CAHIERS DE RECHERCHE

STOCKAGE DE GAZ ET MODULATION : UNE ANALYSE STRATÉGIQUE

Edmond BARANES, François MIRABEL
et Jean-Christophe POUDOU

Cahier N° 04.07.48

29 juillet 2004

Centre de Recherche en Economie et Droit de l'ENergie – CREDEN
Université de Montpellier I
Faculté des Sciences Economiques
Espace Richter, av. de la Mer, CS 79706
34 960 Montpellier Cedex France
Tel. : 33 (0)4 67 15 83 17
Fax. : 33 (0)4 67 15 84 04
e-mail : baranes@univ-montp1.fr

Stockage de gaz et Modulation : Une analyse stratégique

Edmond BARANES, Francois MIRABEL et Jean-Christophe POUDOU*
LASER-CREDEN, Université Montpellier I

29 juillet 2004

Résumé

Cet article s'intéresse au rôle stratégique de l'activité de stockage du gaz et de sa régulation lorsqu'il existe un marché spot de la ressource. Dans la lignée de la littérature sur ce thème, nous envisageons l'activité de stockage comme un instrument de flexibilité pour les approvisionnements en gaz d'un opérateur qui sert la demande en période de pointe. Dans ce cas, un arbitrage est fait entre l'utilisation du stockage et le recours à un marché de court terme pour servir la demande. L'originalité de notre modèle réside dans le lien établi entre les volumes de gaz stockés et le prix sur le marché spot : dans certains cas, le gaz stocké permet de fournir une partie de la demande et contribue ainsi à faire baisser le prix sur le marché de court terme. On montre qu'il est parfois optimal pour le régulateur de permettre le *sur-stockage*, notamment lorsque le nombre d'arbitragistes sur le marché spot est insuffisant (marché peu fluide).

*Nous remercions la Direction de la Recherche de Gaz de France pour son soutien financier. Nous remercions Corinne Chaton, Laurent David, Marie-Laure Guillerminet et Jacques Percebois, pour leurs remarques.

1 Introduction

L'ouverture à la concurrence des marchés énergétiques européens, la baisse des coûts de production d'électricité produite à partir de gaz, l'importance des ressources gazières disponibles au niveau mondial, contribuent à expliquer le développement du gaz en Europe et sa place privilégiée dans les approvisionnement énergétiques européens pour les dix prochaines années. Devant la croissance annoncée des besoins en gaz de l'Union Européenne et dans un contexte d'ouverture à la concurrence des marchés gaziers, Bruxelles souligne la nécessité de développer des modes d'approvisonnement en gaz autres que les contrats long terme. La disponibilité en gaz doit être assurée à plus court terme afin d'assurer une véritable concurrence "gaz-gaz" sur le marché. Le rapport de la CRE (2002) souligne que *"les disponibilités de court et moyen terme pouvant contribuer à une concurrence active sur le marché gazier sont encore très limitées"*. Dans ce cadre, le développement des marchés spot, des hub gaziers et l'accès des tiers aux capacités de stockage pourraient rendre plus fluide l'offre et permettre aux acteurs d'effectuer des arbitrages à plus court terme dans leurs choix des sources d'approvisionnement en gaz. Dans ce contexte de flexibilité, les entreprises gazières seront incitées à mettre en place une véritable gestion de portefeuille des approvisionnements en gaz et à effectuer des arbitrages entre les sources disponibles à court et long terme. Actuellement, les contrats long terme représentent 90% des sources d'approvisionnements pour Gaz de France. Avec le développement des marchés spot et des hubs gaziers, Distrigas a réussi à diminuer progressivement la place des contrats à long terme : les approvisionnements à court terme représentent aujourd'hui 25% des ressources gazières de Distrigas (*rapport annuel 2003*). La diversification des sources d'approvisionnement représente un instrument de flexibilité pour les entreprises gazières, notamment lorsque la demande connaît des pointes importantes et que les ressources sont insuffisantes dans le cadre des contrats long terme souscrits. De manière schématique, un gazier peut gérer un portefeuille d'approvisionnements en utilisant plusieurs instruments de flexibilité : la souscription de contrats de long terme, l'intégration verticale[1] et la remontée vers l'amont[2], ou encore le recours au marché spot pour acquérir les quantités non couvertes par les approvisionnements en interne et les contrats de long terme. Enfin, l'opérateur peut utiliser les capacités de stockage pour répondre à l'accroissement de la demande en période de pointe. Suite à la décision de l'Union Européenne, les capacités de stockage sont mises à disposition de tiers depuis juillet 2004 (accès des tiers au stockage). Dans ce contexte, il est évident que le recours au stockage va devenir un instrument de flexibilité important dans le choix d'un portefeuille d'approvisionnement gazier. Cela devrait permettre aux gaziers présents sur le marché de disposer d'un autre instrument de modulation à court terme que le recours au marché spot.

Comme le précise le rapport de la Commission de Régulation de l'Energie en France (2002),

[1] Voir à ce sujet Baranes *et al.* (2003).

[2] Par exemple *via* des prises de participation dans l'exploration-production de gisements.

"l'accès à un service de modulation dans des conditions transparentes et non discriminatoires constitue un complément indissociable de l'accès des tiers aux réseaux (...). "Le gaz disponible à court et moyen terme qui alimente en particulier le marché spot est limité... Ainsi, c'est seulement 5 à 10% des besoins européens qui peuvent être alimentés par des ressources plus fluides et parfois moins coûteuses que les ressources de long terme". Dans ce contexte, le recours au stockage constitue pour les acteurs un moyen de disposer de ressources gazières à court et moyen terme pour servir la demande en période de pointe : le stockage constitue ici un instrument de modulation complémentaire voire substituable au marché spot. Dans cet article, l'activité de stockage est envisagée comme un instrument de flexibilité pour les approvisionnements en gaz d'un opérateur qui sert la demande en période de pointe. Dans ce cadre, le stockage joue un rôle stratégique pour la fourniture d'un marché aval. Toutefois, la littérature économique sur les activités de stockage est plus large[3]. Traditionnellement, on considère que le stockage est un investissement qui permet aux firmes d'ajuster leur offre lorsque la demande est incertaine ou lorsqu'elle est soumise à des fluctuations conjoncturelles. La littérature économique reconnaît ainsi trois grandes motivations qui permettent d'expliquer l'incitation des firmes à stocker : la spéculation, la précaution et le lissage de la production. La *fonction spéculative* du stockage est relativement bien admise. Dans ce cas, le stockage permet aux firmes de tirer des rentes positives dans une situation où un choc exogène, par exemple, vient affecter le prix de marché du produit stocké. Le *motif de précaution* correspond à un rôle de régulation ; le stock permet alors aux firmes de réguler l'approvisionnement des marchés face à une demande incertaine lorsque la capacité de production des firmes n'est pas très élastique. Pour le cas plus précis du stockage de gaz, C. Chaton *et al.* (2004) analysent l'épuisement optimal des réserves de gaz dans différents scénarios notamment lorsque les autorités de régulation financent par des subventions forfaitaires des stocks de sécurités. Enfin, les firmes peuvent décider de stocker pour lisser les fluctuations conjoncturelles de la demande. A coté de ces fonctions traditionnelles, le stockage occupe une place non négligeable dans la littérature relative à la concurrence oligopolistique dans un cadre dynamique. Ainsi, par exemple, Kirman et Sobel (1974) et Philps et Richard (1989) analysent le rôle du stock dans la discrimination intertemporelle par les prix. Le stockage introduit alors une dépendance tarifaire intertemporelle dans le sens où les décisions prises à une période dépendent des actions des périodes précédentes. Le *rôle stratégique* du stockage a été initialement étudié par Arvan (1983), Saloner (1987) et Pal (1991,1996). Le stockage joue un rôle stratégique s'il affecte les décisions des firmes rivales aux périodes futures. Cet aspect du stockage provient du fait qu'il peut servir pour les firmes comme un moyen d'engagement par les quantités. Une firme oligopolistique peut être incitée à un investir dans du stock pour tenter de pré-empter la production future de ses concurrents. Saloner (1987) et Pal (1991,1996) considèrent un modèle de duopole dans lequel, à la première période, les firmes décident du

[3]Un survol de la littérature sur le stockage peut être trouvé dans Mitraille (2003a).

niveau de leurs avances en termes de production (qu'ils apparentent à du stock) et ensuite, dans une seconde période, vendent sur le marché leurs produits . Ils montrent que lorsqu'il existe un leader de Stackelberg, les firmes peuvent être incitées à produire à l'avance même si la production est plus coûteuse dans la première période. Mollgaard, Poddar et Sasaki (2000) et Poddar, Sasaki (2002) étudient l'incitation des firmes à stocker lorsque les firmes décident simultanément de leurs actions. Alors que dans un modèle de Stackelberg l'accroissement du profit n'est pas ambigu, le stockage peut ne pas être un équilibre dans les modèles où les choix sont simultanés. On retrouve dans la littérature économique ce rôle particulier dévolu au stockage (Mitraille 2003b). Dans ce cas, les acteurs arbitrent entre l'utilisation du stockage et le recours à un marché de court terme pour servir la demande. Notre modèle s'inscrit dans ce cadre. Il se démarque néanmoins de cette littérature en intégrant un lien entre la décision de stockage et le prix de l'input sur le marché de court terme. Contrairement à Poddar, Sasaki (2002) par exemple les décisions de vente sur le marché final sont influencées par le marché spot puisque que l'équilibre de ce dernier est endogène au modèle. Le déroulement de l'article est le

suivant. En section 2, nous développons la problématique et cadre de la modélisation. L'étude du modèle se fera en deux parties. Dans la section 3, nous envisageons le cas référentiel du jeu décrit ci-dessus où les gaziers sont symétriques. Dans la section 4, on suppose que l'un des opérateurs gaziers possède une position de leader pour sa stratégie de stockage. Dans le cadre de ces deux sections, une analyse des équilibres du jeu en terme de bien-être sera menée afin de comparer les effets pour la collectivité des comportements stratégiques des entreprises. Les deux dernières sections sont consacrées aux conclusions et annexes.

2 Le modèle

Nous considérons une industrie dans laquelle n opérateurs se concurrencent sur le marché d'un bien homogène, le gaz naturel. Les comportements de consommation sont représentés par la demande de gaz qui s'adresse aux n entreprises distributrices. On note alors $P(Q)$ la demande en bien de gaz qui dépend du volume de gaz agrégé Q échangé sur le marché. L'offre en aval d'un gazier i est notée q_i. Pour fournir cette offre, le gazier utilise la quantité injectée dans le stock que l'on note y_i. Deux cas peuvent alors se produire :

- soit la quantité de gaz stockée y_i est insuffisante pour fournir la quantité de gaz q_i en aval. Dans ce cas, le gazier peut s'adresser sur le marché spot pour acquérir les quantités supplémentaires z_i et servir la demande ;
- soit la quantité de gaz stockée est trop importante par rapport à la demande qui s'adresse à lui. Le gazier a alors la possibilité de vendre la quantité excédentaire sur le marché spot.

Ainsi, pour chaque opérateur gazier, il existe donc une relation entre la demande finale, la quantité de gaz injectée dans le stock et la position sur le marché spot donnée par :

$$q_i \leq z_i + y_i$$

Cette relation traduit les possibilités de modulation (stock / spot) offertes aux gaziers pour servir le marché aval. Enfin, on note s le prix spot du gaz qui dépend donc des opérations d'achat ou de vente qui sont effectuées, par les gaziers et les traders, sur ce marché. On considère que ces n opérateurs qui sont en concurrence en aval sur le marché final s'approvisionnent en gaz en amont à travers des contrats de long terme (ou par des approvisionnements internes) à un prix marginal constant γ, que l'on normalise sans perte de généralité à zéro. Cette hypothèse nous permet de neutraliser les effets qui proviennent de la nature des contrats d'approvisonnement de long terme. Comme nous l'avons souligné précédemment, nous voulons centrer l'analyse sur les arbitrages d'approvisionnement à court terme et interpréter nos résultats en termes de stratégies de modulation à partir des seuls éléments déterminants des jeux concurrentiels qui ont lieu en aval. Dans ce contexte, l'approvisionnement que l'on considère ici est un approvisionnement pour motif de stockage qui permet aux opérateurs de servir la demande en période de pointe sur un marché localement défini. Paralèllement au stockage, les firmes gazières ont la possibilité de recourir à un marché spot qui leur permet de compléter leur portefeuille d'approvisionnement quand les conditions de stockage ne sont pas intéressantes par rapport au prix sur le marché spot, ou lorsque le stock n'est pas suffisant pour satisfaire la demande qui s'exprime en aval. Le stock et le spot sont en fait considérés ici comme deux modes d'approvisionnement substituables ou complémentaires. On retrouve les caractéristiques d'une modulation de court terme afin de servir la demande en période de pointe. Sur le marché spot, m traders ont la possibilité d'intervenir à côté des opérateurs gaziers présents en aval. On note w_j l'offre nette du trader j : il a une position d'offreur lorsque $w_j > 0$ et de demandeur lorsque $w_j < 0$. Il s'agit ici de rendre compte d'un fonctionnement de marché dans lequel des agents, qui ne servent pas directement le marché final considéré, ont la possibilité pour des motifs de spéculation ou pour servir éventuellement d'autres marchés finals (dont la localisation géographique est différente par exemple), d'intervenir sur ce marché et ainsi d'effectuer des opérations d'achats/vente de gaz. Cette hypothèse permet de se concentrer sur les effets que produit le marché spot sur une concurrence locale en aval entre gaziers[4]. On suppose que les opérateurs gaziers ainsi que les traders cherchent à maximiser leur profit. Le profit des gaziers est donné par la différence entre les recettes réalisées sur le marché aval et le coût supporté (coût d'accès au stockage ay_i et coût d'approvisionnement sur le marché spot lorsque cela est nécessaire, sz_i) :

$$\Pi_i(\mathbf{q}, \mathbf{y}) = p(Q)\, q_i - ay_i - sz_i \text{ avec } \ q_i \leq y_i + z_i$$

[4]De manière générale, on fait l'hypothèse que les *traders* n'interviennent sur des marchés spot qu'en tant qu'arbitragistes : ils prennent position sur chacun d'eux (offre ou demande) en fonction des prix de la ressource sur chacune des places.

Cette expression permet de prendre en compte les deux situations mentionnées précédemment : celle où le gazier utilise le marché spot pour compléter ses approvisionnnements (dans ce cas il supporte un coût $sz_i > 0$) et celle où il utilise ses excédents de gaz stockés pour les vendre sur le marché spot (dans ce cas il bénéficie de recettes $-sz_i > 0$). En substituant[5] z_i dans l'expression le profit des gaziers se réécrit :

$$\Pi_i(\mathbf{q}, \mathbf{y}) = (p(Q) - s) q_i - (a - s) y_i$$

De son côté, le profit des traders $j = 1, \ldots, m$ est donné par :

$$\Pi_j(\mathbf{w}) = (s - \gamma) w_j = s w_j$$

Ici encore deux cas peuvent survenir. Celui où le trader vend du gaz ($w_j > 0$) sur le spot quand $s > \gamma = 0$ et celui où il achète du gaz ($w_j < 0$) lorsque son coût d'approvionnement γ est supérieur au prix du marché spot $(s < \gamma = 0)$. Enfin, l'activité de stockage est supposée générer un profit pour le stockeur égal à :

$$\Pi_s = (a - c) \sum_{i=1}^{i=n} y_i$$

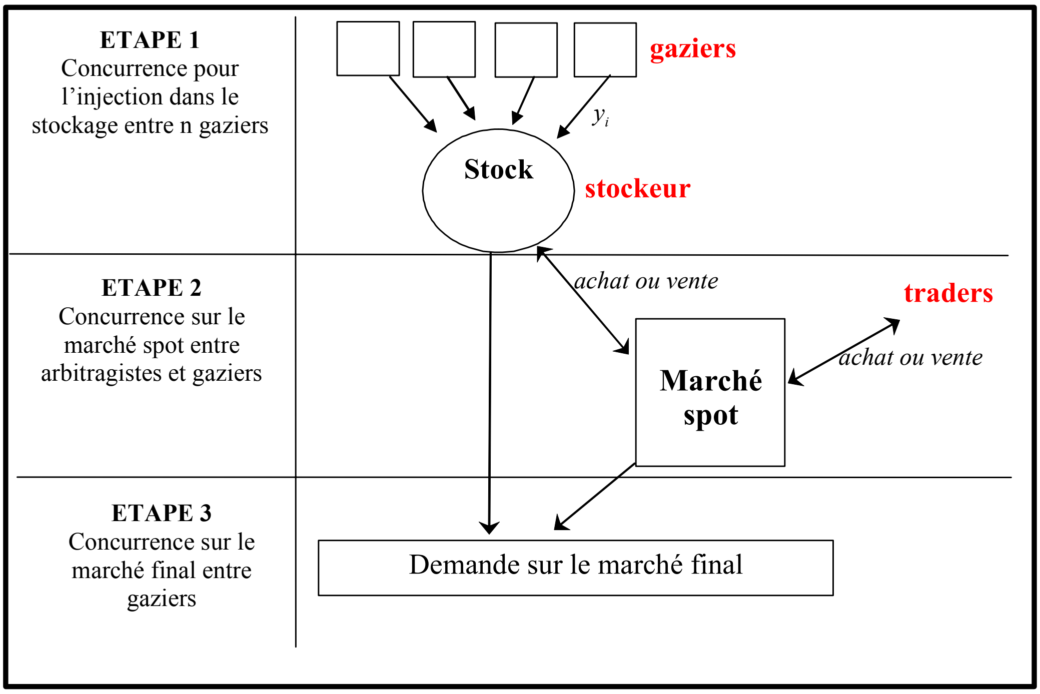
ici $a > 0$ est le prix uniforme ou charge d'accès au stockage[6] et $c > 0$ est le coût unitaire et marginal de l'activité[7]. On considère un jeu en trois étapes que nous détaillons dans les sections suivantes. En première étape, les gaziers décident de leur stratégie de stockage (choix de y_i). En deuxième, les opérateurs (gaziers et traders) décident de leur achats et ventes sur le spot (choix de w_j et z_i). Enfin en troisième étape, les gaziers se concurrencent sur le marché aval du gaz (choix de q_i). On résoud ce jeu par induction vers l'amont. Le déroulement du jeu illustre bien la situation observée sur les marchés gaziers. Dans une première étape (période où la demande est relativement faible), les gaziers décident de leur stratégie de stockage de ressource gazière qui permettra de servir une partie de la demande en période de pointe ou encore, qui pourra être utilisée pour être revendue sur le marché spot. Dans une seconde étape, les gaziers déterminent les quantités achetées ou vendues sur le marché de court terme. A cette étape, des traders ont la possibilité de faire du profit en achetant ou en vendant des quantités de gaz suivant le prix du spot par rapport à leur coût d'approvisionnement (ici égal à zéro). Ils contribuent ainsi à équilibrer le marché de court terme en effectuant des arbitrages sur les différentes places (ce qui influence le prix d'acquisition de la ressource gazière sur le spot). Dans une troisième étape

[5] On montre en effet en annexe A, que l'inégalité $q_i \leq y_i + z_i$ est toujours saturée. Ici toutefois, nous considérons implicitement que le solde entre les quantités stockées et celles vendues n'est jamais nul ($z_i \neq 0$). Cette écriture n'est pas sans incidence sur la résolution du jeu, comme nous le discuterons dans la suite.

[6] A priori, ce prix est exogène, mais on envisagera par la suite les scénarios où cette charge d'accès est soit régulée, soit fixée par le stockeur lui-même.

[7] Pour simplifier, nous considérons des rendements d'échelles constants. Lever cette hypothèse, en intégrant par exemple un coût fixe ne fragilise pas les résultats.

enfin, ayant déterminé leur portefeuille d'approvisionnement (spot et stock), les gaziers servent la demande finale. On peut noter que dans le cadre de ce modèle, les branches de l'arbre du jeu pour lesquelles les gaziers fournissent exactement la quantité stockée ($z_i = 0$) ne sont pas étudiées. On se focalise ici sur les impacts de la décision de stockage sur le prix endogène du spot s et par là même sur l'arbitrage entre stock et spot pour la fourniture du marché aval[8]. Lorsque $y_i = q_i$ (donc $z_i = 0$), les décisions de vente sur le marché final ne sont plus influencées par le marché spot mais simplement liées à la décisons de stockage. Le graphique suivant résume le jeu et la structure industrielle considérée.



Jeu et Structure Industrielle

3 Stockage, marché spot et fourniture de gaz : le cas de la concurrence

Dans cette section, on résoud les différentes étapes du jeu de manière à obtenir l'équilibre dont nous analyserons les propriétés (niveaux de prix, de profits et de bien-être). Dans la première sous-section 3.1, nous nous situons dans l'étape aval du jeu dans laquelle les gaziers servent la demande. Dans la deuxième sous-section, l'équilibre de la concurrence entre traders et gaziers est calculée. Dans la sous-section 3.3, nous analysons les stratégies de stockage des

[8] Il est donc a priori possible que certains des équilibres que nous discutons puissent être dominés par des situations d'éviction du marché spot ($z_i = 0$). Par conséquent, l'endogénéisation du leadership par l'activité stockage ne peut pas être un équilibre de notre modèle. Cf. Pal (91) et Mitraille (2003) pour un survol.

gaziers. Dans la dernière sous-section, l'équilibre global du jeu est analysé du point de vue du bien-être. On envisagera comment ce bien-être évolue lorsque certains paramètres se modifient (influence du niveau de la charge d'accès, du coût du stockage et du nombre d'acteurs).

3.1 Concurrence sur le marché aval

On suppose que les n gaziers se font concurrence en quantité à la Cournot[9]. On pourrait montrer que des résultats similaires à ceux de notre modèle sont obtenus avec une concurrence en prix lorsque une certaine différenciation est possible sur le gaz fourni (image de marque du gazier, qualité chimique du gaz, sécurité d'approvisionnement...). A l'équilibre de la concurrence en aval, le profit d'une firme gazière i est maximisé si elle choisit q_i^* tel que $\Pi_i\left(q_i^*, q_{-i}^*\right) \geq \Pi_i\left(q_i, q_{-i}^*\right), \forall q_i \geq 0$, c'est-à-dire si q_i^* obéit aux conditions[10] marginales traditionnelles d'égalité entre la recette marginale $p(Q) + p'(Q)\, q_i$ et le coût de court terme (en fait du spot) s :

$$\frac{\partial \Pi_i(q_i)}{\partial q_i} = p(Q) + p'(Q)\, q_i - s = 0 \Longleftrightarrow \frac{p(Q) - s}{p(Q)} = \frac{1}{n\varepsilon(Q)}$$

où $\varepsilon(Q)$ est l'élasticité-prix de la demande de gaz. Dans la suite nous supposons que la demande finale de gaz est linéaire et donnée par $P(Q) = 1 - Q$. Dans ce cas, on obtient explicitement l'équilibre (de Nash), pour tout i

$$q_i^* = q^*(s, n) = \frac{1-s}{1+n} \tag{1}$$

Le prix de marché s'écrit alors

$$p^*(s, n) = \frac{1+ns}{1+n}$$

Rapidement, on voit que le prix d'équilibre aval est croissant du prix du marché spot et qu'il converge[11] vers s lorsque le nombre de gazier s'accroît. Pour que ces valeurs correspondent bien à un équilibre, elles doivent être non négatives soit $q^*(s, n) \geq 0$ et $p^*(s, n) \geq 0$, c'est-à-dire que le prix sur le marché spot doit rester encadré de la manière suivante

$$-\frac{1}{n} \leq s \leq 1 \tag{2}$$

[9] Ce type de concurrence permet ici de faire apparaître tous les effets liés au pouvoir de marché des firmes en aval suivant les structures industrielles retenues. Sur un plan plus pratique, l'ouverture européenne effective depuis août 2000, a montré la lenteur du processus de mise en concurrence. A titre indicatif, l'opérateur historique GDF en France n'a perdu que 20 % environ des clients éligibles sur le territoire national.

[10] Ces conditions sont suffisantes si le profit est concave en q_i (ce qui est le cas pour notre cadre linéaire). Alors les meilleures réponses $q_i^r(Q_{-i})$. sont des fonctions bijectives de la forme $q_i(Q_{-i})$.

En revanche on peut noter que le fait d'inclure les branches de l'arbre du jeu ici ignorées et pour lequelles $z_i = 0$ pour certains i, modifierait les fonctions de meilleures réponses en aval. Plus précisement, pour i tel que $z_i = 0$, on aurait $q_i^r(Q_{-i}) = y_i$.

[11] En effet $\lim_{n\to\infty} p^*(s, n) = s$.

3.2 Concurrence sur le marché spot

Par définition, le marché spot permet aux gaziers de procéder aux ajustements de court terme dans leur décision de modulation. Ainsi sachant leur position dans le stock y_i, ils échangent les quantités $z_i = q_i - y_i$ sur le marché spot en même temps que les arbitragistes prennent la position w_j. Le marché spot s'organise donc de la manière suivante : l'offre globale ($Q^* (n, s) = \sum_{i=1}^{i=n} q_i^*$) nette des positions dans le stockage ($Y = \sum_{i=1}^{i=n} y_i$ décidées en première période), constitue la demande (ou l'offre) globale d'aval sur le marché spot alors que l'offre globale (ou la demande) des arbitragistes est donnée par $W = \sum_{j=1}^{j=m} w_j$. Ainsi le prix s équilibre ce marché de la manière suivante :

$$\sum_{i \in I} (q_i^* - y_i) = \sum_{j=1}^{j=m} w_j \Leftrightarrow nq^* (s, n) = Y + W$$

En substituant (1), la demande inverse sur le spot s'écrit

$$S (W + Y) = 1 - \frac{n+1}{n} (Y + W)$$

Cette demande est donc décroissante de l'offre sur le marché spot $Y + W$ mais cet effet s'atténue avec le degré de la concurrence en aval[12]. La concurrence sur le marché spot suppose que les arbitragistes ajustent leur position de manière à maximiser leur profit[13] qui s'écrit

$$\Pi_j (\mathbf{w}) = S (W + Y) w_j$$

L'équilibre de Nash-Cournot (symétrique) entre les arbitragistes correspond à l'offre nette

$$w^* (Y, n, m) = \frac{n - Y (n+1)}{(n+1)(m+1)}$$

L'offre d'équilibre[14] d'un arbitragiste est donc décroissante des quantités stockées par tous les gaziers (qui est représentée par Y) mais cet effet décroit avec le degré de concurrence sur le marché spot (quand m s'accroît). En revanche cette offre d'équilibre est croissante du degré de concurrence sur le marché aval (quand n croît). Ainsi, le prix d'équilibre[15] du marché spot est égal à

$$S^* (Y) \equiv S (mw^* + Y) = \frac{n+1}{n} w^* (n, m, Y) = \frac{n - (n+1) Y}{(1+m) n}$$

On remarque que les effets du stockage d'un gazier sur le prix du marché spot peuvent être appréhendés par l'expression suivante

$$S^{*\prime} (Y) = -\frac{n+1}{(m+1) n} < 0$$

[12] En effet, $\frac{d}{dn} |S' (Y + W)| = -\frac{1}{n^2} < 0$, la pente de la demande décroit en n.

[13] Ce profit est concave en w_j car $\Pi_j'' (w) = -2 \frac{1+n}{n} < 0$.

[14] On notera que celle-ci s'annule si $Y = \frac{n}{n+1}$, c'est-à-dire si les gaziers produisent globalement la quantité d'équilibre de Cournot qui correspond à un coût de production $\gamma = 0$.

[15] On remarque que la condition (2) d'existence de l'équilibre (intérieur) en aval est ici vérifiée si $S^* (Y) \geq -\frac{1}{n} \Leftrightarrow Y \leq \overline{Y} = \frac{n+m+1}{n+1}$. En revanche $S^* (Y) \leq 1$ est toujours vrai car $S^* (0) = \frac{1}{m+1} > 0$.

A la lecture de cette expression, on note que le prix du gaz sur le marché spot est d'autant plus élevé que les quantités stockées sont faibles. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où le recours au stockage est une modulation substituable au marché spot. Le fait de stocker plus de gaz revient à demander des quantités plus faibles sur le marché spot ce qui entraîne, toutes choses étant égales par ailleurs, une baisse du prix du spot. Ainsi à cette deuxième étape du jeu, on peut exprimer les décisions d'offre en aval (ainsi que le prix sur le marché final) comme une fonction de la décision globale de stockage $Y = \sum_{i=1}^{i=n} y_i$:

$$\begin{aligned} q_i^*(Y) &= q^*(S^*(Y), n) = \frac{1 - S^*(Y)}{1+n} = \frac{(n+1)Y + mn}{n(m+1)(n+1)} \\ p^*(S^*(Y), n) &= \frac{1+m+n-(n+1)Y}{(m+1)(n+1)} \end{aligned}$$

On remarque ici que l'offre sur le marché final est croissante du niveau de stockage et que le prix sur ce marché décroît lorsque la quantité stockage augmente. Ces deux résultats ne sont pas surprenants dans la mesure où les quantités stockées sont utilisées pour servir la demande.

3.3 Décisions de stockage

A la première période, les gaziers décident de la quantité de gaz qu'ils désirent stocker à un coût a de manière à pouvoir les vendre sur le marché aval ou sur la marché spot, comme les équilibres des sections 3.1 et 3.2 nous le montrent. Nous déterminons ici l'équilibre de Nash (symétrique) des décisions de stockage entre les gaziers. Le profit[16] de première période d'un gazier s'écrit donc

$$\Pi_i(\mathbf{q}^*, y_i, \mathbf{y}_{-i}) = (p^*(S^*(Y), n) - S^*(Y))\, q^*(S^*(Y), n) - (a - S^*(Y))\, y_i$$

où $Y = y_i + Y_{-i}$ et $Y_{-i} = \sum_{j \neq i} y_j$. A l'équilibre de l'étape en stockage, le profit d'une firme gazière i est maximisé si elle choisit y_i^* tel que $\Pi_i\left(q^*, y_i^*, \mathbf{y}_{-i}^*\right) \geq \Pi_i\left(\mathbf{q}^*, y_i, \mathbf{y}_{-i}^*\right)$,$\forall y_i \geq 0$. La fonction de meilleure réponse $y_i(Y_{-i})$ d'un gazier i est telle que

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi_i(\mathbf{q}^*, y_i(Y_{-i}), \mathbf{y}_{-i})}{\partial y_i} &= 0 \\ &\Leftrightarrow \left[P'(nq^*)(n-1)\frac{dq^*}{ds}q^* - (q^* - y_i)\right] S^{*\prime}(Y) = a - S^* \\ &\Leftrightarrow \left[\frac{n-1}{n+1}(1-s)\,q^* - (q^* - y_i)\right] \frac{n+1}{(1+m)\,n} = a - S^* \end{aligned}$$

On peut commenter cette expression afin de décomposer les différents effets d'une variation des quantités stockées y_i sur le profit d'un gazier. Il faut ici préciser les différents effets qui apparaissent dans ce cas :

---

[16] Ces profits sont concaves en y_i car

$$\frac{\partial^2 \Pi_i(y_i, \mathbf{y}_{-i})}{\partial y_i^2} < 0 \Leftrightarrow -2\frac{n^2 + n^2 m + nm + n - 1}{n^2 (1+m)^2} < 0$$

- L'expression $P'(nq^*)(n-1)\frac{dq^*}{ds}q^*S^{*\prime}(Y)$ représente *l'effet marché final* : l'accroissement des quantités stockées entraîne une modification du profit réalisé sur le marché final. Toute augmentation des quantités de gaz mises dans le stock se traduit par un accroissement de l'offre sur le marché final (effet positif sur le profit), d'une baisse du prix (effet négatif), d'une baisse du prix du spot qui accroît l'offre sur le marché final (effet positif). Ici, le profit s'accroît lorsque les quantités stockées augmentent : $\frac{n-1}{(1+m)n}(1-s)q^* > 0$
- L'expression $-(q^*-y_i)S^{*\prime}(Y)$ représente *l'effet spot* : l'accroissement des quantités stockées entraîne une baisse du prix du spot qui provoque directement une baisse du coût d'approvisionnement pour les quantités achetés sur le spot (ou une baisse des recettes si le gazier vendait sur le spot les quantités excédentaires $y_i - q^* > 0$).
- Enfin, l'expression $a - S^*$ représente l'*effet direct sur le coût net de l'injection dans le stockage* : lorsque les quantités stockées augmentent d'une unité, cela conduit toutes choses étant égales par ailleurs à un accroissement du coût relatif d'approvisionnement lorsque $S^* < a$ et à une baisse de ce coût si $S^* > a$

A partir des expressions précédentes, on peut calculer les quantités stockées par chaque gazier à l'équilibre de Nash :

$$y^*(a,n,m) = \frac{n(n+1)(m+1) + 2m - n(m+1)^2(n+1)a}{(n+1)(n(n+2)(m+1)+m-1)} \geq 0$$

De plus pour cet équilibre intérieur[17] et afin que $y^*(a,n,m) \geq 0$ on doit avoir

$$a \leq a_n = \frac{n(n+1)(m+1)+2m}{n(m+1)^2(n+1)} > 0$$

On vérifie en annexe A que la condition (2) est valide, (voir aussi note 15), soit ici $Y^* = ny^* \leq \overline{Y} = \frac{n+m+1}{n+1}$. Ainsi sur le marché spot, l'équilibre s'établit au niveaux

$$\begin{aligned} w^*(a,n,m) &= w^*(n,m,ny^*) = \frac{n(an(n+1)(m+1)+n-1)}{(n+1)(n(n+2)(m+1)+m-1)} > 0 \\ s^*(a,n,m) &= S^*(ny^*) = \frac{an(n+1)(m+1)+n-1}{n(n+2)(m+1)+m-1} > 0 \end{aligned}$$

On peut alors donner le résultat suivant (preuve en annexe A).

Lemme 1 *Il existe un seuil de charge d'accès* $\widehat{a} = \frac{n-1}{n(m+1)+m-1} < a_n$ *tel que* $s^*(\widehat{a},n,m) = \widehat{a}$ *et* $s^*(a,n,m) \gtreqless a$ *si* $a \lesseqgtr \widehat{a}$

Le prix du spot croît moins vite que le prix du stock a car le nombre d'acteurs sur le marché spot est plus élevé $(n+m)$ que celui des acteurs qui ont accès au stock (n). Il est alors naturel de voir que le prix du marché spot converge vers celui du stock (a) lorsque le nombre d'acteurs commun est très grand[18]. Sur le marché final, on a les offres d'équilibre :

$$q^*(a,n,m) = \frac{m + n(m+1)(1-a)}{n(n+2)(m+1)+m-1} > 0, \forall a \leq a_n$$

[17] Si $a \geq a_n$ alors l'équilibre est en coin soit $y^* = 0$, $w^* = \frac{n}{(n+1)(m+1)}$ puis $s^* = \frac{1}{m+1}$ ainsi $q^* = \frac{n}{(n+1)(m+1)}$

[18] En effet $\lim_{n\to\infty} s^*(a,n,m) = a$.

Proposition 1 *A l'équilibre, les arbitragistes se positionnent en vendeurs sur le marché spot et le prix sur* **ce** *marché incopore une marge bénéficiaire* $(s^* > 0)$ *. A l'équilibre, tous les gaziers se portent acquéreur de gaz sur le marché spot pour fournir la demande finale, car*

$$mw^* (a, n, m) = n (q^* (a, n, m) - y^* (a, n, m)) > 0$$

En effet

$$q^* (a, n, m) - y^* (a, n, m) = m \frac{n(m+1)(n+1)a + n - 1}{(n+1)(n(n+2)(m+1) + m - 1)} > 0$$

Le résultat présenté traduit ici le fait qu'à l'équilibre, les gaziers stockent des quantités de gaz insuffisantes par rapport à l'offre qu'ils font sur le marché final. Cela signifie qu'à l'équilibre, ils modulent leurs approvisionnements et utilisent comme moyens de flexibilité le marché spot et les capacités de stockage. Les gaziers sont obligés de recourir au marché spot pour compléter leur approvisionnement en gaz. Dans la suite de l'article, on appellera une stratégie de *sur-stockage* celle qui consisterait pour une firme distributrice à fournir en aval moins que la quantité stockée (cas où $q^* (a, n, m) - y^* (a, n, m) < 0$).

Proposition 2 *A l'équilibre, la stratégie des gaziers consiste à stocker une quantité de gaz inférieure à leur demande sur le marché : il n'y a pas de sur-stockage.*

$$q^* (a, n, m) > y^* (a, n, m)$$

On remarque ici que même lorsque le prix d'accès a est très faible $(a < \widehat{a})$, la stratégie d'équilibre des gaziers ne correspond pas à une modulation exclusive à partir du stockage. A première vue, ce résultat paraît surprenant car le prix du spot est alors supérieur au prix du stock (cf. lemme 1). L'intuition est relativement simple : si les gaziers choisissent une modulation exclusive par le stock alors la demande s'annule sur le marché spot et le prix spot est nul. Il devient donc avantageux pour chacun des gaziers de dévier en modulant également par le spot. L'équilibre énoncé à la proposition 2 traduit donc l'arbitrage qu'effectuent les gaziers entre les deux sources de modulation. Le raisonnement est identique lorsque $a > \widehat{a}$.

3.4 Analyse de bien-être

Le bien-être de la collectivité est la somme du surplus des consommateurs, des profits des n gaziers, des m arbitragistes et de la firme en charge du stockage.

$$W^n (a, c, n, m) = \int_0^{nq^*(a,n,m)} P(Q)\, dQ - nq^* (a, n, m) P (nq^* (a, n, m)) + n\Pi (\mathbf{q}^*, \mathbf{y}^*) + m\Pi (\mathbf{w}^*) + \Pi_s$$

Le welfare correspondant à cet équilibre de concurrence arbore un profil concave en fonction de la charge d'accès[19]. Pour expliquer cette évolution, il est intéressant de décomposer l'effet de

[19] La concavité est assurée car

$$\frac{\partial^2 W^n}{\partial a^2} = -\frac{1}{2} \frac{n^4 (m+1)^2}{(n(n+2)(m+1) + m - 1)^2} < 0$$

la charge d'accès sur les profits des acteurs (gaziers, arbitragistes et stockeur) ainsi que sur le surplus des consommateurs. Le *surplus des consommateurs* est décroissant de la charge d'accès pour les valeurs $a \in [0, a_n]$ puisque cela contribue à accroître[20] le prix sur le marché aval (effet de l'accroissement direct de la charge d'accès et indirect *via* son impact sur le prix du spot). Le profit d'un gazier à l'équilibre peut s'écrire

$$\Pi(\mathbf{q}^*, \mathbf{y}^*) = (p^*(S^*(Y^*), n) - S^*(Y))\, q^*(S^*(Y), n) - (a - S^*(Y^*))\, y^*$$

On peut montrer (cf. annexe A) que le *profit de ce gazier* est décroissant du niveau de la charge d'accès (jusqu'à la valeur critique $a = a_n$) car celle-ci représente un coût. Pour des valeur de la charge d'accès comprise entre 0 et a_n, le *profit des arbitragistes* croît avec a (ce résultat est logique dans la mesure où le prix du spot est positivement corrélé avec le niveau de la charge d'accès). A l'équilibre, le profit de la firme en charge du stockage (*le stockeur*) s'écrit :

$$\Pi_s(a, c, n, m) = n(a - c)\, y^*(a, n, m)$$

C'est une fonction concave[21] de a. Ce profil illustre deux type d'effets sur le profit du stockeur lorsque la charge d'accès augmente : dans un premier temps, l'accroissement de la charge d'accès entraîne une augmentation des recettes (effet prix), au-delà d'une certaine valeur de a ($a = a_s^n$), la baisse des quantités de gaz transitées (effet quantité) l'emporte et explique la diminution du profit. Au total, pour des faibles valeurs de a, c'est-à-dire pour de grandes quantités stockées, l'accroissement du profit des arbitragistes (lié à l'augmentation du prix du spot s) et du profit du stockeur explique le profil croissant du welfare. Au-delà d'un seuil pour a (c'est-à-dire pour des quantités stockées qui deviennent marginales), l'accroissement du profit de ces deux types d'acteurs est marginal par rapport à la baisse du surplus des consommateurs et du profit des gaziers, le welfare décroit. Au-delà de la valeur limite $a = a_n$, aucune offre sur le marché final n'a transité par le stock et l'influence de a est nulle (le welfare reste constant quelles que soient les valeurs de a). A partir de l'analyse précédente du profil du welfare, on peut alors examiner la politique de réglementation optimale de la charge d'accès. Pour la solution d'équilibre intérieur,

Dans le cas de la solution en coin le welfare est indépendant de a et s'écrit simplement

$$W^n(a_n, c, n, m) = \frac{1}{2}\frac{nm(nm + 2m + 2 + 2n)}{(m+1)^2 (n+1)^2}$$

[20] En effet

$$\frac{dp^*(s^*, n)}{da} = \frac{(m+1)n^2}{n(n+2)(m+1) + m - 1} > 0$$

[21] Le profit du stockeur est bien concave par rapport à a car

$$\frac{\partial^2 \Pi_s}{\partial a^2} = -2\frac{n^2(1+m)^2}{n(n+2)(m+1) + m - 1} < 0$$

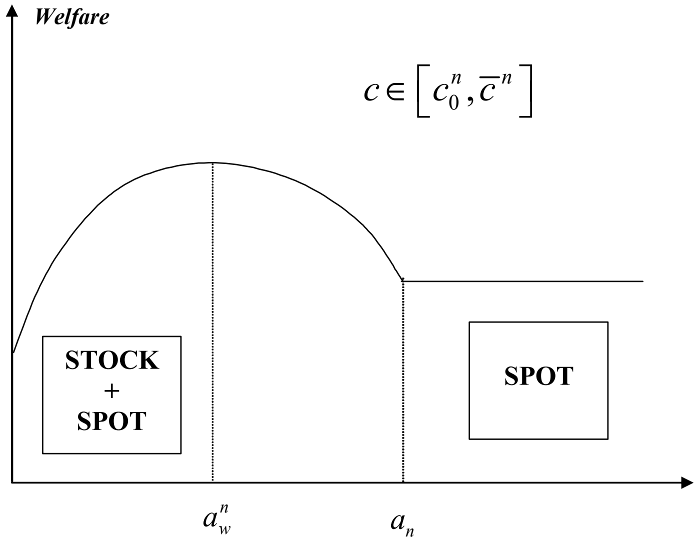
le welfare atteint son maximum pour $a = \min\{\max\{a_w^n, 0\}, a_n\}$ où

$$a_w^n = \frac{n(n+2)(m+1)+m-1}{n^2}c - \frac{m(n+1)+2n-1}{n^2(m+1)}$$

De plus $0 \leq a_w^n \leq a_n$ si[22] $c \in [c_0^n, \overline{c}^n]$ avec

$$\overline{c}^n = \frac{m+n+1}{(n+1)(m+1)^2} \quad \text{et} \quad c_0^n = \frac{m(n+1)+2n-1}{(m+1)(n(n+2)(m+1)+m-1)}$$

En rappellant que a_n représente la valeur de la charge d'accès à partir de laquelle aucune quantité offerte sur le final ne transite par le stock, les relations précédentes permettent d'établir le graphique suivant, illustrant le profil du welfare lorsque a varie.



Profil du Welfare en concurrence : zone intermédaire

Pour des valeurs du coût du stockage intermédiaires ($c \in [c_0^n, \overline{c}^n]$), le niveau optimal de charge d'accès est intérieur au sens où il est positif mais inférieur à a_n.

Proposition 3 *Pour des valeurs intermédiaires du coût de stockage ($c \in [c_0^n, \overline{c}^n]$), la modulation stock/spot est collectivement préférée. Du point de vue de la régulation, cela signifie qu'il est optimal qu'une partie de la demande servie transite par le stock. A contrario, une modulation qui ne s'effectuerait qu'à partir du marché spot n'est donc pas optimale.*

De manière plus précise, lorsque $c \in [c_0^n, \overline{c}^n]$, le bien-être atteint son maximum pour un niveau de charge d'accès a_w^n qui se situe dans la zone où la stratégie d'approvisionnement consiste à utiliser à la fois le spot et le stock $(a_w^n < a_n)$. Dans ce cas, pour des valeurs faibles de la charge d'accès, il est collectivement préférable d'éviter un approvisionnement exclusif via le stock (alors que celui-ci est pourtant relativement moins coûteux). Il est ici intéressant de regarder comment évolue la zone correspondante lorsque le nombre d'arbitragistes augmente. Cela revient à étudier l'impact de m sur $(\overline{c}^n - c_0^n)$. On montre dans l'annexe A le corollaire suivant.

[22] En effet a_w^n est croissant en c car $\frac{da_w^n}{dc} \frac{n(n+2)(m+1)+m-1}{n^2} > 0$

Corollaire 1 *Lorsque le marché spot est peu fluide (m est faible) la zone dans laquelle la modulation stock/spot est optimale s'agrandit.*

$$\frac{d\left(\overline{c}^n - c_0^n\right)}{dm} < 0$$

Pour un marché spot peu fluide (m faible), le prix du spot augmente toutes choses étant égales par ailleurs ce qui rend relativement moins intéressant le spot. Ceci explique l'élargissement de la zone où la modulation stock/spot est socialement optimale. On peut en outre noter que dans cette zone intermédiaire pour la valeur du coût du stockage, il existe un intervalle $[c_0^s, \overline{c}^n]$ où $c_0^s > c_0^n$, pour lequel la régulation optimale de la charge d'accès ($a = a_w^n$) génère aussi des profits positifs pour le stockeur. Ainsi une régulation de la charge d'accès au prix a_w^n est soutenable pour le stockeur si les coûts de stockage ne sont pas trop faibles.

4 Leadership sur l'accès au stockage

On suppose à présent qu'une entreprise parmi les n gaziers joue en premier dans la concurrence pour l'utilisation du stock. Cette hypothèse suppose implicitement qu'une entreprise (le leader) dispose d'un accès privilégié au stockage par rapport aux autres gaziers (maintenant la frange). Ce cadre se justifie dans la mesure où dans la plupart des pays européens une firme, présente historiquement, était seule utilisatrice du stockage pour des raisons de sécurité d'approvisionnement, de lissage des pointes de la demande et d'optimisation du système de transport. Aujourd'hui la question se pose de laisser cette entreprise jouir de ce pouvoir de quasi-préemption sur le stock. Analyser le leadership d'une firme dans le jeu que nous avons proposé est donc un moyen d'envisager un tel scénario[23]. Dans le modèle, on repère maintenant par l le leader et f l'une des $n-1$ firmes gazières représentative de la "frange" oligopolistique[24].

4.1 Equilibre (de Stackelberg) dans les décisions de stockage

Le leadership sur l'accès au stockage n'a pas d'effet sur la *structure* de la concurrence sur le marché final, ni sur celle du marché spot. En revanche *a priori*, elle exerce un effet sur les niveaux des variables en concurrence. Ainsi, les étapes 2 et 3 du jeu ne sont pas modifiées (voir section 3) et seule l'étape initiale (celle de stockage) doit être reconsidérée. Les suiveurs ont la même fonction de meilleure réponse que dans le cas de concurrence (cf. la sous-section 3.3 ci-dessus) à la différence près que $Y_{-i} = y_l + \sum_{j \in I - \{i,l\}} y_j$. Or l'équilibre symétrique au sein de la frange nous permet d'exprimer la fonction de meilleure réponse d'une firme de la frange

[23] Comme nous l'avons souligné précédemment nous envisageons le leadership de manière exogène. Au contraire Pal (1991, 1996) envisage dans un cadre plus simple la formation endogène d'un leadership sur la production.

[24] Nous avons opté pour une frange oligopolistique plutôt que concurrentielle car l'apparition d'un leader ne réduit pas les autres gaziers à des firmes résiduelles, n'ayant aucun pouvoir de marché..

comme dépendant de la seule décision de stockage du leader car $y_l + (n-1)\, y_f = Y_{-l}$. Soit après calcul,

$$\begin{aligned} Y_{-l}\,(y_l) &= -\frac{(n+1)(n\,(n+1)\,(m+1)-2)}{(1+n)\,(n^2(n+1)(m+1)+2\,(n-1))} y_l + \\ &\quad + \frac{n(n\,(n+1)\,(m+1)+2m) - n^2(m+1)^2(n+1)a}{(n+1)\,(n^2(n+1)(m+1)+2\,(n-1))} \end{aligned}$$

Le profit du leader[25] s'écrit donc

$$\Pi_l\,(y_l) = \Pi_l\,(\mathbf{q}, y_l, Y_{-l}\,(y_l)) = (p^* - S^*)\, q^* - (a - S^*)\, y_l$$

A l'équilibre[26], on parvient donc aux niveaux de stockage suivants :

$$\begin{aligned} y_l^*\,(a,n,m) &= \frac{B\,(n,m) - A\,(n,m)\,a}{2\,(n+1)^2\,(n^2(n+1)(m+1) - 2\,(n-1))} \\ y_f^*\,(a,n,m) &= \frac{D\,(n,m) - C\,(n,m)\,a}{2\,(n+1)^2\,(n^2(n+1)(m+1) - 2\,(n-1))} \end{aligned}$$

avec[27] $C\,(n,m) > 0$, $D\,(n,m) > 0$. On montre de plus, en annexe B, que

$$\begin{aligned} y_l^*\,(a,n,m) &\geq 0 \Leftrightarrow a \leq a_l = \frac{B\,(n,m)}{A\,(n,m)} \\ y_f^*\,(a,n,m) &\geq 0 \Leftrightarrow a \leq a_f = \frac{C\,(n,m)}{D\,(n,m)} \end{aligned}$$

avec

$$a_l < a_n < a_f$$

Cette dernière relation indique que l'existence d'un leadership modifie la modulation stock-spot de la manière suivante. Dans son choix d'approvisionnement à court terme, le leader utilise uniquement le spot pour des valeurs plus faibles de la charge d'accès ; il "sort" plus rapidement du stock, en fonction du coût d'accès à l'infrastructure de stockage, qu'il ne l'aurait fait sans posséder de leadership. Il est donc plus sensible au coût d'accès a. En revanche, les firmes gazières de la frange sont relativement moins sensibles aux variations de coût d'accès du fait du leadership ; ainsi elles utilisent plus longtemps le stock (pour des valeurs plus importantes de a) et donc forcément si a est proche de a_n, elles stockent plus qu'à l'équilibre sans leadership. On peut même montrer (en annexe B) le résultat suivant.

Lemme 2 *Il existe un seuil de charge d'accès* $\widehat{a} = \frac{n-1}{n(m+1)+m-1} < a_n$ *tel que pour tout* $a \lesseqgtr \widehat{a}$ *alors*

$$y_f^*\,(a,n,m) \lesseqgtr y_n^*\,(a,n,m) \quad \textit{et } y_f^*\,(a,n,m) \lesseqgtr y_l^*\,(a,n,m)$$

[25] On montre en annexe B que ce profit est toujours concave en y_l.

[26] Le détail de calculs est donné en annexe B. On vérifie alors que $(n-1)\, y_f^*\,(a,n,m) + y_l^*\,(a,n,m) \leq \overline{Y}$.

[27] Les dénominateurs sont positifs car $f\,(2) = 12(m+1) - 2 > 0$ et $f'\,(n) = n(3n+2)\,(m+1) - 2 > 0$ donc $f\,(n) = n^2(n+1)(m+1) - 2\,(n-1) > 0, \forall n \geq 2$.

L'effet du leadership sur la stratégie des firmes de la frange se traduit donc par une réduction de leur modulation par le stock pour des niveaux relativement faibles de la charge d'accès ($a < \widehat{a}$). En revanche, dès que le stock devient onéreux ($a > \widehat{a}$), la présence d'un leader conduit les firmes de la frange à se positionner dans le stock au-delà de ce qu'elles auraient choisies dans le cas concurrentiel (de la section 3). Ainsi pour des faibles valeurs de la charge d'accès au stockage, le leader a intérêt à accroître la quantité stockée qui est peu coûteuse pour lui (si $a < \widehat{a}$). Dans ce cas, il oblige (en terme relatif) la frange à utiliser plus de gaz en provenance du marché spot ($y_f^* > y_n^*$). Sur le marché spot, les valeurs d'équilibres (intérieurs[28]) sont données par

$$\begin{aligned}
\widehat{w}\,(a,n,m) &= w^*\left(n,m,(n-1)\,y_f^* + y_l^*\right) = \frac{n^2(n-1) + E\,(n,m)\,a}{2\,(n+1)\,(n^2(n+1)(m+1) - 2\,(n-1))} > 0 \\
\widehat{s}\,(a,n,m) &= S^*\left((n-1)\,y_f^* + y_l^*\right) = \frac{n^2(n-1) + E\,(n,m)\,a}{2n\,(n^2(n+1)(m+1) - 2\,(n-1))} > 0
\end{aligned}$$

avec $E\,(n,m) > 0$. A la lecture des expressions précédentes, on voit que $\widehat{s}\,(\widehat{a},n,m) = \widehat{a}$, et on montre dans l'annexe B le résultat suivant :

Lemme 3 *Si* $a \lesseqgtr \widehat{a}$ *alors* $\widehat{s}\,(a,n,m) \gtreqless a$

Pour des valeurs faibles (respectivement élevées) de la charge d'accès au stockage, le prix du spot est supérieur (respectivement inférieur) au niveau de a. On voit dans ce cas que le stockage est moins (respectivement plus) coûteux que le spot. Ce dernier résultat mis en perspective avec le lemme 1 permet d'écrire la proposition suivante :

Proposition 4 *Quelle que soit la valeur de la charge d'accès* ($a < a_f$)*, la stratégie du leader en terme de modulation stock-spot lui permet d'accroître le coût des firmes de la frange ("raising rival's cost")*

Pour des valeurs relativement faibles de la charge d'accès au stockage ($a < \widehat{a}$), le leader a intérêt à stocker de manière importante ; dans ce cas, les firmes de la frange "répondent" de manière optimale en s'approvisionnant pour partie sur le marché spot relativement plus coûteux à l'équilibre. De la même manière, lorsque le coût du stockage devient plus important ($a > \widehat{a}$), le leader stocke de moins en moins (il arrête même de stocker et ne s'adresse qu'au marché spot pour des valeurs très élevées de a) ce qui conduit les firmes de la frange à "répondre" par une stratégie de stockage relativement plus coûteuse. Sur le marché aval, on peut calculer les valeurs d'équilibre des offres des gaziers :

$$q_l^*\,(a,n,m) = q_f^*\,(a,n,m) = \widehat{q}\,(a,n,m) = \frac{G\,(n,m) - F\,(n,m)\,a}{2\,(n+1)^2\,(n^2(n+1)(m+1) - 2\,(n-1))}$$

[28] Cf annexe B pour les détails. Il existe aussi des équilibres en coin. Si $a_f > a \geq a_l$ alors $y_l^* = 0$ et $y_f^* > 0$. Dans ce cas $\widehat{w} = \frac{\left(n^5+n^4\right)(m+1)+n^3(3m+1)+n^2(3m+5)-4(2n-1)}{(m+1)(n+1)^2(n^2(n+1)(m+1)-2(n-1))}$ puis $\widehat{s} = \widehat{w}\frac{n+1}{n}$. (ii) Si $a \geq a_f$ alors $y_j^* = 0, \forall j$. Dans ce cas $\widehat{w} = w^* = \frac{n}{(n+1)(m+1)}$ puis $\widehat{s} = s^* = \frac{1}{1+m}$ ainsi $q^* = \frac{n}{(n+1)(m+1)}$.

avec $\widehat{q}(a,n,m) \geq 0, \forall a \leq \overline{a}$ où $\overline{a} > a_f$. A partir des expressions ci-dessus, on compare le niveau des quantités offertes à l'équilibre sur le marché final avec le niveau des quantités de gaz stockées dans la première étape du jeu. Cette comparaison permet d'appréhender la stratégie de portefeuille d'approvisionnement de court terme des gaziers et notamment de voir si les firmes ont intérêt à sur-stocker. On montre en annexe B que pour tout $a \leq a_f$

$$z_f(a,n,m) = y_f^* - q_f^* = \frac{[D(n,m) - G(n,m)] - [C(n,m) - F(n,m)]\,a}{2(n+1)^2\left(n^2(n+1)(m+1) - 2(n-1)\right)} < 0$$

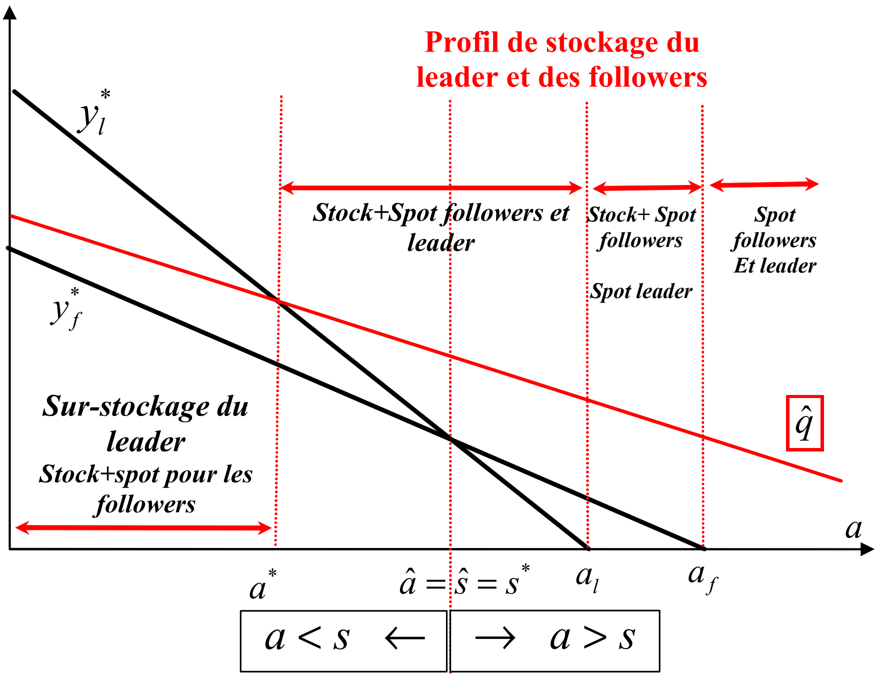
Lemme 4 *A l'équilibre (intérieur) avec leadership, les firmes de la frange utilisent le stockage comme moyen de modulation alternatif au marché spot pour servir la demande ($y_f^* < q_f^*$).*

Quelles que soient les valeurs de a, les firmes de la frange n'ont jamais intérêt à sur-stocker. Ce résultat est similaire à celui donné dans la proposition 2. La position des firmes suiveuses est cohérente dans la mesure où c'est le leader qui choisit sa stratégie de stockage en premier et qui "dicte" la stratégie de meilleure réponse des firmes de la frange (effet d'accroissement du coût des rivaux). Tout se passe comme si le leader faisait supporter les coûts d'arbitrage entre stock et spot aux firmes de la frange. Comme dans le cas d'équilibre concurrentiel, pour des valeurs de a inférieures au prix du spot à l'équilibre, les firmes de la frange ont intérêt à utiliser le spot comme modulation alors que cette stratégie est plus coûteuse. L'intuition développée dans le cas d'équilibre concurrentiel reste la même : si elles choisissaient uniquement le stock, elles auraient intérêt à dévier en modulant également par le spot, puisque le prix sur ce marché serait nul. Le lemme précédent traduit encore l'arbitrage qu'effectuent les gaziers entre les deux sources de modulation. Pour le leader, on montre que

$$z_l(a,n,m) = y_l^* - q_l^* \gtreqless 0 \Leftrightarrow a \lesseqgtr a^* < a_l$$

Proposition 5 *Il existe un seuil $a^* < \widehat{a}$ tel que si $a < a^*$, le leader choisit une stratégie de sur-stockage ($y_l^* > q_l^*$).*

Une nouvelle stratégie pour le leader apparaît dans le cadre de ce scénario : pour des valeurs faibles de a ($a < a^*$), le leader a intérêt à *sur-stocker,* c'est-à-dire à stocker des quantités de gaz au-delà du niveau de son offre sur le marché final. Cette stratégie est cohérente avec les développements précédents : le prix du stockage est très faible et le leader joue en premier connaissant les stratégies de meilleure réponse de la frange. Ainsi, en sur-stockant, il bénéficie du différentiel de coût d'approvisionnement et bénéficie d'un avantage concurrentiel par rapport aux firmes de la frange qui s'approvisionnent pour partie sur le spot. Dans ce cas, on pourrait penser que les firmes de la frange auraient intérêt elles aussi à sur-stocker pour les mêmes raisons. Si tel était le cas, la demande sur le spot serait nulle et de fait, les firmes auraient intérêt à dévier et à utiliser le marché spot comme modulation pour l'approvisionnement à court terme. Les deux résultats précédents peuvent être synthétisés dans le graphique suivant :



Lorsqu'une entreprise bénéficie d'un leadership sur les décisions de stockage, il est optimal pour elle de sur-stocker lorsque la charge d'accès est faible. Dans ce cas, le leader profite du différentiel de coût d'approvisionnement ($a < s$) et peut accroître ses recettes en revendant les quantités excédentaires sur le marché spot. Une telle stratégie, très profitable pour l'entreprise en leadership peut sembler *a priori* néfaste pour la collectivité : entraîner des baisses de profit pour les autres firmes (frange, stockeur, arbitragistes) et une baisse du surplus des consommateurs. Il faut donc analyser à présent le niveau de bien-être collectif lorsqu'apparaît ce type de stratégie.

4.2 Analyse de bien-être et régulation

Dans cette situation de leadership, le bien-être de la collectivité est la somme du surplus des consommateurs, du profit du leader l, des profits des $n-1$ gaziers de la frange, des m arbitragistes et de la firme en charge du stockage.

$$\begin{aligned} W^s(a,c,n,m) &= \int_0^{n\widehat{q}(a,n,m)} P(Q)\,dQ - (n\widehat{q}(a,n,m))\,P(n\widehat{q}(a,n,m)) \\ &\quad + \Pi_l(y_l^*) + (n-1)\,\Pi\left(\widehat{\mathbf{q}}, y_l^*, \mathbf{y}_f^*\right) + m\Pi(\widehat{\mathbf{w}}) + \Pi_s \end{aligned}$$

Le welfare correspondant à cet équilibre de leadership arbore un profil concave[29] en fonction de la charge d'accès. De manière à évaluer l'impact du sur-stockage sur le bien-être collectif,

[29] La concavité est assurée car

$$\frac{\partial^2 W^s}{\partial a^2} = -\frac{1}{4}\frac{n^2\left(n^2(2n+1)(m+1) - nm - 3n + 2\right)^2}{\left(n(n+1)(m+1) - 2n + 1\right)^2 (n+1)^2} < 0$$

Comme dans le cas d'équilibre concurrentiel (cf. section 3.1), l'accroissement du profit du stockeur et des arbitragistes explique l'augmentation du bien-être pour des faibles valeurs de a. Au-delà d'un certain seuil, l'effet de la baisse du profit des gaziers et du surplus des consommateurs l'emporte, ce qui explique la baisse du bien-être.

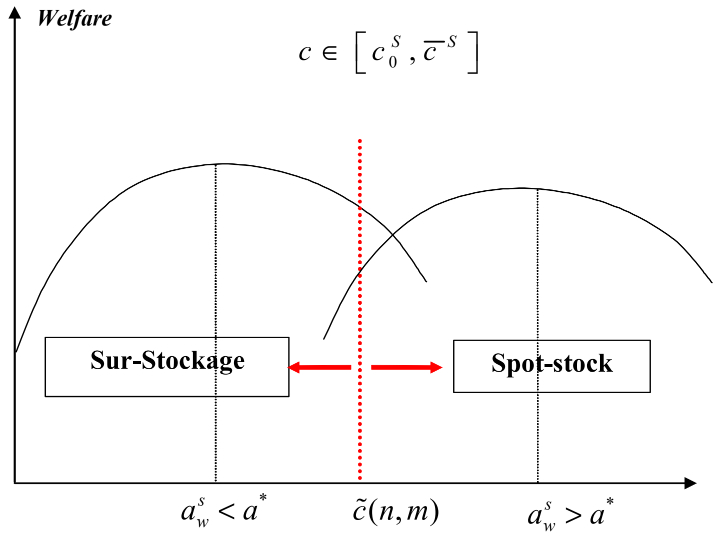
on peut examiner la politique de réglementation optimale de la charge d'accès. Si le niveau de charge d'accès optimal se trouvait dans la zone où la stratégie optimale du leader est de sur-stocker cela signifierait qu'une telle pratique est préférée par le régulateur du point de vue collectif. Il faut donc comparer le niveau de la charge d'accès (que l'on notera a_w^s) qui maximise le bien-être collectif avec le niveau du prix du stock en deça duquel le leader sur-stocke (a^*). Pour la solution d'équilibre intérieur[30], le welfare (avec leadership) atteint son maximum pour $a = \min\{\max\{a_w^s, 0\}, a_l\}$ où

$$a_w^s = 2\frac{(1+m)(1+n)(n^2(n+2)-2n+1)}{n(n^2(2n+1)(m+1)+2-n(3+m))}c - \frac{n^3(2m+3)+n^2(2m+1)+2(1-2n)}{n(n^2(2n+1)(m+1)+2-n(3+m))}$$

On montre dans l'annexe B que pour les valeurs admissibles de c ($c \in [c_0^s, \overline{c}^s]$ tel que $y_l > 0$), on obtient $a_w^s < a^*$ si $c < \widetilde{c}$[31].

Proposition 6 *Si $c < \widetilde{c}$, la régulation optimale de l'accès au stockage conduit à laisser le leader pratiquer sa stratégie de sur-stockage.*

Pour des valeurs relativement faibles du coût de stockage, la charge d'accès socialement optimale a_w^s est inférieure à a^*, valeur seuil en-deça de laquelle la stratégie du leader est de sur-stocker. Dans ce cas, il est collectivement préférable de laisser le leader sur-stocker. En effet, les quantités sur-stockées et revendues par le leader sur le marché de court terme contribuent à faire baisser le prix du spot ce qui est socialement optimal[32]. Lorsque le coût du stockage prend des valeurs plus fortes, le régulateur a intérêt au contraire à éviter cette stratégie de sur-stockage. Le graphique suivant résume cet arbitrage du régulateur en fonction du niveau de coût supporté par le stockeur.



Profil du Welfare et Leadership (zone intermédiaire)

[30] C'est-à-dire ici si $a < a_l$, pour que $y_i^* > 0$.

[31] On vérifie dans cette même annexe que $\widetilde{c} \in [c_0^s, \overline{c}^s]$.

[32] On montre dans l'annexe B que $s^* > \widehat{s}$

A la lecture des développements précédents, il est intéressant de noter que la valeur de $\widetilde{c}$ qui annule la différence entre a_w^s et a^* dépend du nombre d'arbitragistes qui interviennent sur le marché spot. On montre dans l'annexe B le corollaire suivant.

Corollaire 2 *Lorsque le nombre d'arbitragistes est faible, la zone dans laquelle la stratégie de sur-stockage du leader est collectivement préférée s'étend*

$$\frac{\partial \widetilde{c}}{\partial m} < 0$$

Ainsi, en présence de marchés spot peu fluides (situation européenne), il peut être optimal pour le régulateur d'autoriser le sur-stockage. Une telle stratégie peut permettre d'augmenter les quantités de gaz disponibles sur les marchés de court terme afin de faire baisser le prix de la ressource gazière.

5 Conclusion

Dans ce papier, l'essentiel de l'analyse est porté sur la modulation des approvisionnements court-terme en gaz dans un cadre concurrentiel (situation européenne dans les dix prochaines années). Deux instruments de flexibilité sont mis à disposition des gaziers pour leur choix de portefeuille à court terme : le marché spot et les capacités de stockages supposées ouvertes à la concurrence (Accès des Tiers au Stockage). Le modèle que nous avons présenté nous permet de repérer une organisation industrielle classique dans le secteur gazier : un marché final de la ressource complété par les "marchés" de la flexibilité : le spot et le stock. Dans un première période (creuse, "l'été"), un premier choix stratégique est effectué concernant le quantités stockées, qui seront utilisées pour servir une partie de la demande en période de pointe. Dans une deuxième période, (de pointe, "l'hiver") deux décisions sont prises séquentiellement : le gazier détermine d'abord les quantiés achetées ou vendues sur le marché spot ; il sert ensuite la demande de pointe en aval. Après avoir calculé les équilibres des différents marchés, une étude en terme de bien-être collectif a été menée afin de commenter les décisions éventuelles de régulation optimale (notamment la régulation optimale charge d'accès au stockage). Dans ce cadre d'analyse, nous montrons les résultats suivants :

- La diversification est une stratégie optimale pour les gaziers même lorsque le prix spot du gaz est plus élevé que le coût d'accès au stockage
- La modulation stock / spot est d'autant plus souhaitable socialement que le marché spot est peu fluide
- Le leader utilise le stockage de manière stratégique pour accroître le coût de ses concurrents
- Le stockage pour motif de spéculation peut être socialement efficace, notamment lorsque le marché spot est peu fluide (faible nombre d'arbitragistes). Ainsi lorsque le coût du stockage n'est pas trop élevé, les autorités de régulation peuvent avoir intérêt à fixer un

niveau de charge d'accès pour lequel le leader adopte une stratégie de sur-stockage. Dans ce cas, les quantitées stockées en excédent sont vendues par le leader sur le marché spot permettent de fluidifier l'offre et *in fine* de faire baisser le prix du gaz sur l'aval de la chaîne.

Annexes

Annexe A

A.1. Reécriture du profit des gaziers

On montre que l'inégalité $q \leq y + z$ est toujours saturée. Dans le texte, le profit d'un gazier donné s'écrit

$$\Pi(\mathbf{q}, \mathbf{y}) = p(Q)\, q - ay - sz \quad \text{avec} \quad q \leq y + z$$

Ainsi pour tout couple de décisions (q, y), on voit que le problème du choix de z (position nette sur le marché spot) obéit aux conditions d'optimalité suivantes (où $\lambda \geq 0$ est le prix implicite de la contrainte)

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi(\mathbf{q},\mathbf{y})}{\partial z} + \lambda = 0 \\ \lambda(y + z - q) = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} -s + \lambda = 0 \\ \lambda(y + z - q) = 0 \end{cases} \Leftrightarrow s(y + z - q) = 0$$

Donc sans perte de généralité (c'est-à-dire hormis le cas où $s = 0$), on a bien $z = q - y$.

A.2. Détails de l'équilibre de Nash à l'étape de stockage

La fonction de meilleure réponse d'un gazier i s'écrit

$$y_i(Y_{-i}) = -\frac{1}{2}\frac{n(n+1)(m+1) - 2}{n(n+1)(m+1) - 1} Y_{-i} - \frac{1}{2}\frac{n^2(m+1)^2(n+1)a - n^2(m+1)(n+1) - 2nm}{(n+1)(n(n+1)(m+1) - 1)}$$

On vérifie bien que $ny^*(a, n, m, \mu) \leq \overline{Y}$ car la différence $ny^*(a, n, m, \mu) - \overline{Y}$ est bien négative

$$ny^*(a, n, m, \mu) - \overline{Y} = -\frac{(m+1)(an^2(m+1) + (n+1)m + 2n - 1)}{n(n+2)(m+1) + m - 1} < 0$$

A.3. Preuve du lemme 1

La preuve est directe car la différence $s^*(a, n, m) - a$ s'écrit

$$s^*(a, n, m) - a = \frac{n - 1 - a(n(m+1) + m - 1)}{n(n+2)(m+1) + m - 1}$$

Elle est linéaire et décroissante en a. On voit alors directement que la solution de l'équation linéaire $s^*(a, n, m) - a = 0$ est bien

$$\widehat{a} = \frac{n - 1}{n(m+1) + m - 1}$$

et donc

$$s^*(a, n, m) \gtrless a \Leftrightarrow a \lessgtr \widehat{a}$$

A.4. Analyse de bien-être : détails

a. Evolution du surplus et profits des acteurs en fonction (a, m, n) Les différents variables sont données à l'équilibre du jeu complet.

- *Surplus des consommateurs.* Il s'écrit, $\forall a \in [0, a_n]$

$$S^n = \int_0^{nq^*(a,n,m)} P(Q)\,dQ - nq^*(a,n,m)\,P(nq^*(a,n,m)) = \frac{1}{2}\left(n\frac{anm + an - n - m - nm}{n(n+2)(m+1)+m-1}\right)^2$$

  Etant convexe en a car

$$\frac{d^2S^n}{da^2} = \left(\frac{n^2(m+1)}{n(n+2)(m+1)+m-1}\right)^2 > 0$$

  et puisque

$$\frac{dS^n}{da}_{|a=a_n} = -\frac{n^3m}{(n+1)(n(n+2)(m+1)+m-1)} < 0$$

  S^n est toujours décroissant de a, $\forall a \in [0, a_n]$. Si $a \geq a_n$ alors $S^n = \frac{1}{2}\left(\frac{nm}{(n+1)(m+1)}\right)^2$ il est constant en a.

- *Profit des gaziers.* Il s'écrit, $\forall a \in [0, a_n]$

$$\begin{aligned}\Pi(\mathbf{q}^*, \mathbf{y}^*) = {} & \frac{n(m+1)^2(m(n+1)+2n-1)}{(n(n+2)(m+1)+m-1)^2}a^2 \\ & -2\frac{(2n^2(m+1)+n(m+1)+m-1)(n(m+1)+m)}{(n(n+2)(m+1)+m-1)^2(n+1)}a \\ & +\frac{n^3(m+2)(m+1)+n^2(m+1)(3m+1)+3nm(m+1)+m(m-2)-n}{(n(n+2)(m+1)+m-1)^2(n+1)}\end{aligned}$$

  Il est convexe en a car

$$\frac{\partial^2\Pi(\mathbf{q}^*, \mathbf{y}^*)}{\partial a^2} = \frac{n(m+1)^2(m(n+1)+2n-1)}{(n(n+2)(m+1)+m-1)^2} > 0$$

  et puisque

$$\frac{d\Pi(\mathbf{q}^*, \mathbf{y}^*)}{da}_{|a=a_n} = -\frac{(n-1)m}{(n+1)(n(n+2)(m+1)+m-1)} < 0$$

  $\Pi(\mathbf{q}^*, \mathbf{y}^*)$ est toujours décroissant de a, $\forall a \in [0, a_n]$. Si $a \geq a_n$ il est donc constant.

- *Profit des arbitragistes.* Il s'écrit, $\forall a \in [0, a_n]$

$$\begin{aligned}\Pi(\mathbf{w}^*) = {} & \frac{(m+1)^2(n+1)n^3}{(n(n+2)(m+1)+m-1)^2}a^2 + \frac{2(m+1)(n-1)n^2}{(n(n+2)(m+1)+m-1)^2}a + \\ & +\frac{n(n-1)^2}{(1+n)(n(n+2)(m+1)+m-1)^2}\end{aligned}$$

  Ainsi ce profit $\Pi(\mathbf{w}^*)$ est croissant de a puisque les coefficients sont tous positifs.

– *Profit du stockeur.* Il sécrit, $\forall a \in [0, a_n]$

$$\Pi_s(a,c,n,m) = -\frac{(1+m)^2 n^2}{n(m+1)(n+2)+m-1}a^2 + \\ + \left[\frac{(1+m)^2 n^2}{n(m+1)(n+2)+m-1}c + \frac{n(n(n+1)(m+1)+2m)}{(n(m+1)(n+2)+m-1)(n+1)}\right]a \\ - \frac{n(n(n+1)(m+1)+2m)}{(n(m+1)(n+2)+m-1)(n+1)}c$$

Ce profit est concave et on voit que si le stockeur possédait une position de monopole privé alors elle chargerait un prix d'accès au stock égal à a_s^n où

$$a_s^n = \arg\max_a \Pi_s = \frac{c}{2} + \frac{1}{2}\frac{(n+2)(m+1)+1}{(n+1)(m+1)^2}$$

Ainsi le profit du stockeur croît si $a < a_s^n$ et décroit sinon.

b. Effets de fluidité A partir des seuils de coûts données dans le texte, on étudie la différence $\overline{c}^n - c_0^n$ en fonction de n et m.

$$\begin{aligned} \frac{d\left(\overline{c}^n - c_0^n\right)}{dm} &= -\frac{1+m+2n}{(1+m)^3(1+n)} < 0 \\ \frac{d\left(\overline{c}^n - c_0^n\right)}{dn} &= -\frac{m}{(1+m)^2(1+n)^2} < 0 \end{aligned}$$

Annexe B. Equilibre avec leadership

B.1. Concavité du profit du leader

En différentiant deux fois $\Pi_l(\mathbf{q}, y_l, Y_{-l}(y_l))$ par rapport à y_l, on a

$$\frac{\partial^2 \Pi_l(y_l)}{\partial y_l^2} = -2\frac{(n+1)^2(n^2(n+1)(m+1)-2n+1)}{(n^2(n+1)(m+1)-2n+2)^2} < 0$$

B.2. Détails de l'équilibre

Dans le texte pour le cas du leader on a

$$y_l^*(a,n,m) = \frac{B(n,m) - A(n,m)a}{2(n+1)(n^2(n+1)(m+1)-2n+1)}$$

Les expressions $A(n,m)$, $B(n,m)$, sont données par

$$\begin{aligned} A(n,m) &= (m+1)^2 n^5 + 2m(m+1)n^4 + (m+1)^2 n^3 + 2(m+3)n^2 - 4(2n-1) \\ B(n,m) &= (m+1)n^5 + (3m+1)n^3 + 2(2m+3)n^2 - 4(2n-1) \end{aligned}$$

Une étude rapide montre que $A(n,m) > 0$ et $B(n,m) > 0$ pour tout $n \geq 2$ et $m \geq 2$. De plus

$$y_l^*(a_l,n,m) = 0 \text{ avec } a_l = \frac{B(n,m)}{A(n,m)} > 0$$

et puisque

$$\frac{d}{da}y_l^*(a,n,m) = \frac{-A(n,m)}{2(n+1)(n^2(n+1)(m+1)-2n+1)} < 0$$

alors $y_l^*(a,n,m) \geq 0 \Leftrightarrow a \leq a_l$. Pour les firmes de la frange

$$y_f^*(a,n,m) = \frac{D(n,m) - C(n,m)\,a}{2(n+1)(n^2(n+1)(m+1)-2n+1)}$$

Les expressions $C(n,m)$ et $D(n,m)$ sont données par

$$\begin{aligned} C(n,m) &= (m+1)^2 n^4 + 2(m+2)(m+1)n^3 + (m+1)^2 n^2 - 2(m+3)n + 4 \\ D(n,m) &= (m+1)(n+4)n^3 + (3m+1)n^2 - 2(3n-2) \end{aligned}$$

Là encore, une étude sommaire montre que $C(n,m) > 0$ et $D(n,m) > 0$ pour tout $n \geq 2$ et $m \geq 2$. De plus comme précédemment

$$y_f^*(a_f,n,m) = 0 \text{ avec } a_f = \frac{D(n,m)}{C(n,m)} > 0$$

et puisque

$$\frac{d}{da}y_f^*(a,n,m) = \frac{-C(n,m)}{2(n+1)(n^2(n+1)(m+1)-2n+1)} < 0$$

alors $y_f^*(a,n,m) \geq 0 \Leftrightarrow a \leq a_f$. En comparant les deux seuils a_l et a_f il vient

$$\begin{aligned} a_l - a_f &= \frac{B(n,m)}{A(n,m)} - \frac{D(n,m)}{C(n,m)} = \frac{C(n,m)B(n,m) - A(n,m)D(n,m)}{A(n,m)C(n,m)} \\ &= -\frac{4nm(n-1)(n+1)(n^2(n+1)(m+1)-2n+1)(n(n+1)(m+1)-2)}{A(n,m)C(n,m)} < 0 \\ &\Rightarrow a_l < a_f \end{aligned}$$

Pour être des équilibres admissibles, y_f^* et y_l^* doivent obéir à la condition (2), soit $(n-1)\,y_f^*(a,n,m) + y_l^*(a,n,m) \leq \overline{Y}$. En formant la différence, il vient

$$\begin{aligned} (n-1)\,y_f^*(a,n,m) + y_l^*(a,n,m) - \overline{Y} &= -\frac{K_0(n,m) + K_1(n,m)\,a}{2(n+1)(n^2(n+1)(m+1)-2n+1)} < 0 \\ \text{avec } K_0(n,m) &= (1+m)(n^3(2n+1)(m+1) - n^2(m+3) + 2n) > 0 \\ K_1(n,m) &= (1+m)(n^3(2m+3) + n^2(2m+1) - 2(2n-1)) > 0 \end{aligned}$$

La condition (2) est donc toujours vérifiée à l'équilibre avec leader. Dans le texte on a les valeurs d'équilibre sur le marché spot

$$\begin{aligned} \widehat{w}(a,n,m) &= \frac{n^2(n-1) + E(n,m)\,a}{2(n+1)(n^2(n+1)(m+1)-2n+1)} > 0 \\ E(n,m) &= n\left(n^2(m+1)(2n+1) - (m+3)n + 2\right) > 0 \end{aligned}$$

et $\widehat{s}(a,n,m) = \frac{n+1}{n}\widehat{w}(a,n,m)$. Sur le marché aval

$$\begin{aligned} \widehat{q}(a,n,m) &= \frac{G(n,m) - F(n,m)\,a}{2(n+1)^2(n^2(n+1)(m+1)-2n+1)} \\ F(n,m) &= 2n^3(m+3) + n^2(m+1) - n(3+m) + 2 \\ G(n,m) &= 2n^3(m+3) + n^2(2m+1) - 3n + 2 > 0 \end{aligned}$$

cette offre en aval est bien non négative si

$$a \leq \overline{a} = \frac{G(n,m)}{F(n,m)}$$

En comparant $\overline{a}$ et a_f on voit que

$$\begin{aligned}
\overline{a} - a_f &= \frac{G(n,m)}{F(n,m)} - \frac{D(n,m)}{C(n,m)} = \frac{G(n,m)\,C(n,m) - D(n,m)\,F(n,m)}{F(n,m)\,C(n,m)} \\
&= \frac{2n^2m(m+1)(1+n)^2\left(n^2(n+1)(m+1) - 2(n-1)\right)}{F(n,m)\,C(n,m)} > 0
\end{aligned}$$

B.3. Sur-stockage à l'équilibre ?

Dans le cas des firmes de la frange, on forme $z_f(a,n,m) = y_f^* - q_f^*$ soit

$$\begin{aligned}
z_f(a,n,m) &= y_f^* - q_f^* = \frac{[D(n,m) - G(n,m)] - [C(n,m) - F(n,m)]\,a}{2(n+1)^2\left(n^2(n+1)(m+1) - 2n + 1\right)} \\
D(n,m) - G(n,m) &= -(n-1)(n^3(m+1) + n^2m - 3n + 2) < 0 \\
C(n,m) - F(n,m) &= \left(m^2 - 1\right)n^4 + (m+1)(2m+1)n^3 + \left[(m+1)^2 + 2\right]n^2 - \\
-(m+5)\,n + 2 &> 0
\end{aligned}$$

ainsi $z_f(a,n,m) < 0\ \forall a$ car

$$\begin{aligned}
\frac{d}{da} z_f(a,n,m) &= -\frac{C(n,m) - F(n,m)}{2(n+1)^2\left(n^2(n+1)(m+1) - 2n + 1\right)} < 0 \\
z_f(0,n,m) &= \frac{D(n,m) - G(n,m)}{2(n+1)^2\left(n^2(n+1)(m+1) - 2n + 1\right)} < 0
\end{aligned}$$

Pour le leader, on étudie

$$\begin{aligned}
z_l(a,n,m) &= y_l^* - q_l^* = \frac{[B(n,m) - G(n,m)] - [A(n,m) - F(n,m)]\,a}{2(n+1)^2\left(n^2(n+1)(m+1) - 2n + 1\right)} \\
B(n,m) - G(n,m) &= (n-1)(n^3(n-1)(m+1) - n^2(2m+3) + 5) \\
A(n,m) - F(n,m) &= n^5(m+1)^2 + 2n^4(m-1)(m+1) + n^3(m+1)(m-2) + \\
&\quad +2n^2(m+4m) + n(m-7) + 2
\end{aligned}$$

Pour déterminer le signe de ces expressions, on voit directement que $A(n,m) - F(n,m) > 0$. Pour la différence $\phi(n) = B(n,m) - G(n,m)$, étudions-la en raison de n pour $m \geq 2$

$$\begin{aligned}
\phi''(n) &= (m+1)\left[20n^3(m+1) + 24n^2(m-1) + 6n(m-2)\right] + 4(m+4) > 0 \\
\phi'(n) &> 0 \text{ car } \phi'(1) = 156m^2 + 157m + 17 > 0 \\
\phi(n) &> 0 \text{ car } \phi(1) = 4m(m+1) > 0
\end{aligned}$$

Ainsi $B(n,m) - G(n,m) > 0$ et $A(n,m) - F(n,m) > 0$ donc il existe $a^*(n,m)$ tel que $z_l(a^*,n,m) = 0$ soit

$$a^*(n,m) = \frac{B(n,m) - G(n,m)}{A(n,m) - F(n,m)} > 0$$

On peut comparer $a^*(n,m)$ et a_l, il vient

$$\begin{aligned}
a_l - a^*(n,m) &= \frac{B(n,m)}{A(n,m)} - \frac{B(n,m)-G(n,m)}{A(n,m)-F(n,m)} = \frac{A(n,m)\,G(n,m) - B(n,m)\,F(n,m)}{A(n,m)\,[A(n,m)-F(n,m)]} \\
&= \frac{2nm\,(n+1)^2\,(n^2(n+1)(m+1)-2\,(n-1))\,(n^2(n+1)(m+1)-2n+1)}{A(n,m)\,[A(n,m)-F(n,m)]} > 0 \\
&\Leftrightarrow\; a_l > a^*(n,m)
\end{aligned}$$

La comparaison des ces différents seuils de a avec celui de la concurrence (cf section 3 et annexe A) nous donne $a_l < a_n < a_f$. En effet

$$\begin{aligned}
a_f - a_n &= \frac{D(n,m)}{C(n,m)} - \frac{n\,(n+1)\,(m+1)+2m}{n(m+1)^2(n+1)} = 2\frac{m(n-1)(n\,(n+1)\,(m+1)-2)^2}{n(m+1)^2(n+1)C(n,m)} > 0 \\
a_n - a_l &= \frac{n\,(n+1)\,(m+1)+2m}{n(m+1)^2(n+1)} - \frac{B(n,m)}{A(n,m)} = \\
&= 2\frac{m(n-1)(n^2\,(n+1)\,(m+1)-2\,(n-1))(n\,(n+1)\,(m+1)-2)}{n(m+1)^2(n+1)A(n,m)} > 0
\end{aligned}$$

La comparaison entre les niveaux de stockage aux différents équilibres conduit à l'existence d'un seuil de charge d'accès $\widehat{a}$. En effet

$$\begin{aligned}
y_f^*(a,n,m) - y_n^*(a,n,m) = &\frac{(n-1)\,(n\,(n+1)\,(m+1)-2)^2\,(nm+n+m-1)}{2\,(n+1)^2\,(n^2\,(n+2)\,(m+1)-2n+1)(n\,(n+2)\,(m+1)+m-1)}a \\
&- \frac{(n-1)^2\,(n\,(n+1)\,(m+1)-2)^2}{2\,(n+1)^2\,(n^2\,(n+2)\,(m+1)-2n+1)(n\,(n+2)\,(m+1)+m-1)}
\end{aligned}$$

et donc cette différence s'annule si $a = \widehat{a} = \frac{n-1}{m+n(m+1)-1}$ (défini au lemme 1 ou dans l'annexe A). De la même manière,

$$y_f^*(a,n,m) - y_l^*(a,n,m) = \frac{[D(n,m)-B(n,m)] - [C(n,m)-A(n,m)]\,a}{2\,(n+1)\,(n^2(n+1)(m+1)-2n+1)}$$

cette différence s'annule pour

$$a = \widehat{a} = \frac{D(n,m)-B(n,m)}{C(n,m)-A(n,m)} = \frac{n-1}{m+n\,(m+1)-1}$$

B.4. Analyse de bien-être

1. Détermination de a_w^s.

Dans le texte on a $a = \min\{\max\{a_w^s, 0\}, a_l\}$. Pour effectuer l'analyse on cherche les valeurs du coût de stockage c qui permettent d'encadrer a_w^s par 0 et a_l. Ainsi $a_w^s = 0$ si $c = c_0^s$ et $a_w^s = a_l$ si $c = \overline{c}^s$ où

$$\begin{aligned}
\overline{c}^s &= \frac{n^4\,(m+1)\,(m+n) + n^3\,(4m+m^2+1) + 2n\,(3n-4)+4}{(1+m)\,H(n,m)} > 0 \\
\text{avec } H(n,m) &= n^3\left(n^2+1\right)(m+1)^2 + 2n^4m\,(m+1) + 2n^2\,(m+3) - 4\,(2n-1) > 0 \\
c_0^s &= \frac{1}{2}\frac{n^3\,(2m+3) + n^2\,(2m+1) - 2\,(2n-1)}{(1+m)\,(1+n)\,(n^3+n^3m+n^2+n^2m-2\,n+1)} > 0
\end{aligned}$$

De plus

$$\overline{c}^s - c_0^s = \frac{\left(n^2\left(2n+1\right)\left(m+1\right) - n\left(m+3\right)+2\right)n}{2\left(1+m\right)\left(1+n\right)\left(n^3+n^3m+n^2+n^2m-2\,n+1\right)H\left(n,m\right)}\times$$
$$\times\frac{\left(n^5\left(m+1\right)+n^5\left(3m+1\right)+2n^2\left(2m+3\right)-8n+4\right)}{2\left(1+m\right)\left(1+n\right)\left(n^3+n^3m+n^2+n^2m-2\,n+1\right)H\left(n,m\right)}>0$$

Or puisque a_w^s (donné dans le texte) est croissant en c

$$\frac{da_w^s}{dc} = 2\frac{\left(1+m\right)\left(1+n\right)\left(n^2\left(n+2\right)-2\,n+1\right)}{n\left(n^2\left(2n+1\right)\left(m+1\right)+2-n\left(3+m\right)\right)}>0$$

alors on a bien $\forall c \in \left[c_0^s, \overline{c}^s\right] : 0 \leq a_w^s \leq a_l$

2. Comparaison a_w^s et a^*. L'équation $a_w^s = a^*$ a pour racine en c la valeur $\widetilde{c} > 0$

$$\widetilde{c} \;=\; \frac{n^5\left(m{+}1\right)+n^4\left(m{+}1\right)\left(m{-}2\right)+n^3\left(m{+}2\right)\left(m{-}1\right)+8n^2+n\left(m{-}7\right)+2}{\left(m+1\right)I\left(n,m\right)}$$

$$\text{où } I\left(n,m\right) \;=\; n^5\left(m{+}1\right)^2+2n^4\left(m{-}1\right)\left(m{+}1\right)+n^3\left(m{+}1\right)\left(m{-}2\right)+2n^2\left(m{+}4\right)+n\left(m{-}7\right)+2$$

On vérifie maintenant que $\widetilde{c} \in \left[c_0^s, \overline{c}^s\right]$. En effet en étudiant les différences :

$$\widetilde{c}-c_0^s \;=\; \frac{1}{2}\frac{n\left(n{-}1\right)\left[n^2\left(m{+}1\right)\left(2n{+}1\right)-n\left(m{+}3\right)+2\right]\left[\left(n^4-n^3\right)\left(m{+}1\right)-n^2\left(2m{+}3\right)+5n-2\right]}{I\left(n,m\right)\left(m+1\right)\left(n+1\right)\left(n^2\left(m{+}1\right)\left(n{+}1\right)-2\left(n{-}1\right)\right)}>0$$

$$\overline{c}^s-\widetilde{c} \;=\; \frac{mn^2\left[n^2\left(m{+}1\right)\left(2n{+}1\right)-n\left(m{+}3\right)+2\right]\left[n^2\left(m{+}1\right)\left(n{+}1\right)-2\left(n{-}1\right)\right]}{I\left(n,m\right)\left(m+1\right)\left(2n^4m\left(m+1\right)+n^3\left(m+1\right)^2\left(n^2+1\right)+2n^2\left(m+3\right)-4\left(2n-1\right)\right)}>0$$

Enfin on peut voir que $\frac{\partial\widetilde{c}}{\partial m} < 0$. En effet

$$\frac{\partial\widetilde{c}}{\partial m} = -\left[\frac{n^6\left(n+1\right)^3m^4+2n^4(n^4-n^3+n^2+1)\left(n+1\right)^2m^3}{\left(1+m\right)^2I\left(n,m\right)^2}+\right.$$
$$+\frac{n^2\left(2n^5\left(3n-8\right)+11n^4+9\,n^3-13\,n^2+4\,n+1\right)\left(n+1\right)^2m^2}{\left(1+m\right)^2I\left(n,m\right)^2}+$$
$$+\frac{2n(n+2)(1+n)(n^2\left(3n-2\right)+n+1)(n-1)^4m}{\left(1+m\right)^2I\left(n,m\right)^2}+$$
$$\left.+\frac{(n+2)(2n^5-n^4-4n^3+10n^2-7n+2)(n-1)^4}{\left(1+m\right)^2I\left(n,m\right)^2}\right]<0$$

Références

[1] Allaz B. (1991), « Duopoly, Inventories and Futures Markets » in Phlips L. (ed.), *Commodity, Futures and Financial Market*, Kluwer, Dordrecht.

[2] Arvan L. (1985), "Some Examples of Dynamic Cournot Duopoly with Inventories", *Rand Journal of Economics*, vol. 16, pp. 569-78.

[3] Baranes E., F. Mirabel et J.C. Poudou (2003), « Analysis of the vertical structure in the European gas industry », *Energy Studies Review*, vol. 12(1), Fall, pp. 27-52.

[4] Chaton C., A. Creti et B. Villeneuve (2004) « Equilibrium Precautionary Gas Storage », *mimeo Gaz de France, mars.*

[5] CRE (2002), « Rapport d'activité », *Commission de Régulation de l'Energie*, 27 juin 2002 (www.cre.fr).

[6] Mitraille S. (2003a) « Comportements microéconomiques de stockage et de vente à terme : état de l'analyse économique », *Revue d'Economie Politique*, n. 5, pp. 649-670

[7] Mitraille S. (2003b) « Stockage et part de marché dominante en concurrence de Cournot en deux périodes », *miméo.*

[8] Mollgaard H.P., S. Poddar et D. Sasaki (2000) « Strategic inventories in two-period oligopoly », *working paper*, University of Exeter.

[9] Pal, D. (1991). « Cournot Duopoly with Two Production Periods and Cost Differentials », *Journal of Econimic Theory*, vol. 55, pp. 441–448.

[10] Pal D. (1996), « Endogenous Stackelberg Equilibria with Identical Firms », *Games and Economic Behavior*, vol. 12, p. 81-94.

[11] Philps L. et J.F. Richard (1989), « A Dynamic Oligopoly Model with Demand Inertia and Inventories », *Mathematical Social Sciences*, vol. 18, pp. 225-43.

[12] Poddar S. et D. Sasaki (2002), «The strategic benefit from advance production », *European Journal of Political Economy,* vol. 18, Issue 3 , pp. 579-595.

[13] Poddar S. et D. Sasaki (2000), « Strategic Advance Production », *working paper*, University of Exeter.

[14] Saloner G. (1987), "Cournot Duopoly with Two Production Periods", *Journal of Economic Theory*, vol. 42, pp. 183-87.

LISTE DES CAHIERS DE RECHERCHE CREDEN[*]

95.01.01	*Eastern Europe Energy and Environment : the Cost-Reward Structure as an Analytical Framework in Policy Analysis* Corazón M. SIDDAYAO
96.01.02	*Insécurité des Approvisionnements Pétroliers, Effet Externe et Stockage Stratégique : l'Aspect International* Bernard SANCHEZ
96.02.03	*R&D et Innovations Technologiques au sein d'un Marché Monopolistique d'une Ressource Non Renouvelable* Jean-Christophe POUDOU
96.03.04	*Un Siècle d'Histoire Nucléaire de la France* Henri PIATIER
97.01.05	*Is the Netback Value of Gas Economically Efficient ?* Corazón M. SIDDAYAO
97.02.06	*Répartitions Modales Urbaines, Externalités et Instauration de Péages : le cas des Externalités de Congestion et des «Externalités Modales Croisées»* François MIRABEL
97.03.07	*Pricing Transmission in a Reformed Power Sector : Can U.S. Issues Be Generalized for Developing Countries* Corazón M. SIDDAYAO
97.04.08	*La Dérégulation de l'Industrie Electrique en Europe et aux Etats-Unis : un Processus de Décomposition-Recomposition* Jacques PERCEBOIS
97.05.09	*Externalité Informationnelle d'Exploration et Efficacité Informationnelle de l'Exploration Pétrolière* Evariste NYOUKI
97.06.10	*Concept et Mesure d'Equité Améliorée : Tentative d'Application à l'Option Tarifaire "Bleu-Blanc-Rouge" d'EDF* Jérôme BEZZINA
98.01.11	*Substitution entre Capital, Travail et Produits Energétiques : Tentative d'application dans un cadre international* Bachir EL MURR
98.02.12	*L'Interface entre Secteur Agricole et Secteur Pétrolier : Quelques Questions au Sujet des Biocarburants* Alain MATHIEU
98.03.13	*Les Effets de l'Intégration et de l'Unification Économique Européenne sur la Marge de Manœuvre de l'État Régulateur* Agnès d'ARTIGUES
99.09.14	*La Réglementation par Price Cap : le Cas du Transport de Gaz Naturel au Royaume Uni* Laurent DAVID
99.11.15	*L'Apport de la Théorie Économique aux Débats Énergétiques* Jacques PERCEBOIS
99.12.16	*Les biocombustibles : des énergies entre déclin et renouveau* Alain MATHIEU
00.05.17	*Structure du marché gazier américain, réglementation et tarification de l'accès des tiers au réseau* Laurent DAVID et François MIRABEL
00.09.18	*Corporate Realignments in the Natural Gas Industry : Does the North American Experience Foretell the Future for the European Union ?* Ian RUTLEDGE et Philip WRIGHT
00.10.19	*La décision d'investissement nucléaire : l'influence de la structure industrielle* Marie-Laure GUILLERMINET

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

01.01.20	*The industrialization of knowledge in life sciences Convergence between public research policies and industrial strategies* Jean Pierre MIGNOT et Christian PONCET
01.02.21	*Les enjeux du transport pour le gaz et l'électricité : la fixation des charges d'accès* Jacques PERCEBOIS et Laurent DAVID
01.06.22	*Les comportements de fraude fiscale : le face-à-face contribuables – Administration fiscale* Cécile BAZART
01.06.23	*La complexité du processus institutionnel de décision fiscale : causes et conséquences* Cécile BAZART
01.09.24	*Droits de l'homme et justice sociale. Une mise en perspective des apports de John Rawls et d'Amartya Sen* David KOLACINSKI
01.10.25	*Compétition technologique, rendements croissants et lock-in dans la production d'électricité d'origine solaire photovoltaïque* Pierre TAILLANT
02.01.26	*Harmonisation fiscale et politiques monétaires au sein d'une intégration économique* Bachir EL MURR
02.06.27	*De la connaissance académique à l'innovation industrielle dans les sciences du vivant : essai d'une typologie organisationnelle dans le processus d'industrialisation des connaissances* Christian PONCET
02.06.28	*Efforts d'innovations technologiques dans l'oligopole minier* Jean-Christophe POUDOU
02.06.29	*Why are technological spillovers spatially bounded ? A market orientated approach* Edmond BARANES et Jean-Philippe TROPEANO
02.07.30	*Will broadband lead to a more competitive access market ?* Edmond BARANES et Yves GASSOT
02.07.31	*De l'échange entre salaire et liberté chez Adam Smith au « salaire équitable » d'Akerlof* David KOLACINSKI
02.07.32	*Intégration du marché Nord-Américain de l'énergie* Alain LAPOINTE
02.07.33	*Funding for Universal Service Obligations in Electricity Sector : the case of green power development* Pascal FAVARD, François MIRABEL et Jean-Christophe POUDOU
02.09.34	*Démocratie, croissance et répartition des libertés entre riches et pauvres* David KOLACINSKI
02.09.35	*La décision d'investissement et son financement dans un environnement institutionnel en mutation : le cas d'un équipement électronucléaire* Marie-Laure GUILLERMINET
02.09.36	*Third Party Access pricing to the network, secondary capacity market and economic optimum : the case of natural gas* Laurent DAVID et Jacques PERCEBOIS
03.10.37	*Competition And Mergers In Networks With Call Externalities* Edmond BARANES et Laurent FLOCHEL
03.10.38	*Mining and Incentive Concession Contracts* Nguyen Mahn HUNG, Jean-Christophe POUDOU et Lionel THOMAS
03.11.39	*Une analyse économique de la structure verticale sur la chaîne gazière européenne* Edmond BARANES, François MIRABEL et Jean-Christophe POUDOU
03.11.40	*Ouverture à la concurrence et régulation des industries de réseaux : le cas du gaz et de l'électricité. Quelques enseignements au vu de l'expérience européenne* Jacques PERCEBOIS
03.11.41	*Mechanisms of Funding for Universal Service Obligations: the Electricity Case* François MIRABEL et Jean-Christophe POUDOU
03.11.42	*Stockage et Concurrence dans le secteur gazier* Edmond BARANES, François MIRABEL et Jean-Christophe POUDOU

03.11.43	*Cross Hedging and Liquidity: A Note* Benoît SEVI
04.01.44	*The Competitive Firm under both Input and Output Price Uncertainties with Futures Markets and Basis risk* Benoît SEVI
04.05.45	*Competition in health care markets and vertical restraints* Edmond BARANES et David BARDEY
04.06.46	*La Mise en Place d'un Marché de Permis d'Emission dans des Situations de Concurrence Imparfaite* Olivier ROUSSE
04.07.47	*Funding Universal Service Obligations with an Essential Facility: Charges vs. Taxes and subsidies,* Charles MADET, Michel ROLAND, François MIRABEL et Jean-Christophe POUDOU
04.07.48	*Stockage de gaz et modulation : une analyse stratégique,* Edmond BARANES, François MIRABEL et Jean-Christophe POUDOU