L'Actualité économique, Revue d'analyse économique, vol. 95, n° 2-3, juin-septembre 2019

L'EXPLOITATION DE RESSOURCES NATURELLES NON RENOUVELABLES EN ASYMÉTRIE D'INFORMATION*

François M. CASTONGUAY
University of California, Davis
Department of Agricultural and Resource Economics
fcastonguay@ucdavis.edu

Pierre LASSERRE
Université du Québec à Montréal
École des sciences de la gestion

RÉSUMÉ – Nous analysons l'exploration et l'extraction d'une ressource naturelle non renouvelable dans un contexte d'asymétrie d'information. Le principal délègue l'exploitation d'une ressource à un agent (une firme) qui possède de l'information privée concernant ses coûts d'exploration ; cette firme possédera également de l'information privée concernant ses coûts d'extraction une fois que le stock de réserves sera mis au jour et viendra contraindre l'extraction. Le principal peut seulement s'engager pour la période courante : un menu de contrat subventions-découvertes pour la période d'exploration, un menu de contrat redevances-extraction conditionnel au montant de réserves mis au jour pour la période d'extraction. Comparé avec la situation de premier rang où l'information est symétrique, le contrat optimal en extraction entraîne une hausse des découvertes des réserves mises au jour pour la firme la plus efficace et possiblement d'autres firmes, alors que le contrat optimal en exploration entraîne une réduction du montant mis au jour, particulièrement pour les firmes les moins efficaces en exploration. Nous détaillons les implications de l'asymétrie d'information et les formes que prennent les inefficacités : réserves abandonnées, utilisation excessive de ressources à bas coûts et niveau de sophistication technologique inefficace dans les secteurs d'exploration et d'extraction.

*Nous remercions le FQRSC pour leur support financier. Nous tenons également à remercier les participants des conférences de la SCSE 2015 (Montréal), du CREE 2015 (Sherbrooke) et du SURED 2016 (Banyuls-sur-Mer), ainsi que ceux de l'atelier d'économie de l'environnement et des ressources naturelles de Montréal.

ABSTRACT – We analyze the exploration and extraction of a nonrenewable resource under asymmetric information. The principal delegates the exploitation of a resource to an agent (a mining firm) who possesses private information about the cost of exploration; the agent learns further information on extraction costs once reserves have been established and constrain extraction. The principal can only commit to current-period royalty contracts: one discovery-transfer menu and one extraction-royalty menu that is conditional on reserves discovered. Compared with the symmetric information first best, avoiding adverse selection in extraction requires the optimum mechanism to increase discoveries by the lowest cost type and possibly others. This is tempered by a countervailing effect stemming from information asymmetry in exploration that tends to reduce discoveries, especially by higher cost types. We further detail implications on the forms taken by the inefficiencies associated with asymmetric information: abandoned reserves, excessive use of low-cost exploration prospects, and inefficient levels of technological sophistication in the exploration and extraction sectors.

INTRODUCTION

La gestion des ressources naturelles non renouvelables implique souvent une situation où celui qui détient les droits à un stock de ressources sur un terrain donné – le gouvernement par exemple – délègue l'exploitation à une firme spécialisée. Dans plusieurs pays, le gouvernement détient les droits à l'exploration et à l'extraction de ressources naturelle non renouvelables, comme du minerai par exemple, même si la terre sur laquelle les opérations ont lieu est propriété privée. Dans de tels cas, le propriétaire des droits préfère souvent, pour diverses raisons, déléguer les opérations minières à une firme spécialisée en échange d'une redevance préétablie. Même si les droits à l'exploration et l'extraction d'une ressource sont propriété privée, comme c'est le cas aux États-Unis, le propriétaire peut quand même vouloir confier l'exploration et l'extraction d'une ressource à une firme spécialisée. Par conséquent, le droit exclusif de procéder à des activités d'exploration dans le but de mettre au jour un stock de réserves qui sera extrait ultérieurement est habituellement délégué à une firme spécialisée. Ceci crée un problème d'agence où le propriétaire de la ressource est le principal et où les firmes sont les agents.

Le problème d'aléa moral peut se produire si l'agent possède de l'information privée concernant une caractéristique *endogène*, par exemple, l'effort encouru pour une activité donnée. La sélection adverse, ou antisélection, peut se produire lorsque l'agent possède de l'information privée concernant une caractéristique *exogène*, par exemple, les coûts encourus pour extraire la ressource. Dans les deux cas, la partie qui n'est pas informée (le principal) fait une offre à la partie informée (l'agent), et ensuite la partie informée choisit d'accepter ou de refuser l'offre et agit conséquemment. Une autre situation possible est le jeu de signal ; cela se produit lorsque la partie informée communique d'abord son information privée au principal, qui lui, à son tour, fera une offre à l'agent dépendant du signal envoyé.

Ces différents scénarios d'asymétrie d'information peuvent avoir lieu dans un contexte d'exploitation de ressources naturelles non renouvelables. Le problème d'aléa moral a été beaucoup étudié,[1] mais le compromis entre la rente allouée à l'agent due à l'asymétrie d'information et l'inefficacité créée par le contrat optimal est souvent floue dans ce contexte. Pour obtenir des résultats concrets, non ambigus, ces modèles (et donc leurs résultats) sont sujets à d'importantes hypothèses simplificatrices. Selon Laffont et Martimort (2002), il n'y a pas de leçon générale sur la nature des distorsions créées par l'aléa moral. Bien qu'il aurait pu être intéressant de traiter d'une situation de signalement,[2] nous nous attarderons plutôt à un contexte de sélection adverse.[3]

Une question fascinante lorsqu'on traite de questions qui concernent la sélection adverse est le compromis auquel le principal fait face : déterminer la rente informationnelle de l'agent dans le but de minimiser l'inefficacité économique créée par le contrat optimal. Nous démontrerons que ce compromis prend une nouvelle tournure dans notre contexte dynamique d'exploitation d'une ressource naturelle non renouvelable, une tournure qui diffère de résultats plus standards.

L'aspect dynamique est primordial lorsqu'on traite d'une question qui concerne l'exploitation d'une ressource naturelle non renouvelable. La littérature concernant les problèmes d'incitation dynamique – c'est-à-dire lorsque le principal a la possibilité de s'engager à un contrat avec l'agent sur plusieurs périodes – est due largement à Baron et Besanko (1984) et Baron (1989). Quand l'information privée est temporellement indépendante, de sorte qu'une « nouvelle » information privée est tirée à chaque période, le mécanisme d'incitation optimal produit une situation de premier rang dès la seconde période. Le principal peut s'assurer d'une situation de premier rang pour les périodes futures en faisant des transferts qui assurent que les contraintes participatives et de compatibilité incitative sont satisfaites; ces transferts ne génèrent aucune rente informationnelle. Quand l'information privée est parfaitement corrélée, le mécanisme d'incitation dynamique optimal est le même que le mécanisme d'incitation optimal dans un cadre statique. L'hypothèse que le principal peut s'engager sur plusieurs périodes rend donc des problèmes dynamiques complexes en problèmes relativement triviaux. C'est pourquoi dans notre analyse nous nous limiterons (excepté pour la sous-section 4.3) à un problème où il est impossible pour le principal de s'engager au-delà de la période courante. Ceci peut être interprété par le fait qu'il peut être difficile pour un gouvernement de prendre un engagement pour une période future où un autre gouvernement serait au pouvoir; ou encore, qu'aucun contrat qui tient compte de toutes les contingences futures n'existe. Nous comparerons toutefois nos résultats

---

1. Voir Segerson et Wu (2006) pour un exemple appliqué à un contexte de ressources naturelles non renouvelables.

2. Voir par exemple Gerlagh et Liski (2014) dans un contexte de ressources naturelles non renouvelables.

3. Voir Laffont et Tirole (1993), Salanié (1997) et Laffont et Martimort (2002) pour une exposition exhaustive de la littérature générale sur le sujet.

avec le mécanisme incitatif optimal si l'engagement intertemporel du principal est possible.

Gaudet *et al.* (1995) considèrent un problème de sélection adverse dynamique où le principal confère l'extraction d'un dépôt à une firme sur plusieurs périodes. Ils caractérisent le mécanisme incitatif optimal entre le principal et l'agent démontrant que le taux d'extraction et la rente générée par la ressource sont affectés par l'asymétrie d'information, et donc que le résultat diffère de la situation de premier rang qui aurait eu lieu en situation de symétrie d'information. Ils traitent de ce problème dans un contexte où les réserves sont données de façon exogène. Il s'avère cependant que le surplus généré par l'extraction d'une ressource est le principal moteur qui va démarrer l'exploration de nouveaux sites et mener à la découverte et la mise au jour de nouvelles réserves. Il est donc important de considérer ces deux phases comme étant liées. C'est ce que nous faisons dans ce papier : nous traitons d'une question qui concerne l'activité d'exploration et l'activité d'extraction d'une ressource naturelle non renouvelable où le stock de réserves déterministe est endogène.

Lorsqu'on traite d'une question de sélection adverse dans un contexte dynamique, un autre problème peut se produire si la valeur du paramètre qui est sujet à l'asymétrie d'information est temporellement corrélée ;[4] la raison pour cela est que l'« état » de l'information privée varie dans le temps. Quand l'information privée est temporellement corrélée, cela donne lieu à des problèmes dynamiques beaucoup plus complexes puisque, outre les réserves de ressources non renouvelables, il y a une autre facette – la corrélation temporelle de l'information privée – qui crée un lien entre les périodes. Nous simplifions donc notre analyse en faisant l'hypothèse que l'information privée est temporellement indépendante. Dans le modèle à deux périodes que nous utilisons (une période d'exploration suivi d'une période d'extraction), ceci semble être une hypothèse plutôt naturelle puisque l'information privée est d'abord concernant une caractéristique exogène des coûts d'exploration de la firme, et ensuite, concernant une caractéristique exogène des coûts d'extraction de la firme.

La littérature concernant des problèmes de sélection adverse en ressource naturelle est relativement rare. Helm et Wirl (2014, 2016) considèrent des contrats sur des questions climatiques avec des externalités multilatérales où l'information concernant la propension à payer, et les coûts, est privée ; les contrats sont statiques. Tatoutchoup (2015) traite de redevances forestières optimales lorsque l'information concernant les coûts est privée ; l'horizon temporel est infini et les coûts peuvent être corrélés temporellement. De façon similaire à la littérature plus classique, ces auteurs ont trouvé que la rente reçue par l'agent dépend grandement du degré de corrélation temporel. Hung *et al.* (2006) introduisent un paramètre d'information privée dans un modèle d'extraction ; ils trouvent que l'asymétrie d'information augmente sans ambiguïté la durée de l'extraction, ce qui peut être

4. Voir par exemple Baron et Besanko (1984) ou Baron (1989).

interprété comme une sous-utilisation de la ressource dans l'immédiat, comparativement au cas symétrique, même si cela implique une plus grande extraction dans le futur. Leur résultat est donc conforme avec le résultat statique plus classique : afin de combattre l'asymétrie d'information, le contrat optimal réduit l'activité de tous les types de firmes excepté le plus efficace économiquement ; ceci est connu comme étant le principe d'« aucune distorsion pour le type le plus efficace ». Notre modèle comportera un paramètre de coût différent pour chacune des deux périodes ; comme l'a déjà démontré Gaudet *et al.* (1995), le principe d'« aucune distorsion pour le type le plus efficace » ne tient pas lorsqu'on introduit un tel aspect dynamique. [5]

La question principale à laquelle nous nous attarderons consiste donc à déterminer si l'asymétrie d'information réduit l'exploration ; nous déterminerons donc si le principe d'« aucune distorsion pour le type le plus efficace » tient dans notre contexte. Bien que la théorie sur l'exploration de ressources naturelles comme étant l'approvisionnement d'un stock à extraire ultérieurement est déjà bien développé (Daubanes et Lasserre, 2014 ; Venables, 2014), nous ne connaissons aucune étude qui traite de cette question dans un contexte de sélection adverse. [6] Le papier par Osmundsen (1998) traite d'un problème d'extraction d'une ressource naturelle où, contrairement à notre analyse, les réserves sont exogènes et elles sont la source de l'asymétrie d'information. De plus, puisqu'il n'y a pas d'exploration dans son modèle, la firme possède seulement un avantage informationnel au début de la relation contractuelle lorsqu'elle possède un certain niveau de stock qui est inconnu du principal ; ceci implique qu'une fois que le stock de la firme est dévoilé, elle perd son avantage informationnel pour le restant de l'entente et donc le problème d'Osmundsen (1998) réduit à un problème statique. Par conséquent, le principe d'« aucune distorsion pour le type le plus efficace » s'applique dans son cas. [7]

La généralité du papier de Pavan *et al.* (2014) est tel qu'il couvre l'exploitation de ressources naturelles non renouvelables. Cependant, plusieurs adaptations seraient nécessaires pour obtenir des résultats concrets dans notre cas particulier. Les auteurs font de plus l'hypothèse que le principal peut s'engager à des contrats incitatifs à plusieurs périodes. Qui plus est, puisque le papier traite d'un ensemble de types de firme fixes et exogènes, il n'est pas clair comment il peut traiter de l'autre question à laquelle nous nous attarderons : l'endogénéité de l'ensemble des types de firme qui reçoivent une offre du principal.

Pour ce faire, nous utilisons des techniques de contrôle optimal avec bornes endogènes. Bien que notre méthodologie n'est pas nouvelle, elle n'a pas suscité beaucoup d'intérêt dans la littérature alors qu'elle amène une nouvelle façon d'in-

5. Pour d'autres exceptions à ce principe, voir Jullien (2000).

6. Malgré que la série d'articles par Ken Hendricks, Robert Porter et leurs coauteurs (Hendricks *et al.*, 2008; Hendricks et Porter, 2014) traite d'enchères de gisement de pétrole et les problèmes informationnels qui y sont associés, ils ne traitent pas directement de l'offre de l'exploration et des découvertes.

7. Voir aussi Martimort *et al.* (2018a) et Martimort *et al.* (2018b).

terpréter l'effet de l'asymétrie d'information. Dans un contexte technologique, cela nous permet d'identifier l'effet qualitatif de l'asymétrie d'information sur l'efficacité technologique d'un secteur de l'industrie ; dans un contexte géophysique, cela démontre comment l'asymétrie d'information entraîne une surutilisation des meilleurs dépôts (les moins coûteux à découvrir) et l'abandon de certains dépôts qui auraient été exploités en absence d'information privée.

Dans la prochaine section, nous présentons notre modèle à deux périodes utilisé dans le cadre de notre analyse ; il comporte d'abord une période d'exploration et ensuite une période d'extraction. Un modèle à deux périodes est le meilleur contexte pour comprendre intuitivement l'effet que l'asymétrie d'information a sur l'exploration. Il est possible de démontrer que les résultats que nous avons établis sont robustes à une généralisation à plusieurs périodes d'extraction,[8] mais cette extension complique l'analyse, ne change pas les résultats qualitatifs et nuit à l'intuition.

En section 2 nous détaillons les résultats de la situation de premier rang où l'information est symétrique ; ces résultats servent comme point de référence. En sous-section 2.1, nous traitons d'abord de la solution pour la période d'extraction puisque nous cherchons une solution à boucle fermée ; en sous-section 2.2 nous traitons du problème d'exploration. En section 3, nous étudions différents contextes d'asymétrie d'information et démontrons que l'information privée pousse les découvertes en direction opposée dépendamment de l'activité. En sous-section 3.1, l'asymétrie d'information dans la phase d'extraction seulement entraîne tous les types de firme à mettre au jour un plus gros stock qu'en pleine information ; en sous-section 3.2, l'asymétrie d'information en exploration seulement entraîne tous les types de firme (sauf le plus efficace) à mettre au jour un plus petit stock qu'en pleine information. En section 4 nous présentons une analyse plus générale où il y a asymétrie d'information dans les deux activités ; il s'avère dans un tel cas que c'est un type de firme intermédiaire qui n'est pas affecté par l'information privée ; cela fait que le principe d'« aucune distorsion pour le type le plus efficace » ne tient pas dans notre contexte. Nous discutons également des interprétations des résultats, et aussi, nous considérons la possibilité pour le principal de s'engager sur plusieurs périodes.

Nous concluons dans la dernière section.

1. Modèle et objectifs

Afin de garder l'analyse de notre question dans un cadre le plus simple possible, nous faisons l'hypothèse que l'exploration et l'extraction se déroulent sur deux périodes consécutives. Nous supposons que l'exploration se déroule dans un premier lieu et qu'elle dure une seule période, appelée période 1. Nous supposons de plus qu'il n'est jamais optimal d'extraire la ressource au-delà de la seconde

8. Pour une généralisation du modèle d'extraction à plusieurs périodes en présence d'asymétrie d'information voir Gaudet *et al.* (1995).

période, car, par exemple, le prix exogène de la ressource chute et rend l'extraction non profitable. Bien qu'il est possible de modéliser cette question sans avoir recours à ces hypothèses quelque peu restrictives, les résultats qualitatifs ne sont pas affectés par celles-ci et la résolution du problème se voit beaucoup simplifiée. En fait, nous montrons brièvement dans la sous-section 3.1 que nos résultats sont non seulement robustes à l'inclusion d'une troisième période (une seconde période d'extraction), mais également renforcés par une telle extension.

La mise au jour d'une quantité x de réserves par une firme de type θ_1 coûte

$$C_1(x,\theta_1) = \theta_1 x + \frac{c}{2}x^2, \quad c \geq 0.$$

Le paramètre θ_1 peut représenter les habiletés technologiques d'une firme, ou encore, l'information qu'elle possède concernant la difficulté associée à l'exploration d'un site en particulier. Peu importe l'interprétation, la firme ne peut pas modifier son type en modifiant son comportement ; ce paramètre est exogène. De plus, c'est ce paramètre qui n'est pas connu par le principal lorsqu'il y aura asymétrie d'information dans l'activité d'exploration.

De façon similaire, l'extraction d'une quantité q par une firme de type θ_2 coûte

$$C_2(q,\theta_2) = \theta_2 q + \frac{b}{2}q^2, \quad b \geq 0,$$

où θ_2 représente un paramètre de coût connu seulement par la firme lorsqu'il y a asymétrie d'information dans la période d'extraction. Ce paramètre peut représenter différents aspects de l'efficacité de la firme dans son activité d'extraction ; il est connu par la firme (et par le principal dans un scénario d'information symétrique) seulement une fois que les réserves ont été découvertes et mises au jour. La raison pour cela est que ce paramètre représente l'information que la firme acquiert durant la mise au jour du stock ; cette information va au-delà de l'information concernant la grosseur x du stock de réserve, qui elle est connue par les deux parties après que la mise au jour du stock a eu lieu. Bien qu'il semble difficile à croire qu'une firme ne connaît pas ses habiletés d'extraction générales, il semble plus plausible qu'une firme ne sache pas exactement sous quelles conditions elle va devoir accomplir cette tâche avant que les réserves ne soient découvertes.

La relation contractuelle entre le principal et l'agent débute à un moment où la firme connaît θ_1, mais n'a pas encore acquis l'information concernant θ_2 ; la firme connaît donc c, b, θ_1 et θ_2 lui sera révélé au début de la période d'extraction. Le principal connaît c, b et les fonctions de distribution cumulative de θ_1 et θ_2, dénotées respectivement $G(\theta_1)$ et $F(\theta_2)$; ces fonctions de distribution cumulatives sont définies respectivement sur les ensembles $\theta_1 \in [\theta_1^L, \theta_1^H]$ et $\theta_2 \in [\theta_2^L, \theta_2^H]$. Associées à ces fonctions de distribution cumulatives sont les fonctions de densité, respectivement dénotés $g(\theta_1) > 0$ et $f(\theta_2) > 0$, que l'on suppose être continues et différentiables sur $[\theta_1^L, \theta_1^H]$ et $[\theta_2^L, \theta_2^H]$ respectivement. Chacune des deux parties possède l'information concernant les fonctions de distribution cumulative et les fonctions de densité au début des pourparlers. Étant donné des niveaux arbitraires de x et q, les paramètres θ_1^L et θ_2^L représentent respectivement le minimum possible des coûts marginaux d'exploration et d'extraction, alors que les paramètres θ_1^H et θ_2^H représentent leur maxima. Afin de traiter d'une situation d'intérêt économique, nous supposons que les paramètres θ_1^L et θ_2^L sont suffisamment bas de sorte que l'exploitation de la ressource est profitable pour certaines combinaisons de types ; pour ce qui est des paramètres θ_1^H et θ_2^H, il est possible qu'ils soient trop élevés ce qui rendrait alors l'exploitation de la ressource non profitable. Dans un tel cas, une firme de type θ_1^H ne met aucun stock au jour, ce qui veut dire qu'elle n'est pas active en extraction puisqu'elle n'a mis au jour aucun stock et donc qu'elle ne possède aucun stock à exploiter. De plus, une firme de type θ_2^H pourrait par exemple être active en exploration, mais abandonner sa découverte complètement, ou encore en extraire seulement une partie, car il ne serait pas avantageux économiquement pour elle de l'épuiser.

Le contrat entre le principal et l'agent est signé au début de chacune des deux périodes ; le principal peut seulement s'engager pour le contrat de la période courante. Lorsqu'il y a symétrie d'information entre les deux parties dans une période donnée, le principal doit seulement s'assurer que le contrat satisfasse la contrainte de participation pour les agents actifs ; lorsqu'il y a asymétrie d'information entre les deux parties, le principal doit de plus s'assurer que la contrainte de compatibilité incitative soit satisfaite.

L'investissement dans la phase exploratoire doit être compensé par le profit généré de l'extraction de la ressource en seconde période alors qu'elle vaut un prix unitaire p. Le principal et l'agent doivent partager les revenus et coûts encourus au cours de ces deux périodes d'une façon telle que l'exploitation génère suffisamment de profits et rentes. Les profits de la firme sont définis comme étant la différence entre les revenus de la vente de la ressource et les coûts d'exploration, les coûts d'extraction, et les redevances payées au principal, net de toutes possibles subventions offertes par le principal dans la phase exploratoire. Formellement, les profits totaux espérés d'une firme sont

$$\Pi = -C_1(x, \theta_1) + \delta\,\mathbb{E}[\Pi_2] - R_1, \tag{1}$$

où $\mathbb{E}[\Pi_2]$ représente le surplus d'extraction espéré actualisé par δ, avec $0 < \delta < 1$; R_1 dénote la redevance (ou subvention) de la période 1. Les profits, ou surplus, de la firme durant la période d'extraction sont

$$\Pi_2 = pq - C_2(q, \theta_2) - R_2, \tag{2}$$

où R_2 dénote la redevance de la période 2.

Les rentes du principal sont définies comme étant les redevances nettes de toutes subventions, ainsi que tout surplus du consommateur ou surplus du producteur qui pourrait entrer dans son objectif. Le problème auquel fait face le principal est d'établir les redevances (ou subventions) des périodes 1 et 2 de façon à maximiser son objectif. Ce problème de maximisation sera considéré sous différents contextes informationnels. Afin de simplifier notre recherche du contrat optimal, nous faisons l'hypothèse que le prix de la ressource est déterminé de façon exogène et que les consommateurs de la ressource sont à l'étranger. Ceci implique donc que la production domestique de la ressource n'affecte pas le prix de la ressource et qu'elle ne génère pas de surplus du consommateur.[9] Par conséquent, l'objectif intertemporel (de la première période) du principal est donné par,

$$\underset{R_1,R_2}{\text{Max}} \quad R_1 + \delta\,\mathbb{E}[R_2] + \alpha\Pi, \tag{3}$$

et les contraintes sont décrites plus loin. Le terme $\mathbb{E}[R_2]$ représente la redevance espérée de la seconde période actualisée par δ. Le paramètre α, où $0 \leq \alpha < 1$, représente le fait qu'un dollar dans les coffres du principal est préféré à un dollar dans les coffres de la firme ; si le principal est une entité privée alors $\alpha = 0$ puisqu'il est indifférent face aux rentes potentielles que l'agent pourrait obtenir.

De façon similaire, l'objectif de seconde période du principal est donné par,

$$\underset{R_2}{\text{Max}} \quad R_2 + \alpha\Pi_2, \tag{4}$$

sujet aux contraintes décrites ci-dessous.

2. Information symétrique

Dans le cas où les deux parties partagent la même information, le paramètre θ_t est révélé à la firme et au principal au début de chaque période $t = 1, 2$. La firme n'a donc aucun avantage informationnel et le principal peut arriver à une situation de premier rang en rapatriant l'entièreté de la rente.

9. D'autre part, nous pourrions faire l'hypothèse alternative que la fonction de demande de la ressource naturelle pour laquelle le principal détient les droits à l'exploration et à l'extraction est parfaitement élastique. Dans un tel cas, même si les consommateurs de la ressource naturelle étaient dans le même pays que le principal, la production domestique ne génèrerait pas de surplus du consommateur. Une autre alternative serait de faire l'hypothèse que le principal est une entité privée ; il serait alors indifférent face au potentiel surplus du consommateur et face aux potentielles rentes que l'agent pourrait obtenir. Peu importe l'hypothèse faite dans ce cas-ci, son but premier est de simplifier la recherche du contrat optimal en s'assurant que le surplus du consommateur ne fasse pas partie intégrale de l'objectif du principal. Si nous n'avions pas recours à cette hypothèse et que le surplus du consommateur serait inclus dans l'objectif du principal, nous devrions alors faire des hypothèses supplémentaires sur la fonction de demande elle-même. Par exemple, nous devrions faire une hypothèse sur la courbure de la fonction, faire une hypothèse à savoir si la ressource possède un prix de réserve et si c'est le cas, faire une autre hypothèse sur le prix de réserve en question. En recourant à cette hypothèse, nous ne simplifions non seulement la résolution de notre problème, mais nous réduisons également le nombre d'hypothèses que nous devons poser.

2.1 *La période d'extraction*

En seconde période, l'objectif du principal est de maximiser (4) sujet à la contrainte physique de la ressource

$$0 \leq q \leq x, \tag{5}$$

et à la contrainte de participation des firmes

$$\Pi_2(\theta_2) \geq 0 \;\forall\; \theta_2 \in [\theta_2^L, \theta_2^H]. \tag{6}$$

Puisque $0 \leq \alpha < 1$, la solution consiste à choisir un niveau de redevances maximum compatible avec $\Pi_2(\theta_2) \geq 0$ pour tous les types de firmes ; ceci requiert que :

$$q^s(\theta_2, x) = \begin{cases} x & \text{si } \frac{1}{b}\left[p - \theta_2\right] \geq x & \text{(7a)} \\ \dfrac{1}{b}[p - \theta_2] & \text{si } \frac{1}{b}\left[p - \theta_2\right] < x \text{ et } p - \theta_2 > 0 & \text{(7b)} \\ 0 & \text{si } \theta_2 \geq p, & \text{(7c)} \end{cases}$$

où l'exposant « ^{s} » sur q représente le cas symétrique.

La dernière ligne, l'équation (7c), représente une situation où la ressource n'a aucune valeur économique. La seconde ligne, l'équation (7b), représente une situation où la ressource a une valeur économique, mais où la production est contrainte non par la rareté de la ressource, mais plutôt par les coûts de production. La première ligne, l'équation (7a), représente une situation de véritable rareté de la ressource ; la totalité des ressources découvertes est extraite. Bien que nos résultats demeurent valides sous des hypothèses moins restrictives, nous choisissons de nous concentrer sur le cas le plus approprié aux ressources naturelles non renouvelables, c'est-à-dire, le cas défini par (7a) ; cela implique que nous faisons l'hypothèse suivante :

$$p \geq \theta_2^H + bx^s(\theta_1^L).\text{[10]} \tag{8}$$

---

10. Il est possible de réécrire cette hypothèse comme étant $\frac{1}{b}\left[p - \theta_2^H\right] \geq x^s(\theta_1^L)$. Le côté gauche de cette dernière inégalité est la quantité optimale à extraire à une solution intérieure satisfaisant le principe du maximum pour le type de firme le moins efficace en extraction (voir l'équation 7b), alors que le côté droit est la quantité optimale de réserves mises au jour (donné plus loin par l'équation 13) pour le type de firme le plus efficace en exploration. Cette inégalité garantit que la quantité optimale à extraire à une solution intérieure sera nécessairement plus grande ou égale à la quantité de réserves mise au jour précédemment ; par conséquent, la quantité optimale à extraire est nécessairement une solution de coin donnée par l'équation (7a). En substituant $x^s(\theta_1^L)$ par sa valeur donnée par l'équation (13), on peut réécrire cette inégalité comme $\frac{1}{b}\left[p - \theta_2^H\right] \geq \frac{-\theta_1^L + \delta\left[p - \mathbb{E}[\theta_2]\right]}{c + \delta b}$. Le côté droit de cette dernière inégalité est la solution explicite pour le stock de réserves mis au jour par le type de firme ayant les meilleures habiletés technologiques en exploration. Cette hypothèse implique que nous traitons

Cette hypothèse dit que le prix exogène de la ressource (le coté gauche de l'équation 8) est supérieur, ou égal, au coût marginal d'extraction (le coté droit de l'équation 8) pour une firme qui extrait la totalité de son stock alors qu'elle a mis au jour la plus grande quantité de ressources possible dans la période précédente, $x^s(\theta_1^L)$, [11] et qu'elle possède le type le moins efficace en extraction, c'est-à-dire, θ_2^H. Ceci implique à son tour que, dans un contexte où l'information est symétrique, il sera optimal pour une firme d'extraire la totalité de son stock mis au jour, peu importe quelle combinaison de θ_1 et θ_2 elle obtient. Nous faisons donc l'hypothèse que la quantité optimale à extraire à une solution intérieure (qui est issue de la condition du premier ordre du problème de maximisation de seconde période du principal ; voir l'équation 7b) est telle que, lorsque les deux parties partagent la même information, cette solution intérieure sera supérieure au stock de réserves mis au jour en première période ; par conséquent, l'extraction optimale sera toujours une solution de coin donnée par l'équation (7a).

2.2 *La période d'exploration*

Durant la phase exploratoire, le principal veut maximiser (3), sujet à la contrainte

$$x \geq 0, \tag{9}$$

et à la contrainte de participation des firmes :

$$\Pi(\theta_1) \geq 0 \;\forall\; \theta_1 \in \; [\theta_1^L, \bar{\theta}_1^{i,j}].^{12} \tag{10}$$

Le paramètre $\bar{\theta}_1^{i,j} = \bar{\theta}_1^{s,s}$ définit la limite entre les firmes actives et les firmes inactives (pour lesquelles $x = 0$) dans le cas où les deux parties partagent la même information concernant la structure de coûts des firmes, si et seulement si $\bar{\theta}_1^{s,s} \leq \theta_1^H$; autrement la borne maximale est remplacée par θ_1^H.

Puisque la contribution de la période d'extraction aux profits totaux est nulle, c'est-à-dire puisque $\Pi_2(\theta_2) = 0 \;\forall\; \theta_2 \in [\theta_2^L, \theta_2^H]$, les seuls facteurs qui influencent le surplus espéré des producteurs sont les coûts d'exploration ainsi que la rede-

---

d'un problème où, en absence d'asymétrie d'information, une firme qui possède n'importe quelle combinaison de θ_1 et θ_2 est contrainte non par son coût de production (comme ce serait le cas s'il était optimal pour cette firme d'extraire une quantité donnée par l'équation 7b), mais plutôt par son stock de réserves (comme c'est le cas s'il est optimal pour cette firme d'extraire une quantité donnée par l'équation 7a). En recourant à cette hypothèse, nous ne simplifions non seulement l'analyse de notre cas de référence – le cas où l'information est symétrique – mais également la comparaison entre les cas asymétriques et le cas symétrique. Puisque nous sommes intéressés aux différences relatives entre les cas asymétriques et le cas symétrique, cette hypothèse ne fait que simplifier notre tâche, aider à l'intuition derrière les résultats et ne change pas nos résultats qualitatifs.

11. Cette quantité de stock maximale est définie ci-dessous par l'équation (13).

12. Au cours du papier, nous référons à cette équation. Bien que la borne minimale demeure la même – c'est-à-dire θ_1^L – tout au cours du papier, la borne maximale dépend du contexte informationnel. Les indices i et j représentent ici soit un contexte de symétrie d'information ($i, j = s$), ou un contexte d'asymétrie d'information ($i, j = a$) en période 1 et 2 respectivement.

vance de la première période ; ceci implique que $\Pi(\theta_1) = -C_1(x, \theta_1) - R_1$. Afin de maximiser les redevances, le principal doit donc assurer que $\Pi(\theta_1) = 0 \; \forall \; \theta_1 \in [\theta_1^L, \bar{\theta}_1^{s,s}]$, ce qui implique que la décision optimale en première période consiste à offrir une subvention aux firmes équivalente à leurs coûts d'exploration. Étant donné ceci, le problème auquel fait face le principal en période 1, donné par l'équation (3), peut être réécrit comme

$$\underset{x}{\text{Max}} \quad -\theta_1 x - \frac{c}{2}x^2 + \delta \Gamma^s(x) \quad \text{s.c.} \quad \text{(9) et (10),} \tag{11}$$

où $\Gamma^s(x) \equiv \int_{\theta_2^L}^{\theta_2^H} \left[pq^s(\theta_2, x) - \theta_2 q^s(\theta_2, x) - \frac{b}{2} q^s(\theta_2, x)^2 \right] f(\theta_2) \mathrm{d}\theta_2$ est la redevance espérée de la période d'extraction et où $q^s(\theta_2, x) = x$ en raison de l'hypothèse (8). La condition de premier ordre pour une solution intérieure satisfait,

$$\theta_1 + cx = \delta \left[p - \mathbb{E}[\theta_2] - bx \right]. \tag{12}$$

Cette équation dicte qu'à l'optimum, le coût marginal d'exploration (le côté gauche de 12) doit égaler la rente marginale espérée actualisée d'extraire exactement $q^s(\theta_2, x) = x$ (le côté droit de 12). Nous référerons à cette équation comme étant la règle de « coût marginal d'exploration = rente marginale espérée ».

En isolant pour x, nous obtenons

$$x^s(\theta_1) = \frac{-\theta_1 + \delta \left[p - \mathbb{E}[\theta_2] \right]}{c + \delta b}, \tag{13}$$

où $x^s(\cdot)$ dénote le montant optimal de stock de réserves à mettre au jour quand il y a symétrie d'information entre les deux parties concernant la structure de coûts en phase d'exploration et en phase d'extraction.

Si une firme détient un paramètre de coût θ_1 tel que $\theta_1 \geq \bar{\theta}_1^{s,s}$, où $\bar{\theta}_1^{s,s} = \delta \left[p - \mathbb{E}[\theta_2] \right]$, alors un contrat de redevance non profitable est offerte à cette firme ce qui la pousse à ne pas participer et donc à ne pas mettre au jour un stock de ressources. Par conséquent, $\bar{\theta}_1^{s,s}$ est la valeur critique qui délimite les firmes profitables des firmes non profitables ; si $\delta \left[p - \mathbb{E}[\theta_2] \right] > \theta_1^H$, alors $\bar{\theta}_1^{s,s} = \theta_1^H$, ce qui à son tour implique que (13) s'applique à toutes les firmes.

3. Le cas asymétrique

Cette section traite de la question lorsqu'il y a asymétrie d'information dans l'une ou l'autre des activités des firmes. Quand les firmes ont un avantage informationnel, le paramètre θ_t pour lequel ils possèdent de l'information privée est révélé à la firme au début de la période t, mais il n'est pas révélé au principal. Le problème est modélisé comme un jeu de révélation direct ce qui veut dire que le principal choisit un mécanisme d'incitation qui prend la forme d'un menu de contrat en paire $\left(R_1(\tilde{\theta}_1), x(\tilde{\theta}_1) \right)$ qui s'applique à la première période lorsque la firme a un avantage informationnel dans son activité d'exploration, et qui prend la forme d'une paire $\left(R_2(\tilde{\theta}_2, x), q(\tilde{\theta}_2, x)\right)$ qui s'applique à la seconde période lorsque la firme a un avantage informationnel dans son activité d'extraction. Les paramètres $\tilde{\theta}_1$ et $\tilde{\theta}_2$ représentent les valeurs déclarées volontairement par les firmes. Ceci a deux implications majeures. Premièrement, nous devons trouver une solution à boucle fermée ce qui implique que la solution pour le mécanisme d'incitation en période 2 n'est pas déterminée en période 1, mais plutôt en période 2 une fois que le stock a été mis au jour ; donc $R_2(\cdot)$ et $q(\cdot)$ sont des fonctions de x. Deuxièmement, si le principal était capable de s'engager au-delà d'une période, il serait possible pour lui de priver la firme de son avantage informationnel en période 2. Pour ce faire, il devrait s'engager avec la firme en période 1 à un contrat pour l'extraction future ; ce contrat serait signé avant que la firme n'apprenne θ_2. Dans un tel cas, $R_2(\cdot)$ et $q(\cdot)$ seraient alors spécifiés de sorte qu'aucun profit d'extraction ne soit laissé à la firme. Nous considérons plus en détail les implications de la possibilité pour le principal de s'engager sur plusieurs périodes dans la sous-section 4.3.

Selon le principe de révélation, [13] nous pouvons restreindre notre analyse en nous limitant aux mécanismes révélateurs. Un mécanisme révélateur incite les firmes à révéler leur information privée correctement ; ces mécanismes sont tels que $\tilde{\theta}_t = \theta_t$. En plus de ces contraintes de compatibilité incitatives, le principal fait aussi face aux contraintes de participation des firmes et celles de la non-renouvelabilité de la ressource. [14]

3.1 *Asymétrie en extraction seulement*

Nous présentons d'abord le cas où il y a asymétrie d'information en extraction seulement. Cette sous-section est divisée en quatre parties. Puisque nous devons trouver une solution à boucle fermée, nous commençons par la période d'extraction en prenant la quantité de réserves mise au jour comme donnée. Par la suite, nous montrons quelles implications a l'asymétrie d'information en période d'extraction sur les réserves mises au jour. Nous présentons ensuite les résultats d'une simulation numérique. Pour terminer, nous démontrons comment l'ajout d'une seconde période d'extraction renforce nos résultats.

3.1.1 *La période d'extraction*

Le contrat offert par le principal en seconde période dépend de la quantité découverte par la firme durant la phase exploratoire. Posons $\Phi(\tilde{\theta}_2, \theta_2; x)$ comme étant le surplus de la firme en période d'extraction si elle déclare au principal $\tilde{\theta}_2$

13. Voir Baron et Myerson (1982) ou Baron (1989).

14. Si x est la quantité découverte au cours de la période d'extraction, alors la quantité extraite dans la période suivante, q, ne peut surpasser x : $q \leq x$.

alors que θ_2 est son vrai paramètre de coût et qu'elle détient les droits à un stock d'une quantité x ; son surplus est alors donné par :

$$\Phi(\tilde{\theta}_2, \theta_2; x) = pq(\tilde{\theta}_2, x) - \theta_2 q(\tilde{\theta}_2, x) - \frac{b}{2} q(\tilde{\theta}_2, x)^2 - R_2(\tilde{\theta}_2, x). \tag{14}$$

Afin de s'assurer que la firme révèle ses coûts d'extraction de façon véridique, le mécanisme révélateur doit s'assurer que la firme maximise son surplus quand elle décide volontairement de déclarer $\tilde{\theta}_2 = \theta_2$. Ceci est possible lorsque,

$$\Phi_1(\tilde{\theta}_2, \theta_2; x) = 0 \quad \text{pour } \tilde{\theta}_2 = \theta_2, \tag{15}$$

ou

$$\left[p - \theta_2 - bq(\tilde{\theta}_2, x)\right] \frac{\partial q(\tilde{\theta}_2, x)}{\partial \tilde{\theta}_2} - \frac{\partial R_2(\tilde{\theta}_2, x)}{\partial \tilde{\theta}_2} = 0 \quad \text{pour } \tilde{\theta}_2 = \theta_2, \tag{16}$$

et

$$\Phi_{11}(\tilde{\theta}_2, \theta_2; x) \leq 0 \quad \text{pour } \tilde{\theta}_2 = \theta_2, \tag{17}$$

où Φ_1 et Φ_{11} représentent respectivement la première et seconde dérivée partielle par rapport au premier argument de la fonction de surplus de la firme $\Phi(\tilde{\theta}_2, \theta_2; x)$.

Puisque ces conditions doivent tenir pour tous les types de firmes, la différentielle totale (en forçant $\tilde{\theta}_2 = \theta_2$) nous donne

$$\frac{\partial q(\theta_2, x)}{\partial \theta_2} \leq 0. \tag{18}$$

Cette condition implique que sous ce mécanisme révélateur, une firme ayant un coût marginal d'extraction plus élevée ne doit pas extraire une plus grande quantité qu'une firme ayant un coût marginal inférieur.

Faisant face au contrat décrit ci-dessus, une firme de type θ_2 va donc intentionnellement choisir de révéler son type en choisissant $\tilde{\theta}_2 = \theta_2$; ceci implique que nous pouvons réécrire son surplus comme étant :

$$\Pi_2(\theta_2; x) \equiv \Phi(\theta_2, \theta_2; x). \tag{19}$$

Par le théorème de l'enveloppe,

$$\frac{\partial \Pi_2(\theta_2; x)}{\partial \theta_2} = -q(\theta_2, x). \tag{20}$$

De plus, il est possible qu'il ne soit pas dans l'avantage du principal d'offrir un contrat à tous les types de firmes ; certains sites exploratoires pourraient être abandonnés. Dans un tel cas, le principal exclut ces firmes (ou sites) inefficaces ce qui implique qu'il ne doit pas assurer ni les contraintes de compatibilité incitative ni les contraintes de participation pour ces types. L'ensemble des contraintes de participation qui s'applique aux firmes actives est donc donné par :

$$\Pi_2(\theta_2;x) \geq 0 \; \forall \; \theta_2 \in [\theta_2^L, \bar{\theta}_2^{s,a}], \tag{21}$$

où $\bar{\theta}_2^{s,a} \leq \theta_2^H$ est la valeur critique de θ_2 qui délimite les firmes actives des firmes inactives dans la période d'extraction lorsqu'il y asymétrie d'information seulement en période 2. [15] Puisque $\Pi_2(\theta_2;x)$ est une fonction décroissante de θ_2 en raison de (20), l'ensemble des contraintes participatives peut être réécrite comme une seule condition :

$$\Pi_2(\bar{\theta}_2^{s,a};x) \geq 0. \tag{22}$$

L'objectif du principal est donc de maximiser :

$$\begin{aligned} &\underset{R_2(\cdot,\cdot),q(\cdot,\cdot),\bar{\theta}_2^{s,a}}{\text{Max}} \quad \int_{\theta_2^L}^{\bar{\theta}_2^{s,a}} \Big\{ R_2(\theta_2,x) + \alpha \Pi_2(\theta_2;x) \Big\} f(\theta_2) \mathrm{d}\theta_2 \\ &\text{s.c.} \qquad (5),(14),(18),(19),(20) \text{ et } (22). \end{aligned} \tag{23}$$

En utilisant (14) et (19),

$$R_2(\theta_2,x) = pq(\theta_2,x) - \theta_2 q(\theta_2,x) - \frac{b}{2} q(\theta_2,x)^2 - \Pi_2(\theta_2;x), \tag{24}$$

le problème peut être réécrit avec une variable de contrôle en moins :

$$\begin{aligned} &\underset{q(\cdot,\cdot),\bar{\theta}_2^{s,a}}{\text{Max}} \quad \int_{\theta_2^L}^{\bar{\theta}_2^{s,a}} \Big\{ pq(\theta_2,x) - \theta_2 q(\theta_2,x) - \frac{b}{2} q(\theta_2,x)^2 - (1-\alpha)\Pi_2(\theta_2;x) \Big\} f(\theta_2) \mathrm{d}\theta_2 \\ &\text{s.c.} \qquad (5),(18),(20) \text{ et } (22). \end{aligned} \tag{25}$$

Ce problème peut être résolu en utilisant des techniques de contrôle optimal ; l'espace dans lequel le principal optimise est θ_2, Π_2 est la variable d'état et q est la variable de contrôle. La borne minimale θ_2^L est donnée alors que la borne maximale $\bar{\theta}_2^{s,a}$ est libre sujet à $\theta_2^L \leq \bar{\theta}_2^{s,a} \leq \theta_2^H$. Laissant de côté temporairement la contrainte de monotonicité (18), l'Hamiltonien $\mathscr{H}(\Pi_2, q, \mu_2, \theta_2)$ peut être formulé comme étant,

15. Cette valeur critique n'était pas pertinente dans le cas symétrique, c'est-à-dire $\bar{\theta}_2^{s,s} \geq \theta_2^H$, puisque nous avions fait l'hypothèse (l'équation 8) qui assurait l'épuisement du stock pour tous les types de firmes.

$$\mathscr{H}(\cdot) = \Big[pq(\theta_2,x) - \theta_2 q(\theta_2,x) - \frac{b}{2}q(\theta_2,x)^2\Big] f(\theta_2) - \mu_2(\theta_2)q(\theta_2,x)$$
$$- (1-\alpha)\Pi_2(\theta_2;x)f(\theta_2),$$

où μ_2 est la variable associée à Π_2.

Une solution intérieure satisfaisant le principe du maximum est donnée par :

$$\frac{\partial \mathscr{H}}{\partial q} = 0 \implies [p-\theta_2]f(\theta_2) - \mu_2(\theta_2) - bq(\theta_2,x)f(\theta_2) = 0. \tag{26}$$

De plus, la trajectoire de la variable associée doit suivre,

$$\dot{\mu}_2 = -\frac{\partial \mathscr{H}}{\partial \Pi_2} \implies \dot{\mu}_2 = (1-\alpha)f(\theta_2). \tag{27}$$

En intégrant cette condition,

$$\mu_2(\theta_2) = \int_{\theta_2^L}^{\theta_2} (1-\alpha)f(\theta_2)\mathrm{d}\theta_2 + \mu_2(\theta_2^L)$$
$$= (1-\alpha)F(\theta_2),$$

où la dernière ligne suit par la condition de transversalité $\mu_2(\theta_2^L) = 0$ qui s'applique à θ_2^L puisque $\Pi_2(\theta_2^L)$ est libre. En substituant ceci dans (26) et en divisant par $f(\theta_2)$ donne

$$p = \theta_2 + bq(\theta_2,x) + (1-\alpha)h(\theta_2), \tag{28}$$

où $h(\theta_2) = \frac{F(\theta_2)}{f(\theta_2)}$ est le taux d'incident ; nous faisons l'hypothèse que $h(\theta_2)$ est positivement monotone, de sorte que la condition (18) est nécessairement satisfaite.[16] Tout comme dans la plupart des modèles avec antisélection, le coût marginal est augmenté relativement à la situation de pleine information par le *coût marginal de compatibilité incitatif courant* $(1-\alpha)h(\theta_2)$; ceci affecte tous les types de firmes, excepté le plus efficace pour lequel $h(\theta_2^L) = 0$.

En isolant pour $q(\cdot)$ dans l'équation (28) nous obtenons la quantité optimale extraite qui satisfait une solution intérieure, c'est-à-dire, quand une firme abandonne une partie de ses réserves mise au jour à la fin de l'entente ; cette solution intérieure est donnée ci-dessous par (29b). De façon plus générale, la quantité optimale extraite est définie comme étant :

16. Voir Laffont et Martimort (2002), particulièrement le chapitre 3 pour le rôle de la condition du taux d'incident (hazard rate) et les conditions de Spence-Mirlees qui y sont liées.

$$q^a(\theta_2,x) = \begin{cases} x & \text{si } \frac{1}{b}\left[p-\theta_2-(1-\alpha)h(\theta_2)\right] \geq x \quad \text{(29a)} \\ \dfrac{1}{b}[p-\theta_2 & \text{si } \frac{1}{b}\left[p-\theta_2-(1-\alpha)h(\theta_2)\right] < x \quad \text{(29b)} \\ \quad -(1-\alpha)h(\theta_2)] & \\ 0 & \text{si } \theta_2 \geq p-(1-\alpha)h(\theta_2). \quad \text{(29c)} \end{cases}$$

Le principal doit de plus choisir l'ensemble des firmes qui sera exclu de l'entente contractuelle; il y parvient en choisissant $\bar{\theta}_2^{s,a}$. Étant donné que le type de firme le plus efficace ne sera pas exclu, le choix du principal est contraint seulement à $\bar{\theta}_2^{s,a} \leq \theta_2^H$. La condition de transversalité qui s'applique est $\mathscr{H}(\cdot) = 0$ si $\bar{\theta}_2^{s,a} < \theta_2^H$ et $\mathscr{H}(\cdot) \geq 0$ si $\bar{\theta}_2^{s,a} = \theta_2^H$. Puisque les équations données en (29) doivent aussi tenir pour $\theta_2 = \bar{\theta}_2^{s,a}$, il s'ensuit que (29b) doit égaler zéro si $\bar{\theta}_2^{s,a} < \theta_2^H$ et donc $\bar{\theta}_2^{s,a}$ est défini par la condition

$$\bar{\theta}_2^{s,a} = \min\left\{\theta_2^H, [\theta_2 | \theta_2 = p-(1-\alpha)h(\theta_2)]\right\}. \tag{30}$$

Comparé au cas de référence où l'information est symétrique, l'asymétrie d'information implique donc que certaines firmes peuvent être complètement inactives ($\bar{\theta}_2^{s,a} \leq \theta_2 \leq \theta_2^H$) malgré une quantité positive de réserves en période 1 (équation 29c) ; si c'est le cas, alors d'autres types de firmes, plus productifs, vont abandonner une partie de leurs réserves après une extraction partielle (équation 29b). Cette possibilité survient en dépit de l'hypothèse (8) qui assure que toutes découvertes mises au jour seront épuisées en situation de pleine information. [17] Ce résultat, assez standard dans la littérature, est résumé dans la proposition suivante :

Proposition 1. *Considérons une industrie d'extraction où en situation de pleine information le principal demande à tous les types de firmes d'épuiser les réserves mises au jour. L'asymétrie d'information dans l'activité d'extraction peut entraîner une situation où le principal demande à certaines firmes d'abandonner une partie des réserves qu'elles ont mises au jour. Quand $\bar{\theta}_2^{s,a} < \theta_2^H$, les réserves des firmes de type θ_2 tel que $\bar{\theta}_2^{s,a} \leq \theta_2 \leq \theta_2^H$ sont complètement abandonnées, alors que les réserves de certaines firmes de type $\theta_2 \leq \bar{\theta}_2^{s,a}$ sont partiellement exploitées.*

3.1.2 *La période d'exploration*

Pour le moment, il n'y a aucun besoin pour un mécanisme révélateur pour la période d'exploration puisque nous sommes dans le cas où il y a symétrie d'information dans l'activité d'exploration. Le problème auquel fait face le principal

17. L'équation (29c) ne s'applique pas puisqu'elle correspond aux valeurs de θ_2 au-dessus de $\bar{\theta}_2^{s,a}$. Cependant, puisqu'elle prescrit le même niveau d'extraction ($q = 0$) qui s'applique aux firmes exclues, il est possible de dire que les équations (29) s'appliquent à l'ensemble des types, qu'ils soient actifs ou non durant la période d'extraction.

est donné par (3) sujet à la contrainte de non-négativité de la ressource (9) et à la contrainte de participation des firmes (10) (où $i = s$ et $j = a$).[18]

Toutefois, comparé à la situation de pleine information dans la sous-section 2.2, il y a un élément additionnel qui influence le surplus total espéré du producteur : la possibilité que la firme obtienne un surplus positif durant la période d'extraction. Ceci est dû au mécanisme révélateur de la seconde période décrit ci-dessus. Le surplus total espéré d'une firme est

$$\Pi(\theta_1) = -\theta_1 x(\theta_1) - \frac{c}{2}x(\theta_1)^2 + \delta\Psi\big(x(\theta_1)\big) - R_1(\theta_1), \tag{31}$$

où

$$\Psi(x) \equiv \int_{\theta_2^L}^{\bar{\theta}_2^{s,a}} \Pi_2(\theta_2;x) f(\theta_2)\mathrm{d}\theta_2, \tag{32}$$

et où les valeurs de $\bar{\theta}_2^{s,a}$ et de $\Pi_2(\cdot)$ sont celles établies ci-dessus. Ceci implique que pour maximiser les redevances, le principal doit offrir un menu de contrat tel que $\Pi(\theta_1) = 0 \ \forall \ \theta_1 \in [\theta_1^L, \bar{\theta}_1^{s,a}]$ ce qui à son tour implique que $R_1(\theta_1) = -\theta_1 x(\theta_1) - \frac{c}{2}x(\theta_1)^2 + \delta\Psi(x)$ et donc que le problème auquel fait face le principal, donné par l'équation (3), peut être réécrit comme étant une maximisation point part point :

$$\begin{aligned} &\underset{x(\cdot),\bar{\theta}_1^{s,a}}{\text{Max}} \quad \int_{\theta_1^L}^{\bar{\theta}_1^{s,a}} \Big\{ -\theta_1 x - \frac{c}{2}x^2 + \delta\big[\Psi(x) + \Gamma^{s,a}(x)\big]\Big\} g(\theta_1)\mathrm{d}\theta_1 \\ &\text{s.c.} \qquad (9) \text{ et } (10); \end{aligned} \tag{33}$$

où $\Gamma^{s,a}(x)$ représente la redevance espérée quand il y a asymétrie d'information en période 2 seulement :

$$\Gamma^{s,a}(x) = \int_{\theta_2^L}^{\bar{\theta}_2^{s,a}} \Big[pq^a(\theta_2,x) - \theta_2 q^a(\theta_2,x) - \frac{b}{2}q^a(\theta_2,x)^2\Big] f(\theta_2)\mathrm{d}\theta_2 - \Psi(x), \tag{34}$$

et où $q^a(\theta_2,x)$ et $\bar{\theta}_2^{s,a}$ sont respectivement donnés par (29) et (30).

Le montant optimal de réserves à mettre au jour pour une firme de type θ_1 doit être tel que :

$$\Big[-\theta_1 + \delta\Big[\frac{\partial\Psi(x)}{\partial x} + \frac{\partial\Gamma^{s,a}(x)}{\partial x}\Big]\Big] g(\theta_1) - cx(\theta_1)g(\theta_1) = 0. \tag{35}$$

18. La valeur $\bar{\theta}_1^{s,a}$ sépare les firmes actives des firmes inactives quand θ_1 est connu des deux parties et que θ_2 est seulement connu par l'agent au début de la période 2. Tout comme dans la situation de pleine information, cette contrainte sur la borne supérieure s'applique seulement si $\bar{\theta}_1^{s,a} \leq \theta_1^H$, autrement elle est remplacée par θ_1^H.

Notons que $\Psi(\cdot)$ entre additivement dans (34) de sorte que le terme entre crochets dans (35) réduit à

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Psi(x)}{\partial x}+\frac{\partial \Gamma^{s,a}(x)}{\partial x} &= \int_{\theta_2^L}^{\hat{\theta}^a(x)} \Big[p-\theta_2-bx\Big] f(\theta_2)\mathrm{d}\theta_2 \\ &+ \int_{\hat{\theta}^a(x)}^{\bar{\theta}_2^{s,a}} \Big[p-\theta_2-bq\Big] \frac{\partial q^a(\theta_2,x)}{\partial x} f(\theta_2)\mathrm{d}\theta_2,\end{aligned} \tag{36}$$

où l'intégrale dans (34) a été divisé en deux parties qui correspond à la valeur $q^a(\cdot,\cdot)$ implicitement définie par (29). Cette équation exprime l'effet d'un changement marginal en x sur les redevances nettes espérées comme étant une somme de deux valeurs espérées. La première intégrale s'applique si une firme est relativement efficace en extraction de sorte qu'elle épuisera son stock (équation 29a). La seconde intégrale s'applique aux types de firmes relativement moins efficaces, types de firme définis sur l'intervalle $[\hat{\theta}^a(\cdot),\bar{\theta}_2^{s,a}]$, qui abandonneront une partie de leur découverte (équation 29b). Ceci implique donc que $\hat{\theta}^a(\cdot)$ est défini comme étant la valeur de θ_2 faisant la transition entre (29a) et (29b) :

$$\frac{1}{b}\big[p-\hat{\theta}^a(\cdot)-(1-\alpha)h\big(\hat{\theta}^a(\cdot)\big)\big]=x. \tag{37}$$

Pour le moment, nous supposons $\hat{\theta}^a(\cdot)<\theta_2^H$; nous dirons que « la solution pour $\hat{\theta}^a(\cdot)$ est intérieure », ou bien que $\hat{\theta}^a(\cdot)\in[\theta_2^L,\theta_2^H)$. Si $\hat{\theta}^a(\cdot)\in[\theta_2^L,\theta_2^H)$, cela veut dire qu'il est possible, étant donné un certain niveau de $x^{s,a}(\theta_1)$, que la firme n'épuise pas l'entièreté de son stock de réserve mis au jour. De plus, si la solution pour $\hat{\theta}^a(\cdot)$ est intérieure, alors $\hat{\theta}^a(\cdot)$ est décroissant en x étant donnée la propriété du taux d'incident $h(\cdot)$.

Puisque $\frac{\partial q^a(\theta_2,x)}{\partial x}=0$ par l'équation (29b), et en divisant par $g(\theta_1)$, l'équation (35) peut être réécrite comme

$$\theta_1+cx=\delta\Big[p-\mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2\leq\hat{\theta}^a(x)\right]-bx\Big]F\big(\hat{\theta}^a(x)\big). \tag{38}$$

Cette condition est une version modifiée de la règle « coût marginal d'exploration = rente marginale espérée », donnée par (12), qui elle tient en situation de pleine information. Le côté droit de cette équation, la rente marginale espérée, est modifié comparé au cas symétrique parce que les réserves découvertes peuvent être partiellement ou complètement abandonnées si une firme obtient un type θ_2 tel que $\theta_2\geq\hat{\theta}^a(\cdot)$ dans la période d'extraction. Le côté gauche de cette équation est identique au cas symétrique.

Afin de comparer le montant mis au jour dans ce scénario, $x^{s,a}(\theta_1)$, avec celui mis au jour sous pleine information, $x^s(\theta_1)$, réarrangeons (38) comme

$$\theta_1 + cx = \delta\left[p - \mathbb{E}[\theta_2] - bx\right] - \delta\Big(1 - F\big(\hat{\theta}^a(x)\big)\Big)\Big[p - \mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 > \hat{\theta}^a(x)\right] - bx\Big],$$

ce qui implique que

$$x^{s,a}(\theta_1) = x^s(\theta_1) + \frac{-\delta\Big(1 - F\Big(\hat{\theta}^a\big(x^{s,a}(\theta_1)\big)\Big)\Big)\Big[p - \mathbb{E}\Big[\theta_2|\theta_2 > \hat{\theta}^a\big(x^{s,a}(\theta_1)\big)\Big] - bx^{s,a}(\theta_1)\Big]}{c + \delta b}, \tag{39}$$

définit implicitement la quantité de réserves optimales ; $x^s(\theta_1)$ et $\hat{\theta}^a(\cdot)$ sont définis par (13) et (37) respectivement.

Par (37), la différence entre $x^{s,a}(\theta_1)$ et $x^s(\theta_1)$ est strictement positive. Si la solution pour $\hat{\theta}^a(\cdot)$ est intérieure, il est certain que $x^{s,a}(\theta_1) > x^s(\theta_1)$ pour tout $\theta_1 \in [\theta_1^L, \bar{\theta}_1^{s,a}]$ ce qui implique que tous les types de firmes sont requis de mettre au jour plus de réserves qu'il ne serait optimal sous pleine information. Par contre, au fur et à mesure que θ_1 augmente, le terme additionnel diminue puisque $\hat{\theta}^a(\cdot)$ augmente [19] démontrant le fait que les réserves mises au jour ont une plus grande probabilité d'être épuisées si une plus petite quantité est mise au jour.

Le principal n'a pas besoin de se fier à la firme pour connaître θ_1 ce qui fait qu'il n'y a aucun coût relié à la révélation de θ_1. Toutefois, une firme va profiter de son information privée en période 2, ce qui fait que les revenus espérés du principal diffèrent comparativement à la situation de pleine information ; ceci est une implication directe de la comparaison entre (12) et (38). Les deux parties savent en période 1 que la firme va se faire concéder une rente informationnelle en période 2 ; cette rente sera non seulement déterminé par θ_2 mais également par le niveau de réserves qu'elle détiendra à ce moment-là. Par conséquent, le principal doit tenir compte aussitôt qu'en période 1 de l'effet des réserves sur cette rente ; des réserves plus élevées réduisent la valeur marginale de cette rente informationnelle ce qui implique qu'il est dans l'intérêt du principal de demander aux firmes de mettre au jour une quantité au-delà de celle qui est efficace au sens de Pareto. Nous avons établi le résultat suivant.

Proposition 2. *Étant donné un certain niveau de $x^{s,a}(\theta_1)$, si $\hat{\theta}^a(\cdot) \in [\theta_2^L, \theta_2^H)$, l'asymétrie d'information a comme conséquence que toutes les firmes seront prescrites de mettre au jour un plus grand stock de réserves comparativement à la situation Pareto optimale en pleine information.*

La nécessité de l'intériorité de $\hat{\theta}^a(\cdot)$ est cruciale pour la signifiance théorique de la proposition 2. Si $\hat{\theta}^a(\cdot) = \theta_2^H$, l'équation (39) réduit à (13), c'est-à-dire $x^{s,a}(\theta_1) = x^s(\theta_1)$, ce qui implique que l'asymétrie d'information en extraction n'a aucun effet sur l'activité d'exploration.

19. $\hat{\theta}^a(\cdot)$ est décroissant en x et $x^{s,a}(\theta_1)$ est décroissant en θ_1.

Sous les conditions de la proposition 2, la sélection adverse en extraction affecte les revenus que la firme génère de son entente avec le principal, comme le démontre le côté droit de l'équation (38). Cet avantage informationnel que la firme possède génère une rente à sa faveur ; la firme peut augmenter cette rente en générant davantage de réserves. La possibilité que certains types $\theta_2 \geq \hat{\theta}^a(\cdot)$ ne produisent pas au maximum de leur capacité en période 2 augmente le revenu marginal espéré d'une unité de réserves obtenue en période 1.

Les conditions à établir pour l'intériorité de $\hat{\theta}^a(\cdot)$ sont difficiles à définir analytiquement, car $\hat{\theta}^a(\cdot)$ est conditionnel à x, qui lui-même dépend de θ_1 ; donc $x(\cdot)$ et $\hat{\theta}^a(\cdot)$ résolvent conjointement (37) et (38) pour chacune des valeurs de θ_1. Considérons $\hat{\theta}^a\left(x^{s,a}(\theta_1^L)\right)$. Puisque $x^{s,a}(\theta_1)$ est une fonction décroissante et considérant (37), alors il est certain que $\hat{\theta}^a\left(x^{s,a}(\theta_1)\right) \notin [\theta_2^L, \theta_2^H)\ \forall\ \theta_1 \in (\theta_1^L, \theta_1^H]$ si $\hat{\theta}^a\left(x^{s,a}(\theta_1^L)\right) \notin [\theta_2^L, \theta_2^H)$. Donc, l'intériorité de $\hat{\theta}^a\left(x^{s,a}(\theta_1^L)\right)$, c'est-à-dire $\hat{\theta}^a\left(x^{s,a}(\theta_1^L)\right) \in [\theta_2^L, \theta_2^H)$, est nécessaire pour satisfaire les conditions de la proposition 2. La solution pour $\hat{\theta}^a\left(x^{s,a}(\theta_1^L)\right)$ est intérieure si la valeur définie par (37) est inférieur à θ_2^H ; ceci impliquerait que

$$p \leq \theta_2^H + (1-\alpha)h(\theta_2^H) + bx^s(\theta_1^L).^{20} \tag{40}$$

Si cette condition tient avec égalité, alors elle est violée pour toute autre valeur de θ_1, c'est-à-dire, $p > \theta_2^H + (1-\alpha)h(\theta_2^H) + bx^s(\theta_1)\ \forall\ \theta_1 \in (\theta_1^L, \theta_1^H]$, ce qui implique donc que $x^{s,a}(\theta_1^L) = x^s(\theta_1^L)$ par l'équation (39). Si cette inégalité tient strictement alors il est certain que la solution pour $\hat{\theta}^a(\cdot)$ est intérieure pour certaines valeurs de θ_1.[21] Une condition nécessaire et suffisante pour que la proposition 2 s'applique est donc donnée par l'équation (40).[22]

3.1.3 *Simulation numérique*

À des fins démonstratives, nous avons fait une simulation numérique de notre problème en recourant à des distributions uniformes pour θ_1 et θ_2 ; dans un tel cas $\left(1 - F\left(\hat{\theta}^a(\cdot)\right)\right) = \frac{\theta_2^H - \hat{\theta}^a(\cdot)}{\theta_2^H - \theta_2^L}$. Nous utilisons la collocation pseudospectrale (Garg *et al.*, 2010).[23] Cette méthode nous donne la trajectoire optimale du stock de ré-

20. L'hypothèse (8) assure qu'en pleine information la différence entre le prix et le coût marginal d'extraction est non négative pour tous les types de firmes. La condition (40) dit que cette différence n'est pas suffisamment élevée, de sorte que le coût marginal de compatibilité incitatif courant est plus important que cette différence pour au moins un type de firme, le moins efficace θ_2^H ; c'est-à-dire $(1-\alpha)h(\theta_2^H) \geq p - \left(\theta_2^H + bx^s(\theta_1^L)\right)$. Cette condition garantit que $\hat{\theta}^a\left(x^{s,a}(\theta_1^L)\right) \in [\theta_2^L, \theta_2^H)$.

21. Ceci peut également être prouvé par contradiction : si $\hat{\theta}^a(\cdot) = \theta_2^H$ pour toute valeur de θ_1, alors $x^{s,a}(\theta_1) = x^s(\theta_1)\ \forall\ \theta_1$, ce qui contredirait la stricte inégalité $p < \theta_2^H + (1-\alpha)h(\theta_2^H) + bx^s(\theta_1^L)$.

22. On peut vérifier que cette condition est compatible avec l'hypothèse (8) qui assure l'épuisement des réserves en pleine information.

23. Voir Sanchirico et Springborn (2011) et Fuller *et al.* (2017) pour des exemples qui utilisent cette technique.

serves mis au jour et celle du surplus des firmes en approximant le problème de contrôle optimal avec des méthodes d'optimisation non linéaire ; le stock de réserves mis au jour est approximé par un polynôme entre θ_1^L et $\bar{\theta}_1^{s,a}$. Nous laissons l'algorithme déterminer la borne maximale, $\bar{\theta}_1^{s,a}$, de façon optimale. La collocation pseudospectrale permet d'intégrer directement dans le problème de maximisation les contraintes sur les variables de contrôle et d'état (Judd, 1998). Les résultats ont été obtenus en ayant recours à TOMLAB (version 8.4) (Holmström, 2001 ; Holmström *et al.*, 2008), accompagné de son outil PROPT (Rutquist et Edvall, 2010) ; l'optimisation non linéaire est résolue en utilisant KNITRO.

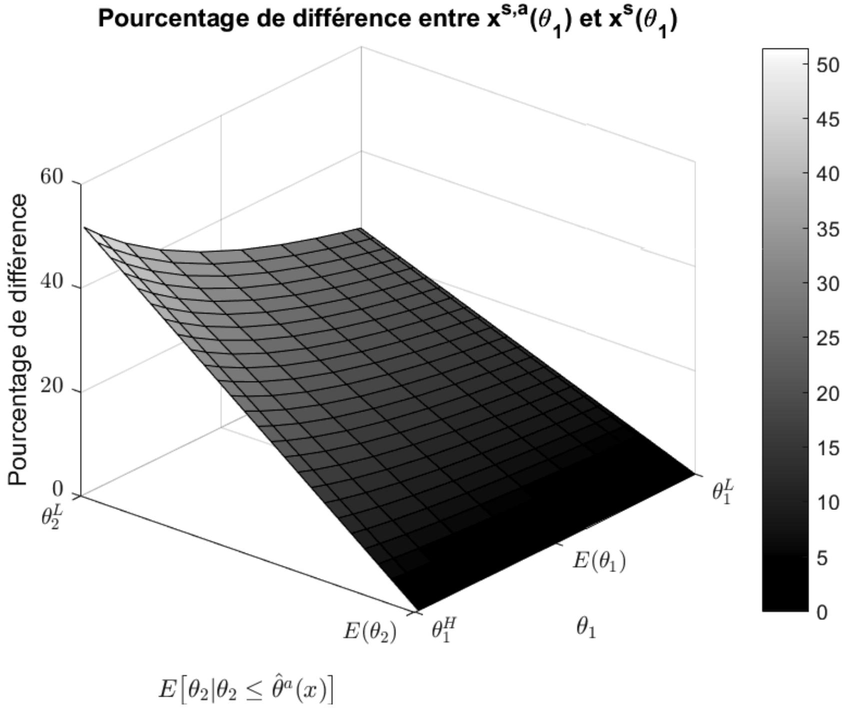
Les paramètres choisis pour la simulation sont $c = 2$, $b = 2$, $\alpha = 0.25$, $\delta = \frac{1}{1.04}$ et $p = 250$; les paramètres d'efficacité des firmes, θ_1 et θ_2, sont définis sur les ensembles $\theta_1 \in [0, 100]$ et $\theta_2 \in [0, 100]$. Les paramètres ont été choisis tels que l'hypothèse (8) et la condition (40) sont satisfaites ; notons qu'étant donné ces paramètres, $\bar{\theta}_1^{s,s} = \bar{\theta}_1^{s,a} = \theta_1^H$, c'est-à-dire que toutes les firmes sont actives en période 1, peu importe le contexte informationnel de l'activité d'extraction.

La figure 1 montre la différence en pourcentage entre $x^{s,a}(\theta_1)$ et $x^s(\theta_1)$ en fonction de θ_1 et de $\mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^a(x)\right]$. Deux points importants sont à noter. Premièrement, la distorsion positive que crée l'asymétrie d'information est la même pour tout θ_1 étant donné un niveau donné de $\mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^a(x)\right]$; cependant le pourcentage de différence entre $x^{s,a}(\theta_1)$ et $x^s(\theta_1)$ n'est pas le même puisque $x^s(\theta_1)$ varie. Cela implique donc que pour une espérance conditionnelle donnée, c'est-à-dire pour un niveau de $\mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^a(x)\right]$ donné, la distorsion est relativement plus grande pour des plus grandes valeurs de θ_1 puisque $x^s(\theta_1)$ est plus petit. Deuxièmement, $\hat{\theta}^a(\cdot)$ et donc $\mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^a(x)\right]$, est décroissant en $x(\cdot)$ et $x^{s,a}(\theta_1)$ est décroissant en θ_1 ; ceci implique que $\mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^a(x)\right]$ est croissant en θ_1. La figure 1 représente toutes les combinaisons de θ_1 et $\mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^a(x)\right]$ alors que seulement certaines d'entre elles peuvent avoir lieu.

3.1.4 *Modèle à trois périodes*

Les résultats de la proposition 2 ont été démontrés dans un modèle à deux périodes ; l'équation (40) ajoute une condition supplémentaire qui doit être assurée afin que ces résultats soient valides. Cependant, nos résultats – que l'asymétrie d'information pousse la firme à se positionner d'une façon telle qu'elle sera capable d'obtenir une plus grande rente informationnelle dans une période future – ne sont pas conditionnels au nombre de périodes. La méthodologie que nous avons démontrée ci-dessus peut être généralisée à un nombre fini de périodes. Il est suffisant d'ajouter une seconde période d'extraction, c'est-à-dire une période d'exploration suivi de deux périodes d'extraction, pour démontrer qu'une condition comme (40) ne tient pas dans un modèle plus général.

GRAPHIQUE 1



NOTE : Différence en pourcentage entre $x^{s,a}(\theta_1)$ et $x^s(\theta_1)$ pour toutes les combinaisons de θ_1 et de $\mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^a(x)\right]$. Les paramètres choisis sont $c = 2$, $b = 2$, $\alpha = 0.25$, $\delta = \frac{1}{1.04}$ et $p = 250$; les paramètres θ_1 et θ_2 sont définis sur les ensembles $\theta_1 \in [0,100]$ et $\theta_2 \in [0,100]$.

En fait, la restriction supplémentaire donnée par l'équation (40) s'applique seulement quand le modèle est limité à une période d'extraction. La raison pour laquelle c'est le cas est que cette condition limite la prépondérance des solutions de coins ($q = x$) durant la phase d'extraction. Sans cette condition, les firmes n'ont pas au début de l'entente la possibilité de manipuler à leur avantage l'information privée qu'elles auront durant la phase d'extraction. Afin de démontrer cela, nous modifions notre modèle pour y ajouter une seconde période d'extraction, immédiatement après la première période d'extraction, où le prix de la ressource est suffisamment élevé. Nous adaptons la notation et les hypothèses pour un modèle à trois périodes tel que dans le cas symétrique il est optimal pour tous les types de firmes d'épuiser la totalité des réserves en deux périodes. Dans un tel cas, même si toutes les firmes épuisent leurs réserves, alors le niveau de réserves optimal à mettre au jour est donné par :

$$x^{s,a,a}(\theta_1) = x^{s,s,s}(\theta_1) + \frac{(1-\alpha)\frac{\delta(1-\delta)}{(1+\delta)}\mathbb{E}[h(\theta_2)]}{c + \frac{2\delta^2}{(1+\delta)}b}.$$

La fraction du côté droit a un effet strictement positif sur $x^{s,a,a}(\theta_1)$ contrairement au dernier terme de (39) si tous les types de firmes épuisent leurs réserves. Nous résumons ceci dans la conjecture suivante :

Conjecture 1. *Dans un cadre d'extraction à plusieurs périodes, l'information asymétrique en phase d'extraction influence positivement le montant de réserves mis au jour en première période pour tous les types de firmes. Il s'ensuit que les réserves mises au jour de tous les types de firmes sont supérieures à ce qu'elles auraient été s'il y avait eu absence d'information privée durant la phase d'extraction et supérieures à la situation Pareto efficace de premier rang.*

3.2 *Asymétrie en exploration seulement*

3.2.1 *La période d'extraction*

Lorsque la valeur de θ_2 est connue par les deux parties, la redevance de seconde période consiste à choisir $R_2(\cdot)$ d'une façon telle que l'entièreté de la rente d'extraction est récupérée par le principal, laissant juste assez à la firme pour couvrir son coût d'opportunité ; ceci implique que $\Pi_2(\theta_2) = 0 \; \forall \; \theta_2 \in [\theta_2^L, \bar{\theta}_2^{a,s}]$. Par conséquent, le surplus espéré des firmes en seconde période est $\Psi(x) = 0$. Le principal veut donc maximiser (3), ce qui implique que $q^{a,s}(\cdot)$ résout le même problème que $q^s(\cdot)$ et donc que dans ce cas-ci, le niveau d'extraction optimal est donné par les équations (7).[24]

3.2.2 *La période d'exploration*

La procédure décrite dans la sous-section précédente pour résoudre le problème asymétrique de la seconde période peut être appliquée pour la résolution du problème lorsqu'il y a information privée en extraction seulement ; une différence majeure modifie l'analyse. Contrairement à la période d'extraction où les firmes diffèrent non seulement par leur type, mais également par la quantité de réserves x qu'elles ont mises au jour précédemment, les firmes diffèrent seulement par leur type dans ce cas-ci ; ceci implique que le surplus des firmes peut être écrit comme $\phi(\tilde{\theta}_1, \theta_1)$. Le surplus total espéré des firmes sous le mécanisme d'incitation $R_1\left(\tilde{\theta}_1, x(\tilde{\theta}_1)\right)$ est :

$$\Pi(\theta_1) = -\theta_1 x(\tilde{\theta}_1) - \frac{c}{2}x(\tilde{\theta}_1)^2 - R_1\left(\tilde{\theta}_1, x(\tilde{\theta}_1)\right). \tag{41}$$

Le contrat optimal doit satisfaire

24. Noté que $q^{a,s}(\theta_2, x) \equiv q^s(\theta_2, x)$, c'est-à-dire que l'extraction (intérieure) optimale n'est pas affecté par l'asymétrie d'information en exploration. À des fins de simplicité, nous écrivons simplement $q^s(\theta_2, x)$ qui s'applique donc lorsqu'il y a symétrie d'information dans les deux périodes, ou seulement en période 1.

$$\frac{\partial x(\theta_1)}{\partial \theta_1} \leq 0 \quad \text{pour } \tilde{\theta}_1 = \theta_1, \tag{42}$$

$$\frac{\partial \Pi(\theta_1)}{\partial \theta_1} = -x(\theta_1). \tag{43}$$

Notons que $R_1(\cdot)$ peut être une subvention ; $R_1(\cdot)$ et $\Pi(\cdot)$ doivent être tels que la contrainte de participation des firmes est satisfaite pour tout type $\theta_1 \leq \bar{\theta}_1^{a,s}$. Ceci est nécessairement le cas si la contrainte est satisfaite à la marge extensive ; c'est-à-dire si le surplus de la firme active la moins efficace est tel que :

$$\Pi(\bar{\theta}_1^{a,s}) \geq 0. \tag{44}$$

En utilisant (41) pour éliminer $R_1(\cdot)$, on peut écrire le problème de maximisation du principal comme étant,

$$\begin{aligned} &\underset{x(\cdot),\bar{\theta}_1^{a,s}}{\text{Max}} \quad \int_{\theta_1^L}^{\bar{\theta}_1^{a,s}} \Big\{ -\theta_1 x(\theta_1) - \frac{c}{2}x(\theta_1)^2 + \delta\Gamma^{a,s}(x) - (1-\alpha)\Pi(\theta_1) \Big\} g(\theta_1)\mathrm{d}\theta_1 \\ &\text{s.c.} \qquad (9), (42), (43) \text{ et } (44), \end{aligned} \tag{45}$$

où $\Gamma^{a,s}(x) \equiv \int_{\theta_2^L}^{\bar{\theta}_2^{a,s}} \Big[pq^s(\theta_2,x) - \theta_2 q^s(\theta_2,x) - \frac{b}{2}q^s(\theta_2,x)^2 \Big] f(\theta_2)\mathrm{d}\theta_2$ représente la redevance espérée de la période d'extraction lorsqu'il y asymétrie d'information en période 1 seulement et où $q^s(\theta_2,x)$ est donné par les équations (7).

Ceci peut être traité comme un problème de contrôle optimal dans l'espace θ_1, où Π est la variable d'état et x est la variable de contrôle. La borne minimale θ_1^L est donnée et la borne maximale $\bar{\theta}_1^{a,s}$ est libre, sujette à $\theta_1^L \leq \bar{\theta}_1^{a,s} \leq \theta_1^H$. Encore une fois laissant temporairement de côté la contrainte de monotonicité (42), l'Hamiltonien $\mathscr{H}(\Pi, x, \mu_1, \theta_1)$ est donné par :

$$\begin{aligned} \mathscr{H}(\cdot) = &\Big[-\theta_1 x(\theta_1) - \frac{c}{2}x(\theta_1)^2 + \delta\Gamma^{a,s}(x) \Big] g(\theta_1) - \mu_1(\theta_1)x(\theta_1) \\ &- (1-\alpha)\Pi(\theta_1)g(\theta_1), \end{aligned}$$

où μ_1 est la variable associée à Π.

En utilisant la même méthode que dans la sous-section précédente, nous obtenons une version modifiée de la règle « coût marginal d'exploration = rente marginale espérée » :

$$\theta_1 + cx(\theta_1) + (1-\alpha)m(\theta_1) = \delta\Big[p - \mathbb{E}\left[\theta_2 | \theta_2 \leq \hat{\theta}^{a,s}(x)\right] - bx \Big] F\left(\hat{\theta}^{a,s}(x)\right) \tag{46}$$

où $m(\theta_1) = \frac{G(\theta_1)}{g(\theta_1)}$.[25] De façon similaire à $\hat{\theta}^a(x)$, la valeur $\hat{\theta}^{a,s}(x)$ est défini comme étant la valeur de θ_2 faisant la transition entre (7a) et (7b) :

$$\frac{1}{b}[p - \hat{\theta}^{a,s}(x)] = x. \tag{47}$$

Définissons $x^{a,s}(\theta_1)$ comme étant le montant optimal à mettre au jour lorsqu'il y asymétrie d'information en période 1 seulement. Afin de démontrer que $\hat{\theta}^{a,s}\big(x^{a,s}(\theta_1)\big) = \theta_2^H \ \forall\ \theta_1 \in [\theta_1^L, \theta_1^H]$, c'est-à-dire que $\hat{\theta}^{a,s}(\cdot)$ est nécessairement une solution de coin peu importe le stock de réserves mis au jour, considérons $\hat{\theta}^{a,s}\big(x^{a,s}(\theta_1^L)\big)$. Puisque $x^{a,s}(\theta_1)$ est décroissant par (42), et considérant (47), $\hat{\theta}^{a,s}(\cdot) = \theta_2^H \ \forall\ \theta_1 \in (\theta_1^L, \theta_1^H]$ si $\hat{\theta}^{a,s}\big(x^{a,s}(\theta_1^L)\big) = \theta_2^H$. Étant donné que $m(\theta_1^L) = 0$ et en raison de l'hypothèse (8), $\hat{\theta}^{a,s}\big(x^{a,s}(\theta_1^L)\big) = \theta_2^H$ donc par conséquent $\hat{\theta}^{a,s}(\cdot) = \theta_2^H \ \forall\ \theta_1 \in [\theta_1^L, \theta_1^H]$, ce qui implique donc que (46) peut être réécrit comme :

$$\theta_1 + cx(\theta_1) + (1-\alpha)m(\theta_1) = \delta\big[p - \mathbb{E}[\theta_2] - bx\big]. \tag{48}$$

Le côté gauche est le coût marginal d'exploration augmenté par le coût marginal de compatibilité incitatif courant $(1-\alpha)m(\theta_1)$. Le côté droit, la rente marginale espérée, est la même rente marginale que sous pleine information (donné par le côté droit de 12). Ceci est un résultat standard dans la littérature : le coût marginal de l'activité est augmenté par le coût marginal de compatibilité incitatif courant, alors que le revenu marginal n'est pas affecté. En isolant $x(\cdot)$ dans l'équation (48), nous obtenons :

$$x^{a,s}(\theta_1) = x^s(\theta_1) - \frac{(1-\alpha)m(\theta_1)}{c+\delta b} \tag{49}$$

où $x^s(\theta_1)$ est donné par (13). Donc, le principal doit réduire l'activité (dans ce cas-ci, l'exploration) de tous les types de firmes, excepté le plus efficace θ_1^L pour lequel le coût de compatibilité incitatif est zéro ; ce résultat est commun lorsqu'on traite de sélection adverse dans un contexte statique. L'explication standard dans la littérature est qu'en forçant les agents à produire sous leur niveau efficace, le principal réduit la rente qu'il doit leur concéder. Il fait cela dans le but d'empêcher les firmes d'imiter un autre type ; cette nécessité disparaît pour le type le plus efficace puisqu'aucun autre type ne veut l'imiter.

Proposition 3. *L'asymétrie d'information dans l'activité d'exploration entraîne une réduction, relativement au niveau Pareto efficace en pleine information, de la quantité de réserves mises au jour pour tous les types de firmes, excepté le plus efficace.*

Nous avons établi le corollaire suivant des propositions 2 et 3, et de la conjecture 1.

25. Nous faisons l'hypothèse que $\frac{\partial m(\theta_1)}{\partial \theta_1} \geq 0$, ce qui assure que (42) est satisfait.

Corollaire 1. *L'information privée en exploration entraîne une réduction de la quantité de réserves mises au jour relativement au niveau Pareto efficace en pleine information ; ceci affecte tous les types de firmes excepté le type le plus efficace.*

L'information privée en extraction entraîne une augmentation de la quantité de réserves mises au jour relativement au niveau Pareto efficace en pleine information ; ceci affecte tous les types de firmes incluant le type le plus efficace.

4. Généralisation, extensions, interprétations, implications

4.1 *Asymétrie d'information complète*

Le problème en période 2 est identique à celui décrit dans la sous-section 3.1 ; le problème en période 1 est légèrement modifié comparativement à la sous-section 3.2. Lorsqu'il y a asymétrie d'information dans les deux activités, le paiement que la firme reçoit ne dépend pas seulement de facteurs courants, comme c'était le cas dans la sous-section 3.2, mais dépend également de l'effet que la quantité de stock mise au jour x a sur le surplus espéré que la firme génèrera durant l'extraction de la ressource en période 2. Il est donc possible de réécrire la règle modifiée « coût marginal d'exploration = rente marginale espérée » comme :

$$\theta_1 + cx + (1-\alpha)m(\theta_1) = \delta\Big[p - \mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^a(x)\right] - bx\Big]F\left(\hat{\theta}^a(x)\right). \tag{50}$$

Contrairement aux problèmes de sélection adverse plus classiques, les deux côtés de l'équation sont modifiés par l'asymétrie d'information. Comme nous l'avons fait dans la sous-section 3.1, il est possible de réarranger (50) tel que,

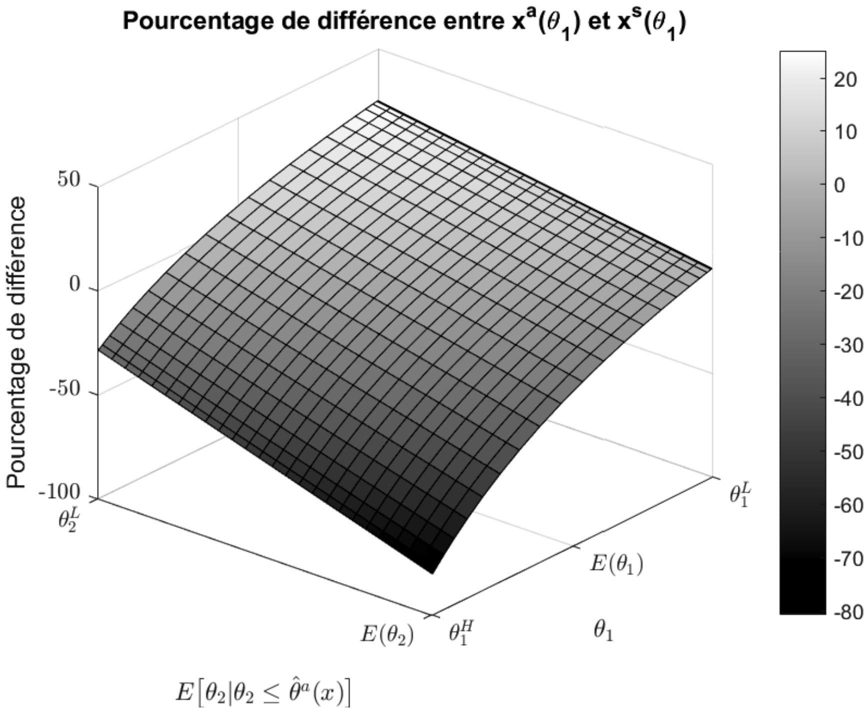
$$x^a(\theta_1) = x^s(\theta_1) - \frac{(1-\alpha)m(\theta_1)}{c+\delta b} \tag{51}$$

$$+\frac{-\delta\Big(1-F\Big(\hat{\theta}^a\big(x^a(\theta_1)\big)\Big)\Big)\Big[p-\mathbb{E}\Big[\theta_2|\theta_2 > \hat{\theta}^a\big(x^a(\theta_1)\big)\Big] - bx^a(\theta_1)\Big]}{c+\delta b}, \tag{52}$$

où $x^s(\theta_1)$ et $\hat{\theta}^a(\cdot)$ sont définis par (13) et (37) respectivement ; l'équation (52) comprend donc le montant Pareto-optimal de découverte (13), moins le coût de compatibilité incitatif courant (trouvé dans l'équation 49) nette de la distorsion positive créée par le principal (trouvée dans l'équation 39).

Par l'équation (37), le dernier terme de (52) est positif de sorte qu'il agit contre le second terme qui lui est négatif. Plus particulièrement, si $\hat{\theta}^a\big(x^a(\theta_1^L)\big) \in [\theta_2^L, \theta_2^H)$, alors il est certain que $x^a(\theta_1^L) > x^s(\theta_1^L)$ puisque $m(\theta_1^L)$ est alors égal à zéro et le dernier terme de (52) est strictement positif. Par contre, au fur et à mesure que θ_1 augmente, le coût marginal de compatibilité incitatif (le deuxième terme) prend de plus en plus de poids, alors que le dernier terme diminue puisque $\hat{\theta}^a(\cdot)$ augmente ; ceci se produit parce qu'il est moins probable d'abandonner une partie des ressources si un plus petit stock est mis au jour. Il est alors possible que $x^a(\theta_1) < x^s(\theta_1)$ pour certaines valeurs élevées de θ_1. Si c'est le cas, alors par continuité, il y a un type intermédiaire pour lequel le stock produit est Pareto efficace, c'est-à-dire, le même qu'en pleine information. La figure 2 montre la différence en pourcentage entre $x^a(\cdot)$ et $x^s(\cdot)$ en fonction de θ_1 et de $\mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^a(x)\right]$; nous avons procédé à la simulation numérique de la même façon qu'en sous-section 3.1.

GRAPHIQUE 2



NOTE : Différence en pourcentage entre $x^a(\theta_1)$ et $x^s(\theta_1)$ pour toutes les combinaisons de θ_1 et de $\mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^a(x)\right]$. Les paramètres choisis sont $c = 2$, $b = 2$, $\alpha = 0.25$, $\delta = \frac{1}{1.04}$ et $p = 250$; les paramètres pour lesquelles les firmes possèdent de l'information privée, θ_1 et θ_2, sont définis sur les ensembles $\theta_1 \in [0,100]$ et $\theta_2 \in [0,100]$.

4.2 *Réserves économiques, marge extensive*

Nos résultats ont des implications en terme technologique et de réserves économiques. Dans le long-terme, les réserves économiques sont définies comme étant les réserves physiques qui ont une valeur suffisamment élevée de sorte qu'elles valent la peine d'être mises au jour étant donné les conditions économiques actuelles et espérées. Dans le cadre de ce papier, les conditions économiques peuvent être interprétées comme étant l'absence ou la présence d'information privée, alors que les réserves économiques peuvent être définis comme étant la fonction de distribution cumulative des réserves mises au jour sous symétrie d'information $(i, j = s, s)$ ou sous asymétrie d'information $(i, j = a, a)$; c'est-à-dire :

$$X^{i,j} = \int_{\theta_1^L}^{\bar{\theta}_1^{i,j}} x^{i,j}(\theta_1)\, g(\theta_1) \mathrm{d}\theta_1. \tag{53}$$

En économie des ressources naturelles, nous utilisons les concepts de marge extensive et marge intensive. La marge extensive traite de changements sur la quantité de réserves économiques ; elle définit la limite entre les dépôts (ou les firmes) qui sont économiques et ceux qui sont non économiques. Dans notre papier, la marge extensive est définie comme étant $\bar{\theta}_1^{i,j}$. La marge intensive quant à elle consiste en le taux auquel la ressource est extraite et son taux de récupération (s'il y a lieu). Bien qu'un modèle à plusieurs périodes d'extraction pourrait nous permettre de traiter d'un tel problème, nous nous attarderons plutôt à la marge extensive dans le cadre de cette sous-section.

Les réserves économiques définies par (53) sont homogènes : avant que le type de la firme soit révélé en période 2, l'entièreté des réserves ont le même coût d'extraction espérée. Cependant, cette homogénéité du stock de réserves cache le fait qu'en réalité différent coûts seront encourus pour extraire la ressource de $X^{i,j}$. Par exemple, pour deux stocks hypothétiques identiques $X^{s,s}$ et $X^{a,a}$, si $x^a(\theta_1)$ est supérieur à $x^s(\theta_1)$ pour des valeurs basses de θ_1, alors l'asymétrie d'information favorise une composition de stock à bas coût ; dans un tel cas, on peut dire que l'asymétrie d'information entraîne une utilisation excessive des ressources qui ont une plus grande valeur.

Considérons la marge extensive $\bar{\theta}_1^{s,s}$; de l'équation (12) nous avons que :

$$\bar{\theta}_1^{s,s} = \delta\left[p - \mathbb{E}[\theta_2]\right]. \tag{54}$$

Sous asymétrie d'information, $\bar{\theta}_1^{a,a}$ est libre ce qui implique que l'Hamiltonien doit être égal à zéro par la condition de transversalité. Dans ce cas-ci, la marge extensive est donnée par :

$$\bar{\theta}_1^{a,a} = -(1-\alpha)m(\bar{\theta}_1^{a,a}) + \delta\left[p - \mathbb{E}[\theta_2 | \theta_2 \leq \hat{\theta}^a]\right] F(\hat{\theta}^a), \tag{55}$$

puisque l'équation (50) doit aussi tenir à $\bar{\theta}_1^{a,a}$. Le dernier terme sur le côté droit de l'équation ci-dessus est inférieur au côté droit de (54), l'équivalent en pleine information ; comme nous avons déjà discuté, ceci est dû à l'asymétrie d'information dans l'activité d'extraction. Cela a comme effet de diminuer la marge extensive $\bar{\theta}_1^{a,a}$ relativement à la marge extensive en pleine information $\bar{\theta}_1^{s,s}$. Le premier terme du côté droit de l'équation (55) est le coût marginal de compatibilité incitatif associé à l'asymétrie d'information dans l'activité d'exploration ;

ceci à comme effet d'augmenter la marge extensive $\bar{\theta}_1^{a,a}$ relativement à la marge extensive en pleine information $\bar{\theta}_1^{s,s}$. Ceci en combinaison avec les propositions 1, 2 et 3 prouve la proposition suivante :

Proposition 4. *Absence d'asymétrie d'information en extraction, sélection adverse en exploration :*

1. *réduit la marge extensive $\bar{\theta}_1^{a,s}$ sous son niveau efficace et entraîne le secteur de l'exploration de ressources naturelles non renouvelables à être plus efficace économiquement que dans une situation Pareto optimale ;*
2. *réduit les réserves économiques $X^{a,s}$ relativement au niveau Pareto efficace $X^{s,s}$ et affecte la composition de celles-ci en augmentant la part des réserves moins coûteuses ; cette augmentation est plus prononcée pour les découvertes les moins coûteuses.*

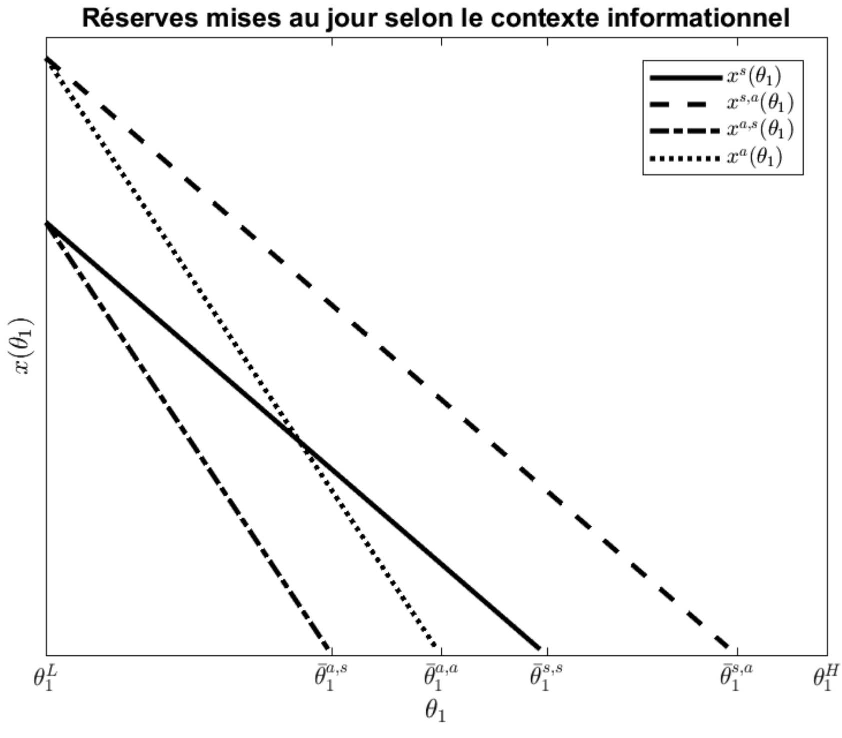
Absence d'asymétrie d'information en exploration, sélection adverse en extraction :

1. *augmente la marge extensive $\bar{\theta}_1^{s,a}$ au-delà de son niveau efficace et entraîne le secteur de l'exploration des ressources naturelles à être moins efficace économiquement que dans une situation Pareto optimale ;*
2. *augmente les réserves économiques $X^{s,a}$ relativement au niveau Pareto efficace $X^{s,s}$ mais n'a aucun effet sur la composition de celles-ci, outre son effet d'augmenter la marge extensive $\bar{\theta}_1^{s,a}$, ce qui augmente la part des réserves les plus coûteuses ;*
3. *entraîne le secteur d'extraction à être plus efficace économiquement que dans une situation Pareto optimale, c'est-à-dire $\bar{\theta}_2^{s,a} \leq \theta_2^H$.*

L'efficacité dans le secteur exploratoire peut représenter la technologie utilisée par les firmes, ou encore, elle peut représenter les perspectives d'exploration que les firmes transforment en réserves à être exploitées. Dans le premier cas, une divergence d'une situation Pareto-optimale implique une perte d'opportunités technologiques ; dans le second cas, un gaspillage de ressources naturelles. Dans les deux cas, des ressources qui sont économiques sous symétrie d'information sont gaspillées si le secteur devient trop efficace économiquement. La figure 3 ci-dessous montre la quantité de réserves mise au jour en fonction de θ_1 pour différents contextes informationnels ; elle démontre qualitativement certains résultats de la proposition 4. Notez que pour démontrer l'effet de l'asymétrie d'information sur la marge extensive, la valeur des paramètres dans la simulation numérique présentée dans la figure 3 ont été choisis de sorte que $\bar{\theta}_1^{i,j} \in [\theta_1^L, \theta_1^H)$ pour $i = s, a$, et pour $j = s, a$. De plus, ce n'est pas nécessairement le cas que $\bar{\theta}_1^{a,a} < \bar{\theta}_1^{s,s}$ comme dans les résultats présentés dans la figure 3 ; sous d'autres combinaisons de paramètres, il est possible que $\bar{\theta}_1^{a,a} > \bar{\theta}_1^{s,s}$.

On peut voir dans la figure 3 que la marge extensive $\bar{\theta}_1^{a,s} < \bar{\theta}_1^{s,s}$, que les réserves économiques $X^{a,s} < X^{s,s}$, et que la part des réserves moins coûteuses est plus grande pour $X^{a,s}$ comparativement à $X^{s,s}$. De plus, la marge extensive $\bar{\theta}_1^{s,a} > \bar{\theta}_1^{s,s}$, les réserves économiques $X^{s,a} > X^{s,s}$, et l'asymétrie d'information en extraction n'a aucun effet sur la composition des réserves économiques comparativement au cas symétrique, outre son effet d'augmenter la marge extensive $\bar{\theta}_1^{s,a}$, ce qui augmente la part des réserves plus coûteuses. Étant donné la valeur des paramètres choisis dans la simulation, à la marge extensive $\bar{\theta}_1^{a,a}$, l'effet de l'asymétrie d'information dans l'activité d'exploration domine l'effet de l'asymétrie d'information dans l'activité d'extraction ce qui implique que $\bar{\theta}_1^{a,a} < \bar{\theta}_1^{s,s}$.

GRAPHIQUE 3



NOTE : Représentation qualitative des réserves mises au jour selon le contexte informationnel. Les paramètres choisis sont $c = 2$, $b = 2$, $\alpha = 0.25$, $\delta = \frac{1}{1.04}$ et $p = 300$; les paramètres d'efficacité des firmes, θ_1 et θ_2, sont définis sur les ensembles $\theta_1 \in [0, 300]$ et $\theta_2 \in [0, 200]$.

4.3 *Engagement du principal*

En période 1, lorsqu'on considère l'information privée de la période 2, il s'agit d'un cas de sélection adverse comprenant des contraintes participatives ex post. Lorsque l'aversion au risque n'est pas un problème (voir Laffont et Rochet (1998) ;

Lewis et Sappington (1995) pour des exemples d'aversion au risque pour le principal ou l'agent), le contrat incitatif optimal assure un résultat de premier rang (proposition 2.4 de Laffont et Martimort, 2002). Toutefois, ce résultat tient seulement si l'entente est faite avant que le type de l'agent soit connu par celui-ci. L'entente entre les deux parties pour l'activité d'extraction a lieu effectivement ex post, cependant l'entente pour l'activité d'exploration a lieu avant la réalisation de θ_2.

Nous avons jusqu'à maintenant fait l'hypothèse que le principal pouvait seulement s'engager au régime de redevances de la période courante.[26] Quand le principal ne peut pas s'engager aux considérations futures, les redevances dépendent de la déclaration des firmes $\tilde{\theta}_t$ faite au début de chacune des périodes $t = 1,2$. Comme nous l'avons montré, les firmes anticipent la réaction du principal à sa future déclaration $\tilde{\theta}_2$; elles savent qu'elles pourront utiliser cette information privée à leur avantage et elles essayent de se positionner immédiatement en première période d'une façon qui leur permettra de maximiser cet avantage informationnel.

Si un engagement intertemporel est possible, alors le principal peut s'engager au même régime de redevances qu'il aurait choisi si un engagement à plusieurs périodes n'était pas possible ; ceci implique donc que le principal ne peut rien perdre par la possibilité d'un engagement intertemporel. Le principal peut même gagner en s'engageant aussi tôt qu'en première période sur le régime de redevances qu'il proposera à une firme qui fera une déclaration $\tilde{\theta}_2$. En faisant ainsi, le contrat auquel la firme s'engage pour l'extraction est signé à un moment où les deux parties ne possèdent aucune information sur θ_2 excepté sa fonction de distribution ; ceci élimine donc l'avantage informationnel des firmes en période 2. En fait, ceci élimine toute possibilité de rente d'extraction, la firme n'a aucun avantage de faire une fausse déclaration ; si l'entente est signée, il sera dans son avantage de révéler véridiquement son information privée. Par conséquent, si le principal peut s'engager sur plusieurs périodes, il fait face à un problème de sélection adverse en première période seulement.

Le principal s'engage donc à une paire de combinaisons $\left(R_1(\tilde{\theta}_1), x^e(\tilde{\theta}_1)\right)$ et $\left(R_2(\tilde{\theta}_2,x), q^e(\tilde{\theta}_2,x)\right)$, où l'exposant « ^{e} » veut dire « engagement ». En période 2, la redevance $R_2(\cdot)$ récupère l'entièreté de la rente d'extraction et laisse aux firmes suffisamment pour couvrir leur coût d'opportunité ; $\Pi_2(\theta_2) = 0 \ \forall \ \theta_2 \in [\theta_2^L, \bar{\theta}_2^e]$. Ceci implique donc qu'en première période, le surplus espéré de la firme en seconde période est tel que $\Psi(x) = 0$. Puisqu'il s'agit du même problème de maximisation qui résout $q^s(\theta_2,x)$ (donné par 4), le niveau d'extraction lorsque le principal peut s'engager, $q^e(\theta_2,x)$, est donné par les équations (7) ; il s'agit donc du même niveau qui prévaut en pleine information. Ce niveau d'extraction est cependant dépendant de x qui lui n'est pas nécessairement le même qu'en pleine

26. Ceci peut représenter le fait qu'un gouvernement courant ne peut pas engager un gouvernement futur en prenant une décision pour eux ; ou bien qu'aucun contrat ne peut tenir compte de toutes les contingences futures parce qu'il trop coûteux ou simplement impossible à écrire. Voir Laffont et Tirole (1988) et Grossman et Hart (1986).

information. Toutefois, pour certains niveaux de stock x relativement bas, ou pour certain θ_2 bas, l'extraction optimale requiert que $q^e(\theta_2, x) = x$; cette condition est garantie par (8) en pleine information.

L'objectif multipériodique du principal peut être formulé comme un problème de contrôle optimal dans l'espace θ_1 avec Π comme variable d'état, x comme variable de contrôle, où θ_1^L est donné et où $\bar{\theta}_1^e$ est libre sujet à $\theta_1^L \leq \bar{\theta}_1^e \leq \theta_1^H$. Le problème du principal est donc :

$$\underset{x(\theta_1),\bar{\theta}_1^e}{\text{Max}} \quad \int_{\theta_1^L}^{\bar{\theta}_1^e} \Bigg\{ -C_1(x,\theta_1) - (1-\alpha)\Pi(\theta_1) + \delta \int_{\theta_2^L}^{\hat{\theta}^e(x)} \Big\{ px - C_2(x,\theta_2) \Big\} f(\theta_2)\mathrm{d}\theta_2 \Bigg\} g(\theta_1)\mathrm{d}\theta_1$$

s.c. $\quad (5), (22), (42), (43)$ et (44).[27]

Par le principe du maximum,

$$\theta_1 + cx + (1-\alpha)m(\theta_1) = \delta\Big[p - \mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^e(x)\right] - bx\Big]F\big(\hat{\theta}^e(x)\big),\text{[28]}$$

ce qui implique que

$$x^e(\theta_1) = x^s(\theta_1) - \frac{(1-\alpha)m(\theta_1)}{c+\delta b},$$

où $x^s(\theta_1)$ est donné par l'équation (13). En utilisant la condition de transversalité, nous trouvons que :

$$\bar{\theta}_1^e = -(1-\alpha)m(\bar{\theta}_1^e) + \delta\left[p - \mathbb{E}[\theta_2]\right].$$

Le montant de réserves mis au jour et la valeur critique de θ_1 qui délimite les firmes actives des firmes inactives en exploration sont les mêmes que s'il y avait symétrie d'information durant la phase d'extraction ; c'est-à-dire $x^e(\theta_1) = x^{a,s}(\theta_1)$ et $\bar{\theta}_1^e = \bar{\theta}_1^{a,s}$. La possibilité pour le principal de s'engager sur plusieurs périodes lui offre donc l'occasion d'éliminer le problème de sélection adverse en extraction.

27. Tout comme $\hat{\theta}^{a,s}(\cdot)$, la valeur $\hat{\theta}^e(\cdot)$ est défini comme étant la valeur de θ_2 faisant la transition entre (7a) et (7b) ; elle est donc également défini par l'équation (47) mais en remplaçant $\hat{\theta}^{a,s}(\cdot)$ par $\hat{\theta}^e(\cdot)$. Dans la contrainte (22), $\bar{\theta}_2^{s,a}$ doit être remplacé par $\bar{\theta}_2^e$, et dans la contrainte (44), $\bar{\theta}_1^{a,s}$ doit être remplacé par $\bar{\theta}_1^e$.

28. Pour démontrer que $\hat{\theta}^e\big(x^e(\theta_1)\big) = \theta_2^H \ \forall\ \theta_1 \in [\theta_1^L, \theta_1^H]$, nous utilisons la même logique que nous avons utilisé en sous-section 3.2 pour démontrer que $\hat{\theta}^{a,s}\big(x^{a,s}(\theta_1)\big) = \theta_2^H \ \forall\ \theta_1 \in [\theta_1^L, \theta_1^H]$. Puisque $x^e(\theta_1)$ est décroissant par (42), et considérant (47), $\hat{\theta}^e(\cdot) = \theta_2^H \ \forall\ \theta_1 \in (\theta_1^L, \theta_1^H]$ si $\hat{\theta}^e\big(x^e(\theta_1^L)\big) = \theta_2^H$. Étant donné que $m(\theta_1^L) = 0$ et en raison de l'hypothèse (8), $\hat{\theta}^e\big(x^e(\theta_1^L)\big) = \theta_2^H$ donc par conséquent $\hat{\theta}^e(\cdot) = \theta_2^H \ \forall\ \theta_1 \in [\theta_1^L, \theta_1^H]$. Ceci implique que $\mathbb{E}\left[\theta_2|\theta_2 \leq \hat{\theta}^e(x)\right] = \mathbb{E}[\theta_2]$ et $F\big(\hat{\theta}^e(x)\big) = 1$.

Proposition 5. *Quand le principal peut s'engager à un contrat de redevances intertemporel :*

1. *le montant optimal de ressource mis au jour est le même que s'il y avait symétrie d'information en extraction, c'est-à-dire (strictement si l'équation 40 tient) plus bas qu'en pleine information et aussi plus bas que s'il n'y avait pas de possibilité d'engagement intertemporel ;*
2. *la marge extensive $\bar{\theta}_1^e$ est la même que s'il y avait symétrie d'information en extraction, c'est-à-dire plus basse qu'en pleine information et aussi plus basse que s'il n'y avait pas de possibilité d'engagement intertemporel.*

Conclusion

Cette analyse combine les activités d'exploration et d'extraction dans un modèle d'exploitation de ressources naturelles non renouvelables lorsqu'il y a présence de sélection adverse. L'information asymétrique est représentée par un paramètre de coût que la firme apprend au début de la phase exploratoire et au début de la phase d'extraction ; nous avons fait l'hypothèse qu'il n'y a aucune corrélation entre les deux paramètres.

Le résultat typique dans la littérature est que la firme la plus efficace n'est pas affectée par la présence d'asymétrie d'information ; cependant, ce résultat ne s'applique pas dans notre analyse dynamique puisque les conditions de la phase exploratoire affectent les conditions de la phase d'extraction et vice-versa. Quand l'information est asymétrique en exploration et en extraction, la sélection adverse génère une rente en faveur de la firme. Les firmes, incluant le type le plus efficace en exploration, peuvent augmenter cette rente en mettant au jour davantage de réserves durant la phase exploratoire. En conséquence, la sélection adverse en extraction augmente le montant de réserves mis au jour par les types de firmes les plus efficaces en exploration, et ce, comparativement au cas Pareto efficace de premier rang de pleine information.

Nous avons souligné les implications de ce mécanisme d'incitation en ce qui concerne la quantité et la composition des réserves économiques, ainsi qu'en matière de sophistication des technologies utilisées en exploration et en extraction. Comme nous l'avons démontré, l'inefficacité créée par la sélection adverse non seulement implique une utilisation excessive des ressources, mais elle peut également entraîner une surexploitation des réserves à bas coûts ; la sélection adverse peut également entraîner une sophistication technologique trop élevée en exploration.

BIBLIOGRAPHIE

BARON, D. P. (1989) : « Design of regulatory mechanisms and institutions », *Handbook of industrial organization*, 2, 1347–1447.

BARON, D. P. et D. BESANKO (1984) : « Regulation and information in a continuing relationship », *Information Economics and Policy*, 1(3), 267–302.

BARON, D. P. et R. B. MYERSON (1982) : « Regulating a monopolist with unknown costs », *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, 50(4), 911–930.

DAUBANES, J. et P. LASSERRE (2014) : « Dispatching after producing : The supply of non-renewable resources », CIRANO Working Paper 2014s-42, Montreal.

FULLER, K. B., J. N. SANCHIRICO et J. M. ALSTON (2017) : « The spatial-dynamic benefits from cooperative disease control in a perennial crop », *Journal of agricultural and resource economics*, 42(2), 127–145.

GARG, D., M. PATTERSON, W. W. HAGER, A. V. RAO, D. A. BENSON et G. T. HUNTINGTON (2010) : « A unified framework for the numerical solution of optimal control problems using pseudospectral methods », *Automatica*, 46(11), 1843–1851.

GAUDET, G., P. LASSERRE et N. VAN LONG (1995) : « Optimal resource royalties with unknown and temporally independent extraction cost structures », *International Economic Review*, 36(3), 715–749.

GERLAGH, R. et M. LISKI (2014) : « Cake-eating with private information », CESifo Working Paper Series No. 5050.

GROSSMAN, S. J. et O. D. HART (1986) : « The costs and benefits of ownership : A theory of vertical and lateral integration », *The Journal of Political Economy*, pp. 691–719.

HELM, C. et F. WIRL (2014) : « The principal–agent model with multilateral externalities : An application to climate agreements », *Journal of Environmental Economics and Management*, 67(2), 141–154.

——— (2016) : « Multilateral externalities : Contracts with private information either about costs or benefits », *Economics Letters*, 141, 27–31.

HENDRICKS, K., R. PORTER et G. TAN (2008) : « Bidding rings and the winner's curse », *The RAND Journal of Economics*, 39(4), 1018–1041.

HENDRICKS, K. et R. H. PORTER (2014) : « Auctioning Resource Rights », *Annu. Rev. Resour. Econ.*, 6(1), 175–190.

HOLMSTRÖM, K. (2001) : « Practical optimization with the tomlab environment in matlab », dans *Proceedings of the 42nd SIMS Conference*, pp. 89–108. Citeseer.

HOLMSTRÖM, K., A. O. GÖRAN et M. M. EDVALL (2008) : « Users guide for TOMLAB/SNOPT », *Mälardalen University, Department of Mathematics and Physics, Västerås, Sweden Google Scholar*.

HUNG, N. M., J.-C. POUDOU et L. THOMAS (2006) : « Optimal resource extraction contract with adverse selection », *Resources Policy*, 31(2), 78–85.

JUDD, K. L. (1998) : *Numerical methods in economics*. MIT press.

JULLIEN, B. (2000) : « Participation constraints in adverse selection models », *Journal of Economic Theory*, 93(1), 1–47.

LAFFONT, J.-J. et D. MARTIMORT (2002) : *The Theory of Incentives : The Principal-Agent Model*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

LAFFONT, J.-J. et J.-C. ROCHET (1998) : « Regulation of a risk averse firm », *Games and Economic Behavior*, 25(2), 149–173.

LAFFONT, J.-J. et J. TIROLE (1988) : « The dynamics of incentive contracts », *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, pp. 1153–1175.

——— (1993) : *A theory of incentives in procurement and regulation*. MIT press.

LEWIS, T. R. et D. E. SAPPINGTON (1995) : « Using markets to allocate pollution permits and other scarce resource rights under limited information », *Journal of Public Economics*, 57(3), 431–455.

MARTIMORT, D., J. POUYET et F. RICCI (2018a) : « Contracts for the Management of a Non-Renewable Resource under Asymmetric Information and Structural Price Breaks », *Annals of Economics and Statistics/Annales d'Économie et de Statistique*, (132), 81–103.

——— (2018b) : « Extracting information or resource ? The Hotelling rule revisited under asymmetric information », *The RAND Journal of Economics*, 49(2), 311–347.

OSMUNDSEN, P. (1998) : « Dynamic taxation of non-renewable natural resources under asymmetric information about reserves », *Canadian Journal of Economics*, 31(4), 933–951.

PAVAN, A., I. SEGAL et J. TOIKKA (2014) : « Dynamic mechanism design : A myersonian approach », *Econometrica*, 82(2), 601–653.

RUTQUIST, P. E. et M. M. EDVALL (2010) : « Propt-matlab optimal control software », *Tomlab Optimization Inc*, 260(1).

SALANIÉ, B. (1997) : *The Economics of Contracts : A Primer*. MIT Press, Cambridge, Mass.

SANCHIRICO, J. N. et M. SPRINGBORN (2011) : « How to get there from here : ecological and economic dynamics of ecosystem service provision », *Environmental and Resource Economics*, 48(2), 243–267.

SEGERSON, K. et J. WU (2006) : « Nonpoint pollution control : Inducing first-best outcomes through the use of threats », *Journal of Environmental Economics and Management*, 51(2), 165–184.

TATOUTCHOUP, F. D. (2015) : « Optimal forestry contracts under asymmetry of information », *The Scandinavian Journal of Economics*, 117(1), 84–107.

VENABLES, A. J. (2014) : « Depletion and development : natural resource supply with endogenous field opening », *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1(3), 313–336.