisation du profit mais à celle de maximisation du surplus net et les effets sur le bien-être seront tout autre.

ex-post (taxe forfaitaire) si la technologie réductrice de coût est innovée alors que sa profitabilité est dans un voisinage proche de celle du projet de R&D A . Dans un premier temps, ce type de mécanisme bute bien évidemment sur les contraintes inhérentes à l'observation des techniques *in situ* après innovation même si l'on peut supposer qu'un audit qualitatif fiable peut être mené à bas coût "sur le terrain". Plus difficile sera le contrôle de la profitabilité réelle des différents projets de R&D une fois signé le contrat coercitif ci-dessus. Le monopole a effectivement intérêt à masquer les charges réelles de R&D afin de laisser supposer à l'agence que la rentabilité du projet R est toujours au dessus de celle du projet A ceci lui permettant d'éviter la pénalité *ex-post*. Il est clair qu'un *schéma incitatif* plus fin peut être mis en place à partir du comportement de l'agence de maximisation du surplus social lui permettant de passer outre l'asymétrie informationnelle *ex ante* inhérente au "type" du monopole en matière d'innovation. Dans le même esprit que la solution d'une taxe forfaitaire pénalisante, un schéma de taxe linéaire relié à la production peut être envisagé. BERGSTROM T.C. *et al.* (1981) ont montré, sur la base d'un cadre informationnel complet et suivant des coûts d'extraction sans effets de stocks, qu'il est possible pour un Etat d'induire l'efficacité dans la politique d'extraction du monopole par un schéma fiscal linéaire, c'est-à-dire proportionnel au niveau d'extraction, de la forme $s_t^*(k) = e^r k - m(q_t^*)$ où k est égal à la rente de rareté actualisée de la firme et q_t^* la politique d'extraction concurrentielle (cf. BERGSTROM T.C. *et al.* (1981), p. 28, relation (13)). Notons au passage que si l'agence impose $k=0$, elle peut alors collecter toute la rente (de rareté) totale actualisée tout en abandonnant au monopole le surplus du producteur. Suivant un schéma fiscal similaire et pour un niveau de k approprié, l'agence pourra rétablir la trajectoire A si le monopole choisit d'innover l'invention réductrice de coût, ceci ayant pour effet d'inciter le monopole à choisir directement le projet A . KARP L. LIVERNOIS J. (1992) ont prolongé l'analyse de BERGSTROM T.C. *et al.*, *ibid*, en supposant d'une part l'apparition d'effets de stocks dans la technologie d'extraction ($\mathbb{C}(q,S)/\mathbb{S}\mathbb{E}0$) et d'autre part un cadre informationnel moins fort que celui de BERGSTROM T.C. *et al.*

Le cas plus général et plus pertinent où la R&D n'aboutit sur l'invention qu'à la condition expresse où la firme innovatrice s'acquitte d'une dépense capitalisée K ne permet pas de généraliser clairement la proposition 5. Les conclusions en termes de bien-être collectif ne sont pas définitives dès que K est positif.

Conclusion et Dépassements

Dans ce travail, nous avons vu, sous l'angle d'un monopole minier, comment la recherche et développement est à même de restructurer la gestion des ressources non

renouvelables. En différenciant deux orientations dans la R&D, pertinentes dans les industries minières (baisse des coûts de production et mise en valeur *technologique* du patrimoine minier), nous avons pu effectuer une analyse de l'évolution de l'interaction entre la composante technologique et la composante "naturelle" (les gisements *in situ*). Bien qu'essentielle, la R&D de technologies qui réduisent le coût par mètre foré n'est pas la seule composante de l'innovation dans les industries minières. L'adoption de ces technologies renforce la précarité des ressources en accélérant l'extraction, mais peut d'un autre côté rapprocher l'entrée de substituts produits par des technologies de type "backstop".

La prise en compte d'une R&D *spécifique* aux industries minières, nous a amené à considérer les innovations technologiques qui permettent d'élargir le volume des ressources accessibles ou bien de récupérer des réserves dites probables. Ces techniques reliées à l'activité d'exploration géologique sont "fortement capitalistiques" et induisent le plus souvent une hausse du coût par mètre foré. Dans l'ensemble, ces innovations rallongent la durée de vie de la firme minière, même si elles réduisent sa rente. De plus d'un point de vue collectif, ces innovations "d'accessibilité" semblent dominer les innovations "réductrices de coûts" du moins pour des projets de R&D peu coûteux.

Bien évidemment il faut, par la suite, examiner ces comportements de R&D dans un cadre de concurrence de marché minier autre que le monopole, afin de voir notamment si les relations "classiques"¹ entre R&D, innovation et structure de marché restent valides lorsque la ressource produite est non renouvelable.

Annexe A

Soit $\Pi(\Sigma, q, q'; c)$, le profit total actualisé de monopole entre deux dates q et q' réalisable sur l'extraction d'un gisement de taille S :

$$\Pi(\Sigma, q, q'; c) = \int_q^{q'} e^{-rt} [R(q_t) - cq_t] dt \quad s/c \quad \Sigma = \int_q^{q'} q_t dt, \quad q \leq t \leq q' \quad (A.1)$$

Le politique d'extraction optimale associée à la maximisation de $\Pi(\Sigma, q, q'; c)$ est donnée par (en appliquant le principe du maximum de Pontryagin) :

$$\forall t \in [q, q'], \quad m(q_t^*) - c = I e^{rt}, \quad \Sigma = \int_q^{q'} q_t^* dt \quad (A.2)$$

où I est une constante positive.

Le profit optimal sur la trajectoire décrite par (A.2) s'écrit alors :

$$\Pi^*(\Sigma, q, q'; c) = \int_q^{q'} e^{-rt} [R(q_t^*) - cq_t^*] dt \quad (A.3)$$

¹C'est à dire les thèses néo-schumpétérienne, par exemple GILBERT R., NEWBERY D. (1982), ou encore les travaux de REINGANUM J. (1989).

En intégrant par parties, il vient :

$$\Pi^*(\Sigma, \mathbf{q}, \mathbf{q}'; c) = \left[-\frac{1}{r} e^{-rt} [R(q_t^*) - c q_t^*] \right]_q^{q'} + \frac{1}{r} \int_q^{q'} e^{-rt} [m(q_t^*) - c] \frac{dq_t^*}{dt} dt \quad (\text{A.4})$$

En substituant (A.2) dans (A.4), il vient :

$$\Pi^*(\Sigma, \mathbf{q}, \mathbf{q}'; c) = \frac{1}{r} \left\{ e^{-rq} [R(q_q^*) - c q_q^*] - e^{-rq'} [R(q_{q'}^*) - c q_{q'}^*] \right\} + \frac{1}{r} \int_q^{q'} \frac{dq_t^*}{dt} dt \quad (\text{A.5})$$

Par changement de variable sur le dernier terme de (A.5), on a :

$$\Pi^*(\Sigma, \mathbf{q}, \mathbf{q}'; c) = \frac{1}{r} \left\{ e^{-rq} [R(q_q^*) - c q_q^*] - e^{-rq'} [R(q_{q'}^*) - c q_{q'}^*] \right\} + \frac{1}{r} \int_{q_q^*}^{q_{q'}^*} dq_t^* \quad (\text{A.6})$$

En invoquant à nouveau (A.2) et en simplifiant, il vient :

$$\Pi^*(\Sigma, \mathbf{q}, \mathbf{q}'; c) = e^{-rq} \frac{w(q_q^*)}{r} - e^{-rq'} \frac{w(q_{q'}^*)}{r} \quad (\text{A.7})$$

où $w(q) = R(q) - m(q)q$.

Ainsi :

$$\frac{\partial \Pi^*(\Sigma, \mathbf{q}, \mathbf{q}'; c)}{\partial \mathbf{q}} = -e^{-rq} w(q_q^*), \quad \frac{\partial \Pi^*(\Sigma, \mathbf{q}, \mathbf{q}'; c)}{\partial \mathbf{q}'} = e^{-rq'} w(q_{q'}^*)$$

Annexe B

* dI / dS .

Prenons (A.1) et (A.2). Si l'on différencie la contrainte, saturée, d'épuisabilité en S , il vient :

$$1 = \int_q^{q'} \frac{dq_t^*}{d\Sigma} dt = \frac{dI}{d\Sigma} \int_q^{q'} \frac{e^{rt}}{m'(q_t^*)} dt \quad (\text{B.1})$$

$$1 = \frac{dI}{d\Sigma} \int_q^{q'} \frac{e^{rt}}{dm/dq_t^*} dt = \frac{dI}{d\Sigma} \int_q^{q'} \frac{e^{rt} dq_t^*}{dm/dt} \quad (\text{B.2})$$

Or en différenciant (A.2) en t , il vient $dm/dt = rI e^{rt}$ (principe d'arbitrage), d'où dans (B.2) :

$$1 = \frac{dI}{d\Sigma} \frac{1}{rI} \int_{q_q^*}^{q_{q'}^*} dq_t^* = \frac{dI}{d\Sigma} \frac{q_{q'}^* - q_q^*}{rI} \quad (\text{B.3})$$

comme $q_{q'}^* < q_q^*$, car $dq_t^*/dt = (dm/dt) / m'(q) < 0$, d'après (A.2), il vient :

$$\frac{dI}{dS} \equiv \frac{dI}{d\Sigma} = \frac{rI}{q_{q'}^* - q_q^*} < 0 \quad (\text{B.4})$$

* dI / dc

Prenons (A.1) et (A.2). Si l'on différentie la contrainte saturée d'épuisabilité en c , il vient :

$$0 = \frac{dl}{dc} \int \frac{q' e^{rt} dt}{q m'(q_t^*)} + \int \frac{q' dt}{q m'(q_t^*)} \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{dl}{dc} = - \frac{\int \frac{q' dt}{q m'(q_t^*)}}{\int \frac{q' e^{rt} dt}{q m'(q_t^*)}} = -e^{\tilde{r}q} < 0 \quad (\text{B.6})$$

Ceci en invoquant le théorème de la moyenne car m' est de signe négatif constant.

Bibliographie

- AMUNDSEN E.S. (1992) *Théorie des Ressources Epuisables et Rente Pétrolière* . Economica, Paris, 1992.
- BASAR T. (1989) "Time Consistency and Robustness of Equilibria in Non-Cooperative Dynamic Games" in van der PLOEG F., de ZEEUW A.J. (Eds) *Dynamic Policy Games in Economics* , 1989, Elsevier Science Publishers B.V., (North-Holland)
- BERGSTROM T.C., CROSS J.G., PORTER R.C. (1981) "Efficiency-Inducing Taxation for a Monopolistically Supplied Depletable Resource" *Journal of Public Economics*, vol. 15, n° 1, p : 23-44.
- BOURGEOIS B., MARTIN J.-M. (1991) "Le pétrole se substitue au pétrole : les effets du progrès technologique sur la production pétrolière". *Revue de l'Energie* n°432, p : 519-527.
- DASGUPTA P., STIGLITZ J.E. (1980) "Industrial Structure and the Nature of Innovative Activity " . *Economic Journal*, vol. 90, p : 266-293.
- DASGUPTA P., STIGLITZ J.E. (1986) "Strategic considerations in Invention and Innovation : the case of Natural Resources" in BINMORE K. et DASGUPTA P. *Economic Organizations as Games* , Blackwell B (ed), Oxford, 1985.
- FARZIN Y. (1992) "Time Path of scarcity Rent in the Theory of Exhaustible Resources" *Economic Journal*, vol. 102, n° 413, p : 813-830 .
- FORAY D., LE BAS C. (1991) "Economie de la Recherche Industrielle" in ARENA R., *et al. Traité d'Economie Industrielle*, Economica, Paris.

- FORAY D., ZUSCOVITCH E. (1991) "L'innovation entre la production et le système technique" in ARENA R., *et al. Traité d'Economie Industrielle*, Economica, Paris.
- FISHELSON G., KROETCH B. (1990) "Energy R&D Portfolio Analysis" *Resources and Energy "Special Issues on Energy R&D"*, vol. 11, n° 2., p. 195-213.
- GILBERT R., NEWBERY D. (1982) "Preemptive Patenting and the Persistence of Monopoly" *American Economic Review*, vol. 72, n°3, p : 514-526.
- GIROD J. (1977) *La Demande d'Energie. Methodes et Techniques de Modélisation*. Energie et Société, CNRS, 1977.
- HARTWICK J. M. (1989) *Non-renewable Resources Extraction Programs and Markets*. Harwood Academic Publishers, Postrasse, 1989.
- HELMER J.-Y. (1972) *La Commande Optimale en Economie*, Dunod, Paris.
- HERFINDHAL O.C. (1967) "Depletion and Economic Theory" in GAFFNEY M. (ed.) *Extractive Resources and Taxation*, Madison, University of Wisconsin Press.
- HOEL M. (1978) "Resource Extraction, Substitute Production and Monopoly" *Journal of Economic Theory*, vol. 19, n°1, p : 28-37.
- _____ (1983) "Monopoly Resource Extraction under the presence of Predetermined Substitute Production" *Journal of Economic Theory*, vol.30, n°1, p : 201-212.
- HUNG N.M., QUYEN N.V. (1993) *Dynamic Timing Decisions Under Uncertainty : Essays on Invention, Innovation and Exploration in Resource Economics*. vol. 406. Coll. Lectures Notes in economics and Mathematical Systems . Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1994.
- I.F.P. (1988) Rapport Annuel, Institut Français du Pétrole.
- KARP L.S., LIVERNOIS J. (1992) "On efficiency-inducing taxation for a non-renewable resource monopolist" *Journal of Public Economics*, vol. 49, n°2, p: 219-240.
- KARNIK J.L., MASSERON J. (1995) "L'impact du progrès technologique sur l'industrie du pétrole" *Cahiers du C.E.G.*, n° 21, IFP-ENSPM.
- MASSERON J. (1991) *L'Economie des Hydrocarbures*. Editions Technip. (4 ed.) . Paris.
- PEARCE D., TURNER K. (1990) *Economics of Natural Resources and the Environment*. Harvester Wheatsheaf, Londres.
- REINGANUM J.F. (1989) "The Timing of Innovations : Research, Development and Diffusion" in SCHMALENSEE R., WILLIG R. (Eds) *Handbook of Industrial Organization* (vol.1) , 1989, Elsevier Science Publishers, B.V., Amsterdam.
- SLADE M.E. (1982) "Cycles in Natural Resources Commodity Prices : An Analysis of the Time Domain" *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 9, n°2, p : 122-137.
- STIGLITZ J. (1976) "Monopoly and the Rate of Extraction of Exhaustible Resources". *American Economic Review*, vol. 66, n°4, p : 655-661.
- TAKIN M. (1983) "A review of Prospects for Enhanced Oil Recovery" *OPEC Review*, vol.7, n°4, p : 381-404.
- TIROLE J. (1993) *Théorie de l'Organisation Industrielle*, Economica, 1993.