EFFORTS D'INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES DANS L'OLIGOPOLE MINIER

Jean-Christophe POUDOU

Cahier N° 02.06.28

Juin 2002

Centre de Recherche en Economie et Droit de l'ENergie – CREDEN
Université de Montpellier I
Faculté des Sciences Economiques
BP 9606
34 054 Montpellier Cedex France
Tel. : 33 (0)4 67 15 83 32
Fax. : 33 (0)4 67 15 84 04
e-mail : jcpoudou@sceco.univ-montp1.fr

EFFORTS D'INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES DANS L'OLIGOPOLE MINIER*

En économie des ressources non renouvelables, l'analyse de l'innovation est largement focalisée sur la pertinence tactique et stratégique de l'adoption d'une technologie de substitution (backstop), voir M. HOEL (1978), P. Dasgupta *et al.* (1986), N.M. Hung, N.V. Quyen (1993), C. Harris, J. Vickers (1995), ou cf. J.-C. Poudou (1997), pour un survol. 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. De même certains économistes, notamment R. Cairns (1990), (1994) mettent en avant la composante technologique "*au sein la mine*" afin de transgresser la rigidité de la vision hotellinienne.

Peu d'analyses ont tenté (cf. toutefois Y. Farzin (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.

A la lumière des analyses factuelles et empiriques sur le sujet (cf. B. Bourgeois B., J.-M. Martin (1991), J.L. Karnik, J. Masseron (1995), N. Alazard (1996) par exemple), on peut proposer une *typologie binaire* pour les innovations de processus d'extraction, cf. J.-C. Poudou (1996). D'un côté des technologies qui permettent de réduire le coût unitaire et marginal d'extraction, c'est-à-dire des *inventions réductrices de coût*, de l'autre des technologies, plus spécifiques aux cadre épuisable des ressources, destinées à valoriser un patrimoine minier inaccessible (*inventions d'accessibilité).* Dans J.-C. Poudou (1998), nous avons mené une analyse microéconomique des caractéristiques de R&D (*timing*, dépenses…) pour des situations industrielles socialement optimales et de monopoles plus ou moins contraints.

Eu égard aux faits stylisés industriels[1] des secteurs de ressources épuisables, nous désirons ici poursuivre cette analyse dans un cadre oligopolistique de marché de la ressource non renouvelable. Pour ce faire nous avons choisi de nous situer à la suite des analyses sur l'oligopole minier avec droits de propriétés parfaitement définis[2] et de les

---

* Une version initiale de ce papier a fait l'objet d'une communication aux XIèmes Journées du GREEN (U. Laval, Quebec, Canada).

[1]J. Griffin (1985) a validé de façon économétrique la configuration d'oligopole asymétrique "frange *vs* cartel" pour le marché pétrolier mondial. Voir aussi D. J. Teece *et al.* (1993). Dans J.-C. Poudou (1996), nous avons abordé le problème des courses aux brevets sur les technologies réductrices de coût et d'accessibilité dans la situation frange concurrentielle *vs* cartel.

[2]En opposition aux oligopoles miniers en "common pool" où le gisement est unique. Cf. J. Mc Millan, H.-W. Sinn et S. Clemhout, H. Wan Jr (1989).

coupler avec les approches de la R&D continue non appropriable (sans brevet exclusif) initiés par P. Dasgupta, J. Stiglitz (1980).

Notre travail est articulé comme suit. Dans la première section nous exposons l'analyse de l'oligopole minier avec droits de propriétés parfaitement définis en mettant en exergue les résultats sur lesquels nous nous appuierons. Dans la section II, nous rappelons brièvement les résultats de l'analyse de P. Dasgupta, J. Stiglitz (1980) sur une R&D "réductrice de coût" continue non appropriable au sein d'un oligopole traditionnel, et nous en donnons une "utile" version répétée. Nous effectuons le croisement des deux pans d'analyses dans la section III, en étudiant la R&D "réductrice de coût" continue au sein d'une gamme d'oligopoles miniers. Dans la dernière section, nous reproduisons l'analyse de la section III mais pour une R&D continue de technologies d'accessibilité.

Les résultats auxquels nous parvenons dans ce papier peuvent être résumés comme suit.
Dans une situation d'oligopoles miniers symétriques du point de vue des réserves (homogénéité des gisements) avec libre entrée sur le marché des outputs, la R&D réductrice de coût d'équilibre de Nash par firme minière est plus faible qu'en univers statique répété, mais le nombre de firmes actives y est plus important. Par contre au sein de l'oil'igopole symétrique sur ses coûts d'extraction, si l'on définit une technologie de R&D d'accessibilité sur les réserves récupérables, croissante, concave, bornée, pour laquelle le coût d'extraction est invariant, aucun équilibre de Nash output-recherche avec libre entrée n'est concrétisable. Ce résultat d'inexistence provient de la conjugaison simultanée des deux hypothèses de libre entrée et de technologie de R&D concave. Dans la formation endogène des marchés miniers où il existe des possibilités géologiques d'exploitation de gisements, la R&D d'accessibilité est un facteur d'instabilité car elle permet d'accentuer le volume des réserves dans un processus cumulatif d'entrée et d'accélération de l'effort de recherche. Toutefois ce résultat ne peut constituer la mise en exergue d'une absolue inefficience de la R&D d'accessibilité du fait que l'hypothèse de libre entrée est fortement contingente à la réalisation d'une distribution géologique illimitée des gisements. Or celle-ci ne peut être assurée que sous des conditions extrêmes.
Ainsi nous-t-il semble plus pertinent de poursuivre, en traitant de marchés oil'igopolistiques où règnent de fortes barrières géologiques à l'entrée, en relâchant toutefois les hypothèses d'homogénéité des réserves ou de symétrie des coûts. Dans ces configurations, nous pouvons déterminer (cf. propositions 6 à 8), que dans un oil'igopole hétérogène, les firmes les mieux dotées en réserves impriment l'effort de R&D réductrice de coût le plus important. Par contre pour ces mêmes firmes, le résultat précédent n'est pas obligatoirement vrai lorsqu'il s'agit d'une R&D d'accessibilité, toutefois l'issue de cette recherche ne déstructure pas la distribution géologique initiale, c'est-à-dire que les firmes les mieux dotées le restent. De plus pour cette même classe de R&D, l'oil'igopole homogène-asymétrique induit une structuration des dépenses en capital dans l'ordre croissant des coûts unitaires d'extraction :

les firmes minières dont les coûts sont les plus faibles investissent plus fortement dans la R&D d'accessibilité, s'octroyant ainsi un avantage géologique au travers de leur avantage technologique.

Section I. Oligopole minier avec droits de propriétés parfaitement définis : Théories de «l'Oil'igopole»

S'appuyant sur les conceptions "classiques" de l'oligopole (cf. C. Shapiro (1989) pour un tour d'horizon), la théorie de l'oligopole minier avec droits de propriétés parfaitement définis a été principalement développée par les contributions de T.R. Lewis, R. Schmalensee (1980.a), (1980.b) puis G. Loury (1986)[3].

Dans ce cadre d'analyse chaque firme minière connaît la taille récupérable (soit exacte soit espérée) du gisement qu'elle exploite et qu'elle propose d'offrir sur le marché, tout en cherchant la maximisation de son profit total actualisé[4]. La structure générale du modèle générique représente une industrie minière composée de n firmes (n 2). Chacune des firmes exploite un gisement d'une ressource non renouvelable ($S_t^i, i = 1, \dots n$ au temps t). La demande inverse $p(Q)$ est normale ($p'(Q) < 0$) et connue de chaque firme. A chaque instant, la firme i extrait un montant q_t^i et l'industrie offre une quantité de ressource $Q_t = \sum_{i=1}^n q_t^i$. Chaque firme est supposée supporter un coût variable total d'extraction $C(q_t^i)$ de type hotellinien, c'est-à-dire n'intégrant pas d'effets de stocks. Le taux d'actualisation de l'industrie r est commun à chaque firme.

Dans le modèle de T.R. Lewis, R. Schmalensee (1980.a), le plus général, les fonctions de coûts d'extraction sont de forme linéaire, soit $C(q_t^i) = c^i q_t^i$, et la demande inverse admet un prix d'étranglement ou encore prix "*choke off*" $\overline{p}$, tel que $p(0) = \overline{p}$, ce qui laisse entrevoir (on le sait par le Principe d'Epuisement de D. Newbery (1984)) que l'extraction totale des n gisements s'effectuera en temps fini. Trois autres hypothèses sont supposées tenir :

* $p(0) = \overline{p} > \overline{c} = \max\{c^1, \dots, c^n\}$

* L'élasticité-prix de la demande $h(Q) = -p(Q)/(p'(Q)Q)$, est strictement décroissante en Q (croissante en p), soit $h'(Q) < 0$. Cette hypothèse assure la concavité stricte du profit instantané d'une firme donnée.

* Il existe un prix $\underline{p}$ tel que $\underline{p}\left[1 - \left(1/[nh(\underline{Q})]\right)\right] = \underline{c} \equiv \min\{c^1, \dots, c^n\}$ et où $p(\underline{Q}) = \underline{p}$.

La concrétisation de l'équilibre de Nash-Cournot dynamique de cet oil'igopole s'avère être en *boucle ouverte*. En effet les auteurs supposent que chaque firme adopte un

---

[3]On justement doit à cet auteur la dénomination ludique "d'Oil'igopole" pour qualifier l'oligopole minier.

[4]Si des éléments d'incertitudes, dont nous ne traiterons pas ici, surviennent (sur la taille du stock initial, sur la demande, sur les coûts ...) la cible est bien sûr la maximisation de l'espérance du profit total actualisé.

comportement de maximisation du profit total actualisé *via* une trajectoire temporelle d'extraction de son gisement tout en considérant que les trajectoires des autres firmes sont fixées à leurs réalisations[5]. Le problème particulier de la firme représentative *i* s'écrit :

$$\max_{\{q_t^i\}} \int_0^{\infty} e^{-rt} \left[p(\sum_{j=1}^{n} q_t^j) - c^i \right] q_t^i dt \tag{1}$$

sous la contrainte cinétique d'épuisabilité de son stock :

$$\dot{S}_t^i = -q_t^i \tag{2}$$

L'Hamiltonien du problème s'écrit : $"i=1..n$

$$H_t^i = e^{-rt} \left[p(\sum_{j=1}^{n} q_t^j) - c^i \right] q_t^i - l_t^i q_t^i$$

Les conditions de premier ordre s'écrivent :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial H_t^i}{\partial q_t^i} = e^{-rt} \left[p(Q_t) - c^i + p'(Q_t) q_t^i \right] - l_t^i \leq 0 \\ q_t^i \dfrac{\partial H_t^i}{\partial q_t^i} = e^{-rt} \left[p(Q_t) - c^i + p'(Q_t) q_t^i \right] - l_t^i = 0 \end{cases} \tag{3}$$

$$\frac{\partial H_t^i}{\partial S_t^i} = \dot{l}_t^i = 0 \Rightarrow \forall t,\ l_t^i = l^i \geq 0 \tag{4}$$

Les conditions de transversalité se résument par :

$$\lim_{t \to \infty} l^i S_t^i = 0 \tag{5}$$

Les conditions (3) et (4) sont assez classiques. La recette marginale nette actualisée de chaque firme est constante tant que la firme produit. Cette propriété de constance est inhérente au caractère hotellinien du coût d'exploitation : la variable l^i représentant la rente marginale actualisée du producteur *i*. Dès que la recette moyenne nette actualisée devient inférieure à la recette marginale nette actualisée la firme cesse toute production. Une caractéristique fondamentale du modèle de T.R. Lewis *et al.* est que les firmes peuvent produire de façon séquentielle selon leurs caractéristiques intrinsèques de coût et de taille initiale des réserves. Les hypothèses du modèle[6] sont suffisantes pour assurer l'existence de l'équilibre de Nash-Cournot de l'oligopole minier. La preuve de l'existence avancée par les auteurs est basée sur un argument de point fixe concernant la rente de rareté actualisée.

---

[5]La cohérence dynamique de l'équilibre est alors assurée, selon la proposition de M. Eswaran, T. Lewis (1985), qui s'énonce : " *Si la règle de décision de chaque firme au sein de l'équilibre de Nash rétroactif est indépendante des stocks des autre firmes, alors un équilibre rétroactif est aussi un équilibre en boucle ouverte*". Et l'on sait que tout équilibre rétroactif est dynamiquement cohérent du moins au sens faible (cf. Fait 6 et 8 de T. Basar (1989)).

[6]Les hypothèses du modèle de T.R. Lewis, R. Schmalensee (1980) sont similaires à celles qu'avancent C. Franck Et R. Quandt (1963) pour démontrer l'existence de l'équilibre de Nash-Cournot d'un oligopole à *n* joueurs.

PROPOSITION 1 : ***T.R. Lewis, R. Schmalensee (1980.a)***

Un équilibre en boucle ouverte non coopératif satisfaisant les conditions (3) à (4) existe et implique : a) l'existence d'une date finie T *à laquelle toute extraction cesse, b)* $Q_t > 0$ *pour* $0 \leq t < T$*, c)* $l^i > 0, \forall i = 1\ldots n$*, d)* $S_0^i = \int_0^\infty q_t^i dt, \forall i = 1\ldots n$*, e)* $p(t)$ *est continu pour* $0 \leq t < T$ *et f)* $p(t) \geq \underline{p}$ *pour* $0 \leq t < T$.

L'équilibre en boucle ouverte non coopératif de l'oligopole minier lorsque les coûts d'extractions sont hotelliniens induit donc une trajectoire de prix continue. L'existence d'un prix d'étranglement de la demande implique que les principes de prix terminal et d'épuisement dE D. Newbery soient valides pour l'oligopole minier : le prix atteint $\overline{p}$ en date *T*. Les trajectoires de prix des équilibres de Nash-Cournot se situent entre le cas parfaitement concurrentiel (prix net croissant au taux *r*) et le cas monopolistique (recette marginale nette de l'industrie croissant au taux *r*). Les caractéristiques intrinsèques des équilibres OLNC[7] dépendent fortement des caractéristiques propres de chaque firme, notamment en matière de coût unitaire d'extraction et de taille des réserves. Certains résultats intéressants dépendent des hypothèses que l'on peut avancer au sujet de ces paramètres. Tour à tour examinons le cas où les *n* structures de coût des firmes sont identiques (oligopole symétrique), puis le cas asymétrique.

i) Coûts d'extraction égaux : oligopole symétrique

La classe des oligopoles symétriques a été initialement étudiée par T.R. Lewis, R. Schmalensee (1980) puis réexaminée par G. Loury (1986).

L'hypothèse inhérente à ce cas symétrique s'écrit : $\forall i = 1\ldots n, c^i = c$. Ainsi la condition de cessation d'activité de *i* dans (3) ne dépendra donc que de sa propre taille de réserve initiale, puisque le fait que $c = \max_i c^i < \overline{p}$ induit un démarrage de la production dès la date *t*=0 pour les *n* firmes minières. L'équilibre symétrique se caractérise alors par un couple (l^i, T^i) pour toute firme, dont la réalisation gouverne la trajectoire d'extraction. Récrivons les conditions du premier ordre sous une forme simple : *"i*, avec *a(x)=dx/dQ*,

$$p(Q_t) + a(p(Q_t))q_t^i = e^{rt} l^i + c \equiv p^i(t),\ 0 \leq t \leq T^i \tag{6.a}$$

$$p(Q_t) \leq p^i(t) \Leftrightarrow q_t^i = 0,\ t > T^i \tag{6.b}$$

$$S_0^i = \int_0^{T^i} q_t^i \, dt \tag{6.c}$$

Dans (6.a), la notation $p^i(t)$ constitue le coût marginal de production *réellement* supporté par la firme *i* au temps *t*. Il se compose de la somme du coût marginal technique d'exploitation c^i (=*c* ici) et du coût d'usage marginal de la ressource, c'est-à-dire la rente de rareté au temps

[7]Abréviation pour Nash-Cournot en boucle ouverte.

t, $e^{rt} l^i \,.\, p^i(t)$ joue en dynamique le rôle du coût marginal de production dans l'approche Nash-Cournot traditionnelle de l'oligopole symétrique.

a) Oligopole symétrique-homogène

Le premier cas générique envisageable est celui où toutes les firmes ont des gisements identiques, soit : $\forall i, S_0^i = S$, c'est-à-dire où les réserves sont homogènes "en coupe transversale". Cette situation polaire constitue le cas parfaitement symétrique où les *n* firmes minières entament et achèvent leur production en la date *T*, telle que le prix d'offre de la ressource atteint le niveau "d'étranglement" $\overline{p}$. En effet toutes les firmes vont dégager la même rente de rareté actualisée puisque la seule façon d'assurer la saturation de leur contrainte d'épuisement (6.c), est de suivre une même trajectoire pour la recette marginale. Ainsi tous les $p^i(t)$ seront identiques, et inférieurs au prix d'offre de l'industrie le long de la trajectoire d'équilibre. Le relâchement de la concentration industrielle dans l'oligopole minier parfaitement symétrique fait converger son seul équilibre OLNC vers l'équilibre parfaitement concurrentiel.

b) Oligopole symétrique-hétérogène

Le cas hétérogène où la symétrie sur la taille des réserves est abandonnée, est beaucoup plus intéressant ne serait ce que du point de vue de la pertinence de l'hypothèse. L'intuition conduit à penser que la firme qui détient les réserves les plus vastes restera en production le plus longtemps car la valeur marginale de ses gisements sera plus faible et donc le rythme d'extraction moins soutenu. Cette intuition s'avère être valide dans cette situation "coûts symétriques-réserves hétérogènes" (que nous nommerons symétrique-hétérogène) .

***PROPOSITION 2 :* T.R. Lewis, R. Schmalensee (1980.a), G. Loury (1986)**

Si $c^i = c, \forall i = 1 \ldots n$ *et si pour i et j donnés* $S_0^i > S_0^j$ *alors a) la firme i produit plus à chaque instant et épuise ses réserves plus tard, b)* p_0 *et T sont plus importants que si les tous les gisements initiaux étaient de même taille, la ressource est extraite sur un rythme plus lent, c) la rente de i est plus faible que celle de j :* $l^i < l^j$.

La cas symétrique-hétérogène démontre que la structure de marché de l'oligopole minier est non seulement dépendante de la structure des coûts relatifs d'exploitation mais aussi de la distribution des réserves entre les firmes. Dans ce cadre là, la firme la mieux dotée demeure en position "dominante" *ex post* alors qu'*ex ante* la concrétisation OLNC de l'équilibre de l'oligopole minier n'octroie aucun avantage tactique. A l'inverse les firmes les moins biens dotées sortent rapidement du marché.

ii) Oligopole asymétrique

Par oligopole asymétrique, on entend ici aussi bien l'existence d'une certaine hétérogénéité dans les tailles initiales des gisements des différentes firmes, que des différences au niveau des coûts unitaires d'exploitations. Sur la base de cette asymétrie générale, classons les *n* firmes minières selon l'ordre croissant de leur coût unitaire. Ainsi l'indice *i* représentant les firmes obéit à la séquence : $c^1 \leq c^2 \leq \ldots \leq c^i \leq \ldots \leq c^n$, avec au moins une inégalité stricte.

Les équilibres OLNC de l'oligopole asymétrique respectent la proposition 1 mais pas la proposition 2. De façon générale il est difficile de donner les caractéristiques de ces équilibres. Toutefois, T.R. Lewis, R. Schmalensee avancent et discutent la proposition suivante :

PROPOSITION 3 : T.R. Lewis, R. Schmalensee (1980.a)

Si $c^i > c^j$ pour i et j donnés, à l'équilibre OLNC il est possible que a) des firmes ne démarrent pas la production en t=0, b) si Τ(i,j) est l'intervalle commun d'extraction de i et j, $\forall t \in \mathrm{T}\,(i,j), q_t^i < (\geq) q_t^j$, c) l'inefficacité[8] productive implique que $T^i < T^j$.

La preuve qu'avancent les auteurs est partiellement basée sur un exemple de duopole. Nous allons ici donner une preuve plus générale.
Pour ce faire, considérons les firmes *i* et *j* données telles que $c^i > c^j$. Nous définissons aussi les sigles suivant : $S_{i/j}$ désigne l'intervalle de temps durant lequel ces deux firmes produisent simultanément, M_k , *k=i,j*; celui tel que la firme *k* possède un "monopole" relatif ou particulier vis-à-vis de la firme *j*, c'est-à-dire que *i* est en production alors que *j* ne l'est pas. Tout au long de l'intervalle total de production de *i* et *j*, ne peuvent apparaître que les phases suivantes : I) M_i - $S_{i/j}$ qui implique donc que $T^i = T^j$, II) M_j - $S_{i/j}$ qui implique aussi $T^i = T^j$, III) M_i - $S_{i/j}$ - M_i qui implique $T^i > T^j$, IV) M_i - $S_{i/j}$ - M_j qui implique $T^i < T^j$, V) M_j - $S_{i/j}$ - M_j qui implique $T^i < T^j$, VI) M_j - $S_{i/j}$ - M_i qui implique $T^i > T^j$, VII) $S_{i/j}$ - M_i qui implique $T^i > T^j$, VIII) $S_{i/j}$ - M_j qui implique $T^i < T^j$ et enfin IX) $S_{i/j}$ qui implique $T^i = T^j$. En fait la condition $c^i > c^j$ va permettre d'éliminer des cas et de ne retenir que les situations possibles au sens de la proposition 3 en faisant apparaître des conditions supplémentaires notamment sur la taille relative des réserves de *i* et *j*. Nous noterons t^k,

[8]La production socialement efficace, qui minimise le coût social actualisé, impliquera que le gisement dont l'extraction est la moins coûteuse soit mis en production avant tout gisement dont le coût est plus fort. R. SOLOW (1974), p. 4, écrit : "Which source will be used ? Your instinct tells you that the low-cost deposit will be the first one worked, and your instinct is right. (...) Apart from market processes, it is actually socially rational to use the lower-cost deposits before the higher-cost ones"

k=i,j, les dates de mise en production des gisements. De façon générale les conditions d'optimalité (3), nous permettent d'avoir les conditions dans les phases M ou S, suivant :

$$\forall k = i, j, l = i, j, l \neq k, M_k : p^k(t) = l^k e^{rt} + c^k < p(Q_t) \leq p^l(t) \qquad (7.a)$$

$$S_{i/j} : p^i(t) \lessgtr p^j(t) \leq p(Q_t) \equiv p(t) \qquad (7.b)$$

En passant en revue les neufs cas ci-dessus (cf. Annexe), on parvient au canevas de conditions sur les coûts et réserves : 1) si c^i>c^j et $S_0^i > S_0^j$ ne sont réalisables que les enchaînements : I) M_j-$S_{i/j}$, III) M_i-$S_{i/j}$-M_i, VII) $S_{i/j}$-M_i, IX) $S_{i/j}$,

2) si c^i>c^j et $S_0^i \gtreqless S_0^j$ ne sont réalisables que : VI) M_j-$S_{i/j}$-M_i, VII) $S_{i/j}$-M_i,

3) si c^i>c^j et $S_0^i < S_0^j$ ne sont réalisables que : II) M_j-$S_{i/j}$, V) M_j-$S_{i/j}$-M_j, VIII) $S_{i/j}$-M_j.

La preuve du point a) de la proposition 4 émane du cas 1) ci-dessus, car si la firme *i* possède le stock de ressource le plus vaste des *n* firmes, elle, peut-être en monopole absolu dès t=0, même si $c^i > c^j$, "j i. On aura donc $t^i = 0$, et pour toute autre firme *j*, $t^j > 0$. La preuve de la non vacuité du point b) est immédiate lorsque l'on considère les séquences VI) et VII) pendant les périodes de production simultanées $S_{i/j}$ (cas 2 et Annexe). Le point c) quant à lui est prouvé pour la séquence VIII), c'est-à-dire lorsque $S_0^i < S_0^j$ (cas 3).

La proposition 3 indique que les asymétries de coût ordonnent l'entrée et la sortie des firmes du marché mais le facteur taille de la réserve initiale, joue aussi un rôle important. Ainsi la firme *n* (coût maximal) peut se trouver en monopole dès la date zéro si la taille de ses réserves est très vaste, ce qui lui assurera une rente faible et donc un coût marginal bas (cf. enchaînements I et III ci-dessus). A l'inverse la firme 1 techniquement la plus efficace (coût minimal) si elle ne détient que peu de ressource devra partager le marché et ne pourra se prévaloir d'une antériorité productive. Bien évidemment si cette dernière firme détient de vastes gisements elle pourra s'assurer un monopole temporaire (cf. enchaînements II et V).

Le modèle de base de l'oil'igopole s'est depuis enrichi d'analyses sur la pertinence empirique du modèle "d'oil'igopole" (S. Polasky (1992)), le problème de l'existence d'un équilibre OLNC dans un cadre d'hypothèse plus général (M. Eswaran *et al.* (1983), R. Cairns (1991)), la contestabilité d'un marché d'une ressource non renouvelable (G. Asheim (1992), R. Cairns (1992)), la distribution initiale des réserves (G. Gaudet, V. Long (1994)), et enfin le type objectif de concurrence dans l'oligopole (J.-P. Amigues *et al.* (1990), G. Gaudet, M. Moreaux (1990)).

Venons-en maintenant à une présentation sommaire l'analyse de P. Dasgupta, J. Stiglitz (1980) au sujet de l'innovation dans l'oligopole *non minier*.

Section II. Innovation technologique "réductrice de coût" et oligopole Nash-Cournot : le modèle de P. Dasgupta, J. Stiglitz (1980)

Dans l'approche de P. Dasgupta, J. Stiglitz (1980) -DS par la suite-, l'activité d'innovation est résumée par les dépenses de R&D associées aux activités d'inventions du département Recherche[9] des firmes, qui visent à réduire les coûts de production. Sur la base de cette activité de R&D statique, continue à résultat immédiat non parfaitement appropriable, les auteurs déterminent en quoi la compétition technologique, c'est-à-dire la structure de la concurrence entre les innovateurs effectifs et potentiels, modifie la vigueur de l'innovation. Chaque firme, en place ou entrante, détermine un niveau de coût unitaire de production $c(K)$, où K est le montant de dépense de R&D capitalisée. La forme de la technologie de R&D relate les faits stylisés industriels en la matière car elle est supposée être décroissante convexe en la dépense $(c'(K) < 0, c''(K) > 0)$. Cette hypothèse retrace des rendements d'échelle croissants, mais marginaux décroissants dans l'activité de recherche.

Nous examinons ici l'oligopole statique sans barrières à l'entrée (i), puis une version répétée (ii).

i) Oligopole avec entrée libre

Dans cette situation oligopolistique, les n firmes entretiennent des conjectures de type Nash-Cournot sur la production et la R&D. Le choix *simultané*[10] de ces deux variables est l'équilibre de Nash-Cournot statique du jeu de production / recherche. Chaque firme i a

---

[9]Dans la vision abstraite qui est proposée, le fait que la R&D soit interne ou externe n'a pas de conséquence sur le résultat de la recherche car la fonction de production du département R&D reste la même dans sa forme générale. La sous-traitance de la R&D pouvant s'analyser par l'ajout d'un coût fixe k_0 à K la dépense en capital. On doit plutôt assimiler cette recherche à une R&D interne.

[10]J. Brander, B. Spencer (1983) considèrent une séquence plus réaliste de décision des couples R&D-output. Les firmes sont censées choisir leur plan de R&D, et donc leur niveau de coût, *avant* de produire. Cette approche "stratégique" conduit à déterminer les équilibres de Nash parfaits (pour les sous-jeux). L'équilibre "stratégique" induit une R&D totale et par firme plus soutenue, une production par firme plus importante, des prix plus bas et de moindres profits que la solution de Nash-Cournot. Dans cette approche la R&D est considérée comme un investissement stratégique qui modifie les conditions du jeu de production. Chaque firme a tout intérêt à surcapitaliser en R&D afin d'apparaître la plus compétitive sur le marché des produits sachant que la meilleure stratégie des autres concurrents est le surinvestissement.

pour objectif la maximisation de son profit total y compris les coûts de R&D, soit la maximisation en q^i et K^i de $p^i(q^i, K^i) = \left(p(q^i + \sum_{i \neq j} q^j) - c(K^i)\right)q^i - K^i$ étant données les décisions des (n–1) autres firmes. A l'équilibre Nash-Cournot symétrique intérieur (q>0, K>0), la firme représentative doit vérifier les conditions :

$$p(Q^*)\left(1 - \frac{1}{n^* h(Q^*)}\right) = c(K^*) \tag{8.a}$$

$$-c'(K^*)\frac{Q^*}{n^*} = 1 \tag{8.b}$$

Avec *"i*, q^i=q et K^i=K, et $Q^* = n^* q^*$. De plus l'absence de barrières à l'entrée induit un processus d'entrée des firmes dans le marché qui implique irrémédiablement la restriction des profits. Ainsi le nombre de firmes actives à l'issue de la compétition technologique, c'est-à-dire la variable n, doit obéir à la relation de libre entrée :

$$\left[p(Q^*) - c(K^*)\right]Q^* \geq n^* K^* \tag{8.c}$$

Sans perte de généralité, DS supposent que le profit global de l'industrie est négligeable à l'équilibre, ce qui implique la saturation de l'inégalité (8.c)[11].

La solution oligopolistique ne correspondra à l'optimum social que si n^* est infini (ou si h est infini). L'indétermination d'essence schumpeterienne sur la vigueur de l'innovation de l'oligopole par rapport au monopole pur peut être en partie levée lorsque l'on prend en compte la R&D totale de l'industrie. Il est possible de donner une relation intéressante sur le lien entre la structure de marché et la vigueur de la compétition technologique.

A partir de (8.c) saturée et de (8.a), on peut écrire :

$$p(Q^*)\left(\frac{1}{n^* h(Q^*)}\right)Q^* = n^* K^* / \frac{1}{n^*} = h(Q^*)\frac{n^* K^*}{p(Q^*)Q^*} \equiv h(Q^*)Z^* \tag{9}$$

Dans (9), *1/n** est l'indice de concentration de l'industrie, c'est-à-dire l'indicateur de concurrence *virtuelle* sur le marché des biens, Z^* est l'indice d'intensité de la recherche dans l'industrie, défini par le ratio entre la dépense totale en R&D et la recette totale pour l'ensemble de l'industrie. La relation (9) exprime donc un lien proportionnel mais *non causal* entre ces deux indices, à savoir que le degré de concurrence sur le marché des biens influence autant qu'il est influencé par la vigueur de l'innovation. Ainsi dans les industries pour lesquelles l'élasticité de la demande est la même, on doit s'attendre à ce que le volume total des dépenses de R&D varie en sens inverse du nombre de firmes actives. On parvient ainsi à la situation schumpeterienne du paradoxe du monopole innovateur. En effet étant donné que n^* et K^* sont simultanément déterminés, (9) exprime aussi le fait qu'un haut niveau de R&D

---

[11]Cette hypothèse peut paraître forte, mais les auteurs montrent parralèlement que la saturation de (8.c) ne survient pas seulement lorsque n^* est grand (comme on pourrait le penser). En effet, "an important class of cases that is so, but that n^* need not be necessarily be large in those circumstances in which the use of (21) (*pour nous (8.c)*) as an equilibrium condition is justifiable." *in* P. DASGUPTA, J. STIGLITZ, *Ibid.*

dans l'industrie n'est compatible qu'avec un faible nombre de firmes à l'équilibre. Ce résultat signifie simplement qu'au niveau de l'industrie dans son ensemble, le monopole pur dégagera une capacité à investir dans la recherche plus conséquente que toute industrie oligopolistique, et puisque n^* 1, cette relation d'ordre restera vraie au niveau de chaque firme.

Ce résultat est en contradiction avec celui de Arrow lorsqu'un brevet de durée fixe permet à l'innovateur de s'approprier de manière exclusive la technologie nouvelle. Dans l'analyse de K. Arrow (1962), l'incitation à devenir un monopole *via* l'innovation est plus forte qu'à le rester, c'est ce que R. Guesnerie, J. Tirole (1985) nomment *l'effet de remplacement* du monopole. Dans DS, la R&D n'est pas couverte pas un brevet[12], mais correspond plutôt à une forme de R&D interne à même de fournir des innovations incrémentales non drastiques. Sous ce vocabulaire, on peut repérer les améliorations et sophistications de la technologie en vigueur dans l'industrie qui ne conduisent pas à une remise en cause du système technique sur lequel repose le processus de production. La propriété de drasticité d'une innovation (cf. R. Guesnerie, J. Tirole (1985)) s'établit quant à elle sur la base du coût marginal de production avant et après innovation. Si le prix de monopole est inférieur au coût marginal avant innovation alors l'innovation est dite drastique ou majeure.

Sur la base de DS, on peut aussi voir que la taille de l'offre dépendra fortement des facteurs exogènes qui caractériseront le marché à savoir la demande du coté des biens et la technologie d'invention du département R&D. A partir de (8.b), on extrait directement l'offre globale de l'industrie à l'équilibre :

$$Q^* = -\frac{n^*}{c'(K^*)} \tag{10}$$

On peut récrire l'indice d'intensité de la recherche, Z^* sous la forme :

$$Z^* \equiv \frac{n^* K^*}{p(Q^*)Q^*} = \frac{n^* K^*}{n^* K^* + c(K^*)Q^*}$$

En substituant (10) dans cette expression, on parvient à :

$$Z^* = \frac{1}{1 - \dfrac{c(K^*)}{c'(K^*)K^*}} = \frac{1}{1 + \dfrac{1}{g(K^*)}} = \frac{g(K^*)}{g(K^*)+1} \tag{11}$$

Avec $g(K) = -c'(K)K/c(K)$, l'élasticité de la technologie d'invention vis-à-vis des dépenses de R&D. En substituant (11) dans (9) et en inversant, il vient alors :

$$n^* = \frac{g(K^*)+1}{h(Q^*)\,g(K^*)} \tag{12}$$

La taille de l'offre et donc la concurrence potentielle sur le marché des biens, sera d'autant plus grande que l'élasticité de la demande sera faible car le caractère captif des consomma-

[12]J.L. Gaffard (1990), p. 213, relève que "*cette analyse repose sur une identification des résultats de l'activité d'invention, qui aboutit à en faire une information non appropriable, alors même que ces résultats prennent souvent la forme d'un savoir-faire collectif, par nature transférable, et donc appropriable au moins immédiatement.*"

teurs permettra de capter un volume global de rentes élevé, attirant ainsi de nombreuses firmes. Par contre plus l'élasticité-R&D du coût unitaire de production sera forte plus l'industrie aura tendance à se réaliser comme un monopole. En effet si *gÆ* , n^* tend vers l'inverse de l'élasticité prix de la demande, qui par définition est inférieure à 1. Du point de vue économique, on peut interpréter l'élasticité-R&D du coût unitaire de production comme un indicateur des opportunités technologiques, ainsi "*les industries qui font face à des opportunités d'innovation plus fortes sont aussi les plus concentrées" in* J.L. Gaffard (1990), p. 217.

Avant de passer à l'examen d'un marché d'une ressource non renouvelable, et afin de pouvoir comparer les différents résultats, nous allons rapidement reprendre l'approche DS sous l'angle d'un marché oligopolistique de durée infinie.

ii) Oligopole symétrique infiniment répété et R&D capitalisée

Le modèle présenté dans le ii) se situe sur une seule période et l'investissement en R&D dicte l'innovation dans cette seule période. Si l'on suppose que le jeu de P. Dasgupta Et J. Stiglitz se répète sur une infinité de périodes, le super-jeu qui en résulte est économiquement peu pertinent. En effet selon les hypothèses de DS, si l'on répète le jeu à l'identique, il n'y aura pas de possibilité de capitalisation du savoir-faire et à chaque période la technologie sera remplacée par une innovation analogue. A moins de supposer des technologies à durée de vie instantanée, ce cadre d'analyse convient d'être remplacé par deux corps d'hypothèses alternatifs. On peut d'une part accorder aux firmes la possibilité d'accumuler le savoir-faire *via* les investissements en R&D afin de produire des innovations meilleures d'un point de vue incrémental. Dans la littérature, ce sont les approches que J. Reinganum (1981) qualifient (p. 24) "d'analyses théoriques de la décision à la Kamien et Schwartz", en référence à leurs articles pionniers, M. Kamien, N. Schwartz (1972), 1976).

D'un autre côté et notamment si l'on est dans un univers certain, il est possible de supposer que la technologie de P. Dasgupta et J. Stiglitz[13] reste valide mais que la dépense de R&D est alors capitalisée en date initiale. De ce fait le niveau de la dépense de R&D est décidé et l'innovation réalisée en date initiale sur la base des profits futurs actualisés. Il faut alors supposer que la technologie $c(K)$ adoptée en date initiale a cours sur la période (infinie) de production.

Sur la base du paradigme "à la Dasgupta et Stiglitz", il est assez simple d'adapter la modélisation développée dans le ii) ci-dessus. Dans le cas symétrique, et pour tout niveau

---

[13]Si aucune incertitude n'existe dans l'activité d'invention, la technologie structurelle de R&D de DS est équivalente, pour un projet fixe *c*, à celles du paradigme de Kamien et Schwartz car l'investissement est réalisé soit en date initiale soit jamais.

de dépense de R&D capitalisée K, chaque firme va maximiser son profit total actualisé sur une période infinie :

$$\Pi^i(q^i) = \int_0^\infty e^{-rt}(p(Q) - c(K^i))q^i dt = \frac{(p(Q) - c(K^i))q^i}{r}$$

Chaque firme va ensuite dimensionner son investissement en R&D de façon à maximiser $\Pi^i(q^i) - K^i$ en $K^i>0$. Ainsi dans le cas symétrique, l'équation (8.a) reste valide (toutefois le signe * est substitué en **), car l'actualisation n'influe pas la production instantanée, mais la relation (8.b) doit être remaniée suivant :

$$-c'(K^{**})\frac{Q^{**}}{r} = n^{**} \tag{13}$$

Bien évidemment la condition (13) diffère de (8.b) du fait qu'elle calibre la R&D capitalisée à la hauteur du gain issu de la réduction du coût de production total actualisé. De même la condition de libre entrée dans l'industrie s'écrit ici :

$$\left[p(Q^{**}) - c(K^{**})\right]Q^{**} = r n^{**} K^{**}$$

L'équivalent de la relation (9) correspond maintenant à :

$$\frac{1}{n^{**}} = r\, h(Q^{**})\frac{n^{**}K^{**}}{p(Q^{**})Q^{**}} \equiv r\, h(Q^{**})Z^{**}$$

On voit que la liaison entre les deux indices, de concentration et de R&D, est toujours proportionnelle, mais le degré de la corrélation est atténué si $r<1$. Cependant (12) reste valide ce qui indique que si les élasticités-prix (h) et R&D (g) sont constantes alors $n^*=n^{**}$, le nombre de firmes actives sera identique.

Examinons maintenant le cas minier du problème d'innovation technologique "réductrice de coût".

Section III. Innovation technologique "réductrice de coût" au sein de l'oligopole minier

Bien que dans le cadre de ressources non renouvelables, le déterminisme géologique dû à la distribution planétaire des réserves constitue une forme incontournable de barrière à l'entrée, il est possible d'envisager que le volume de celles-ci est assez "vaste" pour que des firmes se lancent dans une compétition technologique, ici "réductrice de coût". Pour cela il faut concevoir que toute firme puisse accéder à des gisements (ou même seulement à des prospects), c'est-à-dire puissent soumissionner à l'acquisition de concessions. Reprenons ici le cadre d'oil'igopole de la Section I, sous l'hypothèse de technologie d'invention de la Section II, soit $c'(K) < 0, c''(K) > 0$. Notons de plus que cette technologie est identique et commune à toutes les firmes minières.

Chaque oil'igopoleur doit maximiser le profit total actualisé (y compris les dépenses de recherche) par rapport à sa trajectoire OL d'extraction et son investissement en R&D et sous sa contrainte d'épuisement, soit :

$$\max_{\{q_t^i\},K^i} \int_0^{T^i} e^{-rt}\left[p(q_t^i + \sum_{j\neq i} q_t^j) - c(K^i)\right] q_t^i dt - K^i \qquad (14.a)$$

$$\text{s/c} \quad S_0^i = \int_0^{T^i} q_t^i dt \qquad (14.b)$$

D'après les développements aux deux sections précédentes, on a, avec (14.b), la condition intertemporelle d'extraction $'' K^i > 0$:

$$p(Q_t) + a(p(Q_t))q_t^i = e^{rt} l^i + c(K^i) \equiv p^i(t, K^i),\ 0 \leq t \leq T^i \qquad (14.c)$$

La condition d'équilibre de R&D s'écrit alors :

$$-c'(K^i)\int_0^{T^i} e^{-rt} q_t^i dt = 1 \qquad (14.d)$$

Cette condition est le pendant en univers des ressources non renouvelables de la relation (8.b). Puisque l'on a supposé que l'entrée sur le marché est libre, la condition de profit global nul (8.c), modifiée du cas statique s'écrit ici sur le profit total actualisé au plan de chaque firme soit $'' i$:

$$p^i \equiv \int_0^{T^i} e^{-rt}\left(p(Q_t) - c(K^i)\right) q_t^i dt = K^i \qquad (14.e)$$

Soit en tenant compte de la condition d'arbitrage (14.c) :

$$l^i S_0^i - \int_0^{T^i} e^{-rt} a(p(Q_t))\left(q_t^i\right)^2 dt = K^i$$

Dans cet oil'igopole avec compétition technologique, les niveaux des coûts unitaires d'extraction ne sont pas exogènes mais conditionnés par la vigueur de la R&D. Ainsi *ex ante* on ne peut s'accorder sur un schéma de symétrie sur les coûts comme cela avait été le cas dans la Section I. En fait, seul le caractère homogène ou hétérogène des tailles de gisement est une donnée préalable au jeu de compétition technologique entre les firmes minières.
Nous allons donc tour à tour examiner deux cas : un oil'igopole avec des réserves de même taille (i), puis le cas hétérogène (ii).

i) Innovations réductrice de coût dans l'oil'igopole avec réserves homogènes

Selon cette configuration, toutes les firmes sur le marché ont le même type de gisement : $\forall i, S_0^i = S/n$. L'équilibre OLNC d'extraction de l'oil'igopole ne sera parfaitement symétrique que si le coût unitaire d'extraction de chaque firme active est identique, comme nous l'avons vu à la Section I. En fait la symétrie sur les tailles des réserves suffit à assurer la symétrie parfaite de l'oil'igopole car la R&D optimale au plan de chaque firme va s'harmoniser à son tour. En effet si l'on prend les conditions d'équilibre (14.b) et (14.d), pour la firme représentative de taille de stock S/n, et en passant par le théorème de la moyenne, il vient (l'équilibre est ici repéré avec un "chapeau") $\forall i = 1, \ldots, \hat{n}$:

$$\frac{S}{\hat{n}} = \int_0^{\hat{T}^i} \hat{q}_t^i dt$$

$$-c'(\hat{K}^i) \int_0^{\hat{T}^i} e^{-rt} \hat{q}_t^i dt = 1 \Leftrightarrow -c'(\hat{K}^i) e^{-rq^i} S = \hat{n} \tag{15}$$

où $q^i \in]0, \hat{T}^i[$. De plus en raison de l'absence de barrières à l'entrée, chaque firme s'octroie un profit total actualisé qui couvre ses frais de R&D, d'après (14.e), donc si pour i et j donnés, $\hat{K}^i < \hat{K}^j$ alors $\hat{p}^i < \hat{p}^j$. La firme i peut alors obtenir un profit partiel (sur la base de l'offre) plus conséquent en se lançant dans une R&D plus soutenue, ce qui aura pour effet de réduire sa durée de vie T^i et, dans l'optique de la vérification de (15), la date auxiliaire q^i. Ceci étant vrai pour tous les couples de firmes i et j, la seule configuration est donc la symétrie *ex post* du niveau optimal de dépense de R&D, soit $\forall i, \hat{K}^i = \hat{K}$. Les caractéristiques générales de l'oil'igopole sont alors définies par la proposition 1, soit en résumé un prix continu croissant plafonné par $p(0) = \overline{p} < \infty$. Puisque l'homogénéité sur les réserves implique la symétrie de la R&D et donc des coûts d'extraction, il est maintenant possible de travailler sur la trajectoire d'extraction de l'industrie $\{\hat{Q}_t\}$. Les conditions (14.c,d,e) se récrivent alors :

$$\begin{cases} p(\hat{Q}_t)\left(1 - \dfrac{1}{\hat{n}\, h(\hat{Q}_t)}\right) = l\, e^{rt} + c(\hat{K}) \\ -c'(\hat{K}) \displaystyle\int_0^{\hat{T}} e^{-rt} \frac{\hat{Q}_t}{\hat{n}} dt = 1 \Leftrightarrow -c'(\hat{K}) e^{-rq} S = \hat{n} \\ \displaystyle\int_0^{\hat{T}} e^{-rt} \left[p(\hat{Q}_t) - c(\hat{K})\right] \frac{\hat{Q}_t}{\hat{n}} dt = \hat{K} \Leftrightarrow \int_0^{\hat{T}} e^{-rt} \left[p(\hat{Q}_t) - c(\hat{K})\right] \hat{Q}_t dt = \hat{n} \hat{K} \end{cases} \tag{16}$$

Dans (16) et d'après (14.c), la condition de nullité du profit industriel global devient :

$$l\, S + \int_0^{\hat{T}} e^{-rt} \frac{p(\hat{Q}_t)\hat{Q}_t}{\hat{n}\, h(\hat{Q}_t)} dt = \hat{n}\hat{K}$$

Dans cette expression, on peut donc faire apparaître les indices de concentration industrielle et d'intensité de la recherche à l'instar des manipulations effectuées en DS, soit :

$$\hat{n} = \frac{\hat{n}\, l\, S + \dfrac{1}{h(\tilde{Q})} \displaystyle\int_0^{\hat{T}} e^{-rt} p(\hat{Q}_t)\hat{Q}_t dt}{\hat{n}\hat{K}}$$

/

$$\frac{1}{\hat{n}} = h(\tilde{Q}) \frac{\hat{n}\hat{K}}{h(\tilde{Q})\hat{n}\, l\, S + \hat{R}} = h(\tilde{Q}) \frac{\hat{n}\hat{K}}{\hat{R}} \frac{\hat{R}}{h(\tilde{Q})\hat{n}\, l\, S + \hat{R}} \equiv h(\tilde{Q})\, \hat{Z} \hat{m} \tag{17}$$

où $0<\tilde{Q}<\hat{Q}_0 \leq S$, et $\hat{R}$ est la recette totale actualisée de l'industrie (le chiffre d'affaires actualisé global).

De la même façon on peut trouver un équivalent "minier" à la relation d'équilibre (12) de DS. Etant donné, les deuxième et troisième relations dans (16), on a :

$$\hat{R}=\int_0^{\hat{T}} e^{-rt} p(\hat{Q}_t)\hat{Q}_t dt = c(\hat{K})e^{-rq}S+\hat{n}\hat{K}$$

Et donc $\hat{Z}$ peut aussi s'écrire :

$$\hat{Z}=\frac{1}{1+\frac{1}{g(\hat{K})}}=\frac{g(\hat{K})}{1+g(\hat{K})}$$

D'où d'après (17) en inversant, il vient :

$$\hat{n}=\frac{1+g(\hat{K})}{\hat{m}\,g(\hat{K})\,h(\tilde{Q})} \tag{18}$$

Dans (17), $1/\hat{n}$ est l'indice de concentration de l'industrie minière et $\hat{Z}$ est l'indice d'intensité de la recherche. Comme la relation (9), (17) exprime donc un lien proportionnel mais *non causal* entre ces deux indices. Somme toute, les indices "miniers" diffèrent quelque peu des indices de DS, du fait qu'ils intègrent à la fois les chiffres d'affaires actualisés ($\hat{R}$) et les éléments de rentes totales actualisées (l S). De plus dans (17), l'indice d'intensité de la recherche est facteur d'un coefficient $\hat{m}<1$ qui représente la part de la recette totale actualisée sur le profit minier total actualisé (hors coûts de R&D) et que l'on peut interpréter en vertu de l'indice de Lerner. En effet on peut voir que :

$$\hat{m}=\frac{\hat{R}}{\hat{n}\,h(\tilde{Q})\hat{p}}=\frac{1}{\hat{n}\,h(\tilde{Q})}\frac{\int_0^{\hat{T}} e^{-rt} p(\hat{Q}_t)\hat{Q}_t dt}{\int_0^{\hat{T}} e^{-rt}\left(p(\hat{Q}_t)-c(\hat{K})\right)\hat{Q}_t dt}=\frac{1}{\hat{n}\,h(\tilde{Q})}\frac{p(\hat{Q}_t)}{p(\hat{Q}_t)-c(\hat{K})}$$

Si l'on note $L_t=(p(\hat{Q}_t)-c(\hat{K}))/p(\hat{Q}_t)$, l'indice de Lerner au temps t $]0,\hat{T}[$, on a donc :

$$\hat{m}=\frac{1}{\hat{n}\,h(\tilde{Q})}\frac{1}{L_t}<1 \tag{19}$$

En univers statique le paramètre $\hat{m}$ est unitaire car la règle de "markup" de la firme en oligopole de Cournot est telle que l'indice de Lerner soit égal au rapport entre la part de marché de la firme et l'élasticité de la demande. L'argument de rente courante (l e^{rt}) ajouté au "markup" de la firme induit l'infériorité de $\hat{m}$ à 1.

Si de plus on suppose que les élasticité-prix et élasticité-R&D sont constantes, on peut mettre à jour quelques différences entre les cas statiques pur, d'oligopole répété et le cas minier. Tout d'abord en comparant (11) et (17), on s'aperçoit que le degré de proportionnalité entre la vigueur de la R&D et la concentration des firmes minières ($h\hat{m}$) est plus faible que dans l'industrie non minière. Ainsi dans les études en coupes instantanées pour lesquelles les conditions de la demande sont identiques, on doit observer une relation linéaire entre la recherche et la concentration *moins robuste* dans les industries minières que dans les industries non minières. En comparant (12) et (18), l'allégation précédente est vérifiée car le nombre de firmes minières actives à l'équilibre OLNC symétrique sera toujours plus important qu'en univers statique ($\hat{n} > n^{**} = n^{*}$) et cela pour tout niveau de réserves en terre en la date initiale. Autrement dit, la masse des firmes innovantes (des procédés incrémentaux non appropriables) sera toujours plus forte dans les secteurs de ressources non renouvelables que dans les autres secteurs. Par contre, on peut montrer que le niveau de R&D par firme est plus faible en univers minier qu'en univers statique (dans le jeu répété), soit $\forall S \geq 0, K^{**} > \hat{K}$. Pour ce faire, remarquons tout d'abord que de façon classique, "*K* 0, "*n* 1, l'équilibre de l'oil'igopole converge vers l'oligopole statique répété quand *S* est infini. En effet d'après (16), "*K* 0 et "*n* 1, on voit que : $d\hat{Q}_t / dS = e^{rt}(dl/dS) / [a\,(1-1/(n\,h))]$. En dérivant la contrainte d'épuisement de l'industrie en *S* et en substituant, il vient alors :

$$1 = \int_0^{\hat{T}} \frac{d\hat{Q}_t}{dS} dt + \frac{d\hat{T}}{dS} \hat{Q}_{\hat{T}} \Leftrightarrow 1 = \frac{dl}{dS} \int_0^{\hat{T}} \frac{e^{rt}}{a\,(1-1/(n\,h))} dt$$

Car $\hat{Q}_{\hat{T}} = 0$ (cf. proposition 1). Ainsi on tire la relation sur la rente de rareté :

$$\frac{dl}{dS} = \left(\int_0^{\hat{T}} \frac{e^{rt}}{a\,(1-1/(n\,h))} dt \right)^{-1} < 0$$

En fait "*K* 0, si *S*∅+ , *l*∅0+ car *T*∅+ , et pour tout *t*, $\hat{Q}_t \rightarrow Q^{**}$. Donc "*K* 0, pour tout $S < \infty$ ˆ $< Q^{**}$, ce qui de façon actualisée implique :

$$\int_0^{\hat{T}} e^{-rt} \hat{Q}_t dt = e^{-rq} S < \int_0^{\infty} e^{-rt} Q^{**} dt = \frac{Q^{**}}{r} \tag{20}$$

A partir de (20) et du fait que $\hat{n} > n^{**}$, on peut maintenant comparer (13) et (16). Il vient la relation :

$$-c'(\hat{K}) e^{-rq} S > -c'(K^{**}) \frac{Q^{**}}{r} \Leftrightarrow \frac{c'(\hat{K})}{c'(K^{**})} > \frac{Q^{**}}{r\, e^{-rq} S} > 1$$

Ainsi $c'(\hat{K}) < c'(K^{**})$ et en raison de la convexité de $c(K)$, on a directement $\hat{K} < K^{**}$.

PROPOSITION 5

A l'équilibre symétrique OLNC sur l'extraction et NC sur la R&D réductrice de coût, l'oil'igopole a) soutient une R&D par firme plus restreinte que l'oligopole statique (répété), soit $\hat{K} < K^{**}$, ceci pour tout niveau total de stock en terre, b) supporte un nombre de firmes actives plus important, $\hat{n} > n^{**}$.

Le comportement d'innovation réductrice de coût de l'oil'igopole symétrique se caractérise donc par une certaine "apathie" en ce qui concerne la R&D, en comparaison des industries non minières. Les firmes minières sont donc potentiellement moins enclines à investir dans la R&D interne car la prise en compte de l'épuisabilité des ressources induit, on le sait, l'étalement intertemporel de l'extraction ancré sur l'évolution du coût marginal *réel* ($p^i(t)$). En univers statique, les innovations réductrices de coût accroissent l'output d'équilibre de l'industrie, alors qu'en univers minier ce phénomène ne sera vrai que pour les niveaux initiaux d'extraction. La contrainte d'épuisement des réserves ne permet pas *via* la R&D, de rehausser la totalité de la trajectoire d'extraction mais seulement certains points de celle-ci, proche de t=0, au détriment d'autres points de la trajectoire notamment extrêmes. Conséquence immédiate de cette R&D, la rente marginale actualisée (de chaque firme) est accrue mais le rythme d'évolution de l'extraction industrielle est accéléré. On comprend aisément alors que les firmes minières auront tendance à freiner leur effort de R&D afin de ne pas écourter exagérément la durée de vie de leurs stocks.

Le point *b)* de la proposition 5 semble indiquer que l'oil'igopole est potentiellement plus concurrentiel que l'oligopole classique. Il est certain que ce phénomène est étroitement relié avec la faiblesse de la R&D d'équilibre et par conséquent à la supériorité des coûts marginaux (réels) en univers minier.

En extrapolant les résultats de la proposition 19, il est alors possible d'inférer que les firmes minières qui sont partie prenante dans des secteurs non miniers préféreront transférer la R&D réductrice de coût vers leurs activités non minières plutôt que de se lancer dans des politiques agressives de R&D. En effet sur les marchés non miniers le surinvestissement en R&D est une meilleure stratégie que sur les marchés de ressources non renouvelables. D'un point de vue plus pratique, on observe ce phénomène dans l'industrie pétrolière. N. Alazard (1996) relate les analyses de l'US IEA / DOE sur la réorganisation de la R&D pétrolière.

Nous allons maintenant reconsidérer les comportements de R&D et d'innovations réductrices de coût dans un oil'igopole asymétrique du point de vue des réserves. Même s'il est difficile de généraliser les résultats précédents à cette configuration plus pertinente, il est possible de dégager quelques éléments intéressants.

ii) Innovations réductrices de coût dans l'oil'igopole avec réserves hétérogènes

Supposons qu'à l'équilibre asymétrique OLNC[14], $\tilde{n}$ firmes aient épuisé leurs réserves au plus tard à la date terminale $\tilde{T}$. On peut alors ordonner ces $\tilde{n}$ firmes selon la taille de leurs réserves initiales suivant le critère d'ordre croissant : $S_0^{\tilde{n}} > \ldots S_0^{j} > \ldots S_0^{1}$. Toute firme i obéit aux conditions (14,b,d,e) et à la condition (14.c) lorsqu'elle est en production. En laissant pour l'instant de côté la condition de libre entrée (14.e), pour la firme i, on a :

[14]Celui-ci existe car l'équilibre d'extraction de l'oil'igopole et l'équilibre oligopolistique de R&D statique existent.

$$\begin{cases} S_0^i = \int_{\tilde{t}^i}^{\tilde{T}^i} \tilde{q}_t^i dt \\ p(\tilde{Q}_t) + a(p(\tilde{Q}_t))\tilde{q}_t^i = e^{rt} l^i + c(\tilde{K}^i) \equiv p^i(t,\tilde{K}^i),\ \tilde{t}^i \le t \le \tilde{T}^i \\ p(\tilde{Q}_t) < p^i(t,\tilde{K}^i), \forall t > \tilde{T}^i, \forall t < \tilde{t}^i \\ -c'(\tilde{K}^i) \int_{\tilde{t}^i}^{\tilde{T}^i} e^{-rt} \tilde{q}_t^i dt = 1 \end{cases} \tag{21}$$

D'après la proposition 1, l'équilibre OLNC de l'oil'igopole implique la nullité de l'output total en date terminale $\tilde{T}$ et donc par continuité, la nullité des niveaux d'extraction en date d'épuisement particulière $\tilde{T}^i$ pour tout *i*. Une fois les niveaux de dépenses de R&D d'équilibres déterminés, *a priori* la proposition 4 va s'appliquer et pour tout couple donné, *i* et *j*, de firmes actives sur la trajectoire d'équilibre, tel que $\tilde{K}^i < \tilde{K}^j$ (et donc $c^i \equiv c(\tilde{K}^i) < c(\tilde{K}^j) \equiv c^j$), les huit enchaînements définis à la Section I vont être potentiellement réalisables. Cependant la donnée des tailles relatives de stock initiaux entre *i* et *j* vont éliminer certains enchaînements et donc modifier à leur tour la dépense de R&D d'équilibre.

Vu que le coût marginal de recherche est identique et égal à *1* pour toute firme active, la R&D d'équilibre de chaque firme et le timing de l'extraction obéiront à l'égalité en chaîne (à $\tilde{n}$ termes) : $\forall i = 1 \ldots \tilde{n}$

$$-c'(\tilde{K}^1) \int_{\tilde{t}^1}^{\tilde{T}^1} e^{-rt} \tilde{q}_t^1 dt = -c'(\tilde{K}^i) \int_{\tilde{t}^i}^{\tilde{T}^i} e^{-rt} \tilde{q}_t^i dt = -c'(\tilde{K}^{\tilde{n}}) \int_{\tilde{t}^{\tilde{n}}}^{\tilde{T}^{\tilde{n}}} e^{-rt} \tilde{q}_t^{\tilde{n}} dt \tag{22}$$

Ainsi toute variation positive de la dépense de R&D optimale entraînera une variation négative de $-c'(K)$ et donc un accroissement de l'extraction cumulée actualisée. Les caractéristiques de la R&D réductrice de coût de l'oil'igopole hétérogène correspondent aux éléments de la proposition suivante :

PROPOSITION 6

Pour toutes firmes minières i et j données, telle que les tailles initiales des réserves obéissent à $S_0^i > S_0^j$*, avec un écart relativement grand entre les deux stocks, en général les dépenses de R&D d'équilibre Nash-Cournot de l'oil'gopole sont telles que* $\tilde{K}^i > \tilde{K}^j$*, et induisent donc la relation sur les coûts d'extraction :* $c(\tilde{K}^i) < c(\tilde{K}^j)$.

La preuve de cette proposition s'effectue en trois étapes.

Supposons tout d'abord que pour les firmes *j* données telles que $S_0^{\tilde{n}} > \ldots S_0^j > \ldots S_0^1$, on ait à l'équilibre $\forall j = 1 \ldots \tilde{n}, \tilde{K}^j = \tilde{K}$, immédiatement il vient $\forall j = 1 \ldots \tilde{n}, c(\tilde{K}^j) = \tilde{c} = c(\tilde{K})$. D'après les développements sur l'oil'igopole symétrique, on sait que l'on aura comme caractéristiques particulières d'équilibre (cf. prop. 2.c) : $\forall i,\ \tilde{t}^i = 0$, $\forall i \neq 1, \tilde{n},\ \tilde{T}^{\tilde{n}} > \tilde{T}^i > \tilde{T}^1$ et $l^{\tilde{n}} < l^i < l^1$. Ainsi d'après les conditions d'extraction à l'équilibre (21), il vient la relation d'ordre : $\forall i \neq 1, \tilde{n}, \forall t \in [0, T^{\tilde{n}}] : \tilde{q}_t^{\tilde{n}} > \tilde{q}_t^i > \tilde{q}_t^1$, qui implique à son tour la même relation sur les extractions cumulées actualisées, $\forall i \neq 1, \tilde{n}$:

$$\int_0^{\tilde{T}^{\tilde{n}}} e^{-rt}\tilde{q}_t^{\tilde{n}} dt > \int_0^{\tilde{T}^i} e^{-rt}\tilde{q}_t^i dt > \int_0^{\tilde{T}^1} e^{-rt}\tilde{q}_t^1 dt$$

Or si l'on tient compte de cette dernière chaîne d'inégalités et du fait que $\forall i, c(\tilde{K}^i) = \tilde{c}$, puisque $\forall i, -c'(\tilde{K}^i) = -c'(\tilde{K})$, la relation d'équilibre (22) ne tient plus et l'on parvient donc à une contradiction. Celle-ci indique qu'en dehors du cadre de réserves de tailles homogènes, une R&D symétrique sur l'ensemble de l'industrie est à exclure.

Supposons maintenant que pour *i* et *j* donnés, $S_0^i > S_0^j$, on ait à l'équilibre : $\tilde{K}^i > \tilde{K}^j$. Il vient alors directement $c(\tilde{K}^i) < c(\tilde{K}^j)$ et $-c'(\tilde{K}^i) < -c'(\tilde{K}^j)$. En vertu des développements sur l'oil'igopole asymétrique, huit enchaînements de régimes d'extractions[15] sont *a priori* réalisables. Cependant nous devons ici ne considérer que ceux des enchaînements qui sont compatibles avec les relations de base : $S_0^i > S_0^j$ et $c(\tilde{K}^i) < c(\tilde{K}^j)$. Afin d'alléger l'écriture nous définissons la notation : $\Theta(t_0, t_1, x_t) = \int_{t_0}^{t_1} e^{-rt} x_t dt$. En passant en revue les enchaînements I à IX (cf. Section I.ii), seuls cinq d'entre eux sont compatibles avec les relations de base : 1) M_i-$S_{i/j}$, 2) M_i-$S_{i/j}$-M_i, 3) M_i-$S_{i/j}$-M_j, 4) $S_{i/j}$-M_j et 5) $S_{i/j}$-M_i.

a) Pour les enchaînements 1) 2) et 5), on a : $\tilde{t}^i \leq \tilde{t}^j$, $\tilde{T}^i \geq \tilde{T}^j$ et surtout $\forall t, \tilde{q}_t^i \geq \tilde{q}_t^j$. Par conséquent il vient la relation $\Theta(\tilde{t}^i, \tilde{T}^i, \tilde{q}_t^i) > \Theta(\tilde{t}^j, \tilde{T}^j, \tilde{q}_t^j)$, d'où à partir de (22) :

$$\frac{-c'(\tilde{K}^j)}{-c'(\tilde{K}^i)} = \frac{\Theta(\tilde{t}^i, \tilde{T}^i, \tilde{q}_t^i)}{\Theta(\tilde{t}^j, \tilde{T}^j, \tilde{q}_t^j)} > 1$$

Cette relation implique $-c'(\tilde{K}^i) < -c'(\tilde{K}^j)$, ce qui corrobore l'hypothèse $\tilde{K}^i > \tilde{K}^j$.

b) Pour les enchaînements 3) et 4), $0 < \tilde{t}^i \leq \tilde{t}^j$, $\tilde{T}^i < \tilde{T}^j$ et la relation de supériorité de l'extraction de la firme *i* en tout *t* n'est pas vérifiée. Cependant si l'on forme la différence $d_t = \tilde{q}_t^i - \tilde{q}_t^j$, les enchaînements 3) et 4) obéissent au canevas temporel suivant :

$\forall t \in [0, \tilde{t}^i] : d_t = 0$, $\forall t \in]\tilde{t}^i, q[: d_t > 0$, $d_q = 0$, $\forall t \in]q, \tilde{T}^j[: d_t < 0$, $\forall t \in [\tilde{T}^j, \tilde{T}[: d_t = 0$. La figure 1 ci-dessous reprend l'allure générique de d_t avec $\tilde{t}^i = \tilde{t}^j$ pour le 4). Par définition $S_0^i > S_0^j$, ainsi les aires A et B de la figure 1 sont telles que A+B=$S_0^i - S_0^j$>0. Pour déterminer le signe de $\Theta(\tilde{t}^i, \tilde{T}^i, \tilde{q}_t^i) - \Theta(\tilde{t}^j, \tilde{T}^j, \tilde{q}_t^j)$, nous allons utiliser les propriétés du profil temporel de d_t. Formons la différence des extractions cumulées actualisées de *i* et *j* :

$$\Theta(\tilde{t}^i, \tilde{T}^i, \tilde{q}_t^i) - \Theta(\tilde{t}^j, \tilde{T}^j, \tilde{q}_t^j) = \int_{\tilde{t}^i}^{\tilde{T}^j} e^{-rt} d_t dt$$

[15] Nous avons défini deux régimes : le monopole particulier et la production simultanée.

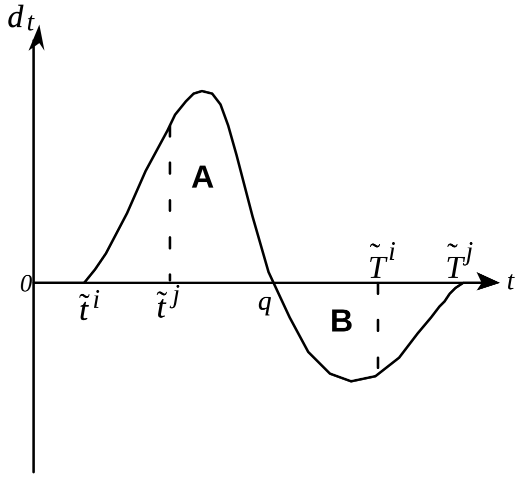

Figure 1. Profil temporel générique de d_t.

Afin de pouvoir appliquer le théorème de la moyenne sur cette différence, nous allons la scinder en sommes de signes constants, soit :

$$\Theta(\tilde{t}^i,\tilde{T}^i,\tilde{q}_t^i)-\Theta(\tilde{t}^j,\tilde{T}^j,\tilde{q}_t^j)=\int_{\tilde{t}^i}^{q} e^{-rt}d_t dt+\int_{q}^{\tilde{T}^i} e^{-rt}d_t dt+\int_{\tilde{T}^i}^{\tilde{T}^j} e^{-rt}d_t dt$$

/

$$\Theta(\tilde{t}^i,\tilde{T}^i,\tilde{q}_t^i)-\Theta(\tilde{t}^j,\tilde{T}^j,\tilde{q}_t^j)=e^{-rq^1}\int_{\tilde{t}^i}^{q} d_t dt+e^{-rq^2}\int_{q}^{\tilde{T}^i} d_t dt+e^{-rq^3}\int_{\tilde{T}^i}^{\tilde{T}^j} d_t dt$$

$q^1\in]\tilde{t}^i,q[$, $q^2\in]q,\tilde{T}^i[$, $q^3\in]\tilde{T}^i,\tilde{T}^j[$ d'où $q^1<q^2<q^3$.

En appliquant le théorème de la moyenne et en intégrant, il vient :

$$\Theta(\tilde{t}^i,\tilde{T}^i,\tilde{q}_t^i)-\Theta(\tilde{t}^j,\tilde{T}^j,\tilde{q}_t^j)=e^{-rq^1}\left(S_0^i-S_0^j\right)+\left(S_q^j-S_q^i\right)\left(e^{-rq^1}-e^{-rq^2}\right)+S_{\tilde{T}^i}^j\left(e^{-rq^2}-e^{-rq^3}\right)$$

Si les premier et dernier terme de cette somme sont sans ambiguï té positifs, le second dépend de la différence $S_q^j-S_q^i$. De plus $\forall t>q$, $d_t<0$, et les contraintes d'épuisement étant saturées, on a donc $S_q^j-S_q^i=-\int_q^{\tilde{T}^j} d_t dt>0$. Le signe de l'expression $\Theta(\tilde{t}^i,\tilde{T}^i,\tilde{q}_t^i)-\Theta(\tilde{t}^j,\tilde{T}^j,\tilde{q}_t^j)$ est toujours positif, ce qui induit la même relation qu'au *a)* ci-dessus ($-c'(\tilde{K}^i)<-c'(\tilde{K}^j)$).

Dans la troisième étape, supposons maintenant que $\tilde{K}^i<\tilde{K}^j$. Il vient $c(\tilde{K}^i)>c(\tilde{K}^j)$ et $-c'(\tilde{K}^i)>-c'(\tilde{K}^j)$. Cinq enchaînements de régimes d'extractions sont réalisables : 1) M_i-$S_{i/j}$, 2) M_i-$S_{i/j}$-M_i , 3) M_j-$S_{i/j}$-M_i , 4) $S_{i/j}$-M_i et 5) $S_{i/j}$. Pour ces cinq enchaînements on a toujours $\tilde{T}^i\geq\tilde{T}^j$, de plus pour les cas 1), 2), et 5), la relation suivante est toujours vérifiée : $\forall t\leq\tilde{T}^i, \tilde{q}_t^i\geq\tilde{q}_t^j$. D'où pour 1), 2), et 5), on a directement : $\Theta(\tilde{t}^i,\tilde{T}^i,\tilde{q}_t^i)-\Theta(\tilde{t}^j,\tilde{T}^j,\tilde{q}_t^j)>0$, et donc d'après (22), il vient :

$$\frac{-c'(\tilde{K}^j)}{-c'(\tilde{K}^i)}=\frac{\Theta(\tilde{t}^i,\tilde{T}^i,\tilde{q}_t^i)}{\Theta(\tilde{t}^j,\tilde{T}^j,\tilde{q}_t^j)}>1$$

Ainsi on parvient à la contradiction $-c'(\tilde{K}^i)<-c'(\tilde{K}^j)$.

Les situation 3) et 4) ne sont pas directes. Pour le cas 3), étant donné que la firme j entame la production en premier, il est tout à fait possible que $\Theta(\tilde{t}^{i}, \tilde{T}^{i}, \tilde{q}_t^{i}) - \Theta(\tilde{t}^{j}, \tilde{T}^{j}, \tilde{q}_t^{j})$ soit négative et que l'hypothèse $\tilde{K}^i < \tilde{K}^j$ soit vérifiée. En effet pour ce cas, il faut que les stocks initiaux ne soient pas d'amplitude trop différentes (cf. enchaînement VI) et la différence entre les niveaux de production de j et de i, obéit à la dynamique générique de $-d_t$ (cf. figure 1, "renversée"). Il en est de même pour le cas 4) où, si les stocks sont proches, les productions niveaux de production initiaux de j sont supérieurs à ceux de i. Ce sont ces deux situations qui ne permettent pas de proposer un résultat général.

En vertu de la proposition 6, la vigueur de la R&D dans l'oil'igopole hétérogène n'est pas symétrique. Les firmes minières les moins bien dotées en ressource se lancent moins volontiers dans la R&D réductrice de coût que les firmes les mieux dotées. A l'équilibre NC de l'oil'igopole, les $\tilde{n}$ firmes ordonnées selon la taille de leurs réserves initiales $(S_0^{\tilde{n}} > \ldots S_0^{j} > \ldots S_0^{1})$ investiront dans la R&D selon la séquence idoine : $\tilde{K}^{\tilde{n}} > \ldots \tilde{K}^{j} > \ldots \tilde{K}^{1}$. En fait les "premières" (dont l'indice de classement est proche de 1) sont faiblement incitées à accroître leur profit total actualisé *via* la réduction du coût marginal réel, car l'étroitesse de leur réserve en terre ne leur permet pas d'espérer des recettes actualisées conséquentes. A l'opposé, les "dernières" (proche de $\tilde{n}$) produisent leur effort de R&D car la rente totale actualisée ($l\ S_0$) qu'elles retirent sera d'autant plus élevée. Pour s'accorder avec les conclusions données par DS, on devra donc s'attendre dans les analyses en coupes instantanées à une relation de même sens entre la taille des gisements et les dépenses de R&D des firmes. La proposition 6 démontre que dans l'industrie oil'igopolistique, le niveau de R&D de chaque unité minière est croissant par rapport au niveau des stocks.

La proposition 6 nous dit encore que lorsque la technologie d'extraction est déterminée de façon endogène, par l'innovation notamment, l'hétérogénéité des réserves aura tendance à induire une asymétrie dans la conduite de la compétition technologique. L'issue de cette compétition consiste alors en une faible innovation des firmes de petites tailles[16] et une tendance à l'innovation des firmes de grandes tailles.

Les distorsions dans les efforts de R&D issus de l'hétérogénéité des réserves alimentent dans un certain sens la théorie du "monopole persistant". Celle-ci initiée par K. Arrow (1962) et étendue par R. Gilbert, D. Newbery met avant l'idée que selon laquelle la compétition technologique incite le monopole à innover. La théorie contraire soutenue par J. Reinganum (1989) indique que le monopole se remplaçant lui-même, ne peut assurer l'effort de R&D qui lui permet de s'approprier le brevet sur l'innovation. Cette dernière analyse anti-schumpeterienne se trouve être démentie dans le cadre d'un oil'igopole hétérogène. En vertu de la proposition 6 et d'après ce que l'on sait de l'équilibre OLNC de l'oil'igopole, les firmes les mieux dotées seront *ex post* celles qui pourront aisément s'octroyer un important

[16]Ici la taille de la firme est résumée par le volume des réserves *in situ*.

pouvoir de marché, ceci étant d'autant plus vrai qu'elles ont de faibles coûts d'extractions. On est donc dans le cas d'application de *l'effet d'efficience* du monopole de R. Gilbert, D. Newbery (1982). Bien évidemment, la firme la mieux dotée n'est pas *a priori* en monopole, mais si l'entrée sur le marché est (assez) libre, elle aura tendance à se comporter comme telle et un résultat de préemption de l'innovation surviendra. En fait la mise en évidence de la préemption du monopole et du résultat de persistance, menée par R. Gilber, D. Newbery, ne s'applique véritablement que lorsque un brevet exclusif sanctionne la réussite de la R&D, c'est-à-dire si l'innovateur peut s'approprier la technologie et bloquer de ce fait l'entrée à toute compétiteur potentiel. Ainsi l'interprétation en termes de préemption de la proposition 6 est une extrapolation du résultat de R. Gilbert, D. Newbery car la critique de J.L. Gaffard sur la non appropriation des innovations dans l'approche de DS reste valide dans notre oil'igopole innovateur.

Remarquons enfin que si l'on introduit les $\tilde{n}$ conditions de libre entrée (*id.* (14.e)) la profitabilité minière (uniquement) de chaque oil'igopoleur va s'en trouver modifiée. Si la libre entrée est possible, par un système d'attribution aux enchères de prospects rentables vacants, alors la condition de profit global actualisé nul conduira immédiatement à la relation d'ordre $p^{\tilde{n}} <..p^{j} <...p^{1}$ car $\tilde{K}^{\tilde{n}} <...\tilde{K}^{j} <...\tilde{K}^{1}$. La profitabilité strictement minière de la firme la moins bien dotée sera plus importante que toutes les autres firmes entrées à l'équilibre. Dans la cadre de ressources non renouvelables, plus pertinent est le cas avec barrières à naturelles à l'entrée du fait, on le sait, de la distribution exogène des réserves *in fine*. Dans ce cadre la condition de profit global nul n'est pas exigée, et si la séquence $\tilde{K}^{\tilde{n}} <...\tilde{K}^{j} <...\tilde{K}^{1}$ reste vraie, la relation d'ordre $p^{\tilde{n}} <..p^{j} <...p^{1}$ n'est plus acceptable. Sans préciser plus avant les amplitudes relatives des stocks des différentes firmes, il ne sera pas possible de donner une relation d'ordre sur les profits miniers et globaux.

Dans la section suivante nous allons analyser comment l'oil'igopole se conduit lorsque la R&D est spécifique à l'activité minière. Cette spécificité implique que l'effort de recherche réside dans la mise au point de technologies non plus réductrice de coût mais d'accessibilité.

Section IV. Innovation technologique "d'accessibilité" au sein de l'oligopole minier

Dans la section précédente nous avons traité d'un contexte d'innovation classique, la baisse des coûts de production comme issue de la R&D, dans un cadre de marché minier oligopolistique. L'industrie minière peut choisir une trajectoire technologique toute autre, en investissant dans la mise au point de techniques de production qui permettent en priorité de récupérer des réserves inaccessibles (probables ou gaspillées). Ces technologies que nous avons qualifiées d'inventions d'accessibilité n'impliquent pas la baisse des coûts unitaires de production. Dans ce cadre d'analyse la technologie de R&D va donc produire une liaison entre les dépenses capitalisées de recherche et le couple coût-réserve.

Pour simplifier nous supposerons ici que la R&D n'agit que sur la composante réserve *in situ* et ne procure aucun désavantage en matière de coût d'extraction. Ainsi pour un niveau donné K de dépense de R&D, le stock initial de ressource accessible par la firme minière i, se situera à un niveau $S^i(K)$ où $S^{i\prime}(K) > 0$, $S^{i\prime\prime}(K) < 0$ et $S^i(0) = S_0^i, S^i(\infty) = S_\infty < \infty$. La technologie de R&D est supposée induire des rendements d'échelles croissants et marginaux décroissants, l'accessibilité des réserves probables étant limité supérieurement par un niveau "naturel" S_∞. *Via* ces hypothèses, les dépenses de R&D permettent d'assurer une expansion du patrimoine minier des firmes, expansion cependant circonscrite à la marge. Il faut remarquer que les firmes minières peuvent être actives sans investir en R&D car $S^i(0)$ 0, de ce fait les différences dans les comportements de R&D d'accessibilité naîtront aussi bien des différences de coûts d'extraction (exogènes) que des patrimoines miniers initiaux.

Chaque oil'igopoleur maximise le profit total actualisé (y compris les dépenses de recherche) par rapport à sa trajectoire OL d'extraction et son investissement en R&D sous sa contrainte d'épuisement, soit :

$$\max_{\{q_t^i\},K^i} \int_0^{T^i} e^{-rt}\left[p(q_t^i + \sum_{j\neq i} q_t^j) - c^i\right] q_t^i dt - K^i \tag{23.a}$$

$$\text{s/c} \quad S^i(K^i) = \int_0^{T^i} q_t^i dt \tag{23.b}$$

Pour tout i, on a la condition intertemporelle d'extraction (14.c) ceci pour tout K positif, la seule différence provient de l'implicite liaison qu'il existe entre la rente l^i et K via la contrainte d'épuisement (23.b). Sous sa forme intégrale, la condition (23.b) est une liaison isopérimétrique, que l'on peut associer à un multiplicateur de Lagrange d. Pour parvenir à la condition d'équilibre de R&D on peut former le Lagrangien généralisé suivant :

$$\int_0^{T^i} e^{-rt}(p(q_t^i + \sum_{j\neq i} q_t^j) - c^i) q_t^i dt - K^i + d(S^i(K^i) - \int_0^{T^i} q_t^i dt)$$

En le différentiant en K et en identifiant le multiplicateur d à la rente de rareté actualisée l^i, il vient (pour une solution intérieure) :

$$l^i S^{i\prime}(K^i) = 1 \tag{24}$$

La condition d'équilibre (24) signifie que chaque oil'igopoleur choisira un niveau de R&D tel que l'accroissement de la rente totale cumulée procurée par l'accessibilité à de nouvelles réserves compense exactement la dépense marginale de R&D, soit 1. Si l'on considère que l'entrée sur le marché est libre, une condition de profit global nul du type (14.e) tiendra.

i) Innovations d'accessibilité dans l'oil'igopole symétrique

Selon cette configuration, toutes les firmes sur le marché ont le même patrimoine minier initial, $\forall i, S_0^i = S_0$ et le même coût unitaire d'extraction, $\forall i, c^i = c$. En notant $\hat{x}$ la variable x à l'équilibre, et si l'on suppose une libre entrée sur le marché de la ressource, il vient les relations :

$$\begin{cases} p(\hat{Q}_t)\left(1 - \dfrac{1}{\hat{n}\, h(\hat{Q}_t)}\right) = l\, e^{rt} + c \\ l\, S'(\hat{K}) = 1 \\ \displaystyle\int_0^{\hat{T}} e^{-rt}\left[p(\hat{Q}_t) - c\right]\frac{\hat{Q}_t}{\hat{n}}\, dt = \hat{K} \Leftrightarrow \int_0^{\hat{T}} e^{-rt}\left[p(\hat{Q}_t) - c\right]\hat{Q}_t dt = \hat{n}\hat{K} \end{cases} \tag{25}$$

En combinant la première et la dernière relation de (25), on forme alors :

$$\frac{\hat{n}\, l\, S(\hat{K})}{\hat{n}\hat{K}} + \frac{1}{\hat{n}\, h(\tilde{Q})}\frac{\hat{R}}{\hat{n}\hat{K}} = 1 \Leftrightarrow \frac{\hat{n}\, l\ S(\hat{K})}{\hat{n}\hat{K}} + \frac{1}{\hat{n}\, h(\tilde{Q})\hat{Z}} = 1$$

où $0 < \tilde{Q} < \hat{Q}_0 \leq \hat{n} S(\hat{K})$, $\hat{R}$ est la recette totale actualisée de l'industrie, et $\hat{Z} = \hat{n}\hat{K} / \hat{R}$. D'où en substituant la deuxième relation de (25) :

$$\frac{1}{\hat{n}} = h(\tilde{Q})\,\hat{Z}\,\frac{x(\hat{K}) - 1}{x(\hat{K})} \tag{26}$$

où $x(K) = S'(K)K / S(K) > 0$, l'élasticité de la technologie de R&D d'accessibilité.

Or en vertu de la concavité de la fonction $S(K)$, la relation (26) conduit à une contradiction et à l'inexistence de l'équilibre de cet oil'igopole avec libre entrée. En effet, puisque h et $\hat{Z}$ sont positifs, il faut que $x(\hat{K}) > 1$ pour que (26) ne soit pas contradictoire, c'est-à-dire que $\hat{n}$ ne soit pas négatif. Cependant si l'on forme la fonction de x, $F(x) = S(x) - x S'(x)$, celle-ci est strictement croissante, $F'(x) = -x S''(x) > 0$ car $S''(x) < 0$, et puisque $F(0) = S_0 > 0$, $F(x)$ sera toujours positive, d'où $\forall x > 0, F(x) > 0$ et donc $x(x) < 1$.

Selon l'hypothèse d'une accessibilité des réserves marginale décroissante, l'équilibre OLNC symétrique d'extraction et de R&D d'accessibilité n'existe pas. La R&D d'accessibilité constitue donc un facteur d'instabilité de l'oil'igopole si les gisements ne sont pas circonscrits et distribués, c'est-à-dire si un système de droits de propriété sur les prospects est parfaitement défini. Une alternative permettant à cet équilibre d'exister est de supposer que la technologie d'accessibilité est convexe, croissante, ce qui entraînera la cohérence de (26). Cependant il est peut pertinent dans l'optique de la R&D de supposer que toute dépense supplémentaire procure un gain (en réserve) marginal plus important que la précédente si l'on suppose que l'accessibilité maximale est finie, comme c'est le cas ici $S_\infty < \infty$.

Ce résultat d'inexistence s'explique par la fait que cette technologie de R&D d'accessibilité concave implique d'après (25) une rente de rareté totale de l'ensemble de l'industrie ($\hat{n}\ l\ S(\hat{K})$) toujours plus élevée que la dépense de R&D globale de cette même industrie ($\hat{n}\hat{K}$). En effet, pour tout n, on aura :

$$n\,l\;S(\hat{K}) - n\hat{K} = n\hat{K}\left(\frac{1}{x(\hat{K})} - 1\right) > 0$$

Ainsi il ne peut y avoir de taille de l'offre n qui rende négative cette relation afin de pouvoir espérer vérifier la dernière égalité de (25). Toute firme potentielle à donc intérêt à entrer sur le marché en accroissant sa R&D, ceci étant vrai pour tout entrant, on entre donc dans un processus cumulatif sans fin.

Si l'équilibre avec libre entrée ne peut exister, l'équilibre avec barrières (géologiques) à l'entrée existe potentiellement, car la dernière relation de (25) ne tient pas. Il suffit de supposer que les n firmes sont définies sur la base d'une distribution donnée de prospects et que la R&D affecte directement les réserves contenus dans ces prospects.

ii) Innovations d'accessibilité dans l'oil'igopole hétérogène

Pour ne pas se heurter au problème d'inexistence décelé ci-dessus, nous supposons maintenant que les droits de propriétés sur les mines et gisements sont parfaitement définis au point de constituer un système infranchissable de barrières à l'entrée sur le marché.

L'oil'igopole hétérogène est défini par l'égalité des coûts d'extraction ($\forall i, c^i = c$) mais des patrimoines miniers initiaux différents ($\forall i \neq j, S_0^i \neq S_0^j$). Prenons deux firmes actives quelconques i et j , telles que $S_0^i > S_0^j$. D'après (24) à l'équilibre OLNC, il vient immédiatement l'égalité suivante :

$$\tilde{l}^i\, S^{i\,\prime}(\tilde{K}^i) = \tilde{l}^j\, S^{j\,\prime}(\tilde{K}^j) \tag{27}$$

Pour simplifier l'analyse, supposons maintenant que l'on puisse définir la technologie de R&D d'accessibilité sous la forme multiplicative suivante : $\forall h,\ S^h(K) = S_0^h\,\Sigma(K)$, où $\Sigma(0) = 1$, $\Sigma'(K) > 0$, $\Sigma''(K) < 0$. Ainsi (27) peut se récrire :

$$\tilde{l}^i\, S_0^i\, \Sigma'(\tilde{K}^i) = \tilde{l}^j\, S_0^j\, \Sigma'(\tilde{K}^j) \tag{28}$$

Trois situations peuvent survenir à l'équilibre, soit a) $\tilde{K}^i = \tilde{K}^j$, b) $\tilde{K}^i > \tilde{K}^j$, c) $\tilde{K}^i < \tilde{K}^j$.

a) Si $\tilde{K}^i = \tilde{K}^j$, d'après (28), il vient directement l'égalité : $\tilde{l}^i\, S_0^i = \tilde{l}^j\, S_0^j$ d'où puisque $S_0^i > S_0^j$, $\tilde{l}^i < \tilde{l}^j$. Dans le cadre d'un oil'igopole hétérogène (cf. prop. 2.c) cette relation est vraie. Remarquons que cette éventualité implique tout de même $S(\tilde{K}^i) > S(\tilde{K}^j)$.

b) Si $\tilde{K}^i > \tilde{K}^j$, $S(\tilde{K}^i) > S(\tilde{K}^j)$ car $\Sigma'(K) > 0$ et $S_0^i > S_0^j$, mais par contre puisque $\Sigma''(K) < 0$, on a $\Sigma'(\tilde{K}^i) < \Sigma'(\tilde{K}^j)$. Le fait que $S(\tilde{K}^i) > S(\tilde{K}^j)$ implique, cf. prop. 2.c : $\tilde{l}^i < \tilde{l}^j$. Ces différents éléments n'induisent pas la contradiction de (28).

c) Si $\tilde{K}^i < \tilde{K}^j$, $S(\tilde{K}^i) <> S(\tilde{K}^j)$ car à la fois $\Sigma(\tilde{K}^i) < \Sigma(\tilde{K}^j)$ et $S_0^i > S_0^j$. Par contre $\Sigma'(\tilde{K}^i) > \Sigma'(\tilde{K}^j)$, ce qui, avec $S_0^i > S_0^j$ implique $\tilde{l}^i < \tilde{l}^j$ pour vérifier (28). D'après prop. 2.c qui tient ici, il vient donc $S(\tilde{K}^i) > S(\tilde{K}^j)$.

Les caractéristiques d'équilibre de Nash-Cournot des dépenses de R&D d'accessibilité dans l'oil'igopole hétérogène sont peu claires. Cependant les effets sur les patrimoines miniers effectifs à l'issue de la R&D seront toujours en faveur de la firme la mieux dotée initialement. Ainsi pour deux firmes technologiquement semblables *i* et *j*, la R&D de la firme *j* peut très bien être supérieure à celle de la firme *i*, mieux dotée initialement, sans que cela ne renverse l'ordre relatif des patrimoines miniers réels. Dans ce cadre général, si les coûts d'extractions sont semblables, l'acquis géologique est prépondérant et la R&D d'accessibilité ne parvient pas à apporter un avantage relatif à la firme la moins bien dotée.

PROPOSITION 7

Dans l'oil'igopole minier, pour toute firme i et j telle que $c^i = c^j$ *et* $S_0^i > S_0^j$, *l'issue de la R&D d'accessibilité implique toujours* $S(\tilde{K}^i) > S(\tilde{K}^j)$.

Remarquons en outre que le comportement d'innovation d'accessibilité ne remet pas en cause la relativité des dates d'épuisements respectifs des deux firmes *i* et *j*, on aura toujours $\tilde{T}^i > \tilde{T}^j$ car à l'issue de la R&D l'oil'igopole demeure dans le même cadre d'hétérogénéité qu'avant l'innovation.

iii) Innovations d'accessibilité dans l'oil'igopole asymétrique

L'oil'igopole asymétrique est défini par l'homogénéité des patrimoines miniers initiaux ($\forall i, S_0^i = S_0$) mais des coûts d'extraction différents ($\forall i \neq j, c^i \neq c^j$). Prenons deux firmes actives quelconques *i* et *j* , telles que $c^i > c^j$. D'après (24) à l'équilibre OLNC, l'égalité (27), où (28) si l'on adopte la simplification de la technologie de R&D ci-dessus, sont toujours respectées.
Trois situations peuvent survenir à l'équilibre, soit a) $\tilde{K}^i = \tilde{K}^j$, b) $\tilde{K}^i > \tilde{K}^j$, c) $\tilde{K}^i < \tilde{K}^j$.

a) Si $\tilde{K}^i = \tilde{K}^j$, alors $S(\tilde{K}^i) = S(\tilde{K}^j)$ et les enchaînements relatifs possibles dans l'oil'igopole OLNC asymétrique (cf. Section I), seules les séquences M_j-$S_{i/j}$-M_i et $S_{i/j}$-M_i peuvent être réalisées. On peut voir (cf. Annexe) que ces enchaînements impliquent un ordonnancement des rentes de raretés actualisées tel que : $\tilde{l}^i \leq \tilde{l}^j$. Or pour vérifier (28) alors que $S_0^i = S_0^j = S_0$, il faut que $\tilde{l}^i = \tilde{l}^j$ car $\Sigma'(\tilde{K}^i) = \Sigma'(\tilde{K}^j)$. L'égalité $\tilde{l}^i = \tilde{l}^j$ renvoie donc à un unique couple (c^i,c^j), toutes choses égales par ailleurs.

b) Si $\tilde{K}^i > \tilde{K}^j$, $S(\tilde{K}^i) > S(\tilde{K}^j)$ car $\Sigma'(K) > 0$ et $\Sigma'(\tilde{K}^i) < \Sigma'(\tilde{K}^j)$ puisque $\Sigma''(K) < 0$. Seuls les enchaînements M_i-$S_{i/j}$, M_i-$S_{i/j}$-M_i , $S_{i/j}$-M_i et $S_{i/j}$ sont réalisables. Ceux-ci correspondent alors un ordonnancement des rentes de raretés actualisées tel que : $\tilde{l}^i \leq \tilde{l}^j$. Or pour vérifier (28) puisque et $\Sigma'(\tilde{K}^i) < \Sigma'(\tilde{K}^j)$, il faut impérativement que l'on ait $\tilde{l}^i > \tilde{l}^j$, d'où une contradiction.

c) Si $\tilde{K}^i < \tilde{K}^j$, $S(\tilde{K}^i) < S(\tilde{K}^j)$ et $\Sigma'(\tilde{K}^i) > \Sigma'(\tilde{K}^j)$. Les enchaînements possibles sont : M_j-$S_{i/j}$, M_j-$S_{i/j}$-M_j , $S_{i/j}$-M_j. Pour les deux derniers on a $\tilde{l}^i <> \tilde{l}^j$, alors que pour M_j-$S_{i/j}$ on a $\tilde{l}^i < \tilde{l}^j$. Tous ces enchaînements sont compatibles avec l'égalité (28) car : $\tilde{l}^i < \tilde{l}^j$.

Les caractéristiques d'équilibre de Nash-Cournot des dépenses de R&D d'accessibilité dans l'oil'igopole asymétrique sont telles que l'incitation à innover est en général plus forte chez la firme minière la plus performante. Cependant si l'écart entre les coûts unitaires est assez faible, un cas *limite* où les deux firmes investissent au même niveau peut apparaître. La stratégie de la firme *i* est de profiter de son avantage technologique de base pour améliorer l'accessibilité aux réserves probables *via* une nouvelle technologie. Cette stratégie lui procure alors un avantage additionnel en terme de profit total actualisé mais peut très bien, selon l'écart entre les coûts d'extraction, renverser la relativité des dates d'épuisements de *i* et *j*. En effet sans innovation, seuls les enchaînements M_j-$S_{i/j}$-M_i et $S_{i/j}$-M_i sont *a priori* réalisables, d'où $T^i > T^j$. Or après R&D, le point c) ci-dessus nous montre bien que les enchaînements M_j-$S_{i/j}$, M_j-$S_{i/j}$-M_j et $S_{i/j}$-M_j sont possibles, et donc $\tilde{T}^i \leq \tilde{T}^j$.

PROPOSITION 8

Dans l'oil'igopole minier, pour toute firme i et j telle que $S_0^i = S_0^j$ *et* $c^i > c^j$ *, la R&D d'équilibre est telle que* $\tilde{K}^i \leq \tilde{K}^j$ *et donc* $S(\tilde{K}^i) \leq S(\tilde{K}^j)$.

Dans la plupart des cas, l'issue de la R&D correspond ici à un renforcement sur le plan du patrimoine minier de l'avantage initial en terme technologique.

iv) Innovations d'accessibilité dans l'oil'igopole asymétrique-hétérogène

L'oil'igopole asymétrique-hétérogène est défini par des patrimoines miniers initiaux et des coûts d'extraction différents : $\forall i \neq j, c^i \neq c^j, S_0^i \neq S_0^j$. Un cadre géologique classique est celui où les firmes les mieux dotées en ressources s'assurent des coûts techniques d'extraction faibles, cela correspond par exemple au fait stylisé de la géologie pétrolière mondiale. Prenons deux firmes actives quelconques *i* et *j* , telles que $c^i > c^j$ et $S_0^i < S_0^j$. A l'équilibre OLNC, les égalités (27) ou (28) sont toujours respectées.

Trois situations peuvent survenir à l'équilibre, soit a) $\tilde{K}^i = \tilde{K}^j$, b) $\tilde{K}^i > \tilde{K}^j$, c) $\tilde{K}^i < \tilde{K}^j$.

a) Si $\tilde{K}^i = \tilde{K}^j$, alors $S(\tilde{K}^i) < S(\tilde{K}^j)$ et $\Sigma'(\tilde{K}^i) = \Sigma'(\tilde{K}^j)$. Seuls les enchaînements M_j-$S_{i/j}$, M_j-$S_{i/j}$-M_j et $S_{i/j}$-M_j peuvent être réalisées. Ceux-ci impliquent un ordonnancement des rentes de raretés actualisées tel que : $\tilde{l}^i \leq> \tilde{l}^j$. Or vérifier (28) revient à s'assurer de l'égalité suivante : $\tilde{l}^i S_0^i = \tilde{l}^j S_0^j$. D'où la condition $\tilde{l}^i > \tilde{l}^j$ puisque $S_0^i < S_0^j$, celle-ci peut être vérifiée pour les enchaînements en question.

b) Si $\tilde{K}^i > \tilde{K}^j$, $S(\tilde{K}^i) <> S(\tilde{K}^j)$ et $\Sigma'(\tilde{K}^i) < \Sigma'(\tilde{K}^j)$. Pour vérifier (28), on doit avoir $\tilde{l}^i / \tilde{l}^i = (S_0^j / S_0^i)[\Sigma'(\tilde{K}^j) / \Sigma'(\tilde{K}^i)] > 1$, soit $\tilde{l}^i > \tilde{l}^j$.

*) Si l'issue de la R&D implique $S(\tilde{K}^i) \geq S(\tilde{K}^j)$, alors seuls les enchaînements séquentiels M_i-$S_{i/j}$, M_i-$S_{i/j}$-M_i, M_j-$S_{i/j}$-M_i, $S_{i/j}$-M_i et $S_{i/j}$ sont possibles. Or ceux-ci impliquent $\tilde{l}^i \leq \tilde{l}^j$ d'où une contradiction.

**) Si l'issue de la R&D implique $S(\tilde{K}^i) < S(\tilde{K}^j)$, alors on retrouve les éléments compatibles du a) ci-dessus.

c) Si $\tilde{K}^i < \tilde{K}^j$, $S(\tilde{K}^i) < S(\tilde{K}^j)$ et $\Sigma'(\tilde{K}^i) > \Sigma'(\tilde{K}^j)$. Pour vérifier (28), on doit avoir $\tilde{l}^i / \tilde{l}^i = (S_0^j / S_0^i)[\Sigma'(\tilde{K}^j) / \Sigma'(\tilde{K}^i)]$ >1, soit $\tilde{l}^i \leq> \tilde{l}^j$. Les enchaînements possibles sont ici : M_j-$S_{i/j}$, M_j-$S_{i/j}$-M_j et $S_{i/j}$-M_j, or ceux-ci impliquent $\tilde{l}^i \leq> \tilde{l}^j$.

Dans le cadre asymétrique-hétérogène, la R&D d'accessibilité impliquera toujours $S(\tilde{K}^i) < S(\tilde{K}^j)$, c'est-à-dire que les firme les mieux dotées initialement le restent à l'issue de l'innovation. En ce sens on retrouve ici les préceptes de la proposition 7. Bien que soit valide la situation où la firme géologiquement et technologiquement désavantagée (*i*), s'engage plus fortement dans la R&D que la firme *j* (cf. b)), il n'en reste pas moins vrai que la situation d'équilibre conserve les avantages géologiques initiaux.

Les propositions 7 et 8 expriment donc le fait que les avantages initiaux aussi bien géologiques que technologiques sont prépondérants dans l'engagement en R&D d'accessibilité à des réserves probables. La compétition Nash-Cournot profite donc aux firmes *a priori* plus efficaces et mieux dotées car celles-ci voient leur position renforcée à l'issue de la R&D. On retrouve là le même genre de résultat que celui de la proposition 6 dans le cadre d'innovation réductrice de coût.

En fait les stratégies de R&D réductrice de coût et d'accessibilité peuvent marcher de pair en permettant toutes deux de conserver sur le long terme des positions relatives entre compagnies. Le cas américain est intéressant car il montre bien que pour des raisons de compétition sur le marché du brut, les compagnies ne peuvent pas abandonner leur politique de R&D dans l'E/P notamment quant elles détiennent des réserves relativement importantes. L'idée selon laquelle Exxon pourrait s'acquitter de cette activité d'invention justement parce qu'elle est leader sur le marché, n'est viable que sur le court terme c'est-à-dire pour des raisons conjoncturelles, par contre l'engagement dans la R&D dans l'E/P est fondamentalement une stratégie essentielle pour conserver dans un avantage structurel dans la compétition entre compagnies américaines. En ce sens les résultats du modèle théorique motivent la position alarmiste du DOE américain (DOE/EIA (1996)) qui regrettent la politique actuelle de restructuration à outrance (*downsizing*) impliquant en outre la baisse des dépenses de R&D et d'exploration, mettant ainsi en péril les gains technologiques et géologiques futurs en faisant parallèlement le jeu de l'OPEP.

Par ailleurs une analyse économétrique de E.M. Zampelli (1996) abonde dans le sens des propositions 7 et 8. L'auteur teste une relation entre les dépenses de R&D sur la RAH pour le pétrole et le gaz et la taille de la firme, le niveau de ses réserves prouvées (en logarithme), la part du gaz dans ces réserves, la part des cash-flows sur les actifs, le prix du brut (en logarithme) et la part du capital fixe investi dans la production de pétrole et de gaz. Ce modèle annuel est estimé sur une période allant de 1978 à 1993 pour l'industrie américaine (données du DOE / EIA).

Les résultats relatent un corrélation positive mais non significative entre la R&D en RAH et le ratio cash-flows sur actifs. La R&D est largement motivée par des opportunités de récupération sur le pétrole alors que le cœfficient est négatif quant il s'agit du gaz. La relation positive (0,06 pour un *t* de Student de 2,29 au seuil de 5%) entre la R&D et le logarithme des réserves correspond aux effets relatés dans les propositions 7 et 8.

"*De façon spécifique, le cœfficient positif et statistiquement significatif sur LNRES* (logarithme des réserves en bl) *indique que les firmes ayant les réserves les plus vastes ont tendance à être plus présente en R&D que leurs homologues plus petits*" in E.M. Zampelli (1996), p. 32.

De plus l'auteur tire de ses investigations économétriques que la non appropriabilité des résultats des inventions est une propriété centrale pour la mesure de l'intensité de la R&D. Il conclut que seules les firmes avec des réserves très larges possèdent les incitations adéquates pour s'engager dans la R&D.

Références bibliographiques

ALAZARD N. (1996) "Le progrès scientifique et technique en exploration-production : impact sur les réserves et les coûts" *Revue de l'Energie*, n° 476, mars, p. 157-166.

AMIGUES J.-P., GAUDET G., M. MOREAUX (1990) "Types de concurrence dans les duopoles de ressources naturelles non renouvelables" *Revue d'Economie Politique*, 100 année, n°3, p : 401-415.

ARROW K. (1962) "Economic welfare and the allocation of resources for invention" in *The Rate and Direction of Inventive Activity* , Princeton U.P., 1962, p : 609-626.

ASHEIM G.B. (1992) "Contestability in a Resource Market with Non-Convex Costs" *Scandinavian Journal of Economics*. vol. 94, n°4. p : 609-618.

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).

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.

CAIRNS R.D. (1990) "Les Ressources Non Renouvelables : le côté Offre". *L'Actualité Economique*, vol.66, n°4, p : 444-460.

_____________ (1991) "On Non-Convex Costs and Dynamic Consistency in a Exhaustible Resource Market". *Scandinavian Journal of Economics*. vol.93, n°1, p : 89-100.

______________ (1992) "Contestability in a Resource Market with Non-Convex Costs : a reply" *Scandinavian Journal of Economics*. vol.94, n°4, p : 619-623.

______________(1994) " On Gray's Rule and the Stylized facts of Non-Renewable Resources" *Journal of Economic Issues*;. vol. 28, n° 3, Septembre, p : 777-798.

CLEMHOUT S., WAN H. Jr (1989) "On Games of Cake-Eating" *in* van der PLOEG F., de ZEEUW A.J. (Eds) *Dynamic Policy Games in Economics*, 1989, Elsevier Science Publishers B.V., (North-Holland).

DASGUPTA P., STIGLITZ J.E. (1980) "Industrial Structure and the Nature of Innovative Activity " . *Economic Journal*, vol. 90, p : 266-293.

DASGUPTA P., GILBERT R., 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.

DOE/EIA (1996) *Performance Profiles of Major Energy Producers 1994*, DOE/EIA -0206(94), Janvier

ESWARAN M., LEWIS T. (1985) "Exhaustible Resources and Alternative Equilibrium Concepts". *Revue Canadienne d'Economique*, vol. 18, n°3, p. 459-473.

FARZIN Y. (1992) "Time Path of scarcity Rent in the Theory of Exhaustible Resources" *Economic Journal*, vol. 102, n° 413, p : 813-830 .

FRANCK C., QUANDT R. (1963) "On the Existence of the Cournot Equilibrium". *International Economic Review*. vol.4, n°1, p : 92-97.

GAFFARD J.L. (1990) *Economie Industrielle et de l'Innovation*, Precis Dalloz, Paris

GAUDET G., LONG V. N. (1994) "On the effects of the distribution of tne initial endowments in a nonrenewable resource duopoly" *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 18, p. 1189-1198.

GAUDET G., MOREAUX M . (1990) "Price versus Quantity Rules in Dynamic Competition : the case of Nonrenewable Natural Resources" *International Economic Review*. vol. 31, n° 3, p : 639- 650.

GILBERT R., NEWBERY D. (1982) "Preemptive Patenting and the Persistence of Monopoly" *American Economic Review*, vol. 72, n°3, p : 514-526.

GORDON H. (1954) "Economic theory of a common-property resource : the fishery" *Journal of Political Economy*, vol.62, p : 124-142.

GRIFFIN J. (1985) "OPEC Behavior : A test of alternatives hypotheses" *American Economic Review*, vol.73, p : 954-963.

GUESNERIE R. , TIROLE J. (1985) "L'Economie de la Recherche et Développement". *Revue Economique*, vol.36, n° 5, p : 843-870.

HARRIS C., VICKERS J. (1995) "Innovation and Natural Resources : a dynamic game with uncertainty" *Rand Journal of Economics*, vol. 26, n° 3, p : 418-430.

HOEL M. (1978) "Resource Extraction, Substitute Production and Monopoly" *Journal of Economic Theory*, vol. 19, n°1, p : 28-37.

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.

KAMIEN M., SCHWARTZ N. (1972) "Timing of Innovations under Rivalry" *Econometrica*, vol. 40, n°1, p : 43-60.

___________________________(1976) "The Degree of Rivalry for Maximum Innovative Industry" *Quarterly Journal of Economics*, vol. 90, n°2, p : 245-260.

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.

LEWIS T.R., SCHMALENSEE R. (1980.a) "On Oligopoly Markets for Non Renewable Resources". *Quarterly Journal of Economics*, vol.95, n°3, p. 475-491.

LEWIS T.R., SCHMALENSEE R. (1980.b) "Cartel and Oligopoly Pricing of Nonreplenishable Natural Resources" in P.T. LIU (Ed.) *Dynamic Optimization and Mathematical Economics*, 1980, Plenum Press, N.Y.

LOURY G. (1986) "A Theory of 'Oil'igopolist : Cournot Equilibrium in Exhaustible Resources Markets with fixed supplies". *International Economic Review*, vol.27, n°2, p : 285-301.

Mc MILLAN J., SINN H.-W. (1984) "Oligopolistic extraction of common-property resource : Dynamic equilibria." in M.C. KEMP, N.V. LONG (eds.) *Essays in the Economics of Exhaustible Resources* (Essai 11), Elsevier Science Publishers B.V.

NEWBERY D. (1984) "The Economics of Oil" *in* van der PLOEG F. (Ed) *Mathematical Methods in Economics* , chap. 20 , 1984, John Wiley & Sons, Ltd.

POLARSKY S. (1992) "Do oil producers act as 'oil'igopolists". *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 23, n°3, p : 216-247.

POUDOU J.-C. (1998) "R&D et innovations technologiques au sein d'un marché monopolistique d'une ressource non renouvelable", *Economies et Sociétés*, série W, n°4, n° 7/8, p. 5-40 .

_____________(1997) "Impacts des activités de R&D, d'Invention et d'Innovation des producteurs de pétrole sur les prix de la ressource", Chap. 2, p. 65-109, in *Energie et théorie économique, à propos de quelques débats contemporains*, sous la direction de J. PERCEBOIS, Ed. Cujas, 1997.

____________ (1996) *Comportements d'Invention, d'Innovation et de Recherche & Développement dans les Marchés de Ressources Non Renouvelables : le cas pétrolier*. Thése de Doctorat, U. Montpellier 1.

REINGANUM J.F. (1981) "Dynamic Games of Innovation". Journal of Economic Theory, vol. 25, n° 1, p : 21-46. (*et corrigendum dans le Journal of Economic Theory, vol. 35, p : 196-197*).

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.

SHAPIRO C. (1989) "Theories of Oligopoly Behavior" in SCHMALENSEE R., WILLIG R. (Eds) *Handbook of Industrial Organization* (vol.1) , 1989, Elsevier Science Publishers, B.V., Amsterdam.

SOLOW R. (1974) "The Economics of Exhaustible Resources or the Resources of Economics" *American Economic Review*, vol. 64, n°2, p. 1-14.

TEECE D.J., SUNDING D., MOSAKOWSKI E. (1993) "Natural Resources Cartels" *in* SWEENEY J.L. & A.V. KNEESE, *Handbook of Natural Resources & Energy Economics*, chap. 24, vol.III. Eds. Elsevier Science Publishers B.V., 1993.

ZAMPELLI E.M. (1996) "Do Firms Underinvest in R&D ? The Case of R&D in Oil and Gas Recovery" *I.A.E.E. Newsletter*, vol.95, Eté, p : 31-33.

I) M_i - $S_{i/j}$ $T^i = T^j = T$. Le passage du monopole relatif de *i* à la phase $S_{i/j}$ induit l'apparition d'une date de transition t^j pour laquelle la production de la firme *j* démarre. A partir des relations (74), on a le canevas temporel en deux périodes suivant : 1) $\forall t \in [t^i, t^j]: p^i(t) < p(t) \leq p^j(t)$, 2) $\forall t \in [t^j, T]: p^i(t) < (>) p^j(t) \leq p(t)$. Les conditions de la période 1) impliquent : $e^{rt^i}(l^i - l^j) + (c^i - c^j) < 0$, et puisque $c^i > c^j$, on doit obligatoirement avoir $l^i < l^j$. Cette dernière condition implique qu'au delà de la date "initiale" t^i, pour tout *t*, $p^i(t) - p^j(t) < 0$, et d'après le fait que $\forall k = i, j$, $\forall k = i, j, q_t^h = [p^k(t) - p(t)] / a(p(t)) \geq 0$, on a donc $\forall t, q_t^i > q_t^j$. Cette relation et l'antériorité de *i* sur la marché ($t^i < t^j$) permet de donner comme condition nécessaire (non suffisante) sur les réserves : $S_0^i = \int_{t^i}^{T} q_t^i dt > \int_{t^i}^{t^j} 0 dt + \int_{t^j}^{T} q_t^i dt = S_0^j$, soit $S_0^i > S_0^j$.

II) M_j-$S_{i/j}$ $T^i = T^j = T$. Les périodes : 1) $\forall t \in [t^j, t^i]: p^j(t) < p(t) \leq p^i(t)$, 2) $\forall t \in [t^j, T]: p^i(t) < (>) p^j(t) \leq p(t)$. Contrairement à I, les conditions de la période 1) impliquent : $e^{rt^j}(l^i - l^j) + (c^i - c^j) > 0$, et donc $l^i < (\geq) l^j$. Si $l^i \geq l^j$ alors pour tout *t*, $p^i(t) - p^j(t) > 0$ et $\forall t, q_t^i < q_t^j$, et d'où la condition $S_0^i < S_0^j$. Par contre si $l^i < l^j$, il existe un date $q > t^i : p^i(q) = p^j(q)$. Par structure p^i et p^j ne peuvent se croiser deux fois[17], or l'hypothèse de ce cas II), $T^i = T^j = T$ implique $p^i(T) = p^j(T) = p(T)$, donc il vient obligatoirement $q = T$. Ainsi $\forall t \leq T, p^j(t) < p^i(t)$, ce qui conduit à la condition $S_0^i < S_0^j$.

III) M_i-$S_{i/j}$-M_i $T^i > T^j$. Périodes : 1) $\forall t \in [t^i, t^j]$: $p^i(t) < p(t) \leq p^j(t)$, 2) $\forall t \in [t^j, T^j]: p^i(t) < (>) p^j(t) \leq p(t)$, 3) $\forall t \in [T^j, T^i]$: *id* 1). Puisque p^i et p^j ne peuvent se croiser deux fois, on va avoir $\forall t, p^j(t) > p^i(t)$, d'où la condition $S_0^i > S_0^j$. La séquence V) est le symétrique de *i* en *j* de cette séquence III), d'où pour V) on aura la condition $S_0^i < S_0^j$.

IV) M_i-$S_{i/j}$-M_j $T^i < T^j$. Périodes : 1) $\forall t \in [t^i, t^j]$: $p^i(t) < p(t) \leq p^j(t)$, 2) $\forall t \in [t^j, T^i]: p^i(t) < (>) p^j(t) \leq p(t)$, 3) $\forall t \in [T^i, T^j]$: $p^j(t) < p(t) \leq p^i(t)$. En t=$t^i$, on a $e^{rt^i}(l^i - l^j) + (c^i - c^j) < 0$, d'où, puisque $c^i > c^j$, $l^i < l^j$. Or cela implique que $\forall t, p^j(t) > p^i(t)$, ce qui interdit l'apparition de la période 3) de cette phase IV).

VI) M_j - $S_{i/j}$ - M_i $T^i > T^j$. Périodes : 1) $\forall t \in [t^j, t^i]: p^j(t) < p(t) \leq p^i(t)$, 2) $\forall t \in [t^j, T^j]: p^i(t) < (>) p^j(t) \leq p(t)$, 3) $\forall t \in [T^i, T^j]$: $p^i(t) < p(t) \leq p^j(t)$. En *t*=$t^j$, on a $e^{rt^j}(l^i - l^j) + (c^i - c^j) > 0$, d'où $l^i < (>) l^j$. Si $l^i > l^j$, $\forall t, p^i(t) > p^j(t)$ ce qui interdit la période 3). Donc $l^i \leq l^j$, et il existe une date *q*>t^i telle que : $p^i(q) = p^j(q)$. Ainsi en contrepoint, nous aurons les profils d'extractions de *i* et *j* : $\forall t \in [t^j, t^i]: q_t^j > q_t^i = 0$, $\forall t \in [t^j, q]: q_t^j \geq q_t^i > 0$, $\forall t \in [q, T^j]: q_t^i \geq q_t^j > 0$ et enfin $\forall t \in [T^j, T^i]: q_t^i > q_t^j = 0$. D'où en, intégrant de t^j à T^i, la condition sur les stocks : $S_0^i < (>) S_0^j$.

VII) $S_{i/j}$-M_i $T^i > T^j$. Périodes : 1) $\forall t \in [t^j = t^i, T^j]: p^j(t) < (>) p^i(t) \leq p(t)$

[17] En effet, si $dp^k/dt = r\ l^k e^{rt}$, et si l^j l^i, alors "c^k, $\exists\,!\ t : p^i = p^j$.

2) $\forall t \in [T^j, T^i]: p^i(t) \leq p(t) < p^j(t)$. Si en entame de la période 1 on a $p^i(t) - p^j(t) < 0$, alors $l^i < l^j$ et $\forall t, p^i(t) < p^j(t)$, d'où $\forall t, q_t^i > q_t^j$, ce qui induit la condition $S_0^i > S_0^j$. Si par contre $p^i(t) - p^j(t) > 0$, alors $l^i < (>) l^j$. Si $l^i > l^j$, $\forall t, p^i(t) > p^j(t)$ ce qui est incompatible avec l'occurrence de la période 2), donc $l^i \leq l^j$, et il existe une date $q < T^j$ où les coûts marginaux réels (p^k) s'égalisent renversant de ce fait l'écart relatif entre les niveaux d'extractions de *i* et *j*, d'où la condition $S_0^i < (>) S_0^j$.

VIII) $S_{i/j}$-M_j $T^i < T^j$. Périodes : 1) $\forall t \in [t^j = t^i, T^i]: p^i(t) < (>) p^j(t) \leq p(t)$
2) $\forall t \in [T^i, T^j]: p^j(t) \leq p(t) < p^i(t)$. Si $p^i(t) - p^j(t) < 0$, $l^i < l^j$ et $\forall t, p^i(t) < p^j(t)$, ce qui est incompatible avec l'occurrence de la période 2). Si par contre $p^i(t) - p^j(t) > 0$, alors $l^i < (>) l^j$. Si $l^i \geq l^j$, $\forall t, p^i(t) > p^j(t)$ ce qui induit la condition $S_0^i < S_0^j$. Si $l^i < l^j$, il existe une date *q* telle que les p^k, $k=i,j$ s'égalisent renversant de ce fait l'écart relatif entre les niveaux d'extractions de *i* et *j*. Or on doit avoir $T^i < T^j$ q car sinon $T^i < T^j$ ne tient plus, d'où $\forall t, q_t^i < q_t^j$ et la condition $S_0^i < S_0^j$.

IX) $S_{i/j}$ $T^i = T^j$. $\forall t \in [t^j = t^i, T^i = T^j]: p^i(t) < (>) p^j(t) \leq p(t)$. p^i et p^i, se croisent en $t = T^i = T^j = T$, soit $p^i(T) = p^j(T) = \overline{p}$. Avec $c^i > c^j$, il vient directement $l^i < l^j$, d'où $\forall t \leq T, p^i(t) \leq p^j(t)$, et donc $S_0^i > S_0^j$.

LISTE DES CAHIERS DE RECHERCHE CREDEN[*]

95.01.01 *Eastern Europe Energy and Environment : the Cost-Reward Structure as an Analytical Framework in Policy Analysis*
Corazón M. SIDDAYAO

96.01.02 *Insécurité des Approvisionnements Pétroliers, Effet Externe et Stockage Stratégique : l'Aspect International*
Bernard SANCHEZ

96.02.03 *R&D et Innovations Technologiques au sein d'un Marché Monopolistique d'une Ressource Non Renouvelable*
Jean-Christophe POUDOU

96.03.04 *Un Siècle d'Histoire Nucléaire de la France*
Henri PIATIER

97.01.05 *Is the Netback Value of Gas Economically Efficient ?*
Corazón M. SIDDAYAO

97.02.06 *Répartitions Modales Urbaines, Externalités et Instauration de Péages : le cas des Externalités de Congestion et des «Externalités Modales Croisées»*
François MIRABEL

97.03.07 *Pricing Transmission in a Reformed Power Sector : Can U.S. Issues Be Generalized for Developing Countries*
Corazón M. SIDDAYAO

97.04.08 *La Dérégulation de l'Industrie Electrique en Europe et aux Etats-Unis : un Processus de Décomposition-Recomposition*
Jacques PERCEBOIS

97.05.09 *Externalité Informationnelle d'Exploration et Efficacité Informationnelle de l'Exploration Pétrolière*
Evariste NYOUKI

97.06.10 *Concept et Mesure d'Equité Améliorée : Tentative d'Application à l'Option Tarifaire "Bleu-Blanc-Rouge" d'EDF*
Jérôme BEZZINA

98.01.11 *Substitution entre Capital, Travail et Produits Energétiques : Tentative d'application dans un cadre international*
Bachir EL MURR

98.02.12 *L'Interface entre Secteur Agricole et Secteur Pétrolier : Quelques Questions au Sujet des Biocarburants*
Alain MATHIEU

---

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

98.03.13 *Les Effets de l'Intégration et de l'Unification Économique Européenne sur la Marge de Manœuvre de l'État Régulateur*
Agnès d'ARTIGUES

99.09.14 *La Réglementation par Price Cap : le Cas du Transport de Gaz Naturel au Royaume Uni*
Laurent DAVID

99.11.15 *L'Apport de la Théorie Économique aux Débats Énergétiques*
Jacques PERCEBOIS

99.12.16 *Les biocombustibles : des énergies entre déclin et renouveau*
Alain MATHIEU

00.05.17 *Structure du marché gazier américain, réglementation et tarification de l'accès des tiers au réseau*
Laurent DAVID et François MIRABEL

00.09.18 *Corporate Realignments in the Natural Gas Industry : Does the North American Experience Foretell the Future for the European Union ?*
Ian RUTLEDGE et Philip WRIGHT

00.10.19 *La décision d'investissement nucléaire : l'influence de la structure industrielle*
Marie-Laure GUILLERMINET

01.01.20 *The industrialization of knowledge in life sciences Convergence between public research policies and industrial strategies*
Jean Pierre MIGNOT et Christian PONCET

01.02.21 *Les enjeux du transport pour le gaz et l'électricité : la fixation des charges d'accès*
Jacques PERCEBOIS et Laurent DAVID

01.06.22 *Les comportements de fraude fiscale : le face-à-face contribuables – Administration fiscale*
Cécile BAZART

01.06.23 *La complexité du processus institutionnel de décision fiscale : causes et conséquences*
Cécile BAZART

01.09.24 *Droits de l'homme et justice sociale. Une mise en perspective des apports de John Rawls et d'Amartya Sen*
David KOLACINSKI

01.10.25 *Compétition technologique, rendements croissants et lock-in dans la production d'électricité d'origine solaire photovoltaïque*
Pierre TAILLANT

02.01.26 *Harmonisation fiscale et politiques monétaires au sein d'une intégration économique*
Bachir EL MURR

02.06.27 *De la connaissance académique à l'innovation industrielle dans les sciences du vivant : essai d'une typologie organisationnelle dans le processus d'industrialisation des connaissances*
Christian PONCET

02.06.28 *Efforts d’innovations technologiques dans l’oligopole minier*
Jean-Christophe POUDOU