



**Ecole Supérieure de
l'Electricité**
Département Energie



**Université
Paris-Sud 11**
Faculté Jean Monnet

**L'ANALYSE ECONOMIQUE DES
ARCHITECTURES DE MARCHÉ ELECTRIQUE.
APPLICATION AU *MARKET DESIGN* DU « TEMPS
REEL »**

Thèse pour le Doctorat en Sciences Economiques

Présentée et soutenue par

Marcelo SAGUAN

Avril 2007

Directeur de Recherche :

M. Jean-Michel GLACHANT, Professeur, Université Paris-Sud 11

Rapporteurs :

M. Ronnie BELMANS, Professeur, Université Catholique de Louvain, Belgique

M. Christian von HIRSCHHAUSEN, Professeur, Université Technique de Dresde, Allemagne

Suffragants :

M. Stéphane SAUSSIÉ, Professeur, Université Paris-Sud 11

M. Michel MASSONI, Directeur des accès aux réseaux, Commission de Régulation de l'Energie

M. Philippe DESSANTE, Professeur, Ecole Supérieure d'Electricité (SUPELEC)

*L'Université Paris-Sud 11
n'entend donner aucune approbation
ni improbation aux opinions
émises dans les thèses.
Ces opinions doivent être considérées
comme propres à leurs auteurs.*

Remerciements

Un professeur m'a dit une fois : « Une bonne thèse est une thèse finie » (je me réserve le nom de l'auteur de cette phrase). En tout cas, ma thèse est finie. Or, elle n'aurait pu être finie sans l'aide et les encouragements que j'ai reçus au cours de ces dernières années. C'est le moment de remercier toutes les personnes qui m'ont entouré pendant la réalisation de ce travail. Malheureusement, les remerciements exprimés dans cette page, si courte et limitée par ma maîtrise maladroite de la langue, ne représentent qu'une partie minimale de mes sincères remerciements.

Je remercie énormément Jean-Michel Glachant, mon directeur de thèse. Mes remerciements envers lui concernent en premier lieu l'attention et le temps qu'il a consacré à mon travail. Je tiens aussi à le remercier pour ses conseils et ses réflexions intelligentes, son soutien et son encouragement. Sincèrement, grâce à lui j'ai pu apprendre beaucoup des choses dont certaines fort utiles pour mes travaux académiques bien sûr, mais aussi des choses importantes pour mon développement personnel.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre du Projet Fédérateur à Supélec. Je remercie Patrick Bastard qui m'a encadré pendant les premières années. Je le remercie de m'avoir fait confiance au début de mes travaux. Je remercie aussi Philippe Dessante qui a pris généreusement la relève et m'a encadré durant les dernières années de cette thèse. Tous les deux, je les remercie pour leurs réflexions, leurs conseils et leurs explications qui m'ont permis de progresser et d'améliorer mon travail. Mes remerciements s'adressent aussi à Jean-Claude Vannier et Sophie Plumel pour leur soutien et encouragement.

Je tiens à remercier Michel Massoni et Christophe Gence-Creux de la Commission de Régulation de l'Energie pour avoir suivi mes travaux pendant la durée de ma thèse. Leurs conseils et remarques, toujours pertinents, m'ont permis de confronter (et ajuster) mes travaux à des problématiques pratiques réelles.

Je remercie spécialement mes relecteurs et correcteurs (et amis) : Virginie Pignon, Céline Hiroux, Yannick Perez, Ute Dubois, Vincent Rious et Florent Maupas. La justesse de leurs critiques ont été très constructives et utiles. Mises à part leurs contributions de fond, ils ont eu la pénible tâche de corriger mon français maladroit ! Un grand merci !

Pendant les années de ma thèse, j'ai eu la chance de travailler dans des groupes de recherche fantastiques. Je remercie toutes les personnes du GRJM et de l'ADIS d'un côté, et du département Energie de Supélec d'autre côté, pour leur support, leurs enseignements et leur amitié. Je remercie spécialement Gino Hadjee avec qui j'ai partagé le bureau (et beaucoup d'autres choses) pendant plus de 3 ans. Je me permets de remercier aussi l'équipe de football « des jeudis » à Supélec ainsi que l'équipe de baby-foot à Fontenay qui ont fait plus conviviale la durée de ma thèse. J'ai eu la chance aussi de travailler avec de groupes de recherche étrangers. En représentation de toutes les personnes intéressantes avec lesquelles j'ai eu des échanges enrichissants, je remercie en particulier deux chercheurs qui sont devenu des amis à force de travailler ensemble : Leonardo Meeus et Nenad Keseric.

Cette dernière partie des remerciements devrait s'appeler « remerciements et excuses » ou remerciements pour la patience. La recherche est très preneuse de temps ! Et le temps consacré à la recherche implique moins de temps pour la famille et les amis... Je remercie énormément à toute ma famille : Abuela, Abuelo, Mamá, Papá, Eugenia, Graciela, Leticia, etc. Depuis très loin, ils m'ont soutenu et encouragé constamment. Je les remercie de leur patience, car à force de travailler dur, j'avoue ne pas leur avoir consacré le temps qu'ils méritent réellement. Je remercie aussi tous mes amis, d'ici et de là-bas. Merci pour m'avoir accompagné et aidé pendant ces dernières années.

Gracias... totales !

Fontenay aux Roses, le 18 mars 2007.

Sommaire

Introduction Générale 1

Partie I : La modularité des architectures de marché électrique

Chapitre 1

Système électrique et exploitation optimale par une entreprise intégrée verticalement

Introduction..... 8
Section 1: Description des éléments d'un système électrique..... 9
Section 2: Exploitation optimale par une entreprise intégrée 31
Section 3: Coordination d'entreprises intégrées sur un même réseau..... 45
Conclusions du chapitre 53

Chapitre 2

Architectures de marché électrique

Introduction..... 56
Section 1: Contrôles-commandes vs. Marchés 60
Section 2: Architectures de marché sur une seule zone de contrôle 72
Section 3: Architectures de marché sur plusieurs zones de contrôle 102
Conclusions du chapitre 121

Partie II : Le Market Design du « temps réel »

Chapitre 3

Séquence des marchés d'énergie et design du module du temps réel

Introduction..... 125
Section 1: Séquence des marchés d'énergie à court terme 127
Section 2: Design du module du temps réel 143
Conclusions du chapitre 188

Chapitre 4

Modélisation de la séquence des marchés d'énergie et du module du temps réel

Introduction..... 192
Section 1: Modélisation du module du temps réel (une zone de contrôle) 194
Section 2: Modélisation de l'intégration d'architectures (deux zones de contrôle).... 235
Conclusions du chapitre 259

Conclusion Générale 262

Annexe..... 268

Bibliographie 276

Table des matières 293

Introduction Générale

L'introduction de la concurrence dans le secteur électrique s'inscrit dans la lignée des mouvements de réformes des secteurs économiques relevant traditionnellement de monopoles intégrés verticalement (Staropoli [2001]). Les caractéristiques technico-économiques de ces secteurs, notamment l'existence d'une infrastructure en monopole naturel, ont longtemps justifié l'existence de l'intégration verticale. De puissants facteurs de changement sont venus remettre en cause les formes traditionnelles d'organisation de ces industries. Dès les années soixante, des travaux de recherche ont conduit à remettre en cause les schémas d'organisation des industries de réseaux, ainsi que l'efficacité des monopoles dans l'allocation de ressources (Averch-Johnson [1962], Demsetz [1968]). Un consensus s'est progressivement établi, dans les dernières décennies du XXe siècle, pour préconiser l'introduction de certaines formes de concurrence. Ce consensus a touché successivement les industries des télécommunications, des transports (aériens et ferroviaires), et finalement le secteur électrique.

En une à deux décennies, des réformes électriques ont été réalisées dans la plupart des pays (Glachant-Finon [2003], Newbery [2005b], Joskow [2006a], Sioshansi [2006]). L'introduction de la concurrence sur un secteur longtemps organisé autour d'un monopole intégré fait apparaître des problèmes de coordination qu'il convient de traiter par la mise en place de dispositifs organisationnels et institutionnels adéquats (Staropoli [2001]). Or la base de ces dispositifs n'émerge pas spontanément du jeu des acteurs, mais résulte des choix d'autorités publiques en charge de l'introduction de la concurrence. Pour ce qui concerne la création d'un marché de gros, la conception d'une architecture du marché (« *market design* ») doit réunir certains dispositifs organisationnels et institutionnels afin d'assurer une nouvelle forme de coordination (Wilson [2002], Stoft [2002]).

Bien que, depuis le début de l'introduction de la concurrence dans le secteur électrique, l'état de l'art des théories économiques sur les architectures de marché ait progressé considérablement, les connaissances actuelles ne permettent pas de trancher définitivement sur le choix d'un seul design optimal qui déboucherait sur des solutions pratiques robustes d'architectures. Ces développements théoriques se heurtent très certainement aux spécificités du bien électricité et, en fait, la question de l'architecture de marché est trop complexe pour être traitée sans être découpée en plusieurs modules (Wilson [1998b], Wilson [2002]).

Le manque de cadre théorique complet sur les architectures de marché rend très intéressantes les expériences des architectures de marché mises en place dans différentes régions du monde. En effet, même sans un cadre théorique complet, on pourrait utiliser l'expérience acquise depuis près de 20 ans pour réaliser des comparaisons et pour développer un classement d'après les performances. Cependant, cette méthodologie, bien que très utile, présente aussi une difficulté de mise en œuvre. Il existe en fait une très grande

diversité d'architectures de marché. La comparaison directe des performances des différentes architectures de marché devient donc très difficile (CE [2004], Green *et al.* [2005]).

La difficulté devient encore plus grande quand on considère l'intégration entre plusieurs architectures de marché. En fait, une architecture de marché est normalement définie pour une zone géographique déterminée (une région, ou un état). Mais l'introduction de la concurrence peut aussi passer par la stimulation des échanges entre plusieurs zones (c'est par exemple, le cas du marché intérieur européen) (Pignon [2003], CE [1996], CE [2003]). Dans ce cas, le choix du design pour intégrer les architectures de marchés des zones adjacentes est donc déterminant pour un bon fonctionnement de nouveaux marchés électriques plus vastes. Cependant, l'analyse économique appliquée à l'étude de l'intégration de marchés ne permet pas non plus de trancher définitivement sur la meilleure manière de mettre en place un marché électrique régional.

Le manque de maîtrise rationnelle dans le choix des options optimales de design, que ce soit au niveau national ou régional, montre d'abord l'importance d'une recherche plus approfondie sur les différents designs possibles. Mais, pour approfondir cette étude des architectures, il faut pouvoir la découper en plusieurs thèmes. Il est d'abord nécessaire de développer un cadre d'analyse modulaire des architectures de marché, afin de pouvoir identifier et caractériser en quoi consiste les designs de marché en électricité. Ensuite seulement on pourra se concentrer sur l'étude approfondie des règles de certains modules spécifiques. La modularité de l'architecture rend possible l'analyse plus approfondie d'une seule sous-partie du système car la modularité permet d'étudier certains modules séparément des autres (Baldwin-Clark [2000]).

Le premier des objectifs de cette thèse est donc de développer un cadre d'analyse modulaire des architectures de marché et de l'intégration des architectures de marché.

La construction d'une architecture de marché consiste à remplacer la séquence de contrôles-commandes (*unit commitment, optimal dispatch, etc.*) utilisé dans une entreprise intégrée verticalement par une séquence de marchés ou de modules (Wilson [2002]). Ces marchés ou modules doivent assurer les fonctions essentielles de coordination qui étaient gérées internement par les outils de contrôle-commande. Une architecture de marché électrique sera ainsi composée de 4 modules : 1° le module d'énergie *forward*, 2° le module de transport *forward* et 3° le module de réserves *forward* et 4° le module du temps réel. Puisque l'architecture de marché est « modulaire », il existe différentes options de design ou formes d'organisation possibles pour chacun des modules. L'analyse des outils de contrôle-commande permettra de dériver ces options ou variantes possibles. Nous verrons que ces options sont contraintes par des limitations techniques et économiques. L'architecture de marché sera donc à la fois un choix d'option particulier pour chaque module, et un choix d'articulation entre les modules. L'analyse modulaire des architectures permet aussi de caractériser différentes formes de design pour réaliser l'intégration des

architectures de marché entre des multiples zones de contrôle liées par un réseau de transport commun.

L'identification et l'isolement de quelques modules essentiels d'une architecture de marché permet d'approfondir la recherche sur le design de ces éléments. Quel module particulier doit-on choisir ? Si l'on regarde l'architecture de marché du point de vue de l'effort des autorités pour la construire, on peut identifier une architecture minimale comme le noyau qui est indispensable au fonctionnement de toute industrie électrique sur une base concurrentielle. Cette architecture minimale correspond au design du module du temps réel. Ceci découle du fait que le bien électricité n'est pas stockable. Tous les échanges physiques ne prennent donc effectivement place qu'en temps réel. Le module du temps réel est ainsi au cœur de toute architecture de marché, et il nécessite un traitement attentif de son design. Cependant, c'est le module comparativement le moins étudié depuis le début des réformes.

Le deuxième objectif de cette thèse est alors d'étudier le design du module du temps réel.

L'étude du module du temps réel et son inscription sur une séquence de marchés présente un intérêt académique et un intérêt empirique.

L'importance académique de l'étude du module du temps réel vient de ce que ce module n'a pas été suffisamment étudié depuis le début des réformes du point de vue de la théorie économique. En effet, depuis le début de l'introduction de la concurrence dans l'industrie électrique il y a eu une séparation tacite des tâches entre les problèmes « économiques » de l'électricité et les problèmes d'« ingénierie » de l'électricité.

Ainsi, d'un côté, les économistes se sont concentrés sur les modules de l'architecture de marché qui, par leurs caractéristiques, étaient plus cohérents avec l'analyse économique typique de transactions sur un pur marché. De l'autre côté, toute la problématique « technique » de l'opération du système électrique en temps réel a été laissée aux ingénieurs de réseau, de fait les seuls compétents pour l'exploitation opérationnelle du système en temps réel. Les études d'analyse économique formalisée se sont centrées donc sur le design de « bourses d'électricité » (*day-ahead market*) car les mécanismes d'enchère étaient le « cœur » de la concurrence en production. Ainsi, les premières études des économistes sur les architectures de marché étaient basées sur la théorie des enchères (Von der Fehr-Harbord [1993]). Parallèlement, les économistes ont privilégié l'étude de la concurrence imparfaite notamment les structures de marché, d'abord en utilisant des modèles classiques (concurrence à la Cournot ou à la Bertrand) et ensuite avec des modèles plus complexes du type de « fonction d'offre » (« *supply function equilibria* ») (Green-Newbery [1992], Bolle [1992], Green [1994]). Cette analyse économique appliquée aux marchés électriques s'est orientée ensuite sur les caractéristiques du réseau de transport et l'influence des contraintes de transport dans un environnement de concurrence imparfaite (Cardell *et al.* [1997], Borenstein *et al.* [2000], Neuhoff [2003], Hobbs-Rijkers [2004],

Barquin *et al.* [2004]). Bien qu'importantes pour l'avancé d'une connaissance plus approfondie des marchés d'électricité, ces études ont été limitées car elles ne considéraient qu'une seule des étapes temporelles d'un marché électrique, ignorant ainsi la séquence de marchés. Quelques études ont pris en compte les caractéristiques intrinsèques du marché électrique, organisé comme une séquence de marchés (Allaz-Vila [1993], Green-McDaniel [1999], Bessembinder-Lemmon [2000], Siddiqui [2002], Kamat-Oren [2004], Yao *et al.* [2004]). Mais le but principal de ces études n'était pas orienté sur les caractéristiques de designs du seul marché physique de l'électricité. L'étude formalisée du design du module du temps réel inscrit sur une séquence de marché nécessite la combinaison de connaissances économiques avancées et de connaissances « ingénieur ». D'un côté, considérer une séquence de marchés, implique l'utilisation de modèles d'équilibre à plusieurs étapes et la prise en compte des comportements d'agents face au risque. D'un autre côté, l'étude détaillée du fonctionnement du module du temps réel, gouverné fortement par des règles conçues généralement par des ingénieurs réseau, est nécessaire car c'est ce module qui ferme la séquence de marché et déterminera les effets sur toute la séquence de marchés.

L'intérêt empirique de l'étude du module du temps réel a deux volets principaux. D'un part, la comparaison des alternatives de design du module du temps réel est d'un réel intérêt empirique dans l'Union européenne, puisque plusieurs pays cherchent à améliorer leurs architectures de marché « nationales » (Meeus *et al.* [2005], Meeus *et al.* [2006]). Dans ce contexte, il est important d'avoir un cadre d'analyse formalisé afin de pouvoir comparer les différentes variantes de design pour une architecture de marché correspondant à un seul pays ou une seule zone de contrôle. Concrètement, il existe en Europe différents designs du module du temps réel. Ils forment toute une gamme qui se répartit entre deux designs extrêmes : d'un côté, le design du type « marché » et, de l'autre côté, le design du type « mécanisme ». Un marché du temps réel utilise un prix unique de l'énergie pour toutes les transactions du temps réel. Par contre, un mécanisme d'ajustement recourt à des systèmes de prix plus complexes incluant normalement l'utilisation de pénalités. D'autre part, l'étude des différents designs du module du temps réel devient encore plus importante lors de la conception de l'intégration d'architectures de marché entre plusieurs zones de contrôle. Dans un contexte où l'intégration se réalise entre architectures qui ne sont pas parfaitement harmonisées, différents designs peuvent coexister pour les modules du temps réel. C'est notamment le cas pour l'intégration de trois pays de l'Europe Continentale : la France et la Belgique présentant un design du type « mécanisme » et les Pays-Bas présentant un design proche d'un « marché ».

Ainsi, cette thèse apportera-t-elle les éléments formalisés nécessaires pour la compréhension, l'évaluation et la comparaison des principales variantes de design du module du temps réel sur une séquence de marchés d'énergie.

Organisation de la thèse

Cette thèse comprend deux parties.

La **première partie** présente un cadre d'analyse modulaire et met en évidence les principaux éléments d'une architecture de marché électrique.

Le **premier chapitre** est consacré aux caractéristiques économiques et techniques spécifiques du système électrique composé de trois parties : la consommation, les moyens de production et le réseau de transport. Nous étudions ensuite la forme d'organisation et de coordination la plus simple pour exploiter un système électrique de manière optimale. Cette forme est une entreprise verticalement intégrée, bienveillante ou parfaitement régulée. Nous en déduisons la séquence de contrôles-commandes étant le dispositif de coordination nécessaire pour une exploitation optimale.

Le **deuxième chapitre** caractérise les éléments essentiels d'une architecture de marchés ainsi que leur diversité. Notre démarche va du plus simple au plus complexe. Nous caractérisons tout d'abord l'architecture de marché pour une zone de contrôle isolée, avec un réseau de transport unique. Puis nous caractérisons l'intégration d'architectures de marché entre plusieurs zones de contrôle.

A ce titre, nous analyserons les éléments essentiels d'une architecture de marché électrique en concevant l'introduction de la concurrence comme le remplacement des outils de contrôle-commande d'une entreprise intégrée par une combinaison de marchés et de mécanismes. Nous nous intéressons à deux horizons temporels, le court terme (au jour J-1) et le très court terme (le temps réel). Et nous insisterons sur la partie du design qui relie les opérations en J-1 aux opérations en temps réel. Grâce à cette analyse, nous définirons quelles composantes du bien électricité et quels modules (ou sous-marchés potentiels) constituent le cœur d'une architecture de marché (Wilson [1998b], Wilson [2002]). Du point de vue de l'analyse économique, cette modularité des architectures ainsi mise en évidence permettra d'étudier certains modules séparément des autres.

L'analyse modulaire d'architectures de marché montrera aussi, que parmi la grande diversité existante d'architectures de marché, il existe un noyau commun à toutes les architectures, c'est-à-dire une architecture minimale. Cette architecture minimale porte sur le design du module du « temps réel ». Toutes les architectures de marché qui ont été mises en place dans le monde ont formellement défini des règles a minima pour ce module. Ceci souligne l'importance du module du temps réel pour un bien difficilement stockable comme l'électricité, dont les échanges physiques ne prennent effectivement place qu'en temps réel. En conséquence, nous centrerons les développements de cette thèse sur le module du temps réel.

La **deuxième partie** analyse le design du module du temps réel et sur son influence sur la séquence des marchés d'énergie.

Dans le **chapitre 3**, nous présentons le fonctionnement de la séquence des marchés d'énergie et nous réalisons une typologie des designs du module du temps réel. Nous insistons particulièrement sur les signaux de prix envoyés par le module du temps réel, car ces signaux gouverneront les comportements des agents économiques sur la séquence des marchés. Ce module est le dernier module de la séquence des marchés d'énergie et il gère la seule place où l'énergie physique est échangée entre acteurs de marché. Tous les autres marchés, qui fonctionnent avant le temps réel, sont des marchés *forward*, où on négocie bien des prix et des volumes, mais sans échange physique d'énergie. Pour cette raison, les caractéristiques de design du module du temps réel auront des conséquences importantes sur le reste de la séquence de marché.

Nous analyserons les principales variantes de design pour le module du temps réel. Nous distinguerons deux types de design : le « marché du temps réel » et le « mécanisme d'ajustement ». Un marché du temps réel utilise un prix unique de l'énergie pour toutes les transactions du temps réel. Par contre, un mécanisme d'ajustement recourt à des systèmes de prix plus complexes pour le règlement, incluant généralement des prix différenciés pour les différents types de transactions et l'utilisation de pénalités. Grâce à l'étude de plusieurs cas nous verrons que les différents designs existants forment toute une gamme, allant du design « marché », sans pénalités, aux designs du type « mécanisme » avec différentes intensités de pénalité. Le choix du *market design* en temps réel aura d'importantes conséquences car il fixera les incitations données aux participants du marché et influencera ainsi leur comportement. Nous verrons alors que les caractéristiques propres de chaque design produisent différentes conséquences économiques qui s'inscrivent sur la séquence de marchés d'énergie.

Le **chapitre 4** est consacré à la modélisation de la séquence des marchés d'énergie en prenant en compte les différents designs pour le module du temps réel. Nous utiliserons un modèle d'équilibre à deux étapes. Ces modèles d'équilibre en présence d'incertitudes se présentent comme l'alternative la plus pertinente pour les marchés d'électricité (Bessembinder-Lemmon [2000], Siddiqui [2002]). Cette modélisation permet de traiter des caractéristiques intrinsèques de l'électricité comme la non-stockabilité, les incertitudes et la valorisation des risques par les participants qui opèrent sur les différents marchés de la séquence. Nous développons une approche originale par rapport aux travaux antérieurs (Bessembinder-Lemmon [2000]) en ajoutant des caractéristiques spécifiques du design des modules du temps réel. Néanmoins l'interprétation économique directe de cette formalisation n'est pas aisée en raison de la complexité analytique du modèle. C'est pourquoi nous avons recours à des simulations numériques comparatives pour évaluer deux problématiques différentes concernant le *market design* du temps réel. Nous évaluons d'abord les conséquences économiques des différents designs dans une seule zone de contrôle. Puis nous évaluons celles de différents designs après l'intégration de deux zones de contrôle adjacentes.