

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

LA DÉCISION DU PRODUCTEUR D'EXPLOITER UN GISEMENT:
LE CAS DES MINES DE CUIVRE ET DE ZINC AU CANADA
DE 1948 A 1971

PAR

MICHEL BÉDARD

DÉPARTEMENT DE SCIENCES ÉCONOMIQUES
FACULTÉ DES ARTS ET DES SCIENCES

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À LA FACULTÉ DES ÉTUDES SUPÉRIEURES
EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE
MAITRE ES SCIENCES (M.SC.)

JUIN 1986



TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	iv
AVANT-PROPOS	v
LISTE DES TABLEAUX	iii
I - INTRODUCTION	1
II - REVUE THÉORIQUE	
2.1 Modèle de base	4
2.2 Les prix	14
2.3 Les coûts d'extraction	18
2.4 La rente	23
III - THÉORIE DU MODÈLE	
3.1 La décision du producteur	30
3.2 La relation teneur quantité	33
3.3 L'évolution temporelle de la qualité des gisements exploités	35
3.4 Incertitude	37
3.5 Le rôle du taux d'intérêt	39
3.6 La substitution entre facteurs de production et le progrès technique	41
IV - ANALYSE EMPIRIQUE	45
4.1 La décision de commencer l'exploitation d'un gisement	45
4.2 Le choix du rythme de l'exploitation d'un gisement	49
4.3 Présentation des variables explicatives	51

	Page
V - RÉSULTATS EMPIRIQUES	
5.1 Présentation des équations	60
5.2 Interprétation des résultats pour le modèle probit	64
5.3 Interprétation des résultats pour le modèle MCO	73
5.4 Résultats obtenus pour les équations logarithmiques (MCO) .	85
 CONCLUSION	 88
 BIBLIOGRAPHIE	 93
 ANNEXE 1 - Transformation des variables et sources des données	
ANNEXE 2 - Liste des gisements	
ANNEXE 3 - Les fichiers de données	

LISTE DES TABLEAUX

	Page
TABLEAU 1	Liste des variables 52
TABLEAU 2	Interprétation des coefficients du modèle probit 62
TABLEAU 3	Résultats du modèle probit 65
TABLEAU 4	Corrélation entre les variables de qualité d'un gisement 68
TABLEAU 5	Résultats du modèle MCO avec prix réels 75
TABLEAU 6	Résultats du modèle MCO avec prix relatifs au capital 76
TABLEAU 7	Résultats du modèle MCO avec prix relatifs au travail 77
TABLEAU 8	Résultats du modèle MCO sous forme logarithmique 87

SOMMAIRE

Le producteur de ressources naturelles non renouvelables fait face à des problèmes différents de ceux d'un producteur ordinaire. Il doit maximiser ses profits à travers deux paramètres principaux, soient:

- 1) la date où l'exploitation d'un gisement débute
- 2) le rythme auquel se fera cette exploitation.

A l'aide de variables tant économiques, telles les prix des facteurs de production, que physiques, telles la taille ou la teneur d'un gisement, nous étudierons chacune de ces deux décisions: le modèle probit sera appliqué à la première, tandis que la deuxième sera étudiée à l'aide des moindres carrés ordinaires.

Nous étudierons plus particulièrement les relations et les substitutions possibles entre les différentes caractéristiques physiques d'un gisement, et nous verrons qu'une substitution teneur-taille et teneur-distance est présente.

AVANT-PROPOS

Je tiens à remercier de façon toute spéciale Monsieur Pierre Lasserre qui a suggéré l'idée de ce travail, et qui a su faire preuve d'une patience tendant vers l'infini face à l'auteur, qui, il faut l'avouer, ne possède malheureusement pas la science infuse.

Monsieur Marcel Dagenais a droit à toute ma reconnaissance pour son aide généreuse et sa grande disponibilité. Son aide me fut très précieuse au niveau des questions économétriques et sans lui, les résultats présentés plus loin auraient certainement été moins valables.

INTRODUCTION

Depuis la publication du célèbre article de Hotelling, en 1931, «the Economics of Exhaustible Resources», la question de l'épuisement des ressources naturelles a fait couler beaucoup d'encre, et chaque année, de nombreux travaux sur ce sujet viennent s'ajouter à une littérature déjà vaste.

Tout d'abord, qu'est-ce qu'une ressource naturelle non renouvelable? C'est premièrement un bien de capital, un actif pour la société et pour les propriétaires de ces ressources. Mais, contrairement à un immeuble ou à une machinerie quelconque, cet actif est disponible en quantités limitées. Chaque utilisation d'une ressource diminue le stock disponible de celle-ci, même en tenant compte du recyclage. Comme le fait remarquer le professeur Solow (1974, p. 2):

«the laws of thermodynamics and life guarantee that we will never recover a whole pound of secondary copper from a pound of primary copper in use, or a whole pound of tertiary copper from a pound of second day copper in use, there is leakage at every round; and a formula just like the ordinary multiplier formula tell us how much copper use can be built on the world's initial endowment of copper».

Le débat sur l'épuisement des ressources naturelles a donné naissance, tout naturellement, à un autre débat: comment mesurer cet épuisement des ressources? Sans trop anticiper sur la prochaine section, qui est une revue théorique des principales méthodes de mesure de la

raréfaction des ressources, notons immédiatement les principaux indicateurs employés: les prix, les coûts d'extraction, et la rente (que l'on peut définir comme étant la valeur implicite de la ressource lorsqu'elle est dans le sol).

Ceci nous amène au coeur du problème étudié par ce travail. De nombreux théoriciens étudient la question de l'épuisement des ressources, avec parfois des résultats contradictoires, certains prédisant l'épuisement prochain des ressources, déplorant l'absence d'un marché futur pour les actifs en ressources; d'autres, plus optimistes, rejettent l'hypothèse de l'épuisement, ou prédisent l'apparition de technologies de remplacement, et concluent qu'aucune menace sérieuse ne pèse sur l'avenir de notre société industrielle. Par contre, le marché des ressources naturelles fonctionne bien, et aucune crise majeure n'a encore éclaté au grand jour, si on fait exception des crises ayant des origines politiques, comme les crises du pétrole lors de la dernière décennie.

Ce travail se divise en deux parties. La première, comme il a été mentionné précédemment, est une revue de la théorie existante au sujet de la mesure de la raréfaction des ressources. La seconde partie est une étude empirique sur un aspect connexe de ce problème: quels sont les éléments sur lesquels se fonde un producteur de ressources naturelles non renouvelables lorsqu'il décide d'exploiter un gisement? Cet aspect, qui jusqu'ici a été très peu étudié, a un lien direct avec la mesure de la raréfaction des ressources, puisque d'une manière ou d'une autre, le producteur interprète les signaux que lui envoie le marché afin de déterminer le moment optimal de la mise en exploitation de son gisement.

Dans cette optique, les effets de nombreuses variables économiques, telles le taux d'intérêt, le prix de la ressource une fois extraite, les coûts des facteurs de production (capital, travail, énergie) seront analysés. Les effets de différentes mesures physiques, telles la taille du gisement exploité, la teneur en métal de son minerai, la distance qui sépare ce gisement du lieu où s'effectue le raffinage du minerai, et le type d'exploitation (par galeries souterraines ou par mines à ciel ouvert) seront aussi examinés.

Les estimations empiriques se feront à l'aide d'un modèle probit et de régressions linéaires classiques; et les données utilisées se réfèrent aux gisements canadiens de cuivre et de zinc, au cours de la période 1948-1970.

II - REVUE THÉORIQUE

2.1 Un modèle de base

Les études sur la question de l'épuisement des ressources (où ressources est ici pris dans le sens ressources naturelles non renouvelables) sont nombreuses. Mais avant de présenter les études sur l'évolution des coûts, des prix ou de la rente, il convient de présenter un modèle de base qui aidera à bien comprendre les interrelations entre ces divers éléments.

La version la plus simple du modèle de base a été couramment utilisée dans toute la littérature sur ce sujet. Citons entre autre Dasgupta et Heal (1979, chap. 6) et Richard Lecomber (1979).

Prenons une fonction de production

$$q_t = f(E, R_t) \quad (1)$$

où q_t est l'output extrait,

E est l'effort, un indice capital travail,

R_t est le stock de ressources au temps t .

La fonction est définie concave en E ; soit $f_e > 0$

et $f_{ee} < 0$

L'objectif de la firme est de maximiser la valeur présente des profits obtenus de la vente de la ressource.

On peut exprimer formellement le problème du producteur: (en concurrence pure et parfaite)

$$\max \int_0^{\infty} e^{-rt} \left[Pq_t - C(q_t) \right] dt \quad (2)$$

sous contraintes

$$1) \quad -\dot{R}_t = q_t \quad (3)$$

$$\text{car} \quad R_t = R_0 - \int_0^t q_t dt \quad (4)$$

$$2) \quad R_t \geq 0 \quad \forall t \quad (5)$$

où P est le prix de la ressource (donné pour la firme en compétition),

$C(q_t)$ est le coût d'extraction,

$$C(q_t) = W E \quad \text{où } W \text{ est la rémunération de l'effort.} \quad (6)$$

Supposons que les coûts ont le comportement suivant:

$$C_q > 0 \quad \text{si } q > q, \quad (7)$$

$$C_q = 0 \quad \text{si } q = q, \quad (8)$$

$$C_q < 0 \quad \text{si } q < q, \quad (9)$$

$$C_{qq} > 0. \quad (10)$$

Donc q est la production qui minimise les coûts.

Le Hamiltonien est alors

$$H = e^{-rt} \left[P_{qt} - C(q_t) - \alpha_t q_t \right] \quad (11)$$

$$\text{où } \alpha_t = \lambda e^{rt} \quad (12)$$

et λ est le multiplicateur associé à la contrainte du Hamiltonien.

α_t est donc la variable associée (escomptée) à la contrainte: c'est la rente, la valeur de la ressource dans le sol. Une autre interprétation qu'il est possible de donner à α_t est la suivante: α_t est l'effet sur les profits futurs (escomptés) d'extraire une unité de la ressource au temps t .

Le principe du maximum du Hamiltonien nous permet d'écrire l'équation:

$$H_q = P - CM - \alpha_t = 0 \quad (13)$$

que l'on peut réécrire

$$P = CM + \alpha_t. \quad (14)$$

On obtient donc que le prix est égal au coût marginal d'extraction plus la rente.

Une autre condition d'optimalité nous indique que:

$$\dot{\lambda} = -H_r \quad (15)$$

et sachant

$$\bar{\lambda} = (\dot{\alpha} - r\alpha)e^{-rt} \quad (16)$$

on peut écrire

$$-H_R = e^{-rt}(\dot{\alpha} - r\alpha). \quad (17)$$

Si on suppose, comme c'est le cas ici, que les coûts sont indépendants de la quantité du minerai déjà extraite, ce qui s'exprime ainsi:

$$C_R = 0, \quad (18)$$

alors

$$H_R = 0 \quad (19)$$

et l'équation (17) devient, une fois réarrangée, le fameux résultat d'Hotelling:

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = r \quad (20)$$

à savoir que la rente augmente au taux d'intérêt r . Regardons maintenant les conditions de transversalité:

- le temps terminal est endogène, donc

$$e^{-rT} \left[Pq_T - C(q_T) - \alpha_T q_T \right] = 0 \quad (21)$$

$$P - C(q_T)/q_T - \alpha_T = 0 \quad (21')$$

Soustrayons (21') de (14), et nous obtenons que :

$$C(q_T)/q_T = CM_T \quad (22)$$

donc que le coût moyen est égal au coût marginal, ce qui n'est possible, bien sûr, qu'au point minimum du coût moyen. Il en découle directement qu'au temps T , $q_T = q$.

Différencions maintenant (14) par rapport au temps, afin d'obtenir la trajectoire de q_t :

$$0 = \frac{\partial CM}{\partial t} \dot{q} + \dot{\alpha} \quad (23)$$

Réarrangeons (23) :

$$\dot{q} = \frac{\dot{\alpha}}{-dCM/dt} \quad (23')$$

Il s'ensuit que \dot{q} est négatif, car par (20) on sait que $\dot{\alpha}$ est positif, et dCM/dt est positif, pour peu que l'on suppose que la pente de l'offre de la firme est positive (le coût marginal étant l'offre de la firme).

On peut donc en conclure que dans ce cas simple, l'output diminue tout au long de l'exploitation du gisement, jusqu'au moment où l'output atteint le niveau qui minimise le coût moyen. Pendant ce temps, la rente augmente au taux r . Ajoutons que, dans ce cas, le gisement est complètement épuisé.

Quelques résultats intéressants amenés par ce modèle se situent au niveau de la statique comparative. Ainsi, une hausse exogène des prix (ou un déplacement vers le bas de la fonction de coûts) amène une hausse du rythme de l'exploitation, ce qui réduit d'autant la vie du gisement. Il en va de même s'il y a une hausse exogène du taux d'intérêt.

Passons maintenant à une vision plus réaliste du monde économique, et relâchons l'hypothèse que les coûts ne sont pas affectés par le niveau des réserves. Cette amélioration du modèle est celle proposée par Levhari et Liviatan (1977):

«Let us take account of the fact that the cost of extraction depends on the volume of ore remaining in the ground. The more ore extracted, the more it costs to extract another unit of ore».

Notons $C(q,x)$ une fonction de coût dépendant tant de l'extraction courante que de l'extraction cumulative. Prenons pour acquis que

$$C_x(q,x) \geq 0 \quad (24)$$

où x est l'extraction cumulative, que l'on peut définir mathématiquement

$$x_t = \int_0^t q_t dt = R_0 - R_t. \quad (25)$$

En d'autres termes, chaque unité est un peu plus coûteuse à extraire que la précédente. Le producteur doit alors maximiser, au lieu de (2), la fonction suivante:

$$\int_0^t e^{-rt} [R(q) - C(q,x)] dt \quad (26)$$

où $R(q)$ est le revenu des ventes, soit

$$R(q) = P \cdot q_t \quad (27)$$

Les contraintes sont: $q_t = 0$, $x_t \leq R_0$.

Notons RM_t le revenu marginal au temps t , et l'équation (14), le principe du maximum, devient

$$RM_t = CM_t + e^{-r(T-t)}(RM_T - CM_T) + \int_t^T e^{-r(s-t)} [C_x(q,x)] ds = CM_t^* \quad (28)$$

L'équation (28) indique que le revenu marginal au temps t égale le «coût marginal complet» CM_t^* , lequel est la somme de trois composantes de coûts associés à la dernière unité extraite. Ces trois composantes sont: premièrement le coût marginal direct; deuxièmement le coût alternatif de produire cette unité maintenant plutôt qu'à la fin de la période T , c'est la valeur présente du profit marginal qu'on en tirerait au temps T , en d'autres mots, λ_T de notre équation (14); et finalement la troisième composante est la valeur présente de tous les coûts de production futurs engendrés par la décision de produire la dernière unité extraite au temps t plutôt qu'au temps T . Cette dernière composante n'apparaissait pas dans notre modèle de base.

Bien entendu, si le marché est compétitif et les firmes nombreuses, alors le revenu marginal sera égal pour toutes les firmes et sera égal au prix de la ressource, ce qui était une hypothèse de notre modèle de base.

Il est temps maintenant de relâcher une hypothèse implicite de notre premier modèle. Puisque les coûts n'augmentaient pas avec la baisse des réserves, il était tout naturel de penser qu'on extrairait tout le minerai disponible et que la mine ne fermerait qu'à l'épuisement. Mais maintenant que les coûts augmentent avec l'appauvrissement de la mine, il est plus logique de supposer qu'à la fermeture la mine ne sera pas totalement épuisée: il y aura un certain niveau où le coût marginal direct (CM_t) excédera le revenu marginal. On peut décrire ceci à l'aide des conditions de transversalité:

au temps T , puisque $R_t \geq 0$, on a soit:

$$1) \quad R_T = 0 \quad \text{et} \quad \alpha_T > 0 \quad ; \quad \text{soit:} \quad (29)$$

$$2) \quad R_T > 0 \quad \text{et} \quad \alpha_T = 0 \quad (30)$$

En d'autres termes, si au temps T l'épuisement est complet, alors la rente est positive (eq(29)), alors que si le gisement n'est pas épuisé à sa fermeture, alors la rente est nulle (eq(30)).

L'équation (29) est celle qui s'appliquait pour notre premier modèle, mais l'équation (30) s'applique maintenant à notre modèle. Puisqu'on postule l'épuisement incomplet, le deuxième terme de l'équation (28) disparaît.

Rappelons que:

$$t = e^{-r(T-t)} \left[MR_T - MC_T \right] \quad (31)$$

Nous avons donc un cas de profit nul avec le revenu marginal égal au coût marginal.

$$RM_t = MC_t + \int_t^T e^{-r(s-t)} \left[C_x(q,x) \right] ds \quad (28')$$

Dans ce cas, la règle d'Hotelling, qui veut que la rente (le profit marginal) croisse au taux de l'intérêt ne tient plus:

«However, in the case of $C_x > 0$ an increase in current production involves an additional cost compared with increased production at the terminal period. For increasing q today leads to extra costs through the entire future production path, while this element is completely absent in the terminal period. It follows that the discounted value of $M\pi_T(1)$ must equal $M\pi_t$ minus the extra cost mentioned above. Consequently, $M\pi_t$ must rise more slowly than the rate of interest.»

Levhari Liviatan (1977).

A la lumière de ces nouveaux résultats, Levhari et Liviatan (1977, pp. 186-187) refont les calculs relatifs à la trajectoire de q . Les résultats obtenus sont que puisque la production à la phase initiale induit un coût de production supplémentaire pour toute la durée de la période d'extraction, alors qu'une production accrue à la fin de la période d'exploitation du gisement réduit la période où les coûts supplémentaires s'appliquent. Ce fait peut renverser les résultats obtenus précédemment: (que la production est décroissante avec le temps). En fait, la production peut augmenter continuellement jusqu'au temps terminal.

(1) dans la notation de Levhari Liviatan, $M\pi_t$ est α_t .

Réexaminons maintenant les résultats de statique comparative obtenus précédemment. Quels seront les effets d'un changement exogène du taux d'intérêt sur le niveau de production et sur la durée de l'exploitation? La production à la période terminale n'est pas affectée par le taux d'intérêt: x_T et q_T sont indépendants de ce taux. Mais avec une augmentation du taux d'intérêt, la production s'accélère. En d'autres termes, si le taux d'intérêt augmente, on extraira une plus grande quantité de minerai par période, mais puisqu'au total, la quantité extraite sera la même, la période d'exploitation de la mine sera tout simplement plus courte (ce résultat est le même que pour le modèle de base).

Par contre, si on suppose un déplacement de la demande vers le haut (une augmentation des prix) ou un déplacement de la fonction de coûts vers le bas, les résultats obtenus pour ce modèle sont alors différents: puisqu'il n'y a pas épuisement du gisement, on observera lors de la cessation des activités un plus fort taux d'épuisement (on peut extraire plus de minerai avant que le profit marginal n'atteigne zéro). Par contre, on extraira plus de minerai à chaque période, ce qui rend indéterminé l'effet total de ces changements pour la durée totale de l'extraction, puisque ces effets vont en sens contraire.

Passons maintenant à la revue des articles traitant de la mesure de la raréfaction des ressources. Les indices principaux sont au nombre de trois: les prix, les coûts et la rente.

2.2 Les prix

Le prix des ressources naturelles est l'indicateur le plus souvent étudié, à cause de ses qualités, bien sûr, mais aussi puisque c'est le seul des trois qui est directement disponible.

Au niveau théorique d'abord, Brown et Field (1976) relèvent les qualités et les défauts suivants aux prix en tant qu'indicateurs de la rareté:

- le prix réel du bien intensif en ressource est orienté vers le futur dans le sens qu'il reflète les anticipations des coûts futurs d'exploration, de découverte et d'exploitation;
- le progrès technique déforme le signal de rareté émis par les prix réels, puisqu'une diminution des coûts de production se reflètera aussi dans les prix;
- les prix réels ne laissent pas présager l'épuisement imminent de ressources qui possèdent de proches substituts;
- le prix réel d'une ressource peut augmenter, diminuer ou rester constant, dépendant du déflateur utilisé pour ajuster les prix nominaux.

Un des principaux problèmes amenés par l'étude des prix réside dans le fait que les secteurs étudiés doivent (idéalement) afficher le même degré de compétitivité, autant dans le marché des produits que dans

celui des facteurs de production . Des changements dans le degré de monopolisation (une cartellisation, par exemple), du niveau de syndicalisation ou dans les taxes et subventions entre les secteurs extractifs et non extractifs peut fausser la relation entre les prix, ce qui peut faussement indiquer une raréfaction croissante des ressources. Mais quel prix utiliser? Comme l'indiquent Brown et Field (1976, p. 226):

«there is agreement that relative prices are the appropriate measures of scarcity because changes in natural resource product prices by themselves mean nothing. There is less agreement on what natural resources product prices should be compared with. We think there is no one correct answer».

Finalement les auteurs concluent (ibid, p. 227) «the price of a natural resource product is clearly an ambiguous indicator of the scarcity of the underlying natural resources».

Au niveau empirique, plusieurs études ont été effectuées sur le comportement des prix dans le temps. Citons d'abord celle de Smith (1979).

A l'aide d'un modèle très simple, l'auteur cherche à trouver s'il existe des tendances stables dans l'évolution des prix des ressources. L'équation utilisée est la suivante:

$$RP_{tj} = B_{0j} + B_{1j}^t + u_{jt} \quad (32)$$

où RP_{tj} est le prix relatif de l'agrégat de ressources naturelles j à la période t (prix désindexés par un indice de prix de gros)

t = temps ($t = 1, 2, \dots, 74$)

u_{jt} : erreur stochastique pour le j ième agrégat à la période t .

Les données utilisées couvrent la période 1900-1974, pour les Etats-Unis.

Les conclusions tirées de l'étude économétrique de la stabilité de ce modèle sont les suivantes:

- on ne peut conclure à la présence d'une évolution stable des prix relatifs au cours de la période considérée, le modèle étant instable;
- on peut probablement expliquer cet état de chose par le fait que la composition des agrégats et la nature de l'économie américaine ont changé significativement pendant la période 1900-1973.

Une autre étude intéressante est celle de Slade (1982), où l'auteur examine le comportement des prix à l'aide de deux équations:

$$P_{it} = a_{0i} + a_{1i}t + u_{it} \quad (33)$$

$$P_{it} = b_{0i} + b_{1i}t + b_{2i}t^2 + v_{it} \quad (34)$$

où P_{it} est le prix en termes réels du bien i au temps t

t est le temps mesuré en années (1800=0)

u_{it} et v_{it} sont les erreurs stochastiques.

Les données sont américaines et couvrent la période 1870-1978. Le but de l'estimation de ces deux équations est de déterminer si les prix ont un comportement linéaire dans le temps, ou si une forme quadratique n'expliquerait pas mieux leur comportement.

Précisons que son modèle théorique intègre le progrès technique comme variable, et tient compte de l'épuisement des réserves de minerai par la baisse de teneur du minerai non extrait. On retrouve comme résultat que le prix est égal au coût marginal d'extraction plus la rente, mais en plus, l'auteur a obtenu le résultat théorique suivant: le taux de variation du prix égale le taux de variation du coût marginal dû au progrès technique plus la rente escomptée («discount rate time rent»). Sans le progrès technique, le prix augmente avec le temps car le taux d'augmentation de la rente est toujours positif. Seulement, si le taux de progrès technique est tel que le coût marginal décroît à un taux décroissant, tandis que la rente augmente, alors on peut voir apparaître une trajectoire de prix en U dans le temps.

Les résultats obtenus pour l'estimation linéaire sont semblables à ceux obtenus par Smith (1979): on ne peut en tirer une conclusion générale quant à l'évolution temporelle des prix. Par contre, la forme quadratique donne des résultats beaucoup plus significatifs, et décrit mieux l'évolution des prix des ressources naturelles: après une longue période de baisse des prix, la tendance s'infléchit et amorce une remontée, l'auteur conclut en ces termes (Slade, 1982, p. 136): «Therefore, if scarcity is measured by relative prices, the evidence indicates that non renewable natural-resources commodities are becoming scarce».

2.3 Les coûts d'extraction

Le coût marginal d'extraction est une donnée qu'on ne peut malheureusement utiliser, car elle n'est pas disponible. En général, dans les études sur ce sujet, les auteurs emploient plutôt le coût unitaire d'extraction.

L'étude la plus célèbre sur le sujet est sans contredit celle de Barnett et Morse (1963). Les résultats de ces travaux ont été remis à jour par Barnett (1979), et c'est cette remise à jour qui est décrite ici.

Ce travail consiste en une étude empirique fouillée sur les coûts. Deux hypothèses concurrentes sont analysées.

La première est celle-ci: les coûts réels d'extraction augmentent dans le temps à cause du manque croissant de disponibilité des ressources et de sa baisse de qualité dans le temps (on utilise le meilleur minerai en premier lieu). Les coûts sont mesurés en travail, ou en travail plus capital par unité d'output extrait.

Les résultats obtenus sont que les coûts réels n'augmentent pas pour les ressources naturelles non renouvelables, au contraire, ils diminuent. Ces résultats sont valables tant pour l'étude originale de 1963 que pour la remise à jour de 1979.

La deuxième hypothèse se lit ainsi: bien que la rareté croissante des ressources naturelles devrait en augmenter les coûts réels d'extraction, tels que définis plus haut, cette hausse des coûts est plus que contrebalancée par le progrès technologique ou par d'autres changements importants dans l'économie. La rareté croissante des ressources naturelles dans l'économie s'exprime plutôt par une diminution moins rapide des coûts réels dans le secteur extractif relativement aux autres secteurs de l'économie. Mentionnons au passage que seule l'hypothèse forte (la première) peut arrêter et renverser la croissance économique. L'hypothèse faible (la seconde), même si elle est vérifiée ne peut empêcher la croissance économique.

L'hypothèse faible est elle aussi rejetée pour les ressources naturelles non renouvelables, bien que la remise à jour de 1979 indique que les dernières observations font peut-être état d'un renversement de tendance.

Ceci dit, est-il valable d'utiliser les coûts réels unitaires comme mesure de la raréfaction des ressources? Brown et Field (1976) en font la critique suivante:

- dans un monde dynamique, la mesure des coûts unitaires mélange certains types de progrès technologique avec une rareté croissante des ressources naturelles;
- sous toutes les conditions le coût unitaire mélange l'ajustement (désiré) à une rareté croissante avec la rareté (indésirable) croissante des ressources;

- le coût unitaire est un indicateur retardé, et non avancé, de la rareté. Les coûts futurs anticipés d'extraction ne sont pas inclus dans cette mesure;
- le coût unitaire ne nous prévient pas d'un épuisement physique imminent;
- le coût unitaire est un indice difficile à mesurer précisément.

Pour toutes ces raisons, les auteurs considèrent que le coût unitaire est un mauvais indicateur, ambigu.

De plus, alors qu'on prétend souvent que le principal avantage des coûts d'extraction en tant qu'indicateurs de la rareté est qu'ils incluent l'effet des changements technologiques dans le secteur extractif (changements technologiques qui relâchent les contraintes des ressources naturelles), on laisse de côté le fait que le progrès technologique peut n'être qu'un, et pas le plus important, des facteurs qui relâchent les contraintes de ressources.

Toujours dans l'article de Brown et Field (1976), les auteurs notent un autre problème important au sujet du coût unitaire d'extraction défini comme une mesure de raréfaction des ressources. Supposons que le prix (et la rente) d'une ressource augmente et induit les producteurs de matières premières à substituer les ressources naturelles (nécessaires à la production) pour des facteurs de production moins coûteux. Cette substitution augmente clairement l'indice de coût unitaire tel que défini, par Barnett et Morse (1963), mais l'ampleur de l'augmentation dépend de la

facilité avec laquelle on substitue le travail et le capital aux ressources naturelles (rappelons que l'indice de Barnett et Morse ne tient compte que du travail et du capital, excluant les matières premières et l'énergie).

Si, par exemple, le secteur extractif est caractérisé par la fonction de production à élasticité de substitution constante suivante:

$$q = (aE^{-B} - bR^{-B}) \frac{1}{1+B} = \sigma, \quad B > -1 \quad (35)$$

où q, E et R ont les mêmes définitions que dans notre modèle de base et σ est l'élasticité de substitution.

Puisque les marchés des facteurs sont compétitifs, le ratio de leur productivité marginale est égal au ratio de leur prix:

$$\frac{aE^{-B-1}}{bR^{-B-1}} = \frac{w}{p} \quad (36)$$

que l'on peut réécrire:

$$\frac{R}{E} = \frac{(wb)^\sigma}{Pa} \quad (37)$$

où P est le prix de la ressource

et w le prix de l'input capital-travail.

Puisque (35) implique des rendements constants à l'échelle, on peut substituer (37) en (35), en exprimant l'équation (35) comme un ratio effort par unité d'output, ce qui nous amène à:

$$\frac{E}{q} = \left[a + b \left(\frac{Pa}{wb} \right)^{B\sigma} \right]^{1/B} \quad (38)$$

Cette relation, si on imagine qu'elle décrit plutôt la relation de production pour deux outputs différents, a une interprétation assez forte: tous les paramètres sont les mêmes à l'exception des élasticités de substitution pour nos deux cas hypothétiques. Si on suppose que le prix de l'input ressources naturelles (commun à nos deux outputs) augmente relativement au prix de l'indice capital-travail, la relation nous indique que le coût unitaire subit la plus forte hausse dans le cas où la substitution est la plus facile. Autrement dit:

$$\frac{\partial(E/q)}{\partial P} > 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial(E/q)}{\partial P \partial \sigma} > 0 \quad (39)$$

Dans ce cas, le coût unitaire d'extraction, tel que défini par Barnett et Morse (1963) donne des signes d'alarme alors qu'en fait la technologie a rendu facile la diminution de l'usage de ressources naturelles non renouvelables.

Finalement, une dernière critique de Brown et Field (1976) face à l'utilisation des coûts unitaires en tant qu'indice de raréfaction des ressources est celle-ci: l'utilisation des coûts unitaires d'extraction amène aussi des difficultés d'ordre pratique. Lorsqu'on utilise les données sur les coûts, on ne compare pas toujours des choses semblables (où en est-on exactement dans le processus de fabrication?), et une bonne partie des dépenses en capital des entreprises extractives sert en fait à l'exploration, et non à l'exploitation, alors que ces dépenses sont agrégées dans les données.

2.4 La rente

La rente est le dernier des trois indices développés à l'aide de notre modèle de base. De tous, ce fût le moins utilisé, même s'il indique parfois la raréfaction alors que les autres indices en sont incapables; même s'il anticipe la rareté dans un sens économique (le manque de substituts), car il n'existe à peu près pas de données disponibles sur la rente (Brown et Field (1976)).

Nous savons déjà que la rente croît au taux de l'intérêt lorsque les coûts sont indépendants du niveau des réserves (cas où l'épuisement est complet) et qu'au contraire, la rente croît moins vite, et diminue finalement jusqu'à zéro lorsque les coûts sont dépendants du niveau des réserves (cas où l'épuisement est incomplet).

De plus, plusieurs autres facteurs peuvent compliquer la situation. Imaginons qu'il existe une technologie de remplacement (a backstop technology). S'il n'y a pas d'effets du niveau des réserves sur les coûts, la rente (et le prix) croissent jusqu'à l'épuisement de la ressource, et à ce moment, le prix de la ressource est alors égal au prix de la technologie de remplacement qui prend la relève (voir à ce sujet Dasgupta et Heal (1979, chap. 6)). Par contre, si le niveau des réserves a un effet sur les coûts d'extraction, ce sont les coûts qui feront augmenter les prix jusqu'au niveau où la technologie de remplacement prend la relève. La rente est alors nulle à ce moment.

Une situation plus complexe est créée si il y a exploitation successive de plusieurs gisements de qualité variable (ibid.). On commence par exploiter celui au moindre coût d'extraction, pour ensuite passer au suivant lorsqu'il devient rentable de le faire, et ainsi de suite. La rente, d'un gisement à l'autre suit alors un comportement erratique dans le temps: elle subit des variations brusques lorsqu'on passe d'un gisement à l'autre.

Signalons aussi que s'il y a plusieurs gisements de qualité différente en exploitation simultanément, il y a alors présence d'une rente au sens ricardien du terme, rente qu'il ne faut pas confondre avec celle qui se veut un indice de rareté.

Ceci dit, il existe plusieurs faits qui font que la rente (ainsi que les prix d'ailleurs) n'indique que de manière imparfaite la raréfaction d'une ressource (voir à ce sujet Brown et Field (1976)).

Premièrement, on note l'absence de marchés futurs dans le secteur des ressources, chacun des agents présents dans le marché doit alors faire ses propres anticipations sur ce que seront l'équilibre et les conditions futures du marché.

De plus, même si de tels marchés existaient, ils pourraient mener à des conclusions erronées à cause de leur impuissance à refléter l'aspect bien public des ressources naturelles. Il faut ici préciser qu'on ne parle pas seulement d'une mine de cuivre, mais aussi, par exemple,

de la disponibilité dans la nature de multiples variétés d'une même espèce, comme pour le blé, et cette variété a une valeur économique, car elle met à la disposition de chercheurs une vaste banque de gènes, permettant de modifier l'espèce afin de l'améliorer.

Dans la même veine, on peut ajouter certaines ressources, telles les poissons, les oiseaux migrateurs, ou les ressources des fonds marins des eaux internationales sont à propriété commune. Personne ne peut en revendiquer la propriété, ce qui donne lieu à la présence d'externalités, et dans ce cas, prix et rentes d'une ressource sont de mauvais indicateurs de la rareté d'une ressource qui pourrait alors être exploitée trop rapidement.

Tous ces problèmes n'ont pas empêché la publication d'études théoriques et empiriques sur la rente en tant que mesure de raréfaction. Devarajan et Fisher (1982) ont développé un modèle et une méthode permettant de mesurer la rente sur une ressource naturelle.

Le modèle, en deux périodes, a les caractéristiques suivantes:

- il n'y a pas de limites à la disponibilité de la ressource qui se présente comme un continuum de teneurs,
- évidemment, pour chaque unité extraite, l'extraction de la suivante demande un peu plus d'efforts,
- il y a ici l'hypothèse implicite que les meilleurs gisements disponibles sont exploités en premier lieu,

- l'output extractif dépend autant du niveau de l'effort E que du niveau des réserves R.

La fonction de production s'énonce alors

$$q = f(E,R) \quad , \quad f_R > 0 \quad \text{et} \quad f_{ER} > 0 \quad (40)$$

Puisque l'extraction présente augmente les coûts futurs, il y a une incitation à découvrir de nouveaux gisements à haute teneur en minerai afin de remplacer ceux déjà utilisés.

Cependant, l'exploration est un processus pour le moins incertain. La fonction de production de l'exploration se définit ainsi:

$$G(e, \emptyset) = \emptyset G(e) \quad (41)$$

où \emptyset est un terme stochastique d'espérance égale à 1 et e est l'effort consacré à l'exploration.

Dans un modèle à deux périodes, le fait que l'extraction diminue les réserves et que l'exploration les augmente, est exprimé de la façon suivante:

$$R_2 = R_1 - f(E,R) + \emptyset G(e) \quad (42)$$

La firme choisit son niveau d'extraction au début de chaque période. Les résultats de l'effort exploratoire augmentent les réserves au début de la seconde période.

Le problème de la firme est donc de maximiser la valeur présente de ses profits:

$$\begin{aligned} \text{Max profits} = & \text{espérance} \left\{ P_1 f(E_1, R_1) - WE_1 - We \right. \\ & \left. + \max B \left[P_2 f(E_2, R_2) - WE_2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (43)$$

$$\text{sujet à } R_2 = R_1 - f(E_1, R) + \emptyset G(e) \quad (42)$$

où P_i est le prix de la ressource en période i ($i = 1, 2$)

W est le coût de l'effort

B est un facteur d'actualisation.

La condition de maximisation de premier ordre pour E_1 amène:

$$P_1 - \frac{W}{fE} = \text{espérance de } B P_2 f_R(E_2, R_2) \quad (44)$$

Le terme de droite est la rente de la ressource, la différence entre le prix et le coût marginal d'extraction; c'est aussi la valeur présente anticipée de détenir une unité supplémentaire de la ressource en période 2 (le terme de gauche).

La condition de premier ordre pour e , l'effort de découverte, nous donne la relation entre la rente et le coût marginal de découverte:

$$W = \text{espérance de } \emptyset G'(e) B P_2 f_R(E_2, R_2) \quad (45)$$

Si on suppose que $\emptyset = 1$ (cas de certitude), alors

$$\frac{W}{G'(e)} = B P_2 f_R (E_2, R_2) \quad (46)$$

et donc, en certitude, le coût marginal de découverte est exactement égal à la rente.

Dans le cas où \emptyset est un paramètre stochastique, on ne peut dériver une relation aussi claire. On peut cependant dire que le coût marginal d'exploration est la borne supérieure de la rente.

Puis Devarajan et Fisher ont appliqué cette théorie aux cas du gaz et du pétrole pour la période postérieure à la seconde guerre mondiale aux Etats-Unis. Alors que les autres indicateurs ne révèlent qu'une abondance croissante de ces ressources, les coûts d'exploration augmentent substantiellement au cours de cette période, indiquant ainsi une raréfaction de ces ressources.

Un article de Lasserre (1983) fait une critique de cette nouvelle méthode de mesure de la rente. En résumé, l'auteur apporte des modifications au modèle utilisé par Devarajan et Fisher. Ces modifications sont les suivantes:

- l'endogénéisation du taux d'extraction et de la période d'extraction,
- le fait que les ressources utilisées diminuent la disponibilité future de celles-ci.

Les conclusions sont que pour évaluer la rente, il faut tenir compte non seulement du coût marginal d'exploration, mais aussi de la rente sur les possibilités d'exploration: celles-ci est l'expression du fait qu'à chaque effort d'exploration entrepris, la valeur anticipée de ce qui reste à découvrir diminue. Chacun de ces deux indicateurs pris séparément n'est pas efficace, alors que la somme des deux, le coût implicite de produire des réserves, est une bonne mesure de la rente sur les ressources naturelles. Cette somme n'est pas ici considérée comme une borne, mais comme une approximation de la valeur exacte de la rente.

III - THÉORIE DU MODÈLE

3.1 La décision du producteur

La théorie économique néoclassique ne laisse aucun doute sur le but premier de tout producteur, y compris bien sûr le producteur minier (sur lequel porte cette analyse): il s'agit de la maximisation des profits. Mais immédiatement des différences importantes se font jour lorsqu'on compare la façon dont un producteur minier cherche à atteindre son objectif avec la façon dont un producteur de biens de consommation s'y prend.

Le producteur de ressources non renouvelables vend à un prix fixé par le marché, un output peu ou pas différencié: le minerai, généralement sous forme de concentré. Ses revenus sont donc définis, comme pour tout producteur, de la manière habituelle: le prix multiplié par les quantités. Du côté des coûts, la situation est différente: la fonction de coûts associée à l'exploitation d'un gisement contient des éléments qu'on ne retrouve pas chez le producteur d'un bien de consommation. On a déjà vu lors de la revue de la littérature qu'on observe en général que le coût d'extraire, disons d'une tonne de minerai, augmente lorsque les réserves diminuent (Levahri et Liviatan, 1977, p. 178), ce qui peut amener le producteur minier à choisir de produire à un rythme plus élevé lorsque le gisement s'épuise (ibid., p. 187). Le choix du rythme d'exploitation a donc des implications importantes sur la fonction de coûts, et par ricochet, sur celle des profits du producteur minier.

Nous en reparlerons un peu plus tard; pour l'instant nous allons examiner plus attentivement la fonction de coût et ses éléments associés à l'exploitation d'un gisement .

Chaque gisement peut être décrit de manière précise par ses caractéristiques physiques:

- la teneur du minerai: plus précisément quels sont les métaux présents, à quelle concentration (habituellement exprimée en pourcentage pour les métaux non précieux, et en grammes par tonne pour les métaux précieux),
- la taille du gisement: combien y a-t-il de tonnes de minerai dans le sol, dont l'exploitation est économiquement rentable,
- la profondeur à laquelle se trouve le minerai dans le sol,
- la distance qui sépare le gisement de l'endroit où le minerai sera traité, et de l'endroit où le minerai sera vendu.

Ces quatre caractéristiques sont les plus importantes tant au niveau de la différenciation des gisements qu'à leurs effets sur la fonction de coûts. Il devient donc évident que si on veut comparer la fonction de coûts de plusieurs gisements (par définition différents, à moins d'un improbable accident statistique), il faut inclure dans les coûts ces caractéristiques physiques.

On peut décrire la fonction de profits que le producteur minier cherche à maximiser de la manière suivante (semblable aux équations (2) et (3)).

$$\max \int_0^t e^{-rt} \left[P_t q_t - C_t(q_t, R_t^{(1)}, PK_t, PL_t, PE_t, TEN_t, PR_t, DIS) \right] dt \quad (47)$$

$$\text{sous contrainte } \int_0^t q_t dt \leq R_0 \quad (48)$$

où $P_t, q_t, C_t(\dots), R_t$ sont les mêmes variables que dans notre modèle de base; et

PK_t : le prix du capital au temps t ,

PL_t : le prix du travail au temps t ,

PE_t : le prix de l'énergie au temps t ,

TEN_t : la teneur du gisement,

PR_t : la profondeur du gisement,

DIS : la distance séparant le gisement de l'usine de raffinage.

Si on suppose que le producteur minier ne peut, par sa seule présence, avoir un effet sur les prix, tant du minerai que des facteurs de production, on peut se demander alors quelles sont les variables qu'il contrôle effectivement afin d'atteindre la maximisation des profits, puisque les caractéristiques physiques sont exogènes à sa prise de décision.

(1) R_t , les réserves au temps t , est ici considéré comme la taille du gisement.

Les variables que contrôle le producteur sont les suivantes: t_0 , le temps où l'exploitation débute; T , le temps où l'exploitation se termine, et q_t , le rythme de l'exploitation. En fait, n'importe quelle combinaison, de deux d'entre elles suffit à déterminer la troisième, pour peu que R_0 , la taille du gisement, soit connu avec certitude, et que le gisement soit exploité jusqu'à l'épuisement total. Supposons par exemple que R_0 est de 20 000 tonnes. Si l'exploitation, q , se fait au rythme de 2000 tonnes par année, alors le temps terminal T est égal à $t_0 + \frac{R_0}{q}$, soit $t_0 + 10$.

Avant d'examiner de manière plus approfondie de quelle façon nous allons tenter d'observer cette prise de décision, il est opportun de présenter certains résultats théoriques concernant les variables physiques et économiques de ce modèle.

3.2 La relation teneur quantité

Premièrement, d'où viennent les métaux? Rappelons que tout atome, à l'exception de l'hydrogène, est créé lors de fantastiques réactions thermonucléaires, réactions qui ne se produisent qu'en des conditions extrêmes de chaleur et de pression, et qu'on ne rencontre qu'au coeur des étoiles (voir à ce sujet: Cosmos, chap. 9 de Sagan (1981)). A la mort des étoiles, les éléments restants sont dispersés dans l'espace, et ces «cendres» d'étoiles sont des atomes, de l'hélium à l'uranium, en passant par le carbone, l'oxygène, le fer ou le cuivre.

La terre est née d'un nuage de cendres stellaires, tout comme l'ensemble de notre système solaire. Voilà donc l'origine de la présence sur la terre des métaux.

On peut maintenant se demander comment se sont distribués dans l'écorce terrestre ces métaux qu'aujourd'hui on extrait. Les nombreux bouleversements qu'a connus notre planète lors et depuis son refroidissement (ibid.) ont réparti les métaux au hasard. Mais qui dit hasard dit probabilité... et lois statistiques.

Un des premiers à avoir étudié sérieusement la relation qui existe entre la teneur et la quantité de minerai de cette teneur est Laski (1950). Il exprime cette relation de manière simple:

«In many (mineral) deposits in which there is a gradation from relatively rich to relatively lean material, there appears to be a consistent mathematical relation between tonnage and grade, according to the equation

$$\text{Grade} = K_1 - K_2 \log \text{tonnage} \quad (49)$$

(où K_1 et K_2 sont des constantes)

Cette relation a été ensuite reprise par d'autres, dont Cairns (1981) qui l'a transformée ainsi:

$$R(G) = Ae^{-G/K} \quad (50)$$

où $R(G)$ est la quantité totale du minerai de teneur égale ou supérieur à G , G étant la teneur minimum sous laquelle un gisement ne sera pas exploité,

A est la quantité totale de minerai,
 K est la teneur moyenne du minerai,
 donc AK est la quantité totale de métal.

Il y a donc consensus sur le fait que plus la teneur est grande, moins les quantités disponibles de cette teneur sont importantes, bien que la forme de cette relation puisse varier d'un auteur à l'autre.

Cette relation est importante si, comme c'est le cas pour cette étude, on cherche à examiner les effets de la «qualité» d'un gisement sur la décision de l'exploiter.

3.3 L'évolution temporelle de la qualité des gisements exploités

Rappelons un autre résultat théorique important: lorsqu'un producteur a le choix d'exploiter deux gisements, alors il exploitera le meilleur en premier, et l'autre ensuite. Reprenons notre modèle de base encore une fois, et examinons ce qui se produit lorsqu'il y a deux gisements d'une même ressource, la différence se situant au niveau des coûts d'extraction, qui deviennent C_{1t} pour le premier gisement, C_{2t} pour le second, $C_{1t} < C_{2t}$. La relation (14) (la règle d'Hotelling) est toujours vérifiée et devient (voir Dasgupta et Heal (1979, p. 172)).

$$\frac{\dot{\alpha}_1}{\alpha_1} = \frac{\dot{\alpha}_2}{\alpha_2} = r \quad (51)$$

Mais puisque les deux gisements contiennent un produit identique ($P_1 = P_2$), ceci implique que:

$$P_1 + \alpha_{1t} = P_2 + \alpha_{2t} \quad (52)$$

Les équations (51) et (52) sont incompatibles. Donc, les deux gisements ne sont pas exploités simultanément mais plutôt de manière séquentielle. Le gisement de meilleure qualité sera exploité jusqu'à l'épuisement, et ensuite on commencera l'exploitation du second.

Schulze (1974) obtient des résultats similaires avec un modèle plus complet. Celui-ci utilise un modèle où le nombre des gisements est n , et la teneur d'un gisement g . La fonction de profits à maximiser (pour l'industrie dans son ensemble) devient:

$$\max \int_0^t e^{-rt} \left[B(nq) - nC(q,g) \right] dt \quad (53)$$

où $B(nq)$ est le revenu total de l'industrie.

Puisque chaque teneur g représente un bien différent, il est important de supposer qu'il existe un continuum de marchés futurs sur tout l'intervalle temporel $\left[g(0), g(t) \right]$ pour le minerai. Pour obtenir ce résultat, Schulze redéfinit le prix courant des droits miniers (la rente) comme étant une fonction de la teneur autant que du temps: $\hat{\alpha}(t,g)$. Une firme en compétition maximise alors ses profits de la manière suivante:

$$\int_0^t e^{-rt} \left[P_t q - C(g, q) - \hat{\alpha}(t, g) \cdot q \right] dt \quad (54)$$

En ayant de plus contraint l'extraction de telle manière que seulement une teneur de la ressource puisse être exploitée à chaque instant, donc que la teneur actuellement exploitée varie continuellement, il obtient le résultat suivant:

«thus, extraction begins at the highest grade available and the value of mineral rights (la rente) drops to zero when production ceases at time T, consistent with the notions of competitive future markets for minerals»

(ibid., p. 63).

Donc, en cas de certitude, les meilleurs gisements sont exploités en premier lieu, et les gisements exploités à un moment précis sont d'égale qualité. A ce tableau, il manque deux choses nécessaires à la description du monde réel: l'incertitude et une définition acceptable de la qualité du gisement.

3.4 Incertain

L'incertitude se glisse dans la théorie des ressources naturelles non renouvelables au niveau de l'exploration (ainsi qu'au niveau des marchés futurs). Même si l'écorce terrestre contient X tonnes de cuivre répartis en Z gisements de qualité variable, on ne peut savoir si il reste encore des gisements non découverts d'une qualité supérieure à, disons, celle des gisements exploités au siècle dernier. De plus, lors de la découverte d'un gisement, des études par forage sont entreprises

afin d'estimer la taille et la qualité du gisement. Mais ces paramètres ne sont connus précisément qu'une fois le gisement épuisé. Il est donc irréaliste de prétendre qu'une seule teneur est exploitée à la fois, et exploitée entièrement (bien que la théorie en certitude soit un préalable nécessaire à la même théorie en incertitude).

Sans pouvoir le prouver formellement, on peut cependant avancer l'hypothèse suivante: ce qui évolue dans le temps n'est pas la qualité (uniforme) des gisements exploités, mais plutôt la qualité minimale des gisements exploités, et tous les gisements d'une qualité supérieure sont alors soit: épuisés, en exploitation, ou inconnus (non découverts).

Pour aider la compréhension de cette hypothèse, définissons ainsi la qualité d'un gisement:

$$QA_{it} = (g_{it}, R_{it}, DIS_i) \quad (55)$$

où QA_{it} est la qualité du gisement i au temps t

g_{it} est la teneur du gisement i au temps t

R_{it} sont les réserves du gisement i au temps t

DIS_i est la distance qui sépare le gisement de l'endroit où le minerai sera raffiné

QA_{it} se comportent alors de la manière suivante:

$$\frac{\partial QA_{it}}{\partial g_{it}} > 0, \quad \frac{\partial QA_{it}}{\partial R_{it}} > 0, \quad \frac{\partial QA_{it}}{\partial DIS_i} > 0 \quad (56)$$

L'hypothèse présentée plus haut s'exprime alors ainsi :

- il existe à chaque moment une qualité minimale QA_t^* au-dessous de laquelle aucun gisement n'est exploité. Ce seuil varie toutefois selon les conditions du marché (prix, progrès technologique, apparition de substituts, etc...);
- de plus, la tendance à long terme est :

$$\frac{\partial QA_t^*}{\partial t} < 0$$

- finalement, il n'existe aucun gisement connu de qualité $QA_{it} > QA_t^*$ dont l'exploitation ne soit débutée.

On peut étendre à volonté cette définition de la qualité d'un gisement, pour y incorporer d'autres paramètres. Citons la profondeur du gisement, la composition physico-chimique du minerai dans son ensemble (le coût de séparer le métal avec la pierre dans lequel il se trouve peut varier avec le type de cette pierre), etc.

Cette hypothèse sera étudiée par le modèle empirique.

3.5 Le rôle du taux d'intérêt

Passons maintenant à l'étude des variables économiques de notre modèle théorique.

Comme nous l'avons vu lors de notre revue de la littérature, une hausse du taux d'intérêt entraîne une exploitation plus rapide du gisement, et ce, tant pour le modèle de base que pour la version plus réaliste par Levhari et Liviatan (1977).

Par contre, le taux d'intérêt a aussi un effet sur le coût du capital. Reprenons la définition du coût du capital qu'utilisent Gaudet et Lasserre (1983, p. 3).

$$C = \left(r + g + \frac{\dot{P}_k}{P_k} \right) \frac{P_k}{P} \quad (1) \quad (58)$$

où C est le coût du capital

r est le taux d'intérêt

g est le taux de dépréciation exponentiel du capital

P_k est le prix du capital

et P le prix de l'output.

Un rapide coup d'oeil suffit à constater que le coût du capital augmente avec le taux d'intérêt (ce qui est un résultat on ne peut plus classique). Il en découle qu'une augmentation du taux d'intérêt déplace la fonction de coûts vers le haut, ce qui rend l'effet total sur le rythme d'exploitation d'une hausse du taux d'intérêt indéterminé: nous avons ici deux effets pouvant aller en sens contraire. (Rappelons que pour notre modèle de base, un déplacement vers le haut de la fonction de coûts induit une baisse du rythme de l'exploitation, et que pour le modèle de Levhari Liviatan, l'effet d'un déplacement de la fonction de coût est indéterminé).

(1) L'équation de Gaudet et Lasserre comportait de plus des variables fiscales. Comme elles sont non pertinentes à notre analyse, nous les avons supprimées.

Dans une étude, Pierre Lasserre (1982, p. 1) conclut que :

«... le résultat qu'une hausse du taux d'escompte accélère l'extraction ne reste valide que si le capital est relativement moins rare, d'une manière qui peut être définie formellement, que la ressource épuisable».

grâce à un modèle d'extraction tenant compte du capital et de l'investissement.

On ne peut donc conclure théoriquement à l'aide des modèles utilisés, quel sera l'effet total d'une hausse d'extraction sur le rythme d'exploitation.

3.6 La substitution entre facteurs de production et le progrès technique

Les notions de substitution entre facteurs de production et de progrès technique sont primordiales lorsqu'on parle de l'importance des ressources naturelles et des effets que l'épuisement de celles-ci peuvent avoir sur la croissance économique. Comme l'expliquent Berndt et Field (1981, p. 1):

«if substitutions possibilities are meager, and technological progress is sluggish, the economic pressures from resource scarcity are likely to be substantial; however, if possibilities for natural resources substitution are considerable, and technological progress is brisk, then that ultimate day of resource reckoning can continue to be postponed indefinitely».

Mais dans le cadre de notre analyse théorique, nous allons nous contenter de regarder les effets du progrès technique et de la substitution de facteurs au niveau de l'exploitation des ressources naturelles.

Examinons pour ce faire l'article de Smithson (1979) sur l'usage relatif des facteurs de production dans l'industrie minière canadienne. Il rappelle tout d'abord les résultats classiques (ibid., p. 374):

«While not unanimous a substantial body of the empirical evidence tends to support the notion of Hicks-Allen complementarity between energy and capital and substitutability between energy and labor and capital and labor».

Il utilise ensuite la fonction de coûts translog suivante:

$$\begin{aligned} \ln C = & \theta_0 + B_0 \ln q + 1/2 B_{qq} \ln (q)^2 + \theta_T \ln T + 1/2 \theta_{tt} (\ln t)^2 \\ & + r_{qT} \ln q \ln T + \sum_i \alpha_i \ln P_i + 1/2 \sum_i \sum_j r^{ij} \ln P_i \ln P_j \\ & + \sum_i B_i \ln q \ln P_i + \sum_i \theta_i \ln T \ln P_i; \end{aligned} \quad (59)$$

et où $i, j = K, L, E, N$

où P_i est le prix de l'input i (exogène à la firme),

q est l'output,

T est l'état de la technologie,

K, L, E, N sont respectivement les inputs capital, travail, énergie, matières premières,

et C a les propriétés suivantes:

- 1) positive et continuellement doublement différentiable par q et P_i ($i = K, L, E, N$),
- 2) concave et linéairement homogène en P_i ,
- 3) strictement décroissante par rapport à T .

Avec cette spécification, l'inclusion de q et de T indique que ni l'homothétie, ni le changement technologique neutre ne sont imposés.

De cette fonction de coûts, en utilisant la théorie de la dualité, il décrit ainsi la part de chaque facteur dans la fonction de coûts :

$$M_i = \alpha_i + \sum_j r_{ij} \ln P_j + B_i \ln q + \theta_i \ln t \quad j = K, L, E, N \quad (60)$$

En estimant l'équation (60), il obtient les résultats suivants :

- on peut rejeter l'hypothèse d'un progrès technologique neutre;
- on ne peut rejeter l'hypothèse d'homothétie;
- les changements technologiques font qu'on augmente l'utilisation du facteur capital et du facteur matière première, et qu'on diminue celle du facteur travail;
- la substitution principale se fait entre le capital et l'énergie; le capital et le travail sont moins substituables, et il y a complémentarité entre les autres paires de facteurs;
- si ces résultats diffèrent des résultats habituels, c'est probablement parce que l'hypothèse que le progrès technique est neutre a été relâchée.

Ainsi se termine le tour d'horizon du problème qui est, rappelons-le, comment le producteur maximise-t-il sa fonction de profits. On a vu précédemment qu'il y parvient en fixant deux des trois paramètres endogènes suivants: le temps où l'exploitation du gisement débute, le rythme de l'exploitation et le temps de fermeture de la mine. En fait, seuls les deux premières sont utilisables, car en tenant compte de l'incertitude sur la taille d'un gisement, ce sont les seuls disponibles ex-ante.

IV - ANALYSE EMPIRIQUE

Après avoir vu la théorie sur le sujet de l'exploitation des ressources naturelles et examiné quelques unes des principales études empiriques pertinentes, nous pouvons maintenant décrire la manière dont nous nous proposons de mener l'étude empirique sur les décisions relatives à la maximisation des profits du producteur minier. Puisque l'analyse théorique nous indique que le producteur prend deux décisions (le moment du début de l'exploitation, et le rythme de celle-ci), nous utiliserons un modèle différent pour chacun des choix du producteur.

4.1 La décision de commencer l'exploitation d'un gisement

Le producteur qui possède un gisement d'une ressource naturelle non renouvelable doit déterminer la date de mise en exploitation de son gisement. Les informations dont il dispose sont peu nombreuses: elles concernent les caractéristiques physiques d'un gisement (sa qualité) et les conditions observées sur les différents marchés avec lesquels échange le producteur: les marchés des facteurs de production, et le marché des minerais. C'est en utilisant ces mêmes informations que nous allons tenter de modéliser comment un producteur décide d'entreprendre l'exploitation d'un gisement.

Tout d'abord, définissons notre variable dépendante, que nous appellons PRO. Notre modèle est ainsi fait qu'il y a une observation par

année par gisement. Ceci nous permet d'observer les variations, d'une année à l'autre, des variables économiques. La variable dépendante est dichotomique, et n'indique que si le gisement est exploité ou non. Ainsi, elle vaut zéro pour chaque gisement pour lequel l'exploitation n'est pas encore commencée, et elle vaut un lorsque le gisement est en cours d'exploitation. Ainsi, nous cherchons à mesurer les effets de chacune des variables indépendantes sur la probabilité qu'un gisement soit exploité.

Les caractéristiques du problème que nous voulons étudier imposent l'usage de techniques d'estimation particulières. Une variable dépendante dichotomique rend inadéquate (et inapplicable) la méthode des moindres carrés ordinaires, car celle-ci suppose la normalité des erreurs résiduelles; or, ici l'erreur résiduelle u s'exprime ainsi:

$$u = Y - XB \quad (61)$$

où Y est la variable dépendante
 X est un vecteur de variables explicatives
 B est un vecteur de coefficients estimés

Puisque Y ne prend que les valeurs zéro ou un, l'erreur résiduelle ne peut prendre que les valeurs suivantes:

$$\begin{aligned} u &= 0 - XB \\ \text{ou} \quad u &= 1 - XB \end{aligned} \quad (62)$$

Il est donc impossible de prétendre à la normalité de la distribution des erreurs, puisque l'équation (62) indique clairement la présence d'hétéroscédasticité.

La méthode probit se révèle la technique la plus fiable compte tenu des particularités mentionnées. Elle se résume en deux étapes:

1. Transformation du modèle initial en une fonction de distribution cumulative normale.
2. Estimation de cette fonction non linéaire par le maximum de vraisemblance.

Trois hypothèses sont à la base de l'utilisation d'une variable dichotomique (et d'un modèle probit):

- 1) il existe pour chaque observation une quantité $X_j B$;
- 2) il existe aussi une variable z , normalement distribuée, de moyenne zéro et de variance un;
- 3) si $X_j B \geq z$, alors $y_j = 1$
et si $X_j B < z$, alors $y_j = 0$
(où y_j est la variable dépendante dichotomique).

Soit $f(z)$ la fonction de densité normale avec $\mu = 0$

$$\text{et } F(z) = (2\pi)^{1/2} \int_{-\infty}^z e^{-x^2/2} dx \quad (63)$$

la fonction de distribution cumulative correspondante.

On a alors:

$$\Pr \{y_t = 1 \mid X_j B\} = \Pr \{z \leq X_j B\} = \int_{-\infty}^{X_j B} f(z) dz = F(X_j B) \quad (64)$$

$$\text{et } \Pr \{y_t = 0 \mid X_j B\} = 1 - F(X_j B) \quad (65)$$

La fonction de vraisemblance découle de (64) et (65) et s'énonce:

$$L = \prod_{y_j=1} \int_{-\infty}^{Y_j B} f(z) dz \prod_{y_j=0} \left(1 - \int_{-\infty}^{X_j B} f(z) dz \right) \quad (66)$$

$$\text{ou encore } L = \prod_{Y_j=1} F(X_j B) \prod_{y_j=0} \left[1 - F(X_j B) \right] \quad (67)$$

Les estimateurs obtenus en maximisant la fonction (67) nous assurent que la probabilité sera comprise entre 0 et 1. Ces coefficients mesurent l'impact de l'événement X_j sur la variable dépendante; en d'autres termes, ils indiquent de combien varie la probabilité que la variable dépendante se réalise lorsque l'événement K_j se produit.

4.2 Le choix du rythme de l'exploitation d'un gisement

Le choix du rythme de l'exploitation est probablement la plus importante et la plus intéressante à étudier des décisions que doit prendre le producteur minier. Les informations dont il dispose sont essentiellement les mêmes que pour la prise de décision du temps optimal du début de l'exploitation (modèle probit), et nous utilisons donc pour ce modèle les mêmes variables. La variable dépendante est la capacité du concentrateur associé à chaque gisement (soit la capacité de production).

A l'origine, nous devions utiliser un modèle tobit. La variable dépendante aurait été la capacité du concentrateur lors de l'exploitation du gisement, et zéro avant le début de l'exploitation. Ainsi, tout comme pour le modèle probit, nous aurions eu une observation par année par gisement. Malheureusement, le modèle tobit s'est avéré inapplicable dans notre cas, puisque la variable dépendante, une fois fixée, ne varie que très rarement après le début de l'exploitation. Nous nous retrouvions donc devant une variable dépendante X_i ayant pour valeur soit zéro, soit une constante positive, pour une mine i . Cette situation impliquait une autocorrélation extrêmement sévère des erreurs résiduelles (un examen des erreurs résiduelles a montré un taux d'autocorrélation variant de .90 à .98), et de plus, ces résidus étaient, pour une même mine, soit toujours positifs, toujours négatifs. L'expert en économétrie consulté à ce sujet, M. Marcel Dagenais, professeur au département de sciences économiques de l'Université de Montréal a indiqué que ce genre de données ne respectaient pas les conditions exigées pour une

application acceptable du modèle tobit, et qu'il faudrait plutôt écrire une version améliorée du modèle probit, où la variable dépendante serait 0 ou une constante (différente pour chaque gisement). Monsieur Dagenais a alors indiqué qu'il ne connaissait pas un tel modèle, et qu'il ne savait pas si ce type de modèle existait, quoique ce serait un excellent sujet de thèse de doctorat en économétrie.

Devant une telle situation, nous avons dû abandonner l'idée même de l'utilisation du modèle tobit, et nous rabattre sur les moindres carrés ordinaires.

Comme nous l'avons dit plus haut, la variable dépendante, que nous appellerons CAP, est la capacité du concentrateur associé à chaque gisement lorsque l'exploitation débute. Contrairement au modèle probit, il n'y a qu'une observation par gisement: celle de l'année de mise en service.

Une petite précision technique s'impose ici: le minerai extrait d'un gisement quelconque n'atteint que rarement une concentration totale (tous les métaux présents) de 10%. Plutôt que de transporter vers les usines de raffinage un minerai contenant plus de 90% de déchets, une première concentration du minerai est effectuée sur place: on obtient alors un produit semi-transformé, contenant environ 50 à 60% de métaux divers. Un rapide calcul à partir d'un exemple hypothétique nous permettra de bien comprendre le processus. Imaginons que le gisement A produit un minerai contenant 4% de zinc et 2% de plomb. Pour chaque tonne extraite, il y a donc 40 kg de zinc et 20 kg de plomb; le reste, soit 940 kg, n'est que du déchet.

Imaginons que le concentrateur permet d'obtenir un concentré dont la teneur en métaux serait de 60%: chaque tonne concentrée contiendrait alors environ 400 kg de zinc et 200 kg de plomb. Cette transformation permet de n'avoir à transporter vers l'usine de raffinage qu'une tonne de concentré pour chaque 10 tonnes de minerai extraites, d'où une économie appréciable de frais de transport, au moins égale sinon supérieure au coût de l'établissement d'un concentrateur adjacent au gisement.

4.3 Présentation des variables explicatives

Il est temps maintenant de présenter les variables explicatives de nos deux modèles. A moins d'une indication contraire, chacune de ces variables est utilisée tant pour le modèle probit que pour le modèle des moindres carrés ordinaires (MCO).

La source, ainsi que les calculs effectués pour chacune de ces variables sont indiqués à l'annexe A.

Précisons que cette étude empirique a pour sujet les gisements de cuivre et de zinc canadiens dont l'exploitation a débuté entre 1948 et 1971.

TABLEAU 1

Liste des variables

PRO	Variable dépendante dichotomique du modèle probit = 0 lorsque la mine n'est pas en exploitation = 1 lorsque la mine est en exploitation
CAP	Variable dépendante du modèle MCO: capacité du concentrateur associé à un gisement
C	Constante
PRII	Valeur d'une tonne de minerai dans le sol
QT	Taille du gisement
KM	Distance séparant le gisement du lieu où le minerai est raffiné
OP	Variable dichotomique indiquant le type d'exploitation du gisement = 0 exploitation par galeries = 1 exploitation à ciel ouvert
MP	Variable dichotomique indiquant la présence de métaux précieux = 0 absence de métaux précieux = 1 présence de métaux précieux
T1	Taux d'intérêt réel
CEI	Indice de coût de l'énergie
PWI	Indice de coût du travail
PCI	Indice de coût du capital
TE	Variable dichotomique (modèle MCO) indiquant le délai entre la découverte d'un gisement et son exploitation = 0 si le délai est de plus de 6 ans = 1 si le délai est de 6 ans ou moins

PRII, la valeur d'une tonne de minerai dans le sol: cette variable se veut une approximation de la teneur car la valeur d'une tonne de minerai est, s'il n'y a qu'un seul métal présent, directement proportionnelle à la teneur de ce minerai. Malheureusement, la situation se complique grandement lorsqu'un minerai contient plusieurs métaux: ainsi, considérons un minerai A dont la teneur en cuivre est de 4% et la teneur en or est de 5 grammes par tonne, et un minerai B dont la teneur en cuivre atteint 5%, mais pour lequel il n'y a que 3 grammes d'or par tonne: peut-on alors affirmer que la teneur de l'un est supérieure à celle de l'autre? Si on pondère la teneur par les prix, on retrouve au bout de la ligne une seule valeur (en dollars) par minerai, ce qui est une simplification non négligeable sachant que certains minerais contiennent jusqu'à cinq métaux.

Le signe anticipé est positif tant pour le modèle probit que pour les MCO car, toutes choses étant égales par ailleurs, un gisement dont la valeur par tonne de minerai est supérieure à celle d'un autre gisement devrait être exploité en premier lieu. Mais cette constatation n'est valable qu'à court terme, car à long terme, deux phénomènes contribuent à renverser ce signe. Premièrement, le progrès technologique permet l'exploitation de gisements dont la teneur est de plus en plus faible, et deuxièmement, le résultat théorique qui veut que les meilleurs gisements soient exploités en premier (voir la section 3.3) implique qu'avec le temps, la qualité des gisements restants diminue. Ainsi, un signe positif indiquerait que l'effet de court terme prédomine, alors qu'au contraire un signe négatif indiquerait que la période considérée (24 ans) est suffisamment longue pour qu'on puisse parler de long terme puisque soit le progrès technique, soit la baisse du nombre de gisement à haute teneur a eu le temps de laisser sa marque.

Q_t , la taille du gisement. Cette variable, tout comme PR_{II} , est une indication de la qualité du gisement. Q_t nous est déjà familier, puisqu'il s'agit des réserves totales lors du début de l'exploitation. Il est à noter que cette variable reste stable pour toutes les observations se rapportant à un gisement (dans le cas du modèle probit), puisque c'est la prise de décision d'exploiter ou non qui est étudiée, et non de continuer l'exploitation d'année en année. Si nous utilisons la taille du gisement à chaque année, nous nous trouverions à surestimer l'effet de cette variable, puisque bien entendu, lorsqu'un gisement s'épuise, Q_t tend vers zéro, alors que notre variable dépendante (PRO) serait toujours fixée à 1 (gisement exploité). Il en est de même pour chacune des variables décrivant une caractéristique physique: on suppose de manière implicite que ces caractéristiques physiques sont connues avec certitude au moment de la prise de décision d'amorcer l'exploitation. Par contre, les variables économiques sont celles observées chaque année.

Toujours pour le modèle probit, toutes choses étant égales par ailleurs, on s'attend à ce qu'un gisement dont la taille est supérieure à un autre sera exploité en premier, d'autant plus que des économies d'échelle sont très probablement présentes au niveau des infrastructures notamment (construction de voies d'accès, etc). Un signe positif est donc attendu ici. Pour le modèle utilisant les MCO, le signe attendu est sans conteste positif: le niveau de l'exploitation est sûrement proportionnel à la taille du gisement.

KM, la distance séparant le gisement du lieu où le minerai est raffiné. Cette variable cherche à capter le coût du transport du minerai. Elle nous semble d'autant plus importante que même si en général les usines de raffinage sont situées dans des régions industrielles (donc possédant un bon réseau de transport) les gisements sont quant à eux souvent situés en région éloignée, et dans ce cas, il y a en général un bout de route ou de chemin de fer à construire, ce qui augmente les coûts associés au transport.

On s'attend à ce que la variable distance ait un signe négatif, puisque toutes choses étant égales par ailleurs, il semble normal de minimiser les coûts de transport. Il sera toutefois intéressant de regarder les coefficients de corrélation entre cette variable et les autres indices de qualité, afin de déceler un possible arbitrage entre les variables physiques: en d'autres mots, un producteur est-il prêt à franchir une plus grande distance afin d'exploiter un gisement plus imposant?

Pour le modèle MCO, le signe attendu est inconnu. Un gisement éloigné doit offrir d'autres qualités afin de rendre son exploitation attrayante: par exemple, un gisement éloigné pourra être exploité profitablement à cause de sa taille imposante, et dans ce cas, le signe de la variable sera positif. Si c'est plutôt sa teneur qui est exceptionnelle, le signe pourrait être négatif, surtout s'il est de petite taille.

OP, la variable dummy indiquant si le gisement est exploité à ciel ouvert ou par galeries. Il aurait été préférable, pour cette variable,

de disposer de séries complètes de profondeur réelle des gisements. Les données recueillies étant malheureusement incomplètes, nous avons tout de même cru important de chercher à savoir si la décision d'entrer en production pouvait différer selon qu'il s'agit d'un gisement exploité à ciel ouvert ou par galeries; la technologie employée, ne serait-ce que le ratio capital travail, n'étant pas la même dans les deux cas, ce fait normalement se refléter sur la fonction de coûts.

Le signe attendu pour le modèle probit est positif, si on suppose qu'il est moins coûteux d'exploiter à ciel ouvert que par galeries, supposition qu'il est permis de faire puisque si l'inverse était vrai, il n'y aurait pas de mines à ciel ouvert. Rappelons que la technique d'exploitation à ciel ouvert n'est possible que pour les gisements de faible profondeur.

Pour le signe MCO, le signe attendu est aussi positif puisque les gisements exploités à ciel ouvert sont en général plus gros que ceux exploités par galeries.

MP, la variable dummy indiquant la présence de métaux précieux. Cette variable cherche à mesurer si la seule présence de métaux précieux fait augmenter la probabilité qu'un gisement soit exploité, ou, le cas échéant, son rythme d'exploitation.

Le signe attendu est donc positif et ce pour les deux modèles. Signalons que relativement à PRII, le progrès technique y joue un rôle beaucoup moins important, le progrès technique se manifestant surtout à la marge.

TI, le taux d'intérêt réel. Comme nous l'avons vu lors de la revue de la littérature et ensuite dans l'analyse théorique du modèle, le taux d'intérêt a une grande influence sur le rythme d'exploitation. La présence de cette variable dans le modèle sur la décision d'exploiter peut se justifier si on voit l'ensemble de la terre comme un immense gisement, qu'on exploite petit à petit; en d'autres termes: un continuum de teneurs. Si tel est le cas, une augmentation du taux d'intérêt aura pour effet d'augmenter la probabilité qu'un gisement soit exploité, puisque l'exploitation du continuum de gisements se fera de façon accélérée (revoir la revue de littérature, p. 9 et 13). Par contre, nous avons vu à la section 3,5 qu'une augmentation du taux d'intérêt a aussi pour effet d'augmenter le coût du capital, ce qui a l'effet inverse sur le rythme d'exploitation. L'effet total étant inconnu, il en va de même pour le signe attendu, tant pour le modèle probit que pour les MCO.

Les indices de coûts: ces indices sont au nombre de trois, soit l'indice du coût de l'énergie, CEI; l'indice du coût du travail, PWI et l'indice du coût du capital, PCI.

Ces variables cherchent à mesurer la sensibilité du producteur face à son environnement économique. Les signes attendus sont négatifs tant pour le modèle probit que pour les MCO, puisqu'une hausse du prix des inputs entraîne une hausse des coûts de production, ce qui diminue (ou retarde) la mise en exploitation des gisements.

Afin de capter les effets de substitution pour le modèle MCO (décision du rythme de l'exploitation), il a été décidé d'employer parallèlement aux prix réels des prix relatifs. Nous avons donc des équations où tous les prix ont été divisés soit par l'indice de prix du travail ou par l'indice de prix du capital. La comparaison des divers coefficients ainsi obtenus pourrait nous permettre de dégager des faits qui autrement seraient passés inaperçus. Par exemple, on peut supposer que le concentrateur associé à un gisement est un bien intensif en capital et par conséquent, que la capacité de ce concentrateur est alors une approximation de la demande de capital de la firme. Les coefficients associés aux variables des prix relatifs à celui du capital nous indiqueraient alors si ces facteurs sont substitués ou compléments du capital (un signe négatif indiquerait alors la complémentarité face au capital). Les résultats obtenus nous permettront aussi de vérifier si le capital et l'énergie sont des facteurs de production complémentaires, tel qu'indiqué par la théorie néoclassique, ou plutôt substitués, ce qui est le résultat obtenu par Smithson (1979). La théorie néoclassique indique aussi que le travail et capital sont substitués, donc le signe attendu pour le coefficient du travail relativement à celui du capital est positif.

TE, variable dichotomique indiquant le délai entre la découverte d'un gisement et son exploitation. Cette variable particulière à notre modèle sur le rythme de l'exploitation (MCO) cherche à vérifier si les «surprises géologiques» ont un effet sur le rythme d'exploitation. Nous avons vu à la section 3.4 qu'un gisement dont la qualité est supérieure à la qualité minimale nécessaire à l'exploitation est soit en exploitation (ou

épuisé), soit non découvert. Il en découle que lorsqu'un de ces gisements est découvert, il devrait être exploité dans les plus brefs délais. Un signe positif indiquerait qu'un gisement dont la découverte est récente est exploité plus rapidement qu'un autre. Notons que le délai nécessaire pour que la variable TE prenne la valeur un est de 6 ans (ou moins) entre la date de découverte et la mise en exploitation (ce délai a été choisi de manière arbitraire); autrement cette variable prend la valeur zéro.

V - RÉSULTATS EMPIRIQUES

5.1 Présentation des équations

Trois équations ont été utilisées lors de l'analyse statistique des données recueillies sur les gisements de cuivre et de zinc.

Tout d'abord, notre modèle probit (la décision du producteur de commencer l'exploitation d'un gisement) a comme variable dépendante une dichotomique valant un lorsque le gisement est exploité et zéro autrement, et s'énonce ainsi:

$$\begin{aligned} \text{PRO} = & B_0 C + B_1 \text{PRII} + B_2 \text{QT} + B_3 \text{KM} + B_4 \text{OP} + B_5 \text{MP} + B_6 \text{T1} + B_7 \text{CEI} \\ & + B_8 \text{PWI} + B_9 \text{PCI} + u \end{aligned} \quad (68)$$

où B_i est un coefficient estimé;

et u l'erreur résiduelle.

Avant de passer aux équations de l'autre modèle, un mot d'explication s'impose sur l'interprétation des coefficients estimés par le modèle probit.

Les coefficients pour le modèle probit présentés au tableau 3 sont directement interprétables en tant que probabilité que la variable dépendante se réalise (i.e. que la mine soit en exploitation). Il faut distinguer ici entre les deux types de variables explicatives présentes.

Premièrement, les variables explicatives dichotomiques (soit MP, la présence de métaux précieux, et OP, l'exploitation par gisements à ciel ouvert) ont un coefficient qui s'interprète ainsi: supposons que la variable MP a un coefficient calculé de 20.0: ceci signifie que la présence de la caractéristique MP (métaux précieux) augmente de 20,0% la probabilité que la variable dépendante se réalise (i.e. que le gisement soit exploité).

Deuxièmement, les variables continues (Qt, KM, PRII, PWI, etc.) ont un coefficient qui indique quel est l'effet d'une variation d'une variable explicative sur la variable dépendante: en d'autres mots, si on augmente par exemple de 2% les taux d'intérêt, de combien variera la probabilité qu'un gisement soit exploité? Le tableau 2 (page suivante) rappelle quelles sont les variables utilisées, et indique s'il s'agit d'une variable dichotomique (DIC) ou continue (CON). Dans le cas d'une variable continue, ce tableau indique aussi l'intervalle sur lequel s'applique le coefficient: par exemple, pour la variable KM, le coefficient indique de combien varie la probabilité qu'un gisement soit exploité lorsque la distance augmente de 100 km. Tous les coefficients des indices de prix expriment l'effet d'une hausse de 20% de ces indices.

En ce qui concerne les équations du modèle décrivant le choix du rythme de l'exploitation d'un gisement (à l'aide des moindres carrés ordinaires), deux types de régressions ont été utilisées. La première est tout simplement linéaire, tandis que pour la seconde, nous utilisons une équation log-log (seules les variables dichotomiques MP, OP et TE n'ont pas été transformées en logarithmes, puisque le log de zéro n'existe pas).

TABLEAU 2

Interprétation des coefficients du modèle probit

VARIABLE	DESCRIPTION	INTERVALLE CONSIDÉRÉ (interprétation des variables continues)
C	Constante	
PRII	Valeur du minerai (CON)	Augmentation de 20%
Qt	Taille du gisement (CON)	Augmentation de 10 millions de tonnes
KM	Distance entre le gisement et la raffinerie (CON)	Augmentation de 100 Km
OP	Profondeur du gisement (DIC)	-
MP	Présence de métaux précieux (DIC)	-
T1	Taux d'intérêt réel (CON)	Augmentation des taux de 2%
CEI	Indice de coût de l'énergie (CON)	Augmentation de 20%
PWI	Indice de coût du travail (CON)	Augmentation de 20%
PCI	Indice de coût du capital (CON)	Augmentation de 20%

Une équation log-log nous permet ainsi d'interpréter le coefficient de chacune des variables non dichotomiques comme étant l'élasticité de la variable dépendante face à la variable explicative en question:

L'équation linéaire s'énonce ainsi:

$$\begin{aligned} \text{CAP} = & B_0 C + B_1 \text{PRII} + B_2 \text{QT} + B_3 \text{KM} + B_4 \text{OP} + B_5 \text{MP} + B_6 \text{TE} \\ & + B_7 \text{TI} + B_8 \text{CEI} + B_9 \text{PWI} + B_{10} \text{PCI} + u \end{aligned} \quad (69)$$

Les résultats sont présentés au tableau 5.

Les variantes de l'équation (69), qui utilisent plutôt les prix relatifs, sont celles-ci:

$$\begin{aligned} \text{CAP} = & B_0 C + B_1 \text{PRIC} + B_2 \text{QT} + B_3 \text{KM} + B_4 \text{OP} + B_5 \text{MP} + B_6 \text{TE} + B_7 \text{TI} \\ & + B_8 \text{CEC} + B_9 \text{PWC} + u \end{aligned} \quad (70)$$

où PRIC : prix relatif de la ressource face au capital;

CEC : prix relatif de l'énergie face au capital;

PWC : prix relatif du travail.

et

$$\begin{aligned} \text{CAP} = & B_0 C + B_1 \text{PRIW} + B_2 \text{QT} + B_3 \text{KM} + B_4 \text{OP} + B_5 \text{MP} + B_6 \text{TE} + B_7 \text{TI} \\ & + B_8 \text{CEW} + B_{10} \text{PCW} + u \end{aligned} \quad (71)$$

où PRIW : prix relatif de la ressource face au travail;

CEW : prix relatif de l'énergie face au travail;

PCW : prix relatif du capital face au travail.

Les résultats de ces deux équations sont présentés respectivement aux tableaux 6 et 7.

Notre troisième équation, sous forme log-log, se lit

$$\begin{aligned} \log \text{CAP} = & B_0 C + B_1 \log \text{PRII} + B_2 \log \text{QT} + B_3 \log \text{KM} + B_4 \text{OP} + B_5 \text{MP} \\ & + B_6 \text{TE} + B_7 \log \text{TI} + B_8 \log \text{CEI} + B_9 \log \text{PWI} + B_{10} \log \text{PCI} + u \end{aligned} \quad (72)$$

Les résultats sont présentés au tableau 8.

Finalement, signalons que ces équations ont été appliquées à trois fichiers. Le premier concerne les gisements de cuivre et de zinc canadiens dont l'exploitation a débuté entre 1948 et 1970. Ce fichier est constitué d'informations sur 52 gisements (soit 1 078 observations pour le modèle probit). Ce fichier a été subdivisé en deux, soit un sous-fichier de 27 gisements dont le métal principal est le cuivre et un sous-fichier de 25 gisements dont le minerai est principalement composé de zinc. Rappelons que pour le modèle MCO, il n'y a qu'une observation par gisement; correspondant à l'année où débute l'exploitation.

Finalement, il semble important de préciser que la forme fonctionnelle n'a que peu de liens avec la littérature présentée en première partie, et ceci puisque ce modèle s'appuie sur nombre de variables «physiques» plutôt qu'économiques, ce qui n'est pas le cas dans la littérature.

5.2 Interprétation des résultats pour le modèle probit

Les résultats obtenus avec ce modèle, présentés au tableau 3, sont dans l'ensemble satisfaisants: les R^2 varient de .40 à .52, ce qui est plutôt bon pour un modèle probit. Examinons maintenant les résultats obtenus par chacune des variables.

TABLEAU 3

Résultats du modèle probit

<u>Variable</u>	<u>Interprétation</u>	<u>Gisement Cuivre et zinc</u>	<u>Gisement cuivre</u>	<u>Gisement zinc</u>
C	Constante	36.35	- 53.33	42.89
PRII	+ 20%	- 0.24	1.77 [*]	- 8.47 ^{**}
QT	+ 10 millions t.	- 1.65	5.64 ^{**}	- 17.54 ^{**}
KM	+ 100 Km	- 0.09	- 3.44 ^{**}	3.63 ^{**}
OP	DIC	-13.37 ^{**}	- 35.95 ^{**}	- 15.50 ^{**}
MP	DIC	13.87 ^{**}	- 17.76 ^{**}	55.35 ^{**}
TI	+ 2%	1.71	4.50	- 1.49
CEI	+ 20%	- 21.11 ^{**}	- 6.02	- 44.96 ^{**}
PWI	+ 20%	25.06 ^{**}	56.19 ^{**}	14.43
PCI	+ 20%	1.17	- 34.37	20.17
R ²		.3999	.5040	.5239

^{**} Significatif à 95%

^{*} Significatif à 90%

. PRII (valeur de la ressource dans le sol)

Le résultat obtenu varie sensiblement selon le fichier que l'on considère. Ainsi, le coefficient est non significatif pour le fichier complet, ce qui peut s'expliquer si l'on note qu'il est positif (et significatif à 90%) pour le fichier cuivre et négatif (et significatif) pour le fichier zinc. Conformément à nos anticipations, une augmentation de 20% de la valeur du minerai augmente de 1,77% la probabilité qu'un gisement de cuivre soit exploité. Il est toutefois plus délicat d'expliquer pourquoi la même augmentation diminue de 8,47% la probabilité qu'un gisement de zinc soit exploité. Je crois toutefois que l'explication de ce phénomène réside dans le comportement des coefficients de la variable de distance, KM.

Cette variable a un coefficient non significatif pour le fichier complet, négatif et significatif pour le fichier cuivre, et positif et significatif pour le fichier zinc. Encore une fois, le signe est conforme à nos attentes dans le cas du cuivre: si la distance augmente de 100 km, la probabilité qu'un gisement soit exploité diminue de 3,44%; et contraire à nos attentes dans le cas du zinc: la même variation de la distance augmente de 3,63% la probabilité qu'un gisement soit exploité. Regardons maintenant les coefficients de corrélation entre les différentes variables de «qualité» d'un gisement (voir tableau 4). Il appert que le coefficient de corrélation est nul entre la variable PRII et la variable KM pour les gisements de cuivre, tandis qu'il est de .60 entre les mêmes variables pour les gisements de zinc. Il semble donc que les producteurs de zinc soient prêts à substituer des kilomètres pour un gisement plus riche, ce qui vient brouiller les signes obtenus par ces variables. Ce phénomène est par contre

totalément absent dans le cas des gisements de cuivre, ce qui explique pourquoi dans ce cas les résultats sont conformes à nos attentes.

. QT (taille du gisement)

Tout comme les variables PRII et KM, le coefficient associé à la variable QT n'est pas significatif pour le fichier complet, et il est significatif et de signe opposé pour chacun des deux sous-fichiers. Conformément à la théorie (et à nos attentes), une augmentation de la taille du gisement (de 10 millions de tonnes de minerai) accroît de 5,64% la probabilité qu'un gisement de cuivre soit exploité. Par contre, le signe obtenu pour ces gisements de zinc est encore une fois étonnant: une augmentation de la taille du gisement diminue de 17,54% la probabilité qu'un gisement soit exploité. Les coefficients de corrélation ne nous expliquent pas vraiment ce phénomène cette fois-ci: la variable QT a un coefficient de corrélation (avec la variable PRII) de $-.25$ pour les gisements de cuivre et de $-.23$ pour les gisements de zinc, et le coefficient de corrélation QT-KM est de $-.16$ dans le cas du cuivre et de $.05$ dans le cas du zinc. La différence entre ces coefficients de corrélation est trop faible pour que cette explication soit convaincante. Par contre, on peut dégager une observation des résultats présentés jusqu'à maintenant. Ceux-ci sont conformes aux attentes pour le fichier cuivre, et systématiquement opposés à nos attentes pour le fichier zinc. Un tel phénomène peut laisser supposer que l'explication réside à un autre niveau: par exemple, le progrès technique a pu être plus rapide pour le processus de la production du zinc que pour celui du cuivre, tout au moins au long de la période considérée¹. Cette hypothèse demanderait toutefois à être vérifiée à l'aide d'un indice approprié de progrès technique.

(1) Voir la section 4.3 à l'explication de la variable PRII

TABLEAU 4

Corrélation entre les variables de
qualité d'un gisement

9.1 FICHER CUIVRE ET ZINC

	PRII	Qt	KM	OP	TE	MP	AN ¹
PRII	1.00	- .14	.45	- .17	- .14	.24	- .15
Qt	- .14	1.00	- .03	.33	- .02	- .01	.15
KM	.45	- .03	1.00	- .18	- .17	- .07	- .03
OP	- .17	.33	- .18	1.00	.05	- .14	.23
TE	- .14	- .02	- .17	.05	1.00	.37	- .09
MP	.24	- .01	- .07	- .14	.37	1.00	- .19

9.2 FICHER CUIVRE

PRII	1.0	- .25	0	- .12	- .31	- .06	- .19
Qt	- .25	1.0	- .16	.40	- .03	- .17	- .09
KM	0	- .16	1.0	- .42	.07	.14	- .02
OP	- .12	.40	- .42	1.0	- .07	- .42	.39
TE	- .31	- .03	.07	- .07	1.0	.29	.18
MP	- .06	- .17	.14	- .42	.29	1.0	- .04

9.3 FICHER ZINC

PRII	1.0	- .23	.60	- .29	- .32	0	- .11
Qt	- .23	1.0	.05	.26	- .06	.05	.37
KM	.60	.05	1.0	- .04	- .30	- .28	0
OP	- .29	.26	- .04	1.0	.14	.13	.11
TE	- .32	- .06	- .30	.14	1.0	.32	- .28
MP	0	.05	- .28	.13	.32	1.0	- .34

(1) AN: année de mise en service

. KM (variable de distance)

Les coefficients associés à cette variable ont été examinés en même temps que ceux de la variable PRII (voir page 67, 68).

. OP (variable indiquant les gisements à ciel ouvert)

Cette variable a un coefficient négatif et significatif pour chacun des fichiers considérés. Ainsi, pour l'ensemble des observations, le fait qu'un gisement soit exploitable à ciel ouvert diminue de 13,37% la probabilité qu'il soit exploité. Dans le cas du fichier cuivre, un gisement à ciel ouvert verra ses chances d'être exploité diminuer de 35,95%, comparativement à une diminution de 15,50% pour les gisements de zinc. Ce résultat est contraire à nos attentes, puisqu'on supposait que les gisements exploités à ciel ouvert sont en général plus gros (donc de meilleure qualité) et exploités plus rapidement. Ce fait est d'ailleurs confirmé par les coefficients de corrélation entre les variables OP et QT: .33 pour l'ensemble des observations, .40 pour les gisements de cuivre et .26 pour les gisements de zinc. Par contre, les coefficients de corrélation de cette variable avec PRII sont négatifs, ce qui indique que les gisements exploités à ciel ouvert sont en général d'une teneur plus faible que les autres (ces coefficients sont de - .17 pour le fichier complet, - .12 pour le fichier cuivre, - .29 pour le fichier zinc). Ce fait constitue une explication possible du signe inattendu obtenu.

. MP (variable indiquant la présence de métaux précieux)

Cette dernière variable décrivant les caractéristiques physiques des gisements est significative pour chacun des fichiers considérés. Si tout d'abord on examine le coefficient du fichier complet, on peut noter que la présence de métaux précieux dans le minerai augmente de 13,87% la probabilité qu'il soit exploité, ce qui semble indiquer une nette préférence des producteurs pour les gisements dont le minerai contient de l'or ou de l'argent.

Mais voilà que le tableau de la situation est beaucoup moins clair lorsqu'on regarde les coefficients obtenus pour chacun des sous-fichiers: par exemple, la présence de métaux précieux diminue de 17,76% la probabilité qu'un gisement de cuivre soit exploité, alors qu'elle l'augmente de 55,35% dans le cas d'un gisement de zinc (ces deux résultats sont significatifs). Le signe obtenu pour les gisements de cuivre n'est pas celui anticipé, mais ces résultats s'expliquent à l'aide, encore une fois, des coefficients de corrélation. Ainsi, pour le fichier cuivre, MP est corrélé négativement à PRII et à Qt, et positivement à KM: ceci signifie qu'un gisement de cuivre contenant des métaux précieux est en général plus petit, d'une teneur plus faible, plus distant et donc de moins bonne qualité qu'un gisement ne contenant que du cuivre, ce qui rend plausible un signe négatif.

En ce qui concerne le zinc, la variable MP est corrélée positivement avec QT, négativement avec KM, et n'est plus corrélée avec PRII: de ce fait, un gisement qui contient des métaux précieux est d'autant plus

intéressant à exploiter qu'il est aussi, en général, plus gros et moins distant qu'un autre ne contenant que des métaux de base, d'où l'obtention d'un coefficient positif.

. TI (le taux d'intérêt réel)

Cette variable n'est pas significative, ni pour le fichier complet, ni pour les sous-fichiers cuivre et zinc. Tout de même, les coefficients obtenus nous apportent quelques indications de tendances (ils sont tout de même significatifs à ... 75%). Une hausse du taux d'intérêt augmente de 1,71% la probabilité qu'un gisement soit exploité: le coefficient est de 4,50% pour le fichier cuivre et de - 1.49% pour le fichier zinc. Donc, même si aucune tendance significative ne se dégage de ces résultats, il semble que ces deux effets antagonistes du taux de l'intérêt (voir section 3.5), l'augmentation de la valeur escomptée de la production prime dans le cas du cuivre, alors que l'augmentation du loyer du capital semble dominer le coefficient de cette variable pour le fichier zinc. On peut ajouter en terminant que les taux d'intérêt ont connu une grande stabilité sur la plus grande part de la période, ce qui aide probablement à expliquer leur manque d'impact sur la variable dépendante.

. CEI (indice du coût de l'énergie)

Cette variable est significative et négative tant pour le fichier complet que pour le fichier zinc, alors qu'elle n'est pas significative pour le fichier cuivre. Une augmentation de 20% du coût de l'énergie diminue de 21.11% la probabilité qu'un gisement soit exploité. Cette diminution est

44,95% dans le cas du zinc, et de 6.02% pour le fichier cuivre. Ce signe est conforme à nos attentes. Ces coefficients peuvent sembler imposants mais il faut savoir qu'en terme réel, l'indice de prix a diminué légèrement, bien que régulièrement, tout au long de la période considérée. Il serait intéressant de disposer de données indiquant les fortes variations de coût de l'énergie suite aux chocs pétroliers des années 1970.

. PWI (Indice du coût du travail)

La variable du coût du travail est positive et significative tant pour le fichier complet que pour le fichier cuivre (une augmentation de 20% de l'indice amène respectivement une augmentation de 25.06% et 56.19% la probabilité qu'un gisement soit exploité). Le coefficient de 14.43% obtenu pour le fichier zinc n'est pas significatif. Les résultats sont étonnants, puisqu'une augmentation des coûts ne devrait pas augmenter la probabilité qu'un gisement soit exploité.

On peut alors se demander, puisque la période où un gisement n'est pas exploité (notre variable dépendante est zéro) précède toujours celle où le gisement est exploité (notre variable dépendante est un) comment varient dans le temps les indices de prix. On sait déjà que CEI diminue (indice de corrélation avec l'année de mise en service de $- .74$), alors que PWI est corrélé à $.99$ avec l'an de mise en service ($.94$ pour PCI). Donc, au fil du temps, on observe une augmentation plutôt régulière du coût du travail. Peut-être notre variable PWI capte-t-elle le fait que la probabilité qu'un gisement soit exploité augmente avec le temps? (rappelons que l'indice de corrélation est de $.99$)

. PCI (indice de coût du capital)

Cette variable n'est pas significative pour aucun des fichiers considérés. L'exploitation d'un gisement demandant de grandes quantités de capital, il est possible que le progrès technique, surtout s'il rend plus intensif en capital les procédés de production, vienne contrebalancer l'effet d'une hausse du prix du capital sur la rentabilité d'un gisement quelconque. La forte corrélation de cet indice avec le temps (.94) est un autre élément qui peut venir annuler l'effet attendu d'une hausse du coût du capital sur la probabilité qu'un gisement soit exploité.

5.3 Interprétation des résultats pour le modèle MCO

Voici maintenant la présentation des résultats de notre second modèle, qui, rappelons-le, cherche à expliquer le choix de la capacité de production d'un gisement, ou si on préfère, son rythme d'exploitation.

Les tableaux des pages suivantes présentent les résultats obtenus en utilisant successivement les prix réels des facteurs de production, puis les prix relatifs au capital et finalement les prix relatifs au travail. A l'exception de la première équation présentée, les variables dont la non-signifiante ne faisait aucun doute ont été retirées des régressions. Finalement, on retrouve sur chacun des tableaux les résultats pour le fichier complet, le fichier cuivre et le fichier zinc.

Un petit mot au sujet des R^2 obtenus avant de commenter les résultats proprement dits. Ceux-ci peuvent sembler élevés (ils varient entre .8 et .9) et le nombre de variables explicatives significatives plutôt faible, ce qui pourrait indiquer un problème de multicollinéarité. Mais les R^2 élevés proviennent de l'importante corrélation existant entre CAP, la capacité du concentrateur associé à un gisement d'une part et QT, la taille du gisement d'autre part. Ainsi, une régression qui n'a que QT (et une constante) comme variable dépendante a un R^2 de .7870. En ce qui concerne l'autocorrélation des erreurs, les statistiques de Durbin Waston obtenues permettent de rejeter cette hypothèse, sauf en ce qui concerne le fichier cuivre, lorsqu'on utilise des prix relatifs: pour ces deux régressions, on ne peut rejeter l'hypothèse d'autocorrélation des erreurs.

TABLEAU 5

Résultats du modèle MCO avec prix réels

<u>Variable</u>	<u>Fichier complet</u>	<u>Fichier complet</u>	<u>Fichier cuivre</u>	<u>Fichier zinc</u>
C	4577.0	3185.4 ^{**}	3866.7	4166.8 ^{**}
QT	.1136 ^{**}	.1124 ^{**}	.0912 ^{**}	.1293 ^{**}
KM	.6582 ^{**}	.6540 ^{**}	.251	1.011 ^{**}
OP	525.2 ^{**}	527.51 ^{**}		
MP	489.8 ^{**}	526.96 ^{**}	- 140.6	811.4 ^{**}
TE	149.8			
TI	- 2.77		- 123.1 [*]	
PRII	- 128.1 ^{**}	- 133.0 ^{**}	- 130.9 ^{**}	- 272.0 ^{**}
PWI	242.6			
PCI	- 1045.8			
CEI	- 776.6 [*]	- 806.0 ^{**}	- 767.3 ^{**}	- 951.9 ^{**}
R ²	.8278	.8401	.8131	.8887
DW	1.7982	1.8571	2.1661	1.9200

** Variable significative à 95%

* Variable significative à 90%

TABLEAU 6

Résultats du modèle MCO
avec prix relatifs au capital

<u>Variable</u>	<u>Fichier complet</u>	<u>Fichier cuivre</u>	<u>Fichier zinc</u>
C	2993.8 ^{**}	4068.8 ^{**}	1295.5 [*]
QT	.1244 ^{**}	.0926 ^{**}	.1345 ^{**}
KM	.6486 ^{**}		.681 ^{**}
OP	518.1 ^{**}		571.5 ^{**}
MP	494.7 ^{**}	- 167.8	
TI	- 72.57 ^{**}	- 178.7 ^{**}	
PRIC	- 293.0 ^{**}	- 258.4 ^{**}	- 354.2 ^{**}
CEC	- 1349.8 ^{**}	- 1536.2 ^{**}	
R ²	.8359	.8346	.8920
DW	1.8453	2.4316	1.9827

** Variable significative à 95%

* Variable significative à 90%

TABLEAU 7

Résultats du modèle MCO
avec prix relatifs au travail

<u>Variable</u>	<u>Fichier complet</u>	<u>Fichier cuivre</u>	<u>Fichier zinc</u>
C	2444.2 ^{**}	3594.1 ^{**}	1106.8 ^{**}
QT	.1132 ^{**}	.0958 ^{**}	.1343 ^{**}
KM	.6619 ^{**}	.314	.620 ^{**}
OP	531.2 ^{**}		603.2 ^{**}
MP	467.2 ^{**}	- 229.3	
TI	- 121.2 ^{**}	- 248.1 ^{**}	
PRIW	- 351.3 ^{**}	- 284.2 ^{**}	- 312.9 ^{**}
CEW	- 1065.5 ^{**}	- 1402.3 ^{**}	-
R ²	.8384	.8424	.8873
DW	1.8209	2.4580	1.9657

** Variable significative à 95%

* Variable significative à 90%

. QT (la taille du gisement)

Cette variable est positive et significative pour chacune des régressions effectuées, ce qui n'a rien d'étonnant, puisque comme nous l'avons déjà dit, la capacité de production d'un concentrateur est sûrement fonction de la taille du gisement en question. Signalons que cette variable est d'ailleurs significative à plus de 99.95%.

. KM (la variable de distance)

La distance a un effet significatif sur la taille du concentrateur dans le cas du fichier zinc et du fichier complet. Plus un gisement est éloigné, plus la capacité de production associée est importante. En moyenne, un gisement situé 100 km plus loin qu'un autre aura une capacité supplémentaire de production de 65 tonnes/jour. Le signe obtenu est contraire à nos attentes, mais l'explication réside dans les coefficients de corrélation entre les variables KM et PRII. Ces variables sont en effet très fortement corrélées, du moins en ce qui concerne les fichiers complet et zinc (respectivement .45 et .60). On peut en conclure que le producteur de zinc n'hésite pas à parcourir une plus grande distance afin d'exploiter un gisement de plus haute teneur. Ce coefficient de corrélation étant de zéro dans le cas des gisements de cuivre, et la variable étant ici non significative, il semble que le producteur soit neutre face à la distance lorsqu'il n'y a pas d'avantages (gisement plus gros, meilleure teneur, etc.) à exploiter un gisement plus éloigné. Signalons que contrairement à ce qu'on pourrait croire, la variable KM n'est pas coréllée avec QT: la taille d'un gisement exploité n'a donc rien à voir avec son éloignement. Enfin,

pour terminer, ces résultats sont cohérents, pour le fichier zinc, avec ceux obtenus par le modèle probit. Pour le fichier cuivre, puisque le coefficient de cette variable pour le modèle probit était négatif et significatif, on peut en conclure qu'une plus grande distance peut retarder la mise en exploitation d'un gisement, mais n'aura pas d'effet sur le rythme de l'exploitation.

. OP (variable indiquant les gisements à ciel ouvert)

La variable OP a un coefficient significatif et positif pour le fichier complet, ainsi que pour le fichier zinc. Ainsi, un coefficient de 525.2 associé à cette variable signifie que le concentrateur associé à un gisement exploité à ciel ouvert a en moyenne une capacité supplémentaire de 525 tonnes/jour comparativement à un gisement exploité par galeries. Ce résultat n'est pas très étonnant si on remarque que la variable OP est corrélée à .33 avec la variable QT: les gisements à ciel ouvert sont en général plus gros que les autres. Cette corrélation explique aussi pourquoi les résultats obtenus ici ne concordent pas exactement avec ceux obtenus par le modèle probit, ou les coefficients pour tous les fichiers étaient négatifs et significatifs; en résumé, il faudra plus de temps pour que débute l'exploitation d'un gisement à ciel ouvert, mais celle-ci se fera à un rythme plus rapide.

. MP (variable indiquant la présence de métaux précieux)

Tout comme pour le modèle probit, la présence de métaux précieux dans le minerai a un effet positif et significatif sur la variable dépendante pour les fichiers complet et zinc, ce qui était le résultat anticipé. La présence de métaux précieux fait augmenter la capacité associée à un

gisement de plus de 525 tonnes/jour dans le cas de l'ensemble des gisements, et de plus de 800 tonnes/jour dans le cas d'un gisement de zinc. Par contre, dans le cas du cuivre, cette variable n'est pas significative. Un arbitrage entre les différentes variables de qualité physique en est probablement la cause, bien que l'effet en soit beaucoup moins prononcé que pour le modèle probit, où le coefficient de cette variable était négatif et significatif.

. TE (variable indiquant la rapidité de l'exploitation après la découverte)

Cette variable n'a pas donné les résultats escomptés. Bien que positive (ce qui est le signe attendu, puisqu'on s'attendait à ce qu'un gisement dont le délai entre la découverte et la mise en exploitation est court soit exploité plus rapidement qu'un autre), les résultats pour l'ensemble des fichiers ne sont pas significatifs. On peut alors se poser des questions sur l'exactitude de la mesure de la date de découverte, qui ici est la date où ont été réalisés les forages d'exploration: il se peut que le producteur ait à sa disposition d'autres sources d'information, telles d'autres méthodes de prospection.

. TI (taux d'intérêt réel)

Le taux d'intérêt réel est négatif et significatif dans le cas du cuivre et du fichier complet (lorsqu'on considère les prix relatifs). Par exemple, une hausse de 1% du taux d'intérêt diminuera de plus de 100 tonnes par jour la capacité du concentrateur associé à un gisement. Ces résultats semblent établir hors de tout doute que l'effet d'une hausse des taux d'intérêt est plus important au niveau du loyer du capital (ce qui

diminue le niveau de capital demandé) qu'au niveau de la rentabilité accrue d'une exploitation accélérée (voir section 2.5).

Au niveau des gisements de zinc, on ne peut tirer une conclusion aussi claire, puisque les coefficients ne sont pas significatifs. On peut toutefois supposer que ces deux effets antagonistes s'annulent mutuellement. Ce résultat vient aussi renforcer l'hypothèse d'un progrès technique plus important dans le cas du zinc que du cuivre, puisqu'on peut dire à la limite que ces producteurs sont moins sensibles à une hausse du loyer du capital, c'est peut être parce que ce même capital est plus «performant».

Finalement, ces résultats sont différents de ceux obtenus par le modèle probit (les coefficients y étaient non significatifs, positifs pour le cuivre et négatifs pour le zinc), ce qui vient renforcer l'interprétation que pour le cuivre, le loyer du capital à l'effet dominant sur le rythme de l'exploitation, puisque la variable dépendante des modèle MCO, la capacité du concentrateur (intensif en capital), est plus sensible au taux d'intérêt que la probabilité qu'un gisement soit exploité.

. PRII (valeur du minerai)

Avant de décrire les résultats obtenus, rappelons simplement que PRII est l'indice de valeur réelle du minerai, PRIW est l'indice de valeur du minerai relativement à l'indice de prix du travail, et PRIC est l'indice relatif au prix du capital.

Le coefficient associé à cet indice est dans tous les cas négatif et significatif. On obtient donc le résultat paradoxal que lorsque la valeur du minerai d'un gisement est élevée, la capacité du concentrateur associé est faible ce qui est un résultat inattendu. Deux facteurs se rejoignent pour provoquer un tel phénomène. Le progrès technologique est l'un d'entre eux. A mesure que s'améliorent les méthodes d'extraction des métaux du minerai, des gisements qui autrefois n'étaient pas rentables le deviennent. Cette explication est d'autant plus plausible qu'au fil du temps, la valeur des gisements exploités tend à diminuer (taux de corrélation avec l'année de mise en service de $- .19$ pour les gisements de cuivre et de $- .11$ pour les gisements de zinc). Mais le fait que ce facteur devrait avoir eu en théorie les mêmes effets sur le modèle probit (alors qu'on avait obtenu un coefficient positif et significatif pour le fichier cuivre, et négatif et significatif pour le fichier zinc) nous incite à penser que l'explication de ces résultats se situe ailleurs.

En effet, le coefficient de corrélation entre la variable PRII et la variable QT est négatif: il est de $- .14$ pour l'ensemble des fichiers, de $- .25$ pour le fichier cuivre et de $- .23$ pour le fichier zinc. Ce fait, en plus de confirmer la théorie de Laski (1951)(qui veut que plus la teneur est élevée, moins il y a de minerai de cette teneur disponible; voir la section 3.2), implique aussi que puisqu'en moyenne plus un gisement est de forte teneur plus il est petit, alors la capacité de son concentrateur associé sera aussi plus petite, puisque la capacité de production d'un gisement est fortement corrélée avec la taille de ce même gisement.

. PWI (indice du coût du travail)

Cet indice est positif bien que non significatif, peu importe le fichier considéré. Le coût du travail ne semble donc pas avoir d'effet marqué sur la décision du rythme de l'exploitation, quoique son signe positif puisse indiquer une substituabilité avec le capital, si l'on considère le concentrateur comme un bien intensif en capital.

Ces résultats se rapprochent de ceux obtenus par Lasserre (1985). Dans un modèle cherchant à expliquer le choix de capacité du concentrateur associé à un gisement, il utilise des variables économiques (coût du capital, coût du travail) ainsi que des variables physiques (teneur et taille du gisement). Il obtient un coefficient positif et significatif pour la variable coût du travail. La différence au niveau de la signification de cette variable peut s'expliquer de deux manières: les formes fonctionnelles différentes, mais surtout, la définition différente de la variable coût du travail. Alors que Lasserre (1985) utilise un indice de salaire horaire (source: FMI), la variable utilisée ici a été bâtie à l'aide de la masse salariale annuelle, divisée par le nombre de travailleurs: il s'agit donc du salaire annuel.

. PCI (indice de coût du capital)

Tout comme l'indice de coût du travail, le coefficient du coût du capital n'est pas significatif, et ce pour aucun des fichiers. Le signe est toutefois négatif, ce qui était le signe anticipé. Si on compare avec les résultats obtenus par Lasserre (1985), on note que cette variable a un coefficient négatif mais significatif. On peut supposer encore une fois que l'explication réside dans l'utilisation de données différentes: ses données sont spécifiques à l'industrie minière opérant à ciel ouvert, tandis que les données utilisées ici font référence à l'industrie minérale dans son ensemble, y compris le pétrole. Quoiqu'il en soit, la non-significativité de cette variable est une déception.

. CEI (indice du coût de l'énergie)

Le coefficient associé à cet indice est négatif et significatif, tant pour le fichier complet que le fichier cuivre. Dans le cas du zinc, il n'est significatif que pour les régressions utilisant les prix réels, tandis qu'il est non significatif lorsque le coût de l'énergie relativement aux autres facteurs est considéré.

Les signes obtenus pour le modèle avec prix réels sont ceux anticipés: à une augmentation des coûts de l'énergie correspond une diminution de la capacité du concentrateur associé à un gisement, et donc de l'output.

Regardons maintenant les résultats obtenus avec les prix de l'énergie relatifs à ceux du capital. Le signe est négatif et significatif, sauf dans le cas du sous-fichier zinc. On peut donc en conclure que capital et énergie sont des facteurs de production complémentaires, contrairement aux résultats obtenus par Smithson, mais conformément à la théorie néoclassique. En ce qui concerne les gisements de zinc, on ne peut conclure ni à la complémentarité, ni à la substituabilité de ces facteurs.

5.4 Résultats obtenus pour les équations logarithmiques (MCO)

Les résultats obtenus, présentés en page 87, sont décevants: les coefficients ne sont pas significatifs, à l'exception de la variable QT. De plus, les résultats obtenus au test de Durbin Waston ne permettent pas de rejeter l'hypothèse d'autocorrélation des résidus.

Ces problèmes proviennent probablement de la difficultés de transposer en version logarithmique certains modèles linéaires. Par exemple, les variables dichotomiques ne sont pas transformées, puisque le logarithme de zéro n'existe pas. Il a donc fallu les employer telles quelles, ce qui a pu modifier la structure du modèle. Les variables dont certaines observations sont

négatives sont aussi un problème. C'est le cas ici du taux d'intérêt: ce phénomène se produit lorsque le taux d'inflation anticipé est plus élevé que le taux d'intérêt nominal. Pour remédier à cette situation, il faut soit: laisser tomber cette variable, soit utiliser une approximation, c'est-à-dire additionner aux observations une constante positive, afin de n'avoir aucune observation négative. Ces deux approches ont été utilisées, mais sans grand résultat.

Il n'est même pas possible de corriger le problème d'autocorrélation à l'aide des techniques usuelles puisque nos données ne sont pas des séries temporelles: on ne peut ici utiliser des méthodes d'estimations autorégressives (ou U_t , l'erreur résiduelle au temps t , est fonction de U_{t-1}) telles celle de Cochrane Orcutt ou celle de Hildreth-Lu. En conclusion, les résultats de ce modèle ne nous semblent pas réalistes.

TABLEAU 8

Résultats du modèle MCO
sous forme logarithmique

<u>Variable</u>	<u>Fichier complet</u>	<u>Fichier cuivre</u>	<u>Fichier zinc</u>
C	1.739	4.12**	2.63
QT	.6079**	.4986**	.584**
KM	.021	- .117	.0921
OP	.155	.064	- .0311
MP	.062	- .178	.220
TI	- .082	- .470	- .639
PRII	- .076	- .325**	- .217
PWI	1.688		
PLI	- 2.649		
CEI	.854	.056	- .371
R ²	.8517	.8195	.8526
DW	1.6382	2.0852	1.0816

** Variable significative à 95%

* Variable significative à 90%

CONCLUSION

Ce travail cherchait à répondre aux questions suivantes:

- 1) Comment le producteur décide-t-il d'exploiter un gisement de cuivre ou de zinc?
- 2) Comment choisit-il le rythme de l'exploitation?

Puis, lors de la présentation théorique du modèle, diverses hypothèses ont été examinées:

- la relation teneur-taille d'un gisement;
- l'évolution temporelle des gisements exploités;
- le rôle du taux d'intérêt;
- la substitution entre les facteurs de production.

Voici donc les réponses apportées à ces questions.

La relation teneur-taille d'un gisement est confirmée (malgré la petite taille de l'échantillon) par le coefficient de corrélation négatif existant entre ces deux variables.

Au sujet de l'évolution temporelle des gisements, il est plus difficile de dégager des conclusions claires et précises à l'aide des résultats obtenus. Il aurait été, entre autres, préférable de pouvoir

utiliser un modèle qui aurait amené des estimations directes des taux de substitution entre les diverses variables de qualité physique d'un gisement. Tout ce dont nous avons disposé ici consistait en coefficients de corrélation entre ces diverses variables. En plus de la substitution teneur-taille d'un gisement, la principale substitution observée est entre les variables teneur et distance, particulièrement visible dans le cas du zinc. Les résultats obtenus avec la variable MP (présence de métaux précieux) laissent aussi clairement voir une substitution entre cette variable et les autres. On peut conclure qu'il y a une substitution présente entre les indices de qualité d'un gisement.

On ne peut cependant parler en connaissance de cause de l'évolution temporelle des indices de qualité, à cause de l'absence de modèle plus sophistiqué pour établir cette question, surtout que la période considérée est relativement courte (24 ans seulement). Il est probable qu'une extension de la période étudiée qui s'étend de 1948 à 1971, tant vers le passé que vers le présent amènerait des résultats plus significatifs et plus intéressants. On peut toutefois observer que les variables qualifiant la teneur, PRII et MP, sont toutes deux corrélées négativement avec l'année de mise en service.

Une autre observation importante que l'on peut faire est celle-ci: les coefficients obtenus pour les variables de caractéristiques physiques peuvent être différents pour chacun des modèles (soit le probit et le MCO). Ce fait s'explique par l'importance que prend la variable Q_t (taille du gisement) lorsque vient le temps de décider le rythme de l'exploitation: la corrélation entre les autres variables de «qualité» et la taille d'un gisement peut changer

Le signe du coefficient d'une variable. Le meilleur exemple en est la variable OP (exploitation à ciel ouvert ou non) qui est négative pour le modèle probit et positive pour le modèle MCO.

Il est important de noter ici que l'effet de TE, qui cherchait à vérifier la présence de «surprises géologiques», c'est-à-dire si les gisements nouvellement découverts sont exploités plus rapidement n'est pas significatif, ce qui viendrait contredire l'hypothèse présentée à la section 2.4, qui veut que tous les gisements d'une qualité supérieure à une qualité minimale soient exploités dans les plus brefs délais. On peut aussi se poser la question si la prospection à l'aide des foreuses à têtes de diamant (diamond drill), qui a été retenue ici comme étant la date où la découverte a eue lieu, est effectivement une bonne approximation de la date de découverte d'un gisement.

Le rôle du taux d'intérêt n'est pas très clair lui non plus. Rappelons que la théorie prévoit deux effets concurrents et contradictoires: une hausse du taux d'intérêt implique une hausse du taux de l'exploitation lorsque les coûts d'exploitation sont indépendants de l'intérêt (pas de loyer du capital), mais la présence de ce loyer du capital dans la fonction de coûts induit justement l'effet inverse.

Pour le modèle MCO, les résultats obtenus laissent supposer que l'effet des taux d'intérêts sur le coût du capital (négatif), est plus grand que l'effet sur la rentabilité accrue d'une exploitation plus rapide. Ces résultats différents de ceux obtenus par le modèle probit, puisque la variable dépendante de chacun de ces modèles n'est pas la même (rappelons qu'il s'agit de la capacité

de production du gisement, donc un bien intensif en capital pour les MCO, et de la probabilité qu'un gisement soit exploité pour le modèle probit). Néanmoins, rappelons que les taux d'intérêt furent très stables pour la majeure partie de la période étudiée, et une extension de l'échantillonnage serait probablement bénéfique quant à la valeur des résultats.

Au niveau de la substitution entre les facteurs de production, les résultats obtenus ici contredisent les conclusions obtenues précédemment par Smithson (1979), à savoir que l'énergie et le capital soient des inputs substituables plutôt que complémentaires, comme le veut habituellement la théorie classique. Le travail et le capital sont substituables. Pour parfaire ce travail, il aurait fallu y inclure un indice de progrès technologique, tel par exemple celui proposé par Smithson (1979), afin d'en bien isoler les effets.

La différence des résultats selon qu'on considère les gisements de zinc ou ceux de cuivre mérite d'être soulignée. Par exemple, pour le modèle probit, toutes les variables de qualité d'un gisement sont de signes opposés, à l'exception de la variable OP (gisements exploités à ciel ouvert). Ce fait laisse supposer que le progrès technologique est plus important dans le cas du zinc que du cuivre, renversant ainsi les signes obtenus. Il est vrai que la substitution entre variables de qualité explique certains de ces signes inattendus, mais cette explication n'est pas suffisante. Une extension de la période d'échantillonnage, parallèlement à l'ajout d'un indice de progrès technologique serait une intéressante amélioration à apporter à ce travail.

Enfin, il se dégage des résultats empiriques de ces modèles que ce sont surtout les variables physiques qui déterminent les choix du producteur, y compris la variable valeur du minerai. Ce résultat étonne un peu mais laisse la porte ouverte à des recherches permettant de modéliser plus adéquatement les interactions et substitutions entre, d'une part les variables physiques, et d'autre part les variables économiques.

BIBLIOGRAPHIE

- BARNETT, Harold J. (1979). Scarcity and Growth Revisited. Chapter 8 in Smith, V.K. ed. Scarcity and Growth Reconsidered, Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- BARNETT, H.J.; MORSE C. (1963) Scarcity Growth, the economic of Nature Resource Availability, John Hopkins University Press for Resources for the Future, Baltimore.
- BERNDT, F.; FIELD B. (1981). Modeling and Measuring Natural Resource Substitution, Berndt & Field Editors, MIT.
- BROWN, Gardner M. and FIELD, Barry (1976). The Adequacy of Measures for Signaling the Scarcity of Natural Resources, chapter 9 in Smith, V.K. ed. Scarcity and Growth Reconsidered, Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- CAIRNS, R. (1981). An application of depletion theory to a base metal: Canadian nickel, Canadian Journal of economics 14(4) p. 635-657.
- DASGUPTA, P.S. and HEAL, G.M/ (1979). Economic theory and Exhaustible Resources, James Nipbet and Co. Ltd, Digswell place, Cambridge University Press, chap. 6.
- DEVARAJAN, S. and FISHER, A.C. (1982). Exploration and Scarcity, Journal of Political Economy, 90 (6), 1279-90.
- FISHER, A.C. (1979). Measures of Natural Resources Scarcity, chapter 10 in Smith, V.K. ed. Scarcity and Growth Reconsidered, Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- GAUDET, G. et LASSERRE, P. (1983). L'impôt sur les sociétés incorporées et le coût du capital pour l'entreprise minière, Cahier de recherche 8325, Département de science économique et Centre de recherche en développement économique, Université de Montréal, Montréal.
- GOLDFIELD, SM et QUANDT, RE (1972). Non-linear Methods in Econometrics, North Holland, London, pp. 124-134.
- HARTWICK, John M. (1978). Exploitation of many deposits of an exhaustible resource, Econometrica 46 (1), pp. 201-217.
- HOTELLING, H. (1931). The Economics of Exhaustible Resources, Journal of Political Economy 39(2), pp. 137-175.
- LASSERRE, P. (1983). Discovery Costs as a measure of rent: A comment on Devarajan and Fisher, Cahier de recherche, (8306), Dept. de science économique et Centre de recherche en développement économique, Université de Montréal, Montréal.
- LASSERRE, P. (1985). Capacity choice by mines, Canadian journal of Economics 18 (4), p. 831-842.

- LASKY, S.G. (1950). How tonnage and grade relations help predict ore reserves, Engineering and Mining Journal, vol 151, pp. 81-85.
- LECOMBER, R. (1979). The Economics of Natural Resources, chap. 3, Macmillan.
- LEVHARI, D. and LIVIATAN, N. (1977). Notes on Hotelling's Economics of Exhaustible Resources, Canadian Journal of Economics (86)5, pp. 841-861.
- LEVHARI, D. and PINDYCK, R. (1981). The principle of durable exhaustible Resources, The Quarterly Journal of Economics XCVI (3), pp. 365-377.
- ROBINSON, (1982). On the asymptotic properties of estimators of models containing limited dependant variables, Econometrica 50(1) pp. 27-41.
- SAGAN, Carl (1981). Cosmos, Presses Select Ltée, Montréal pour l'édition canadienne (édition originale: Random House, New York, 1980).
- SCHULZE, W.D. (1974). The optimal use of Non Renewable Resources the theory of Extraction, Journal of Environmental Economics and Management, 1(1), pp. 53-73.
- SLADE, M.E. (1982). Cycles in Natural-Resource Commodity Prices: An Analysis of the Frequency Domain, Journal of Environmental Economics and Management, 9(1), pp. 138-148.
- SMITH, V.K. (1978). Measuring Natural Resource Scarcity: Theory and Practice, Journal of Environmental Economics and Management, 5(2) 151-171.
- SMITH, V.K. (1979). Natural Resource Scarcity: A statistical Analysis, Review of Economics and Statistics 61, pp. 423-427.
- SMITHSON, C.W. (1979). Relative factor usage in Canadian mining, Resources and Energy, 2 pp. 373-389.
- SOLOW, R. (1974). Economics of Resources or the Resources of Economics, American Economic Review, vol. 64 (1), pp. 1-14.

ANNEXES

ANNEXE 1

TRANSFORMATION DES VARIABLES ET SOURCES DES DONNÉES

Voici la présentation de la source de chacune des variables utilisées pour ce travail; ainsi que les transformations qu'elles ont subies.

Les variables dépendantes

- PRO: les sources pour PRO (la variable dépendante dichotomique: la mine est en exploitation ou non) sont le FPSM¹ et le CMH².
- CAP: les sources de CAP sont les mêmes que pour PRO. Cette variable est mesurée en tonnes de minerai traitées par jour.

Les variables explicatives

- PRII: valeur d'une tonne de minerai dans le sol. Cette variable est bâtie à partir de la teneur des réserves lors de l'ouverture de la mine (source FPSM et CMH), des prix des métaux sur le marché canadien (source Statistique Canada, publication 26-201), et d'un indice de prix ci-après appelé IP: soit l'indice général des

(1) FPSM Financial Post survey of mines

(2) CMH Canadian Mines Handbook

prix de gros, métaux non-ferreux, or inclus; source: Statistique Canada
(Statistiques historiques du Canada, 2e éd., Ottawa 1983, tableau K-41)

La formule est:

$$PRII_t = \sum_{i=1}^5 \frac{TEN_i \cdot PRIX_{it}}{IP_t \cdot PRIM_1} \quad (i = 1, \dots, 5) \quad (A1)$$

ou: TEN_i est la teneur des réserves en métal (cuivre, zinc, plomb, or et argent);

$PRIX_{it}$ est le prix du métal i à l'année t ;

Cette variable est exprimée en dollars par tonne de minerai.

$PRIM_1$ Valeur moyenne approximative d'une tonne de minerai pour l'ensemble des gisements ($t = 1$)

. QT Taille du gisement

Ce sont les réserves à la première année de l'exploitation de la mine. (Source: FPSM ou CMH)

Cette variable est exprimée en milliers de tonnes de minerai.

. KM Distance séparant le gisement du lieu où le minerai est raffiné.

Cette variable était parfois disponible (source FPSM ou CMH), ou a été calculée à l'aide de cartes, de la localisation du gisement à la destination finale du minerai. Elle est exprimée en KM.

. OP Variable dichotomique indiquant le type d'exploitation (ciel ouvert ou galeries) du gisement. (Source: FPSM ou CMH)

- . MP Variable dichotomique indiquant la présence de métaux précieux.
(Source FPSM ou CMH)

- . TE Variable dichotomique indiquant le délai entre la découverte d'un gisement et son exploitation.

Cette variable est $t_0 - t_d$ où t_0 est l'année de mise en exploitation et t_d l'année où ont eu lieu les travaux de prospection.

(Source FPSM ou CMH)

- . TI Taux d'intérêt réel.

Le taux d'intérêt réel consiste en la différence entre le taux d'intérêt nominal (taux des obligations gouvernementales canadiennes, FMI International Financial Statistics) et un taux d'inflation anticipé, bâti de la façon suivante:

$$TIA_t = .05 TI_{t-4} + .15 TI_{t-3} + .3 TI_{t-2} + .5 TI_{t-1} \quad (A2)$$

où TIA_t est le taux d'inflation anticipé au temps t ,

et TI_{t-i} est le taux d'inflation observé à l'année i .

Les sources de TI_{t-i} sont: Statistique Canada, Statistiques historiques du Canada, 2e édition, Ottawa 1983, tableau K-8
Indice des prix à la consommation.

. CEI Indice du coût de l'énergie

Cet indice est une moyenne pondérée des indices de coût du pétrole et de coût de l'électricité, il est construit de la manière suivante:

$$CEI_t = \left[\frac{PP_t}{PP_1} + \frac{PE_t}{PE_1} \right] \frac{1}{IP_t} \quad (A3)$$

où PP_t : prix de l'électricité au temps t ;

PE_t : prix du pétrole au temps t ;

IP_t : indice des prix (identique à celui utilisé pour PRII) au temps t .

Source: PP_t , PE_t : statistique Canada, publication 26-201.

. PWI Indice du coût du travail

Il s'agit ici d'un indice bâti de la façon suivante:

$$PWI_t = \frac{(MS_t \div NT_t)}{PW_1 \cdot IP_t} \quad (A4)$$

ou MS_t : masse salariale au temps t

NT_t : nombre de travailleurs au temps t

IP_t : indice des prix de gros (voir PRII)

Les sources sont, tant pour MS_t que pour NT_t :

Statistique Canada, Statistiques historiques du Canada, 2e éd.

Ottawa 1983, tableaux 151-156: statistiques principales des industries canadiennes de minéraux métalliques.

. PCI Indice du coût du capital.

Cet indice est construit comme suit:

$$PCI_t = \frac{PC_t}{PC_1 \cdot IP_t}$$

ou PC_t est un indice de prix des immobilisations en construction et en machineries par industries, secteur mines (source Statistique Canada, publication 13-271);

et IP_t l'indice des prix de gros (voir PRII).

Terminons cette revue des données utilisées pour ce travail en notant que les indices de prix relatifs sont tout simplement le ratio des deux indices concernés. Par exemple, l'indice du prix du travail relatif au prix du capital, que nous appellerons PWC_t , est calculé ainsi:

$$PWC_t = \frac{PWI_t}{PCI_t} \tag{A5}$$

ANNEXE 2

Liste des gisements

Cette liste présente les 52 gisements constituant le fichier de données qui a servi à l'étude empirique. En plus du nom de chacun gisement (accompagné du nom de l'entreprise minière si celle-ci possède plus d'un gisement), on y trouve le métal principal, la date du début de l'exploitation, la date d'arrêt des activités (si celle-ci est antérieure à 1972), la province où est situé ce gisement, ainsi que le numéro de code de ce même gisement dans le fichier de données brutes Mines (voir annexe 3).

- 1) Cuprus Mines
Zinc, 1948-1954, Manitoba, 015
- 2) Anacon Mine (Anacon Lead Mines)
Zinc, 1948-1955, Québec, 001
- 3) Sullico (East Sullivan Mines)
Cuivre, 1949-1966, Québec, 017
- 4) Quémont Mining Corp
Zinc, 1949-1971, Québec, 040
- 5) Reeves McDonald Mines
Zinc, 1949-1971, Colombie-Britannique, 056
- 6) Yale Lead & Zinc Mines
Zinc, 1951-1958, Colombie-Britannique, 054
- 7) Suffield Mine (Ascott Metal Corp)
Zinc, 1952-1956, Québec, 004
- 8) Barvue Mines
Zinc, 1952-1957, Québec, 005
- 9) Mindamar Metal Corp
Zinc, 1952-1956, Nouvelle-Ecosse, 033

- 10) Weedon Pyrite & Copper
Cuivre, 1952-1959, Québec, 050
- 11) East Rim Nickel
Cuivre, 1953, 1958, Colombie-Britannique, 016
- 12) Openiska Cooper Mines
Cuivre, 1953, Chibougamau, 037
- 13) Lynnlake (Sherrit Gordon Mines)
Cuivre, 1953, Manitoba, 044
- 14) Mineral King Mine (Sheep Creek Gold Mines
Zinc, 1954-1958, Colombie-Britannique, 042
- 15) Gaspé Cooper
Cuivre, 1955-1968, Québec, 020
- 16) Chibougamau Explorers (Anacon Lead Mines)
Cuivre, 1956-1961, Québec, 002
- 17) Coldstream Copper Mines
Cuivre, 1957-1967, Ontario, 012
- 18) Geco Mines
Zinc, 1957, Ontario, 021
- 19) Maritimes Mining Corp
Cuivre, 1957-1967, Terre-Neuve, 029
- 20) North Rankin Nickel Mine
Cuivre, 1957-1962, Territoires du Nord-Ouest, 036
- 21) Willroy Mines
Zinc, 1957, Ontario, 053
- 22) Merrill Island Mining Corp
Cuivre, 1958-1967, Québec, 032
- 23) Giant Mascott Mines
Cuivre, 1959, Colombie-Britannique, 022
- 24) Grandy Mining Corp
Cuivre, 1959, Colombie-Britannique, 023
- 25) Temagami Mining
Cuivre, 1959-1972, Ontario, 046.

- 26) Coniagas Mine
Zinc, 1961-1967, Québec, 019
- 27) Kam Kotia Porcupine Mines
Cuivre, 1961, Ontario, 026
- 28) Pater Mine (Rio Algoni)
Cuivre, 1961-1970, Ontario, 041
- 29) Vauze Mines
Cuivre, 1961-1969, Québec, 049
- 30) Coast Copper
Cuivre, 1962-1969 (données agregées) Colombie-Britannique, 011
- 31) Faraday
Cuivre, 1962-1972, Ontario, 018
- 32) Solbec Copper Mines
Zinc, 1962-1970, Québec, 045
- 33) Mattagami Lake Mines
Zinc, 1963, Québec, 030
- 34) McIntyre Procupine Mines
Cuivre, 1963, Ontario, 031
- 35) Orchan Mines
Zinc, 1963, Québec, 038
- 36) Zone 12, (Brunswick Mining & Smelting)
Zinc, 1964, Nouveau-Brunswick, 009
- 37) Consol Rambler Mines
Cuivre, 1964, Terre-Neuve, 013
- 38) Lake Dufault
Zinc, 1964, Québec, 027
- 39) Whalesback Pond (British Newfoundland Explorations)
Cuivre, 1965-1972, Terre-Neuve, 006
- 40) Cubra Mines
Zinc, 1965, Québec, 014
- 41) Pine Point Mines
Zinc, 1965, Territoires du Nord-Ouest, 039

- 42) Anglo Rouyn
Cuivre, 1966-1972, Saskatchewan, 003
- 43) Zone 6 (Brunswick Mining & Smelting)
Zinc, 1966, Nouveau-Brunswick, 008
- 44) Canadian Jamerson Mines
Zinc, 1966-1971, Ontario, 010
- 45) Granisle Copper
Cuivre, 1966, Colombie-Britannique, 024
- 46) Kidd Heck (Texas Gulf Sulphur)
Zinc, 1966, Ontario, 047
- 47) Western Mines
Zinc, 1966, Colombie-Britannique, 051
- 48) Zenmac Metal
Zinc, 1966-1970, Ontario, 055
- 49) New Imperial Mines
Cuivre, 1967, Yukon, 035
- 50) Tribag Mining Corp
Cuivre, 1967, Ontario, 048
- 51) Madeleine Mines
Cuivre, 1969, Québec, 028
- 52) Fox Lake (Sherrit Gordon Mines)
Zinc, 1970, Manitoba, 043

ANNEXE 3

Les fichiers de données

LES DONNÉES BRUTES

Toutes les données concernant chacun des gisements proviennent d'une seule et unique source: le fichier Mines (numéro d'utilisateur 505). Ce fichier a été compilé dans le cadre d'une assistance de recherche sous la direction de M. Pierre Lasserre. Ce fichier est constitué d'observations annuelles sur chacun des gisements présentés à l'annexe précédente, plus les gisements suivants:

- 025: Joutel Copper
Cuivre, 1967, Québec, 025
- 034: New Hosco Mines
Cuivre, 1963-1970, Québec, 034
- 052: Willecho Mines
Zinc, 1965, Ontario, 052

La page suivante présente une photocopie d'un extrait de ce fichier. Chaque observation (une année-gisement) occupe trois lignes. Pour CHAQUE LIGNE, les 6 (six) premiers caractères ont la même signification:

- les trois premiers correspondent au numéro du gisement (de 001 à 056)
- les deux suivants correspondent à l'année de l'observation (de 48 à 82)
- le dernier indique le numéro de la ligne de l'observation (de 1 à 3)

Il est à noter que chaque «espace blanc» (aucune donnée disponible) a été rempli avec des séries de 9.

DESCRIPTION DE LA 1^o LIGNE

La première ligne est constituée de 77 caractères.

Nous connaissons déjà la signification des caractères 01 à 06. Cette ligne est consacrée aux réserves. Ainsi, aux caractères suivants correspondent:

- 07-11 Réserves sans classification (en milliers de tonnes)
- 12-16 Réserves indiquées (ou réserves indiquées et prouvées)
(en milliers de tonnes)
- 17-21 Réserves prouvées (en milliers de tonnes)
- 22-25 Teneur en cuivre des réserves sans classification (en 1/100 de 1%)
- 26-29 Teneur en zinc des réserves sans classification (en 1/100 de 1%)
- 30-33 Teneur en argent des réserves sans classification (en onces/tonne)
- 34-37 Teneur en or des réserves sans classification (en onces/tonne)
- 38-41 Teneur en plomb des réserves sans classification (en 1/100 de 1%)
- 42-45 Autre teneur des réserves sans classification (en 1/100 de 1%)
- 46-49 Teneur en cuivre des réserves indiquées (en 1/100 de 1%)
- 50-53 Teneur en zinc des réserves indiquées (en 1/100 de 1%)
- 54-57 Teneur en argent des réserves indiquées (en onces/tonne)
- 58-61 Teneur en or des réserves indiquées (en onces/tonne)
- 62-65 Teneur en plomb des réserves indiquées (en 1/100 de 1%)
- 66-69 Teneur en cuivre des réserves prouvées (en 1/100 de 1%)
- 70-73 Teneur en zinc des réserves prouvées (en 1/100 de 1%)
- 74-77 Teneur en argent des réserves prouvées (en onces/tonne)

DESCRIPTION DE LA SECONDE LIGNE

Les six premiers caractères étant connus, nous passons immédiatement aux suivants:

- 07-10 Teneur en or des réserves prouvées (en onces/tonne)
- 11-14 Teneur en plomb des réserves prouvées (en 1/100 de 1%)
- 15-19 Minerai extrait du gisement et concentré sur place (en centaines de tonne)
- 20-24 Minerai expédié sans traitement (en centaines de tonne)
- 25-29 Quantité de cuivre contenue dans le minerai (en milliers de livres)
- 30-34 Quantité de zinc contenue dans le minerai (en millier de livres)
- 35-39 Quantité d'argent contenue dans le minerai (en centaines d'once)
- 40-44 Quantité d'or contenu dans le minerai (en onces)
- 45-49 Quantité de plomb contenu dans le minerai (en milliers de livres)
- 50-54 Quantité produite d'un métal supplémentaire
- 55-59 Concentré de zinc (en dizaines de tonne)
- 60-64 Concentré de cuivre (en dizaines de tonne)
- 65-69 Autre concentré
- 70-71 Autre concentré
- 75-79 Teneur en zinc du concentré de zinc (en 1/100 de 1%)

DESCRIPTION DE LA TROISIÈME LIGNE

Les 6 premiers caractères sont connus.

- 07-11 Teneur en cuivre du concentré de cuivre (en 1/100 de 1%)
- 12-16 Teneur des autres concentrés
- 17-21 Teneur des autres concentrés
- 22-26 Teneur des autres concentrés
- 27-31 Teneur des autres concentrés
- 32-36 Capacité quotidienne du concentrateur (en tonnes)
- 37-41 Profondeur du 1° puit
- 42-45 Profondeur du 2° puit
- 46-51 Profondeur du 3° puit
- 52-56 Profondeur du 4° puit
- 57-62 Revenu des ventes (en milliers de \$)
- 63-68 Coût d'opération (en milliers de \$)
- 69-74 Profit d'opération (en milliers de \$)
- 75 Dichotomique indiquant
 - 0 : gisement exploité par galeries
 - 1 : gisement exploité à ciel ouvert

DESCRIPTION DES FICHIERS AYANT SERVIS À L'ÉTUDE EMPIRIQUE

Ces fichiers sont au nombre de six (6): trois (3) pour le modèle probit et trois (3) pour le modèle MCO.

Tout d'abord, pour le modèle probit, le fichier complet s'appelle «GAG», et est constitué de 1 078 observations. Ces observations sont ordonnées de manière suivante: elles sont regroupées par année, suivant l'ordre dans lequel sont présentés les fichiers à l'annexe 2. Ainsi, la 1^o observation se rapporte au gisement 1 pour l'année 1948, la seconde au gisement 2 de la même année, jusqu'à la 52^o observation, qui correspond au gisement 52 pour l'année 1948. La 53^o observation correspond au gisement 1 pour l'année 1949. Il est important de noter que lorsqu'un gisement n'est plus exploité, il n'y a plus d'observations. Les dates de fermetures sont précisées à l'annexe 2.

En ce qui concerne les sous-fichiers, le principe est le même: le sous-fichier cuivre, nommé «CUI», contient des observations sur 27 gisements, le sous-fichier zinc (nommé «ZIN») contient des observations sur 25 gisements.

Pour le modèle MCO, il n'y a qu'une observation par gisement, soit celle de l'année de la mise en service du gisement. Il y a 52 observations pour le fichier complet, nommé «DER», 27 observations pour le fichier cuivre «CUIA» et 25 observations pour le fichier ZINC «ZINA». Il est à noter que la variable dépendante a pour nom «TOB» dans ces fichiers. Cette variable est présentée sous le nom de CAP dans ce travail.

