CAHIERS DE RECHERCHE

MINIMUM OPERATING LEVEL INVESTISSEMENT DANS LE RESEAU ELECTRIQUE : UNE CONCILIATION DIFFICILE

Renaud MENARD

Cahier N° 09.01.80

19 janvier 2009

Centre de Recherche en Economie et Droit de l'Energie
CREDEN - Equipe du LASER
Université de Montpellier I
Faculté des Sciences Economiques -C.S. 79606
34960 Montpellier Cedex 2, France
Tel. : 33 (0)4 67 15 83 17
Fax. : 33 (0)4 67 15 84 04
e-mail : prenom.nom@univ-montp1.fr

Minimum Operating Level
Investissement dans le réseau électrique :
Une conciliation difficile

Renaud Ménard

Janvier 2008

Résumé

L'objet de cette étude est d'analyser les effets d'un investissement en transport par rapport à ceux d'un investissement en production électrique tout en introduisant une contrainte de production minimale : le Minimum Operating Level. Nous montrerons que cette contrainte peut entraîner des effets inhabituels. Notamment, nous verrons qu'il est possible d'avoir une absence de rentes de congestion durant les heures les plus chargées alors que ces rentes sont présentes durant des heures moins chargées. D'autre part, la détermination d'une capacité de transport pareto optimale peut être mise à mal, et finalement aboutir à une indétermination.

Introduction

Cette contrainte de Minimum Operating Level (MOL) a comme conséquence de limiter le Gestionnaire de Réseau de Transport (GRT) dans son objectif de réalisation d'un dispatching optimal. En effet, il est supposé, dans de nombreux articles, que le GRT ne subisse que la contrainte de production maximale dans son processus d'optimisation. Or, il existe en électricité une contrainte « opposée », c'est-à-dire qu'une centrale ne peut produire en deçà d'un niveau minimum. En effet, il est difficilement imaginable de démarrer une tranche nucléaire de 900MW pour un besoin de 100MW. D'autre part, ce minimum operating level peut être perçu comme un bloc d'offre minimal que le producteur proposerait sous la forme « à prendre ou à laisser ». Notons que cette contrainte a fait l'objet d'une étude par **Fischer R., Serra P. (2002).** Mais ces deux auteurs ont analysé les effets d'une telle contrainte sur le système tarifaire standard : le « peak-load pricing ».

Afin de mener à bien cette analyse, nous étudierons en premier les différences sur l'équilibre obtenu avec ou sans MOL. En second lieu, nous nous intéresserons aux investissements en capacité de transport, puis en moyen de production. Enfin, nous réaliserons une comparaison de ces deux types d'investissement en utilisant un exemple numérique.

1. Le modèle

Sur un marché de l'énergie qu'est l'électricité, deux grands types de volatilité existent : volatilité due à l'équilibre offre/demande ; volatilité due aux contraintes de saturation du transport. Afin d'éliminer la volatilité du premier type, les agents peuvent conclure un « Contract For Difference (CFD) ». Néanmoins, comme l'a souligné **Hogan W.W. (2002)**, ce type de contrat ne permet pas une couverture totale, car il reste le risque de congestion. Afin compléter ces « CFD », les agents devraient acheter : soit des droits financiers ; soit des droits physiques. Le choix entre ces deux types de droits est encore très largement débattu, puisque si théoriquement, en l'absence de comportement opportuniste, ces deux types sont équivalents (voir **Joskow P.L., Tirole J. (2000)**), leurs implémentations ainsi que leurs effets sont différents.
Mais l'objet de ce modèle ne se situe pas dans la comparaison de ces deux droits, mais à l'étude des effets des investissements d'une part, en moyen de transport et d'autre part, en moyen de production, en prenant en compte des contrats bilatéraux, ainsi qu'une demande sensible aux périodes horo-saisonnières.

1.1. Hypothèses

Le réseau étudié est composé de deux nœuds, notés N_1 et N_2, qui sont reliés par une infrastructure de transport de capacité[1] K (ce modèle pourrait être apparenté à deux marchés nationaux qui sont interconnectés par la capacité K). Ce marché possède un fournisseur de service de transport : le Gestionnaire du Réseau de Transport (GRT) gérant une bourse d'échange non obligatoire.
Quant à la tarification du service de transport, nous utilisons la tarification nodale[2], celle-ci ne permettant généralement pas la couverture de l'ensemble des coûts fixes (sauf en cas de réseau sous dimensionné[3]). Néanmoins, nous supposons que les coûts fixes liés à l'activité de transport sont normalisés à zéro, il n'y a donc pas de péage (notons à ce propos que la seule tarification de l'accès

[1] Notons que, bien que ce type de réseau linéaire ne soit pas la norme dans les systèmes électriques développés, il n'en reste pas moins que dans des configurations de réseaux maillés, il existe des portions linéaires. Or, ces réseaux sont plus vulnérables au pouvoir de marché d'un producteur local ainsi qu'aux aléas. Pour s'en convaincre, en France, le GRT (le Réseau de Transport d'Electricité) a dû interrompre l'unique ligne desservant la région de Cannes pour cause d'un incendie.
[2] Voir l'article fondateur **Schweppe F.C. et ali. (1984)**. Pour une présentation simplifiée, voir **Hsu (1997)**.
[3] Voir **Pérez-Arriaga** et **al. (1995)**.

ne permet pas de réaliser la coordination entre la localisation des moyens de production et le développement du réseau, voir **Stoft S. (2006)**).

Un centre de consommation, localisé en N_2, est matérialisé par une fonction de demande $D[P]$. Nous nous plaçons à long terme, c'est-à-dire que la demande $D[P]$, ainsi que les autres paramètres, sont une estimation à une date T. En outre, nous émettons l'hypothèse qu'il est possible que l'infrastructure supplémentaire due à l'investissement soit effective à cette date T.

L'offre d'électricité provient de deux producteurs (1,2), le producteur 1 localisé au nœud N_1, l'autre au nœud N_2. Nous supposons que le producteur 1 est toujours plus efficace que le producteur 2 pour tout niveau de production. Ces deux producteurs n'ont pas de coûts fixes à supporter, et ne connaissent pas de limitation de production. Ces deux producteurs peuvent soit signer un contrat bilatéral avec un distributeur, soit fournir leur production sur la bourse, soit les deux.

Nous supposerons qu'il existe deux types de consommateurs. Les consommateurs dits domestiques seront représentés par un fournisseur, ce dernier signant un contrat bilatéral avec un producteur. Nous appellerons consommateurs industriels ceux qui se fournissent par l'intermédiaire de la bourse. Ces derniers[4] sont généralement des firmes pouvant utiliser plusieurs types d'énergie. Ces consommateurs réalisent donc un arbitrage entre les prix des différentes sources d'énergie.

Le fonctionnement général du marché est le suivant : le fournisseur, ayant à sa disposition les n courbes de charges annuelles individuelles de l'année passée des n consommateurs domestiques du noeud 2 qu'il représente, évalue ses besoins d'électricité par heure pour l'année. Cette évaluation horaire lui permet de signer un contrat avec le producteur le plus efficace. Nous supposons que ce producteur est localisé au nœud 1.

Puis, ces deux agents (les co-contractants que sont le producteur 1 et le distributeur) informent le GRT des quantités horaires contractuelles[5], ainsi que des nœuds d'injection (ici, le nœud 1) et de soutirage (le nœud 2).

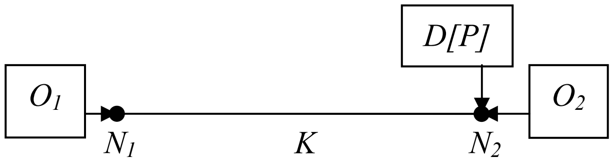
Afin de simplifier le problème, nous émettons l'hypothèse que ces quantités horaires contractuelles sont identiques suivant la période à laquelle elles appartiennent. En supposant que l'année peut être décomposée en quatre périodes identiques en nombre d'heures, nous obtenons donc quatre types de quantités contractuelles que nous notons Q^c_{HPH}, Q^c_{HCH}, Q^c_{HPE}, Q^c_{HCE} (avec C pour Contractuelle, HPH pour Heure Pleine Hiver, …, HCE pour Heure Creuse d'Eté). D'autre part, nous supposons que $Q^c_{HCE} < Q^c_{HPE} < Q^c_{HCH} < Q^c_{HPH}$. Quant aux consommateurs industriels, réputés arbitrer entre les prix des différentes sources d'énergie, ils s'approvisionnent donc sur la bourse. Ces derniers effectuent la veille pour le lendemain une demande en fonction du prix. Afin de simplifier, la

[4] Notons que rien n'empêche ces consommateurs industriels d'acheter une partie de leur besoin en électricité par l'intermédiaire de contrats bilatéraux.

[5] Relevons que l'annonce faite par ces co-contractants est définitive, c'est-à-dire que les quantités prévues ne peuvent diminuer quel que soient les prix nodaux. La centrale du producteur 1 est considérée comme « must run », ceci étant parfaitement réaliste avec les hypothèses de notre modèle, puisque cette centrale est la plus efficace. Les contrats bilatéraux ne sont donc pas conditionnés par une enchère décrémentale.

demande globale par heure (obtenue par sommation des demandes horaires individuelles) est linéaire et identique quelle que soit l'heure de l'année considérée[6]. Nous obtenons donc deux demandes horaires, celle inélastique au prix émanant des consommateurs domestiques, et celle provenant des consommateurs industriels, cette dernière par contre étant élastique au prix. Les agents peuvent donc échanger : soit à travers une bourse d'échange ; soit en signant un contrat bilatéral ; soit les deux. Graphiquement, le réseau est :

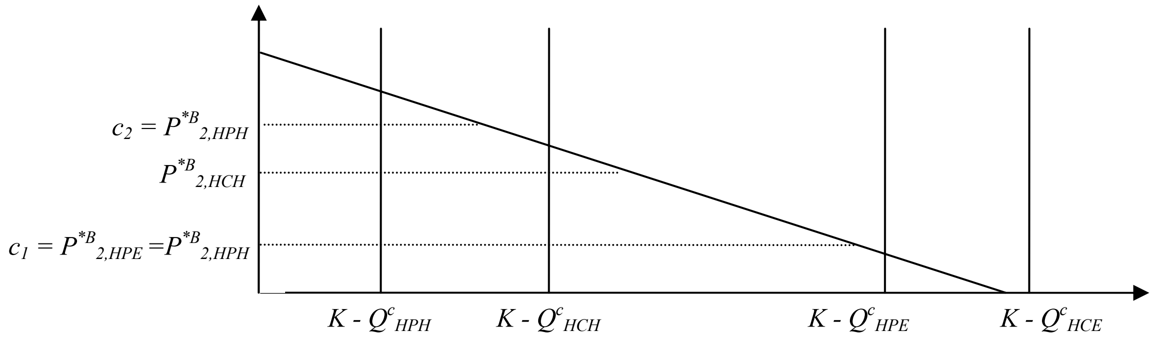
Graphique 1



1.2. Résolution de l'équilibre

Avec les données recueillies, le GRT cherche à maximiser le bien-être collectif horaire, pour toute heure de l'année. L'introduction de quantités contractuelles modifie la capacité K utilisable pour les échanges réalisés en bourse (cette capacité est réduite). La capacité disponible, notée K^D (D pour Disponible), par exemple en HPH, est donc $K^D_{HPH} = K - Q^c_{HPH}$. Cette capacité disponible est fonction des périodes, et donc, afin de mener à bien notre étude, nous supposons que les équilibres horaires en HPH et en HCH sont soumis aux congestions, alors que ceux des HPE et des HCE ne le sont pas. Sur le graphique 2 ci-après, nous représentons les quatre équilibres horaires possibles et nous notons, par exemple, $P^{*B}_{2,HPH}$ (B pour Bourse) le prix d'équilibre au nœud 2 pour les Heures Pleines d'Hiver.

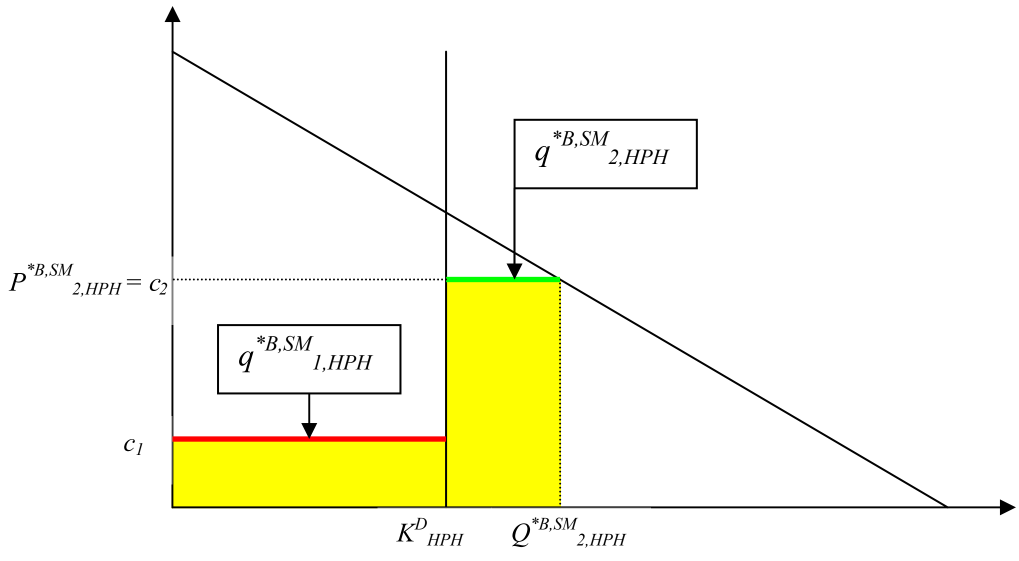
Graphique 2



[6] Ceci suppose implicitement que l'activité de ces industriels est constante durant toute l'année.

Ce graphique appelle un commentaire : les prix d'équilibre obtenus en HPE et en HCE sont identiques, et égaux au coût marginal du producteur le plus efficace, donc celui qui est localisé au nœud 1. Or, ce producteur fournit déjà les quantités contractuelles. Nous supposons donc que la capacité de production au nœud 1, notée q^{max}_1, est telle que $q^{max}_1 \geq Q^c_{HPH} + (c_1 - b)/a$, avec $(c_1 - b)/a$ la quantité demandée par les industriels au prix c_1. Puisque par hypothèse $Q^c_{HPH} > Q^c_{HPE} > Q^c_{HCE}$, alors le producteur 1 peut, quelle que soit la période horo-saisonnière, fournir la totalité de la demande. Néanmoins, en HPH (et en HCH), ce producteur est limité par la capacité de transport disponible, cette limitation ne se retrouvant pas en HPE (et donc en HCE). En outre, nous choisissons une capacité disponible en HPH avant investissement telle qu'elle oblige le GRT à appeler le producteur 2, alors que la capacité disponible en HCH est caractérisée par l'exclusion de ce producteur d'une part, par des rentes de congestion d'autre part (cette capacité est donc utilisée à son maximum mais elle est insuffisante pour équilibrer l'offre à la demande sur la bourse au prix c_1 par unité). Mais avant de pénétrer dans le vif du sujet, partons de l'équilibre horaire en HPH sans le MOL et examinons les différences qui peuvent exister lorsque nous introduisons le MOL Le graphique ci-dessous représente l'équilibre en HPH sans le MOL.

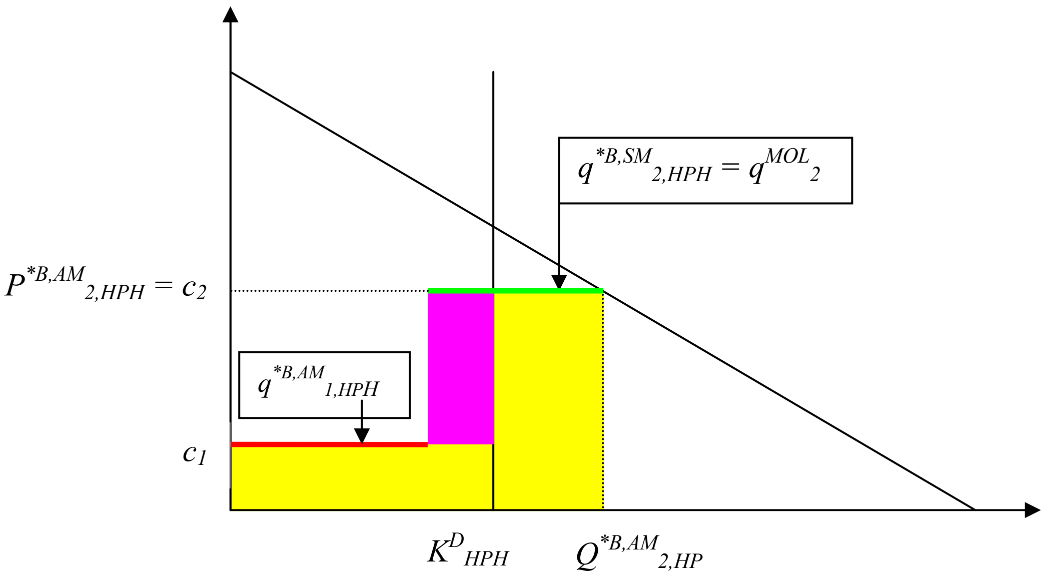
Graphique 3



Premièrement, nous avons noté la quantité d'équilibre sans MOL « $Q^{*B,SM}_{2,HPH}$ », afin de la différencier avec la quantité d'équilibre obtenue avec le MOL, que nous noterons « $Q^{*B,AM}_{2,HPH}$ ». La zone de couleur jaune représente le coût total de production d'une fourniture de $Q^{*B,SM}_{2,HPH}$: $CT\ [Q^{*B,SM}_{2,HPH}] = CT\ [q^{*B,SM}_{1,HPH}] + CT\ [q^{*B,SM}_{2,HPH}]$. Ce coût total correspond au dispatching optimal, sous contrainte de la capacité de transport K^D_{HPH}. Il se décompose ici en deux parties : la première correspond au coût d'achat de K^D_{HPH} unités au producteur 1, donc un coût de $CT[q^*_1 = K^D_{HPH}]$ (l'infrastructure est utilisée à son maximum) ; mais comme le GRT peut améliorer le surplus collectif en appelant le producteur 2, il achète donc $Q^{*B,SM}_{2,HPH}$ - K^{D}_{HPH} unités à ce producteur, ce qui correspond donc à un coût d'achat de $CT[q^*_2 = Q^{*B,SM}_{2,HPH} - K^{D}_{HPH}]$. Nous allons maintenant introduire le fait que l'offre du producteur 2 est contrainte par son MOL[7].

La quantité[8] minimale que doit fournir ce producteur est notée q^{MOL}_2, et pour les besoins de notre étude, nous supposerons[9] que $q^{MOL}_2 > q^{*B,SM}_{2,HPH}$. Le GRT doit donc réaliser un dispatching, en tenant compte des échanges provenant des contrats bilatéraux, de l'offre et de la demande effectuées en bourse, de la capacité de transport limitée, et de la quantité minimale que doit produire le producteur 2. Graphiquement, le nouvel équilibre en tenant compte du MOL est :

Graphique 4



Comme nous le montre le graphique 4, le segment vert correspond à la quantité minimale que doit fournir le producteur 2. L'introduction du MOL provoque un accroissement du coût total de production (celui-ci étant matérialisé par l'aire violette) sans pour autant augmenter la quantité d'équilibre. Cet accroissement trouve sa source dans la diminution de la quantité provenant du nœud 1 échangée en bourse ($q^{*B,AM}_{1,HPH} < q^{*B,SM}_{1,HPH}$) afin de pouvoir satisfaire cette nouvelle contrainte. Il y a donc substitution d'unité « bon marché » par des unités onéreuses. En outre, relevons qu'il n'y a plus de rentes de congestion[10] en HPH, ceci impliquant $K^{D}_{HPH} > q^{*B,AM}_{1,HPH}$, et la ligne n'atteint pas sa limite physique[11] de transport. Les prix nodaux sont égaux : $P^{*B,AM}_{1,HPH} = P^{*B,AM}_{2,HPH} = c_2$.

---

[7] Cela ne signifie pas que le producteur 1 ne soit pas sujet à ce type de contrainte. Mais comme il est le producteur le plus efficace, donc celui qui est appelé en premier à produire, alors nous supposons que la quantité qu'il fournit est, quelle que soit la période horo-saisonnière, toujours supérieure à son MOL.

[8] Cette quantité minimale est fixe et indépendante de l'heure.

[9] Si nous supposons que q^{MOL}_2 soit inférieure ou égale à $q^{*B,SM}_{2,HPH}$, alors l'examen de cette contrainte n'aurait aucun intérêt puisque le GRT ne serait pas contraint par cette caractéristique technique.

[10] Voir annexes, p.27

[11] En effet, sans MOL, le GRT sature la capacité de transport avec la production du nœud 1, et appelle le producteur 2. Pour une même quantité d'équilibre, l'introduction du MOL « oblige » le GRT à acheter au producteur 2 une ou

L'absence de congestion par l'ajout d'une nouvelle contrainte a été étudiée par **Boucher J., Ghilain B., et Smeers Y. (1998)**. Mais ces auteurs n'analysaient pas l'introduction du MOL, mais l'introduction d'une règle de gestion prudentielle : la règle dite du « $N - 1$ ». Il est avancé que les réseaux développés sont peu soumis aux problèmes de congestion et donc la tarification nodale ne permettrait pas de recouvrir l'ensemble des coûts de l'activité de transport. Néanmoins, ces auteurs montrent qu'il n'en est rien en faisant remarquer que le dispatching réalisé par le GRT prend en compte la règle du « $N - 1$ », ce qui a pour conséquence une limitation des problèmes de congestion. En effet, il y a congestion lorsque l'insuffisance d'une ligne électrique oblige le GRT à ne plus respecter le « merit order ». Or, en introduisant la règle du « N – 1 », puisque le dispatching doit être réalisable avec la perte d'une ligne, ceci implique une limitation « artificielle » de la production aux différents nœuds. Donc l'infrastructure sera très rarement utilisée à son maximum. Il y a eu une « substitution » d'une contrainte réelle (la capacité de transport) par une contrainte « artificielle » (limitation des productions). En fait, cette règle de gestion, tout comme le MOL, masque la réalité.

Comme nous venons de l'indiquer, les prix nodaux sont identiques. Mais cette égalité ne vient pas de la diminution du prix nodal au nœud 2, mais de l'augmentation de celui au nœud 1 (nous avons donc l'effet opposé à un desserrement total de la contrainte de transport). Ceci a pour effet de transformer le montant des rentes de congestion, qui prévalait sans le MOL, en surprofit pour la production injectée au nœud 1. Mais ce surprofit n'est pas entièrement équivalent aux montants des rentes[12].

En effet, comme il est indiqué sur le graphique 4, l'introduction du MOL provoque une augmentation du coût total de production. Nous avons donc l'apparition d'un surcoût, noté *SCT* (rappelons que ce dernier est matérialisé par la zone violette du graphique 4), qui est égal à :

$$SCT = (q^{MOL}_2 - q^{*B,SM}_{2,HPH}).(c_2 - c_1). \qquad (1)$$

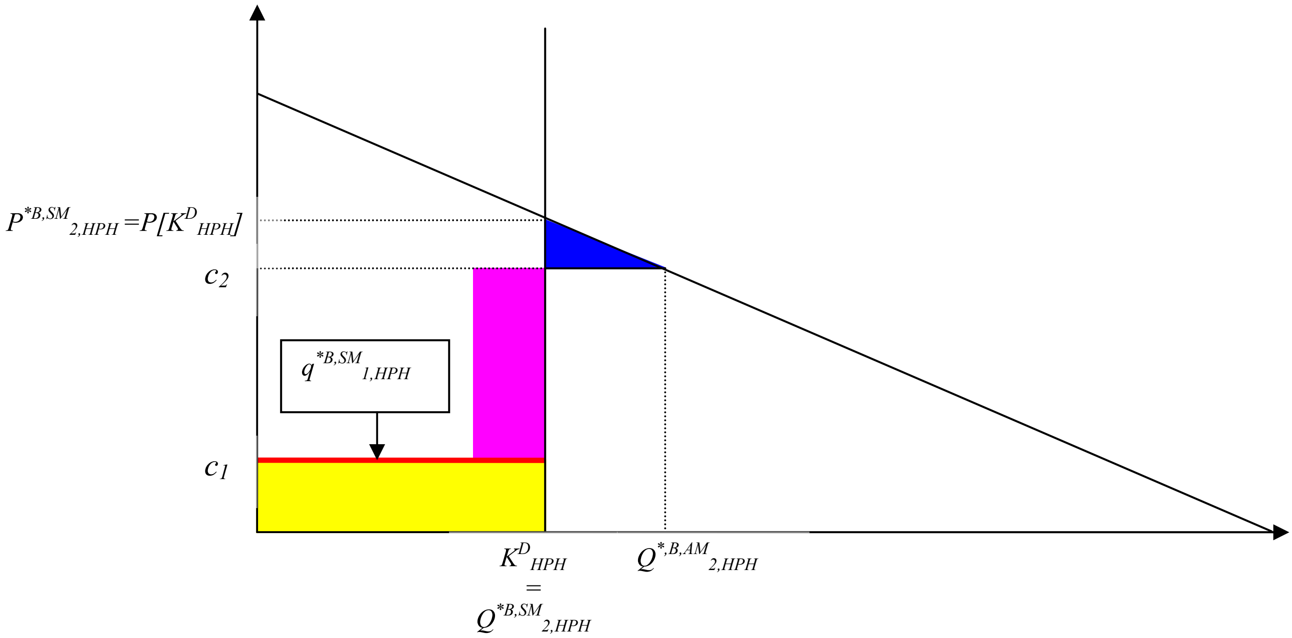
Par rapport au cas sans le MOL, le bien-être collectif diminue d'un montant égal au surcoût. En effet, pour une quantité totale donnée Q^* valable avec ou sans MOL, la répartition des quantités fournies par les producteurs a changé. L'introduction du MOL nous pousse à nous poser une question sur la pertinence de l'équilibre obtenu. Puisque le GRT cherche à maximiser le surplus collectif, il est possible que l'équilibre excluant le producteur 2 (ceci impliquant une utilisation de la capacité de transport à son maximum), soit supérieur, en terme de bien-être, à l'équilibre défini

plusieurs unités supplémentaires. S'il ne diminuait pas d'un même montant la production du nœud 1, alors la quantité s'accroîtrait, et donc le prix d'équilibre diminuerait. Le GRT valoriserait alors les unités du producteur 2 à un prix inférieur au prix de revient, et le bien-être collectif ne serait plus à son maximum, compte tenu des contraintes. Donc, le GRT diminue l'achat d'électricité au nœud 1 et l'infrastructure de transport n'est plus utilisée à sa capacité maximale.

12 En effet, sans MOL, le montant des rentes obtenu sur la bourse est égal à $(c_2 - c_1)K^D_{HPH}$. Imaginons, dans le cas sans MOL, que le producteur 1 adopte un comportement opportuniste et vend donc sa production à un prix égal à c_2 (cette hypothèse n'est pas réaliste puisque d'une part, c'est le producteur 2 qui dispose d'un certain pouvoir de marché, et d'autre part la maximisation du surprofit du producteur 1 ne correspond pas forcément à un prix égal à c_2). Il en tire un surprofit par unité vendue égal à $c_2 - c_1$. Comme la capacité de transport limite ses ventes, son surprofit total est donc égal à $(c_2 - c_1)K^D_{HPH}$, donc égal au montant des rentes. Mais avec le MOL, comme q^*_1 est inférieure à K^D_{HPH}, alors son surprofit est égal à $(c_2 - c_1)q^*_1$, ce qui est inférieur au montant des rentes, la différence étant égale au surcoût total.

précédemment. L'exclusion de ce producteur provoquerait un accroissement du prix d'équilibre, donc une diminution de la quantité échangée au travers de la bourse, le surcoût (1) mis en évidence disparaîtrait (puisque l'exclusion du producteur 2 implique l'élimination de la contrainte du MOL), la production d'électricité injectée au nœud 1 augmenterait jusqu'à la limite de la capacité de transport, et le surprofit laisserait place aux rentes de congestion (le GRT achèterait au total K^{D}_{HPH} unités au producteur 1 au prix c_1 par unité et revendrait K^{D}_{HPH} unités au prix $P[K^{D}_{HPH}]$).
Pour qu'un tel équilibre soit supérieur à celui incorporant le producteur 2 (et donc le MOL), il suffit que la valeur représentée par la zone bleu du graphique 5 ci-après (correspondant à la perte en terme de surplus net des consommateurs[13] industriels) soit inférieure à la valeur de la zone violette.

Graphique 5



Un tel équilibre sera supérieur à l'équilibre incorporant le producteur 2 (et le MOL de ce dernier), si le surcoût est supérieur à la perte subie par les consommateurs industriels, ce qui nous donne :

$$(c_2 - c_1).(q^{MOL}_{2} - q^{*B,SM}_{2,HPH}) > (1/2).\{(P[K^{D}_{HPH}] - c_2).(Q^{*B,AM}_{2,HPH} - K^{D}_{HPH})\} . \quad (2)$$

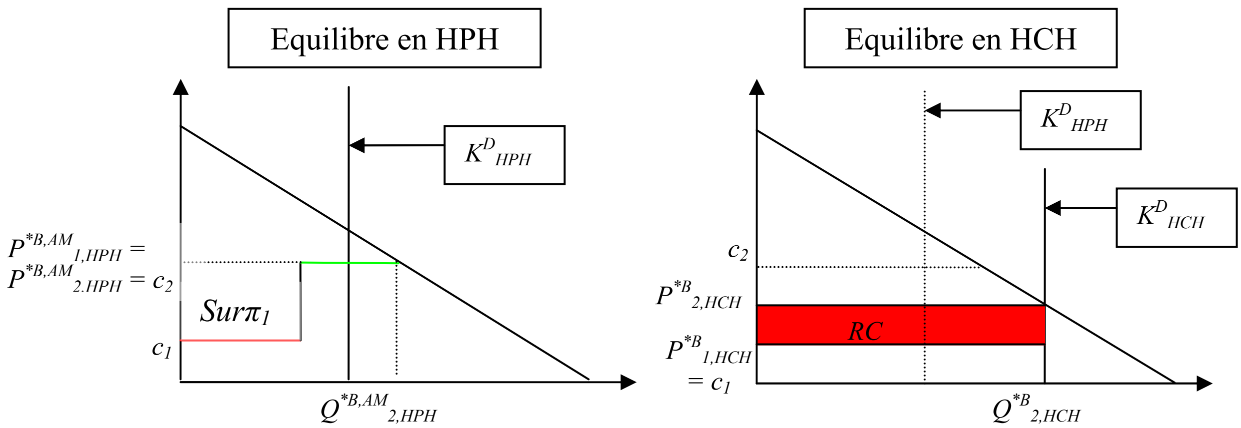
Cet équilibre particulier entraîne certaines questions. En premier lieu, si en terme de surplus collectif, cet équilibre est supérieur à celui qui incorpore le producteur 2, est-il néanmoins acceptable ? En effet, cet accroissement de bien-être se fait au détriment des consommateurs. En second lieu, des rentes de congestion apparaissent alors qu'elles étaient inexistantes avec l'équilibre

[13] L'accroissement du prix d'équilibre entraînerait un surcoût pour les consommateurs domestiques, mais en terme de bien-être collectif, ce surcoût serait entièrement compensé par une augmentation équivalente des rentes de congestion, financée par ces consommateurs, ceci provoquant un effet nul en terme de surplus collectif.

incorporant le MOL. Cet exemple nous montre que si le montant des rentes de congestions est récupéré par le GRT, il pourrait donc être tenté de sélectionner cet équilibre, alors que les conditions économiques n'étaient pas favorables, c'est-à-dire dans le cas où l'équilibre obtenu avec le MOL aurait été supérieur en terme de bien-être collectif. Or, il faut noter que, dans ce cas précis, le montant des rentes obtenu est à son maximum, compte tenu des paramètres du modèle[14].

Mais sans parler de cet équilibre particulier, l'introduction du MOL dans ce modèle aboutit à un résultat contre intuitif en HCH. En effet, nous avons supposé qu'en HCH la capacité de transport disponible ($K^D_{HCH} = K - Q^c_{HCH}$) est telle que le GRT n'a nullement besoin de faire appel au producteur 2 (il suffit que, lorsque le GRT utilise intégralement la capacité de transport, la quantité d'unité du producteur 1 ($q^*_1 = K^D_{HCH}$) soit telle que sa confrontation avec la demande nous donne un prix d'équilibre inférieur au coût marginal du producteur 2 et donc, dans ce cas, il est inefficace de l'appeler à produire). Toutefois, par hypothèse, la capacité disponible n'est pas suffisante pour éliminer les rentes de congestion (l'élimination des rentes nécessite une capacité de transport qui permet l'égalisation de l'offre avec la demande à un prix maximum égal à c_1). Donc, en supposant que le GRT retienne en HPH l'équilibre incorporant le MOL du producteur 2, il n'y a pas de rentes de congestion. Mais en HCH, heures moins chargées que celles des HPH ($Q^c_{HPH} > Q^c_{HCH}$), l'équilibre se caractérise par des rentes de congestion. Nous représentons ci-après, l'équilibre en HPH avec le MOL et l'équilibre en HCH.

Graphique 6



En fait, l'équilibre en HPH est réalisé sous contrainte de la capacité de transport et du MOL du producteur 2. Mais ici, la contrainte de transport « s'efface » au profit de la contrainte du MOL, le GRT devant d'abord satisfaire cette dernière. Mais en la saturant, la contrainte de transport ne peut être saturée (sauf si la capacité de transport est telle que le GRT soit obligé d'appeler le producteur 2

[14] En effet, sans le MOL le montant des rentes est égal à $(c_2 - c_1)K^D_{HPH}$. Mais dans le cas où nous introduisons le MOL d'une part, et que nous supposons que le GRT ne retienne pas le producteur 2 d'autre part, alors l'égalisation de l'offre à la demande nécessite un prix d'équilibre égal à $P[K^D_{HPH}] > c_2$. Donc, le montant des rentes est égal à $(P[K^D_{HPH}] - c_1)K^D_{HPH}$, montant supérieur à $(c_2 - c_1)K^D_{HPH}$.

pour une fourniture supérieure (à la limite égale) à son MOL Par contre, en HCH, la capacité disponible de transport est telle que le GRT n'a nullement besoin d'appeler le producteur 2. La contrainte du MOL n'entre plus en compte. Ce résultat particulier, bien évidemment, repose sur la capacité de transport ainsi que sur le MOL du producteur 2. Reste qu'ici, l'introduction du MOL entraîne une certaine « myopie » des deux types de consommateurs. En effet, comme les prix nodaux sont identiques, il n'y a pas de rentes de congestion (les consommateurs domestiques, ayant conclu un « CFD », sont totalement couverts contre la volatilité des prix). Si les deux types de consommateurs anticipent correctement le coût marginal de la production provenant du nœud 1 (ou du moins, font l'estimation « plutôt correcte » que le coût marginal du producteur 1 est plus faible que celui du producteur 2), alors puisque $P^{*B,AM}_{2,HPH} = c_2 > c_1$, et que les prix nodaux 1 et 2 sont égaux, ils peuvent en conclure qu'il n'y a pas un manque d'infrastructure de transport, mais plutôt un manque de capacité de production peu onéreuse[15].

Intéressons nous maintenant aux effets d'un accroissement de la capacité de transport.

2. Investissement en capacité de transport

2.1. Introduction

L'introduction de cette contrainte de MOL, comme nous venons de le voir, génère un surcoût de production, bien que la quantité ainsi que le prix d'équilibre soient identiques. C'est la répartition de la production totale entre le(s) producteur(s) du nœud 1 et le producteur du nœud 2 qui explique le surcoût.

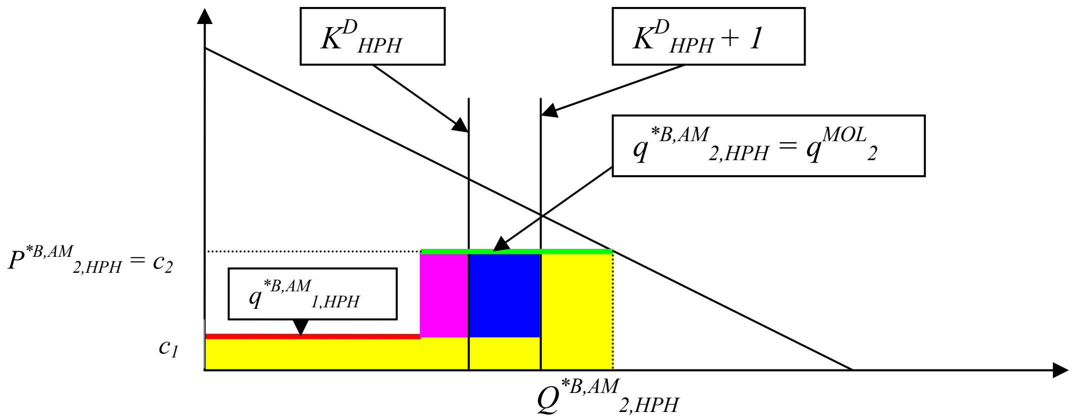
Nous allons maintenant procéder à l'analyse des effets que provoque un investissement en infrastructure de transport. Mais avant, nous devons faire remarquer que les effets vont dépendre de la capacité de transport disponible après investissement.

2.2. Capacité disponible après investissement inférieure à $(c_2 – b)/a$

Supposons qu'un investissement unitaire soit réalisé. Nous indiquons, sur le graphique 7, l'équilibre obtenu après cet accroissement unitaire.

[15] En annexes, p.27, nous discutons sur l'idée de « myopie » des consommateurs.

Graphique 7



Le graphique 7 nous montre qu'un accroissement unitaire de la capacité de transport (tant que $K^D{}_{HPH} + \Delta K < (c_2 - b)/a)$ n'a aucun effet sur le prix et sur la quantité d'équilibre. Toutefois, nous avons montré dans « **Accroissement de la capacité de transport électrique : Investissement stratégique ? (2008)** » qu'un investissement unitaire en capacité de transport permettait au GRT de substituer une unité onéreuse de production par une unité « bon marché », ceci permettant un accroissement du montant des rentes de congestion égal à $c_2 - c_1$. Cet effet provenait d'une modification de la répartition des unités achetées par le GRT Or ici, l'introduction du MOL empêche cette substitution, et donc, bien que le coût total d'achat de l'électricité n'augmente pas (le GRT achète la même quantité au producteur 1 au même prix c_1 par unité et achète le MOL, donc la même quantité, au producteur 2 au même prix c_2 par unité), le surcoût est plus élevé (l'accroissement de ce surcoût est matérialisé par la zone bleue) par rapport à l'équilibre antérieur à l'investissement.

Finalement, cet investissement n'a aucun effet sur le surprofit dégagé par la production localisée au nœud 1, sur les surplus des deux types de consommateurs, et sur le bien-être collectif.

Néanmoins, nous avions vu que le GRT, en cherchant à maximiser le bien-être collectif, pouvait sélectionner un équilibre excluant le producteur 2, en utilisant la capacité de transport à son maximum. Pour cela, il suffisait que la condition ci-dessous soit vraie :

$$(c_2 - c_1).(q^{MOL}{}_2 - q^{*B,SM}{}_{2,HPH}) > (1/2).\{(P[K^D{}_{HPH}] - c_2).(Q^{*B,AM}{}_{2,HPH} - K^D{}_{HPH})\}. \quad (3)$$

Or, nous venons de voir que l'investissement augmentait le surcoût $(c_2 - c_1).(q^{MOL}{}_2 - q^{*B,SM}{}_{2,HPH})$, car la substitution était impossible. Cet accroissement de surcoût est, pour un investissement unitaire, égal à :

$$\frac{\partial SCT}{\partial K} = (c_2 - c_1)(-\frac{\partial q^{*B,SM}_{2,HPH}}{\partial K}) = (c_2 - c_1) \succ 0 . \qquad (4)$$

D'autre part, la perte que subiraient les consommateurs industriels, si le producteur 2 était exclu du marché, est fonction décroissante de la capacité disponible. Donc, un investissement unitaire en capacité de transport augmente le surcoût, lorsque l'équilibre avec le MOL est retenu, et diminue la perte des consommateurs industriels, si l'équilibre retenu est sans le MOL. Donc, si l'équilibre n'incorporant pas le MOL était inférieur en terme de surplus collectif à celui caractérisé par le MOL avant tout investissement, il n'en reste pas moins qu'il existe une certaine capacité, notée K^I, comprise entre la capacité d'origine et le niveau d'infrastructure $(c_2 - b)/a$ telle qu'elle implique un équilibre sans MOL supérieur (toujours en terme de surplus collectif) à l'équilibre incorporant le MOL. Cette remarque est importante puisque nous venons d'annoncer que l'investissement n'avait aucun effet en terme de bien-être collectif, tant que la capacité après investissement ne dépassait pas le niveau $(c_2 - b)/a$. Or, si le seul but recherché par le GRT est la maximisation du bien-être collectif, et qu'il n'a aucune incitation à augmenter les rentes de congestion, alors il peut effectuer un investissement permettant d'atteindre un niveau d'infrastructure tel que $(K^D_{HPH} + \Delta K) \in]\, K\, ; (c_2 - b)/a\, [$. Ce dernier aura un effet positif sur le bien-être collectif, si le GRT retient l'équilibre excluant le producteur 2. Néanmoins, ce gain se matérialisera uniquement sous forme de rentes de congestion, ces dernières étant composées du surprofit que percevait la production injectée au nœud 1, d'une partie de la perte en surplus que subissent les consommateurs industriels, et de l'élimination du surcoût que provoquait le MOL. La valeur de ce gain, pour un niveau de capacité égal à $K^D_{HPH} + \Delta K$, est :

$$(c_2 - c_1)(q^{MOL}_2 - q^{*B,SM}_{2,HPH}) - (1/2)\{(P[K^D_{HPH} + \Delta K] - c_2)(Q^{*B,AM}_{2,HPH} - (K^D_{HPH} + \Delta K))\}. \qquad (5)$$

Mais, rappelons le, cet équilibre se caractérise par un prix plus élevé associé à une quantité plus faible et donc, ce sont les consommateurs qui sont perdants, bien que le bien-être collectif soit à son optimum compte tenu des contraintes. La puissance publique peut donc penser qu'un tel équilibre est inacceptable, et donc imposer au GRT une pondération des divers éléments qui composent le surplus collectif, afin d'accroître le poids du surplus des consommateurs.

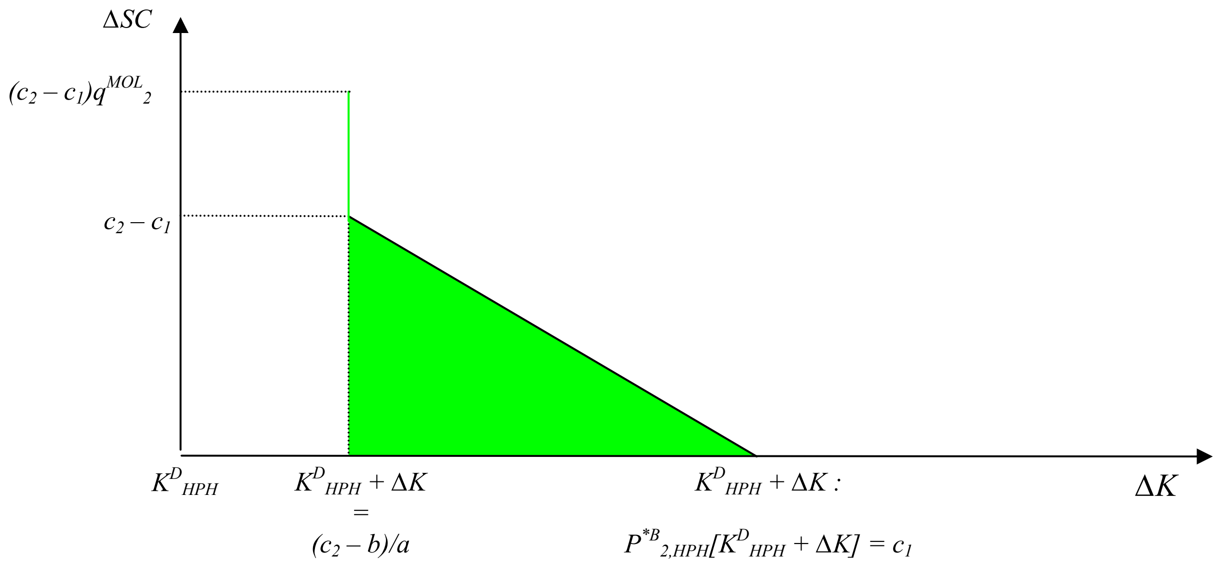
En supposant que cet équilibre est inacceptable pour la puissance publique, pour qu'un investissement en capacité de transport améliore le bien-être collectif, il faut donc que ce dernier amène la capacité à un niveau au moins égal à $(c_2 - b)/a$.

2.3. Capacité disponible égale à $(c_2 - b)/a$

Nous venons de voir que tant que la capacité de transport après investissement restait inférieure à $(c_2 - b)/a$, alors cet investissement n'avait aucun effet sur le bien-être collectif.

Par contre, si $K^D_{HPH} + \Delta K = (c_2 - b)/a$, alors le GRT ne fait plus appel au producteur 2 et donc le surcoût imputable au MOL disparaît. Le gain pour la collectivité, sans prendre en compte le coût de l'investissement, est égal à $(c_2 - c_1)q^{MOL}_2$. Nous représentons ci-après graphiquement l'évolution du surplus collectif marginal.

Graphique 8



La zone verte du graphique 8 représente le gain en surplus collectif avec le MOL, que nous pouvons obtenir si la capacité après investissement est telle que $P^{*B}_{2,HPH}[K^D_{HPH} + \Delta K] = c_1$.

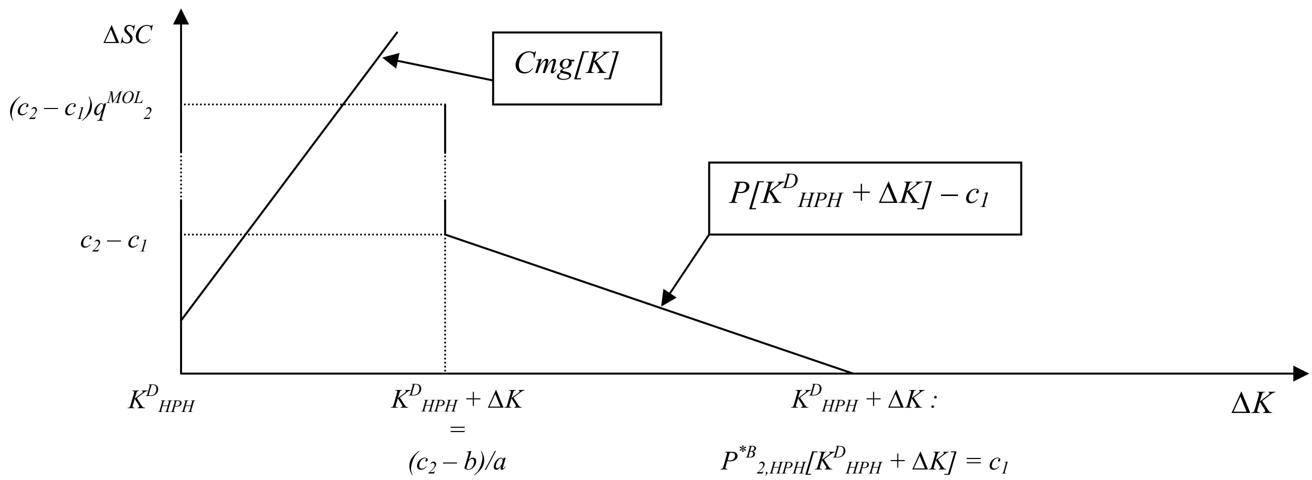
Il ne faut pas croire que le bien-être collectif obtenu avec le MOL sera toujours inférieur à celui obtenu lorsque nous ne l'introduisons pas. En effet, cette remarque ne peut être vraie que si la capacité de transport après investissement reste strictement inférieure au niveau $(c_2 - b)/a$.

Mais, dès lors que l'accroissement de la capacité permet d'atteindre le seuil $(c_2 - b)/a$, alors pour un même investissement, les gains en bien-être collectif de l'équilibre avec le MOL et celui sans le MOL sont égaux. En fait, pour une capacité inférieure à $(c_2 - b)/a$ et sans le MOL, alors tout investissement unitaire permet au GRT de substituer des unités et donc accroît le gain de la collectivité de $c_2 - c_1$ par unité d'infrastructure supplémentaire. Avec le MOL, cette substitution est impossible. Mais, dès que l'investissement permet d'atteindre la capacité $(c_2 - b)/a$, alors le gain pour la collectivité, compte tenu du MOL, est égal à la somme des gains unitaires $(c_2 - c_1)$ qu'aurait dû normalement produire l'effet de substitution. En quelque sorte, il y a un phénomène de rattrapage. La seule différence avec l'absence du MOL est qu'il existe une plage de capacité après investissement qui ne produit aucun effet.

La conséquence directe de cette différence est que le MOL « réduit » l'opportunité de réaliser des investissements. En effet, en introduisant le coût marginal induit par l'investissement (coût que nous supposons croissant et de pente égale à d) nous obtenons plusieurs cas possibles.

Premier cas

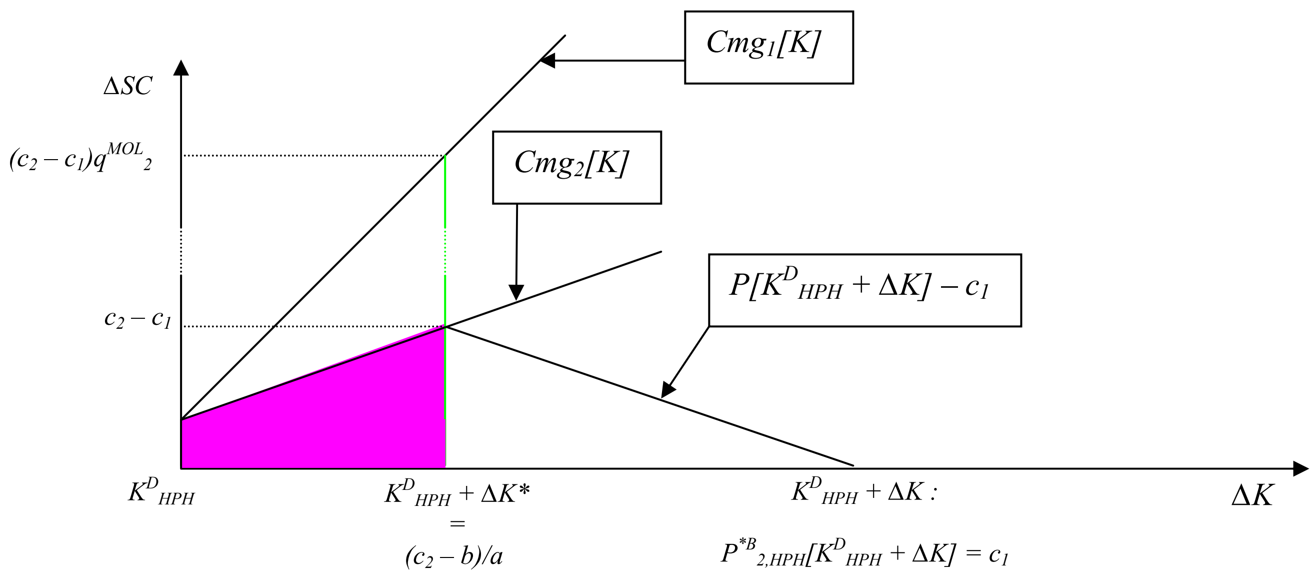
Graphique 9



Dans ce premier cas, il est évident qu'il n'y a pas de capacité optimale, du moins en HPH, puisque la pente du coût marginal est telle que pour tout Δ*K*, le coût marginal sera toujours supérieur au gain marginal. Mais, comme nous l'avons fait remarquer, nous n'avons pas pris en compte les effets d'un investissement sur l'équilibre en HCH.

Deuxième cas

Graphique 10



Nous avons indiqué, sur le graphique 10, deux types de coûts marginaux, Cmg_1 et Cmg_2, qui ont la particularité d'égaliser le gain marginal pour une même capacité K^*.

Néanmoins, la règle d'optimisation reposant sur l'égalisation du coût marginal avec le gain marginal pose problème ici. En effet, avec un coût marginal Cmg_1, nous avons gain marginal égal coût marginal. Mais ici, le gain marginal est aussi égal au gain total. Or, le coût marginal est, quant à lui, inférieur au coût total, et donc cet investissement entraîne une perte nette. Par contre, le coût total de l'investissement, représenté par l'aire violette du graphique 10 obtenue avec le coût marginal Cmg_2, est inférieur[16] à $(c_2 - c_1)q^{MOL}{}_2$, gain que procure un tel investissement (qui est aussi égal au gain marginal). Donc, un tel investissement procure un gain net pour la collectivité. Ces deux cas nous amènent à conclure qu'il existe une fonction de coût marginal caractérisée par une pente d^* telle que le gain total est égal au coût total. Si la pente du coût marginal est supérieure à d^*, alors cet investissement induira une perte nette et inversement. En outre, si nous introduisons l'indivisibilité du capital, il n'est pas sûr qu'une capacité optimale existe même avec un coût marginal par palier. Notons toutefois que nous n'avons pas pris en compte l'effet en terme de bien-être que produit l'investissement en HCH. Or, en introduisant le surplus collectif marginal en HCH, nous pouvons affirmer que la valeur de d^* s'accroît, ceci augmentant donc les possibilités d'obtenir un gain net suivant la pente d du coût marginal. D'autre part, l'existence d'une unique capacité optimale ne tient plus. En effet, deux conditions doivent être réunies pour que la sommation de ces deux gains marginaux permette d'obtenir une unique capacité optimale. La première, qui est condition nécessaire, car elle conditionne la seconde, est que le gain marginal en HCH, quand $K^D{}_{HPH} + \Delta K = (c_2 - b)/a$, doit être strictement positif. Mathématiquement, cette condition s'écrit :

$$c_2 - c_1 + a(K^D{}_{HCH} - K^D{}_{HPH}) < 0. \qquad (6)$$

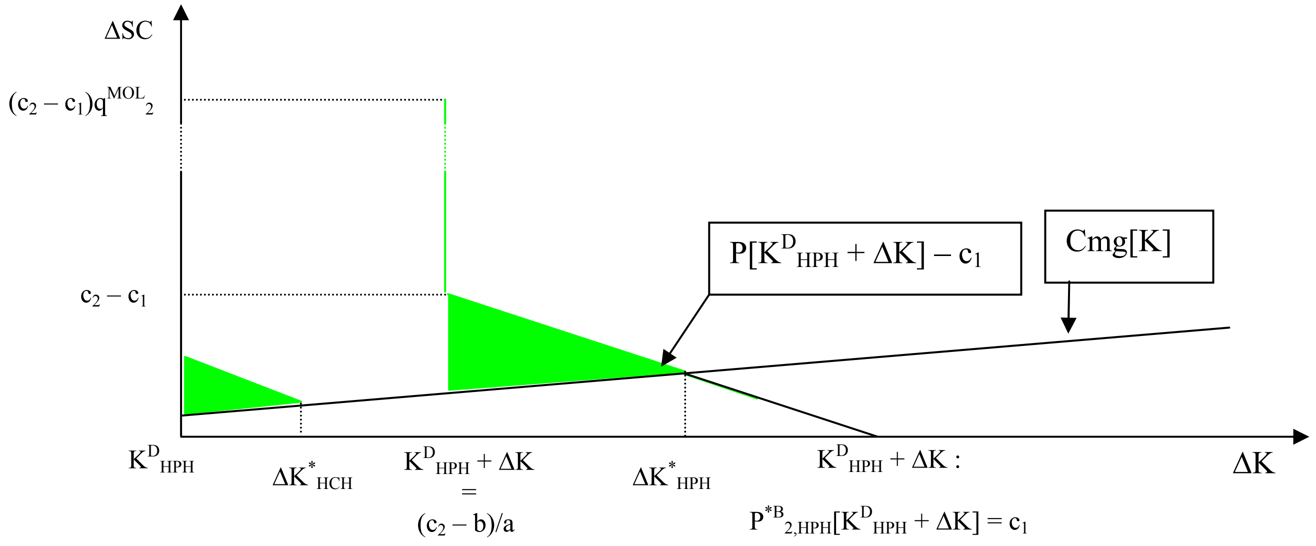
Quant à la seconde condition, elle repose sur la pente du coût marginal ($Cmg[\Delta K] = d\Delta K + e$). Si nous appelons d cette pente, alors cette dernière doit être telle que :

$$d \prec \left[c_2 - c_1 - e + a(K^D_{HCH} - K^D_{HPH})\right] \times \left(\frac{a}{c_2 - b - aK^D_{HPH}} \right) \quad (7).$$

Si la première condition (6) n'est pas vérifiée alors, suivant la pente d, nous obtenons soit une capacité optimale pour les seules HCH, soit une capacité optimale différente pour les deux périodes horo-saisonnières considérées. Le graphique 11 représente le cas où il y a deux capacités additionnelles optimales.

[16] Voir annexe p.29.

Graphique 11



Comme nous le montre le graphique 11, la première condition n'étant pas remplie, la sommation des gains marginaux ne permet pas d'obtenir une unique capacité optimale. La zone verte représente le gain net provoqué par l'investissement, si nous retenons comme capacité supplémentaire optimale ΔK^*_{HPH}.

Examinons maintenant les effets d'un investissement en moyen de production.

3. Investissement en moyen de production

3.1. Introduction

Ici, nous supposons qu'un agent pénètre le marché de la production, en choisissant de construire une centrale se caractérisant par un coût marginal c_3 tel qu'il appartienne à l'intervalle $]\ c_1\ ;\ c_2\ [$ et que $q^{MOL}_3 < q^{MOL}_2$.

Si l'équilibre en HPH était caractérisé par une quantité d'équilibre $Q^{*B,AM}_{2,HPH}$ égale à $q^{*B,AM}_{1,HPH} + q^{MOL}_2$, alors l'entrant est assuré de vendre au minimum[17] q^{MOL}_3. Notons que nous n'examinerons pas les effets d'un investissement sur l'équilibre caractérisé par l'exclusion du producteur 2.

[17] Puisque $q^{MOL}_2 > q^{MOL}_3$ et que $c_2 > c_3$.

3.2. Effets

Plusieurs cas sont envisageables, en fonction des valeurs prises par les différents paramètres.

Premier cas :

$$Q^{*B,AM}{}_{2,HPH} = q^{*B,AM}{}_{1,HPH} + q^{*B,AM}{}_{3,HPH}\,;\; Q^{*B,AM}{}_{2,HCH} = q^{*B,AM}{}_{1,HCH} + q^{*B,AM}{}_{3,HCH}. \quad (8)$$

Dans ce premier cas (8), le coût marginal de l'entrant est suffisamment faible pour que le GRT ne soit pas contraint par son MOL dans la réalisation des équilibres en HPH et en HCH.

Examinons plus en détail les effets de cet investissement. Puisque nous avons supposé que le producteur 2 était toujours appelé à produire en HPH, alors tout investissement en production (plus efficace) entraînera une amélioration du bien-être, supérieure à celle obtenue sans le MOL. En effet, sans le MOL, l'augmentation du bien-être collectif correspond à une fraction de l'accroissement du surplus net des consommateurs. Mais dans ce modèle, la contrainte du MOL du producteur 2 provoque un surcoût de production en HPH. Or, nous étudions le cas où l'équilibre en HPH n'est pas contraint par le MOL de l'entrant. Donc, il n'y a plus de surcoût de production après la réalisation de l'investissement en production. Cette disparition provoque un accroissement du bien-être collectif, ce dernier étant supérieur à celui qui aurait été obtenu sans le MOL. En fait, le surprofit que percevait le producteur du nœud 1 se transforme d'une part, en surplus net des consommateurs et d'autre part, en rentes de congestion. L'élimination du surprofit n'a donc aucun effet en terme de surplus collectif. Par contre, le surcoût de production se transforme lui aussi en deux parties, la première étant une augmentation du surplus net des consommateurs, l'autre étant un accroissement des rentes de congestion.

Finalement, les différents montants après investissement du surplus net des consommateurs, des rentes de congestion, et du bien-être collectif, sont identiques à ceux qui auraient été obtenus sans le MOL. Mais comme le surplus collectif de ce modèle, avant investissement en production, est inférieur à celui réalisé sans cette contrainte pour cause de surcoût, alors l'investissement provoque une amélioration du bien-être collectif plus importante. Notons d'autre part que cet investissement provoque l'apparition de rentes de congestion en HPH et en HCH, alors qu'avant celui-ci, il n'y avait des rentes que durant les HCH. Mais, ce dernier ne fait que révéler la situation réelle, c'est-à-dire le manque d'infrastructure de transport, qui était masquée par le MOL.

En ce qui concerne les effets de cet investissement en HCH, ces derniers sont identiques à ceux qui auraient été obtenus sans le MOL puisque le G.R.T. n'appelle pas le producteur 2 d'une part, et il n'est pas contraint par le MOL de l'entrant d'autre part.

Second cas :

$$Q^{*B,AM}{}_{2,HPH} = q^{*B,AM}{}_{1,HPH} + q^{*B,AM}{}_{3,HPH}\,;\; Q^{*B,AM}{}_{2,HCH} = q^{*B,AM}{}_{1,HCH} + q^{MOL}{}_{3}. \qquad (9)$$

Le GRT est contraint par le MOL de l'entrant en HCH. Nous n'analysons pas les HPH car les effets de l'investissement sont identiques à ceux du premier cas. Par contre, nous allons étudier les implications de cet investissement en production en HCH.

Ici aussi, nous supposons que le GRT retient la production de l'entrant en HCH (cela ne signifie pas que le bien-être collectif, contraint par le MOL en HCH après investissement, soit supérieur à celui où le GRT ne retiendrait pas l'offre de l'entrant pour cause de surcoût[18]). En gardant la même valeur c_3 que dans le premier cas ci-dessus alors, puisque le GRT est contraint en HCH par le MOL, ceci implique que l'accroissement du surplus en HCH dans ce cas est inférieur à celui du premier cas, du fait de l'existence du surcoût de production.

En outre, nous aboutissons à l'apparition des rentes de congestion en HPH, et à la disparition de ces mêmes rentes en HCH.

Troisième cas :

$$Q^{*B,AM}{}_{2,HPH} = q^{*B,AM}{}_{1,HPH} + q^{MOL}{}_{3}\,;\; Q^{*B,AM}{}_{2,HCH} = q^{*B,AM}{}_{1,HCH} + q^{MOL}{}_{3}. \qquad (10)$$

Dans ce cas, la capacité disponible en HPH et en HCH, ainsi que le coût marginal et le MOL de l'entrant, sont tels que les deux équilibres obtenus présentent un surcoût induit par le MOL. Puisque, par rapport aux deux premiers cas où il n'y avait pas de surcoût en HPH, nous pouvons en conclure que le bien-être s'accroît, mais d'un montant inférieur. En HCH, nous obtenons les mêmes résultats que dans le deuxième cas.

En outre, il n'y a plus de rentes de congestion en HPH et en HCH, ce qui masque la réalité, et le surcoût en HPH est inférieur à celui en HCH.

[18] Nous faisons référence ici à la discussion des deux équilibres possibles. En effet, soit le GRT retient la production de l'entrant en HCH, soit il ne la retient pas. Dans ce dernier cas, le prix d'équilibre sera plus élevé. Mais rappelons que cela n'implique un bien-être collectif inférieur.