

# THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES ECONOMIQUES

De

Mlle Céline HIROUX

---

Titre de la Thèse :

L'insertion d'une production inflexible dans des marchés concurrentiels:  
L'énergie éolienne

Sous la direction de : M. le Professeur Jean-Michel Glachant

Date prévue de soutenance : 11 juillet 2007

Lieu : Salle de conférences C301 – Campus Fontenay (Bât. C – 3<sup>ème</sup> étage)

Heure : 9 h

---

## *Résumé en français*

La majorité des études économiques sur l'énergie éolienne portent sur l'évaluation des externalités environnementales positives de cette énergie ou sur la comparaison des mécanismes incitant à l'investissement et leur efficacité relative. Mais avant d'être une énergie verte, l'énergie éolienne est d'abord un processus de production qui s'insère dans un système industriel. Cette thèse se propose donc d'analyser l'insertion de l'énergie éolienne dans les systèmes électriques concurrentiels comme un problème d'organisation industrielle pour gérer une production inflexible alors même que le produit n'est pas stockable. Une production inflexible soulève un problème central de coordination que nous analysons au regard de l'économie néo-institutionnelle.

L'énergie éolienne est extraite d'une ressource primaire aléatoire – le vent – qui transmet son caractère intermittent à la production électrique. Cette énergie se caractérise alors par de fortes variations de production et par la faible prévisibilité de ces variations de production. Le transfert d'un tel aléa naturel à la production industrielle pose d'emblée un problème économique particulier. Logiquement, l'intégration de cet aléa dans un processus industriel supposerait un système économique flexible capable d'épouser la forme de l'aléa. Ce n'est, cependant, pas ce que permettent les nouvelles formes d'organisation concurrentiels des systèmes électriques.

Le système électrique est contraint par les lois physiques de production et de circulation de l'électricité. L'électricité ne s'y stocke pas et elle n'est pas déplaçable en dehors du réseau électrique. Cette non-stockabilité fait du système électrique un système industriel de juste-à-temps avec une gestion des en-cours en flux tendus. Dans un tel système, la production s'ajuste continuellement aux variations de la consommation. Sur les systèmes électriques, ces adaptations de flux s'opèrent à la vitesse de la lumière et l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité doit être adapté instantanément par des variations de l'offre répondant aux aléas de la demande. Dans un tel système, la coordination entre une production inflexible et une demande aléatoire pose nécessairement problème. L'objectif de cette thèse est d'analyser comment est-il possible d'assurer la rencontre entre une production inflexible et une demande aléatoire alors même que le produit échangé n'est pas stockable.

L'énergie éolienne se caractérise par une production faiblement contrôlable et par un output inflexible. De ce fait, l'énergie éolienne a une très faible capacité d'adaptation aux contraintes du système électrique. Dans un monopole verticalement intégré, l'analyse économique de

l'intégration de l'énergie éolienne montre que la structure de coûts de l'énergie éolienne permet son insertion directe dans le mécanisme technico-économique de coordination production/consommation en temps réel. Dans un système électrique qui serait intégré verticalement, l'optimisation économique suppose en effet une minimisation des coûts d'exploitation, que l'on obtient en classant les différentes technologies par ordre croissant des coûts marginaux de production. La structure de coût de l'énergie éolienne, où les coûts totaux sont principalement des coûts fixes, et où les coûts marginaux de production sont à peu près nuls, explique qu'on préférera injecter cette production inflexible sur le réseau dès que les investissements en capacité auront été réalisés. L'ensemble des problèmes de coordination dus à l'énergie éolienne est géré par les outils internes à l'entreprise intégrée.

Mais, le monopole n'existe plus. Depuis plus d'une dizaine d'années, des réformes de mise en concurrence ont été engagées. Ces réformes imposent des mécanismes concurrentiels et la restructuration des activités électriques par éclatement vertical de la chaîne électrique. Cet éclatement permet de dégager les fonction de production, de transport, d'opération du système, de distribution et de commercialisation. Ces restructurations font apparaître une chaîne de transactions entre les activités qu'elles séparent. L'analyse de l'intégration de l'énergie éolienne dans les systèmes concurrentiels impose d'appréhender les caractéristiques transactionnelles propres à la production inflexible afin d'en évaluer les difficultés de coordination dans un système concurrentiel et au sein de cette chaîne transactionnelle. Dans un environnement concurrentiel, la très faible capacité d'adaptation a des conséquences majeures sur les transactions électriques et leur dénouement. L'incertitude des régimes de vent et le changement de sens de la fréquence des transactions éoliennes génèrent des difficultés transactionnelles majeures. Le problème de mesure, le besoin de gestion des externalités et d'une forte coordination offre - demande exigent ainsi la mise en place préalable, *ex-ante*, de structures de pilotage qui permettront la réalisation des transactions éoliennes. Dans le cadre de la réglementation publique, un dispositif transactionnel réglementé est imposé et se caractérise par l'obligation d'achat à un prix fixé et par la priorité d'injection sur le réseau. Ce mécanisme renforce l'inflexibilité de l'énergie éolienne et la transforme en un nouvel objet analytique que nous étudions dans cette thèse.

Notre analyse des structures de pilotage des transactions éoliennes distingue les conséquences transactionnelles d'une production inflexible sur l'amont et sur l'aval de la chaîne électrique. L'amont de la chaîne électrique correspond aux relations de marché entre les producteurs et les fournisseurs jusqu'à la livraison en temps réel de l'électricité. Ces relations traversent la séquence des marchés de gros jusqu'à l'injection physique de la production électrique. L'aval de la chaîne électrique concerne l'approvisionnement des clients finals et le règlement de l'énergie aux producteurs. C'est le segment de la commercialisation de l'électricité.

Dans un système concurrentiel, le mécanisme de coordination est le prix d'équilibre entre l'offre et la demande. Le prix signale l'information sur l'état du système. Lorsque les réformes électriques introduisent la concurrence en amont, le prix issu du mécanisme de coordination en temps réel est particulièrement volatile puisque l'électricité n'est pas stockable et que la demande n'est pas élastique. Les acteurs du marché pour se protéger de ce risque prix favorisent la séquence des marchés électriques et s'engagent sur les marchés *forward*. Ce n'est pas le cas de l'énergie éolienne.

L'énergie éolienne est complètement insensible aux signaux prix des marchés de l'électricité. Elle est dispensée du mécanisme concurrentiel de coordination car elle reçoit pour toute l'électricité injectée un prix administré. En amont de la chaîne électrique, les producteurs éoliens sont alors exemptés de la séquence des marchés puisqu'ils sont garantis par la réglementation publique et que leur volume de production sera rémunéré à un tarif fixé. Néanmoins, les transactions éoliennes, alors concentrées sur le temps réel, vont affecter les mécanismes de coordination et d'ajustement du temps réel et obliger l'opérateur du système à lever des offres d'ajustement. L'énergie éolienne pousse ainsi les autres moyens de production sur le dernier module de la séquence des marchés.

Le module de l'ajustement permet de corriger les écarts entre les échanges effectifs des agents et leurs positions contractuelles. L'ajustement correspond à des mécanismes multilatéraux où des offres d'ajustement sont levées pour corriger les déséquilibres. Les coûts d'ajustement ainsi générés sont supportés par les responsables en écart. C'est un mécanisme incitatif pour respecter les échanges réalisés sur les marchés *forward*. Mais la garantie de prix et surtout de volume consentie aux producteurs éoliens supprime leurs responsabilités sur l'ajustement. La réglementation publique, en garantissant la priorité d'injection, délègue à l'opérateur du système la gestion des coûts d'ajustement de la production inflexible. *Ex post*, l'opérateur du système répercute ces coûts sur les utilisateurs du réseau. L'incertitude de la production inflexible est ainsi gérée, en amont de la chaîne électrique, par l'opérateur du système.

En aval de la chaîne transactionnelle, les consommateurs choisissent leurs fournisseurs. La propension à consommer une énergie « verte » n'étant pas identique chez les consommateurs résidentiels, cette liberté de choix pourrait laisser apparaître des comportements de passager clandestin où certains consommateurs accepteraient de payer le prix administré alors que d'autres favoriseraient une électricité moins chère. Pour éviter ce problème, la réglementation publique impose un contrat d'achat collectif où toute l'électricité produite à partir d'éoliennes est obligatoirement achetée par l'ensemble des consommateurs. Il s'agit d'un contrat d'achat multilatéral.

Mais la mise en œuvre de ce contrat suppose que chaque consommateur paie une part de l'énergie éolienne injectée et que chaque producteur reçoive le prix administré pour son volume de production. Il est donc nécessaire d'individualiser le contrat collectif. Or, il est impossible de déterminer l'origine du flux consommé par les consommateurs obligés. Et le producteur ne connaît pas à l'avance son volume de production. Un important problème de mesure empêche les deux parties d'exécuter les termes du contrat. Ce contrat collectif ne peut être individualisé qu'avec l'aide d'une structure de gouvernance particulière dont la fonction est d'assurer le règlement individuel à chaque producteur de l'énergie éolienne consommée par chaque consommateur.

Pour mettre en œuvre le contrat collectif, la structure de gouvernance doit assurer trois missions : la gestion du système de mesure, la livraison du volume aléatoire et le paiement individuel. Parce que l'opérateur du système est l'autorité des flux électriques, il possède les compétences pour gérer ces trois fonctions et pour assurer, ainsi, l'individualisation du contrat collectif. Comme il est impossible de déterminer l'origine de l'électricité consommée, les quantités d'énergie éolienne à délivrer à chaque consommateur doivent être déterminées *ex ante*. Pour cela, l'opérateur du système fabrique des « blocs fermes » d'énergie qu'il s'engage à livrer à chaque consommateur. En mesurant et en individualisant le volume d'énergie éolienne à livrer, l'opérateur du système assure la mise en œuvre du contrat d'achat collectif.

La structure de gouvernance trilatérale dans laquelle l'opérateur du système joue le rôle de la tierce partie permet de gérer les aléas contractuels de la production inflexible et ainsi d'exécuter le contrat d'achat collectif. Le rôle de l'opérateur du système en amont et en aval de la chaîne pour gérer l'insertion de la production inflexible montre la nécessité d'une gouvernance trilatérale, où il apparaît comme la tierce partie et l'architecte des modalités d'intégration. Cette thèse nous permet donc d'affirmer que l'intégration de l'énergie éolienne dans des systèmes concurrentiels, lorsque l'énergie est soumise au tarif d'achat garanti, se réalise grâce à une gouvernance trilatérale qui internalise les difficultés transactionnelles en amont et en aval de la chaîne électrique.