

N°d'ordre : 13/2008-M/EL

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie HOUARI BOUMEDIENNE
Faculté d'Electronique-Informatique Département d'Electronique



MEMOIRE

*Présenté Pour obtention du diplôme
de MAGISTERE En Electronique*
Spécialité : Systèmes Electro-Energétiques
Par
TIGUERCHA Ahmed

Thème

***Equilibre du Marché Dérégulé d'Electricité par les
Algorithmes
Co-évolutionnaires Coopératifs***

Soutenu le 28/06/2008, devant le jury composé de :

Mr : S. BOUAZABIA, Maitre de conférences (USTHB)	Président
Mr : M. BOUDOUR, Maitre de conférences (USTHB)	Rapporteur
Mr : A. HELLAL, Professeur (UAT Laghouat)	Examineur
Mr : M. MOULAI, Maitre de conférences (USTHB)	Examineur
Mr : A.A. LADJICI, Magistère(USTHB)	Invité

Remerciement

Mes remerciements vivement Mr M. BOUDOIR et Mr A.A. LADJICI pour leur entière disponibilité tout au long de notre travail et je les remercie encore pour leur aide si précieuse sur un plan conseil et orientations.

Je tiens tout particulièrement à remercier les enseignants du département d'électrotechnique pour leur disponibilité et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Mes reconnaissances vont aussi à Messieurs les membres de jurys, pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger notre travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mes parents et grands parents.*
- *Mes tentes et mon oncle d'Oran*
- *Mes frères et mes amis*
- *Tous ceux qui me sont chers.*



Sommaire

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I: *Marché dérégulé de l'électricité*

Introduction.....	3
I.1 Evolution de la dérégulation du marché de l'électricité.....	4
I.2 Comparaison entre le marché dérégulé et régulé	7
I.3 Participants du marché de l'électricité	8
I.3.1 Objectif des compagnies de production	9
I.3.2 Objectif des consommateurs	10
I.3.3 Objectif de l'ISO	10
I.4 Structure du marché dérégulé.....	11
I.4.1 Point de vue relationnel	12
I.4.2 Point de vue contrat	14
I.5 Problème de la dérégulation du marché	18
Conclusion	19

Chapitre II: *Introduction à la Microéconomie*

Introduction.....	20
II. Notions de base sur la microéconomie	20
II.1 Définition	20
II.2 Théorie du consommateur.....	21
II.2.1 Equilibre du consommateur	21
II.2.2 Fonction de demande individuelle et globale	22
II.3 Equilibre du producteur.....	23
II.3.1 Position du problème	23
II.3.2 Minimisation du coût	23
II.3.3 Maximisation du profit	24
II.4 Théorie du marché.....	24
II.4.1 Définition	24
II.4.2 Equilibre du marché.....	25
II.4.3 Concurrence parfaite.....	25
II.4.4 Concurrence imparfaite.....	29
II.4.5 Le monopole	29
II.5 L'oligopole	30
II.5.1 Modèle de Cournot	30
II.6 Théorie de jeu.....	32
II.6.1 Définition d'un jeu	34
II.6.2 Forme d'un jeu	35
II.6.3 Types de jeux	36
II.6.4 Equilibre de Nash.....	37
Conclusion	38

Chapitre III: *Présentation des Algorithmes Co-évolutionnaires Coopératifs*

Introduction.....	39
III.1 Principe.....	39
III.2 Algorithmes Evolutionnaires de bases	41
III.3 Algorithmes Co-évolutionnaires	42
III.3.1 Définition	43
III.3.2 Algorithme Co-évolutionnaire Coopératif.....	44
III.3.3 Algorithme Co-évolutionnaire Coopératif de base	46
III.3.4 Stratégie d'Evolution (SE).....	46
III.4 Application à l'optimisation.....	54
III.4.1 Exemple N°1	55
III.4.2 Exemple N°2.....	56
III.4.3 Exemple N°3.....	58
Conclusion	60

Chapitre IV: *Modélisations du Marché et Résultats de Simulations*

Introduction.....	61
IV.1 Présentation des modèles d'équilibre.....	61
IV.1.1 Approche de Bertrand	61
IV.1.2 Approche de connivences de prix	63
IV.1.3 Approche d'Enchère	63
IV.2 Modèle de Cournot.....	63
IV.3 Modèle de Fonction d'Approvisionnement (SF)	67
IV.4 Formulation du marché à terme	69
IV.4.1 Marché Centralisé	69
IV.4.2 Marché Bilatéral.....	71
IV.4.3 Jeu de Cournot	71
IV.4.4 Jeu de Fonction d'Approvisionnement (SF)	72
IV.5 Approche	74
IV.5.1 Théorie des jeux.....	74
IV.5.2 Algorithme Co-évolutionnaires	74
IV.6 Cas Etudiés.....	75
IV.6.1 Marché Centralisé	75
IV.6.2 Marché Bilatéral.....	79
Conclusion	82
Conclusion Générale.....	83

Introduction générale

Introduction Générale

Historiquement, l'industrie de l'électricité était un monopole parfait géré par l'état. Cependant, dans les dernières décennies, le marché de l'électricité s'est ouvert à la concurrence dans plusieurs pays à travers le monde. Ceci a induit le passage du marché régulé à un marché dérégulé, conséquence directe de plusieurs facteurs d'ordre : politique, technique, économique,... etc.

Les conditions économiques et politiques spécifiques à chaque pays, ont conduit à l'adoption de différents modèles de structures de marché. Mais, du moment que la finalité est la même, tous les modèles de marché d'électricité compétitifs présentent des bases communes et des caractéristiques similaires.

Une des bases essentielles et communes à toutes les structures des marchés dérégulés est le fait que la production, le transport et la distribution sont du ressort de compagnies différentes. Cette séparation de tâches conduit à la dérégulation du marché d'électricité. Les compagnies de production (fournisseurs) tentent de maximiser leurs profits indépendamment des autres agents du marché. L'autorité de régulation doit garantir un accès juste au réseau à tous les agents du marché.

Une autre caractéristique commune aux marchés dérégulés de l'électricité est l'aspect oligopolistique du marché. Dans la littérature micro-économique, plusieurs modèles sont utilisés pour la modélisation des marchés oligopoles tels: Cournot, Bertrand et fonctions d'approvisionnement (Supply Functions : SF). Dans le cas de concurrence parfaite ou de monopole, les interactions des agents peuvent être traitées comme un simple problème d'optimisation, tandis que les interactions stratégiques des agents du marché oligopole nécessitent une approche faisant appel à la *théorie des jeux*. Calculer le point d'équilibre est une approche théorique permettant d'estimer les prix et prévoir l'état du marché en se basant sur les interactions répétées des agents : c'est un outil d'aide à la décision.

Dans ce travail, nous développons un Algorithme Co-évolutionnaire Coopératif basé sur une Stratégie d'Evolution qui nous permet de calculer le point d'équilibre d'un marché à terme. Ceci nous permettra d'analyser les différentes transactions qui

se déroulent dans le marché dérégulé de l'électricité suivant les modèles de Cournot et de SF. Ces deux techniques seront utilisées afin de modéliser l'interaction et les stratégies des agents pour deux structures distinctes du marché: Centralisé (Power Pool Market) et Bilatéral (Bilateral Market).

Pour ce faire, le manuscrit de notre mémoire est structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des étapes permettant le passage du marché de l'électricité, d'une structure régulée à une structure dérégulée. Les principales structures du marché dérégulé sont détaillées du point de vue relationnel entre les différents agents et en fonction de la durée de contrats.

Le chapitre II traite des notions de base de la micro-économie et de l'étude de l'équilibre et des interactions entre les agents d'un marché. La théorie des jeux est enfin exposée ainsi que son application dans des problèmes similaires.

Le chapitre III est dédié aux Algorithmes Co-évolutionnaires Coopératifs comme étant une méthode d'optimisation, dont les performances par rapport aux Algorithmes Evolutionnaires sont démontrées. Une étude comparative entre les deux algorithmes sur des fonctions tests d'optimisation (benchmarks) est effectuée.

Dans le chapitre IV, nous présentons les résultats de simulation obtenus en appliquant l'algorithme proposé dans la modélisation du marché Centralisé et Bilatérale. Deux approches sont alors considérées: Modèle de Cournot et Modèle de la Fonction d'Approvisionnement (SF).

Une conclusion termine cette étude, synthétisant les principaux résultats obtenus et mettant en exergue des perspectives redondances de ce travail.

Chapitre 1

Marché dérégulé de l'électricité

I. Introduction

Historiquement, l'industrie de l'électricité était une industrie de monopole avec une structure verticale. Dans un environnement verticalement intégré, les entreprises étaient responsables de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. Durant les dernières décennies, et particulièrement dans les années 90, le secteur de l'électricité a subi de grandes réformes à travers le monde. Les vieux marchés de puissance sous monopole sont remplacés par des structures dérégulés ouvertes à la concurrence. Différents facteurs d'ordre : technique, économique et politique, ont conduit le marché d'électricité vers la dérégulation. L'idée économique de base qui a conduit à la dérégulation, est qu'un marché compétitif 'bien géré' peut garantir la minimisation des coûts et la réduction des prix [1]. Les économistes croient qu'un marché ouvert à la compétition peut offrir au marché d'électricité les avantages suivants :

- Inciter les fournisseurs à réduire leurs coûts de production.
- Conduire les prix vers les coûts marginaux.

Le développement technologique des réseaux de haute tension pendant les années 60 et 70 a rendu le transport sur de longues distances possible. Ce qui a permis de couvrir un espace géographique important et d'alimenter les clients qui sont loin des zones de production. En dépit de cet accomplissement, l'industrie de l'électricité est demeurée sous monopole pendant les vingt années suivantes.

Un autre facteur technique a précipité le marché de l'électricité vers la dérégulation. Ce facteur réside dans l'amélioration technologique de production d'électricité. Pendant les années 60 et 70, la taille typique des centrales thermiques se situait entre 600 et 1000 MW. La durée moyenne de construction pour de telles centrales était de quatre à cinq ans. Dans le cas des centrales nucléaires, la durée de construction peut doubler. Pour cette raison, les décisions d'expansion de la capacité de production ne pouvaient être prises que par un monopole disposant des moyens nécessaires pour l'investissement [1].

Le développement des centrales à gaz, et particulièrement des turbines à gaz à cycle combiné a permis de produire jusqu'à 300 MW. La durée de construction de telles centrales est plus courte qu'elle en était avant, ce qui rend possible la prise de décisions d'expansion de la production par de plus petites entreprises. L'expansion du réseau gazier est une raison supplémentaire qui rend les investissements liés aux centrales de gaz facilement réalisables.

Une autre raison écologique est l'incitation au recours aux sources d'énergie renouvelable. L'émergence de producteurs indépendants disposant, pour la plupart du temps, des centrales éoliennes donne encore un autre caractère concurrentiel à l'industrie d'électricité. L'amélioration des technologies de transport a comme conséquence un réseau efficace régi par les compagnies de transport. Les dispositifs tels que les FACTS (Flexible AC Transmission Systems) permettent un meilleur contrôle des dispositifs électriques du réseau. Ainsi, la séparation du secteur de la production de celui du transport peut être plus simple. Au delà des améliorations techniques, un ensemble de facteurs économiques peut être considéré comme force principale derrière la réforme du marché de l'électricité. L'idée économique principale, qui a mené à la dérégulation, était qu'un marché compétitif bien structuré peut garantir la minimisation des coûts. Les économistes croient qu'un marché libre fournit de plus véritables motifs au fournisseur afin d'appliquer des procédures de minimisations du coût qu'un marché régulé. Le deuxième avantage d'un marché compétitif est sa capacité de conduire les prix vers les coûts marginaux [1].

I.1 Evolution de la dérégulation du marché d'électricité

Les premières expériences du marché de l'électricité aux Etats-Unis, fin du 19^{ème} siècle, ont été caractérisées par une concurrence sans règles. Après cette phase, l'industrie de l'électricité était régulée afin d'imposer le développement de technologies et de stabiliser le marché de l'électricité. La vraie phase de dérégulation aux Etats-Unis a commencé en 1996 où la Federal Energy Regulatory Commission (FERC) a publié deux directives : la première « favorisant la concurrence en gros par des services de transport ouverts avec un accès non-discriminatoire aux différents équipements du réseau » ; la deuxième directive exige « les outils de développer un

système de télécommunication sur le réseau (internet)», lequel permettra l'échange d'informations sur la capacité de transfert et sur les lignes de transport [1] [2] [3].

La dérégulation du marché de l'électricité a suivi différents chemins dans les nombreux Etats possédant leurs propres marchés séparés. Une raison supplémentaire est l'absence de la juridiction de la FERC dans tout le territoire des Etats-Unis, car le marché du gros est sous le contrôle de la FERC tandis que les marchés du détail demeurent tributaires des commissions de normalisation de chaque Etat. Le marché de l'électricité de Pennsylvania-New Jersey-Maryland (PJM) d'une capacité de plus 67000 MW est un des plus grands marchés entièrement libéralisés aux Etats-Unis. PJM est venu en ligne en 1997 comme marché d'électricité régional, et qui en fin 2002 comptait plus de 200 membres [4] [5].

Le cas le plus connu de la libéralisation du marché de l'électricité est celui de la Californie. La réussite des deux premières années, après la dérégulation du marché, a été suivie de situations problématiques pour tous les agents du marché. Le point culminant de cette situation était le Black-out qui s'est produit en 2001 entraînant la faillite de quelques compagnies. Une des causes de l'échec du marché résidait dans les prix au détail restés bas pour cause de normalisation, tandis que les prix de gros augmentaient considérablement. Ainsi, les distributeurs en gros n'ont pas pu satisfaire la demande. Les limites thermiques des lignes de transport étaient une raison supplémentaire. Le pouvoir du marché s'est exercé par quelques agents pendant les situations de congestion du réseau. Le paradigme de la Californie a enseigné ce qu'une dérégulation médiocre peut avoir comme conséquence. L'évolution la plus récente dans l'industrie de l'électricité aux USA est le désir de la FERC d'introduire une conception standard du marché (Standard Market Design SMD) par tous les marchés dérégulés. Le SMD devrait avoir comme conséquence la régulation du transport dans tous les Etats.

Le premier marché dérégulé de l'électricité dans le monde est celui du Chili. Dès 1982, le Chili a ouvert son marché de l'électricité à la concurrence en donnant le droit à de grands utilisateurs de choisir leur fournisseur et de négocier les prix. Au delà de cette première étape, le Chili a réalisé les mécanismes du marché afin de déterminer le dispatching des producteurs et le prix de l'électricité.

L'expérience avec la dérégulation du Chili était réussie et ainsi l'Argentine en 1992 à ouvert son marché à la concurrence suivie du Pérou en 1993, de la Bolivie et de la Colombie en 1994 et des pays de l'Amérique centrale en 1997. Le Brésil adhère également au groupe de pays qui ont restructuré leur industrie de l'électricité. Cependant, dans le cas du Brésil, certains problèmes ont émergé au sujet de la privatisation des compagnies de distribution.

Le secteur d'électricité dérégulé en Océanie a également une longue histoire. En 1987, le gouvernement de Nouvelle-Zélande a commencé la réforme du secteur de l'électricité en installant Electricity Corporation de Nouvelle-Zélande (ECNZ). En 1988, l'opérateur système (Transpower), a été installé par ECNZ. Après quelques années de la restructuration initiale, un marché du gros a été créé en Nouvelle-Zélande. Sa mise en service le situe parmi les modèles les plus réussis de la dérégulation du secteur de l'électricité.

La plupart des issues actuelles pour éviter une dérégulation problématique est l'introduction de règles financières afin de surveiller la validation ou non des contrats et inciter les firmes à investir sur le réseau pour éliminer le problème de congestion des lignes. En Australie, la Commission de l'industrie réforme en 1990 le marché de l'électricité. En 1994, dans l'état de Victoria un marché centralisé (Pool) a été établi. La même structure du marché a été présentée en Nouvelle-Galles du Sud en 1996. Ces deux marchés étaient les fondateurs du marché National de l'électricité d'Australie en 1998. L'étape future du processus de réforme est le remplacement de la structure de normalisation actuelle (Fédérale et d'Etat) par un régulateur National d'énergie [6].

Le marché de l'électricité a subi une réforme dans quelques pays d'Asie. Le Japon, a commencé un processus de dérégulation en 1995. L'introduction de la concurrence a été réalisée en favorisant l'entrée des producteurs d'électricité indépendants dans le marché de gros. Ces producteurs étaient libres de passer des transactions avec des clients des autres zones. Le Japon est divisé en 10 zones régies par les compagnies privées. En février 2003, le Comité électrique d'industrie a publié une directive exigeant l'établissement d'un échange de l'électricité. En outre, les consommateurs de plus de 50 kW pouvaient choisir leur fournisseur à partir d'avril 2005.

En Chine, en dépit de l'économie centralisée, le secteur de l'électricité a subi une réforme depuis le milieu des années 80 [7] [8]. Dans la première phase, l'investissement privé dans la production a été autorisé. En 2002, toutes les entreprises publiques d'énergie ont été transformées en compagnies commerciales. Cependant, il n'y avait encore aucun consommateur éligible. La banque mondiale soutenait financièrement le plan quinquennal du gouvernement, de 2001 à 2005, en dérégulant l'industrie de l'électricité.

En Afrique, quelques pays ont commencé un processus de dérégulation du secteur de l'électricité. En 1999, le gouvernement du Nigéria a adopté un programme complet de privatisation qui a dû être accompli en 2004. La dérégulation de l'industrie de l'électricité est projetée pour la troisième phase de ce programme. En Afrique du Sud, l'industrie régulée d'approvisionnement de l'électricité a été bien développée. Cependant, le gouvernement a projeté la dérégulation de ce secteur [9].

I.2 Comparaison entre le marché dérégulé et régulé

■ **Caractéristiques d'un marché régulé :** un réseau électrique sous monopole présente les caractéristiques suivantes :

- Le monopole est concerné par la fourniture d'une énergie électrique avec un minimum de coût, ce qui constitue un problème d'optimisation mono-objectif.
- Le service central de dispatching contrôle la programmation et la répartition de l'énergie, lesquelles constituent un problème d'optimisation déterministe.

■ **Caractéristiques d'un marché restructuré (dérégulé) :**

- Les compagnies de production ont un double objectif, d'une part la Minimisation du coût de production de l'énergie et d'autre part la Maximisation du profit (revenue et gain). Les consommateurs tentent de maximiser leurs utilités, tandis que, l'opérateur système indépendant est concerné par la préservation de la fiabilité et la sécurité du réseau électrique.

- L'opérateur système indépendant dans un marché dérégulé d'électricité, contribue au dispatching mais il ne peut pas décider de la quantité produite ou demandée par les agents.
- L'information disponible n'est pas suffisante, donc il existe un risque réel que les agents prennent une mauvaise décision. Ces incertitudes sont souvent dues à la fluctuation du prix du fuel (carburant), à une panne non-programmée des organes de production ou des lignes de transport, et aux stratégies utilisées par les agents du marché.
- L'accès ouvert au système de transport encourage fortement l'échange d'énergie électrique entre les différentes zones, ce qui implique un encombrement au niveau des lignes d'interconnexion (tie line) à cause de leurs limites thermiques. Ceci nécessite de nouvelles techniques de programmation et de nouveaux algorithmes de dispatching. En effet, les congestions causées par les limites des lignes d'interconnexion peuvent avoir un sérieux impact sur le prix de l'électricité dans les différentes zones du marché (Prix Marginal Local : LMP) [10].

I.3 Participants du marché de l'électricité

L'industrie électrique est composée de trois fonctions physiques : production, transport et distribution d'électricité, et de deux fonctions financières : vente de détail et marché de gros. Les différents segments du marché de l'électricité sont présentés sur la figure I.1.

Dans un marché de monopole parfait c'est un seul organisme qui prend en charge les différentes étapes de la production à la consommation. Cependant, dans une structure dérégulée, certaines parties peuvent être ouvertes à la concurrence, d'autres, en revanche sont des monopoles naturels [1] [11].

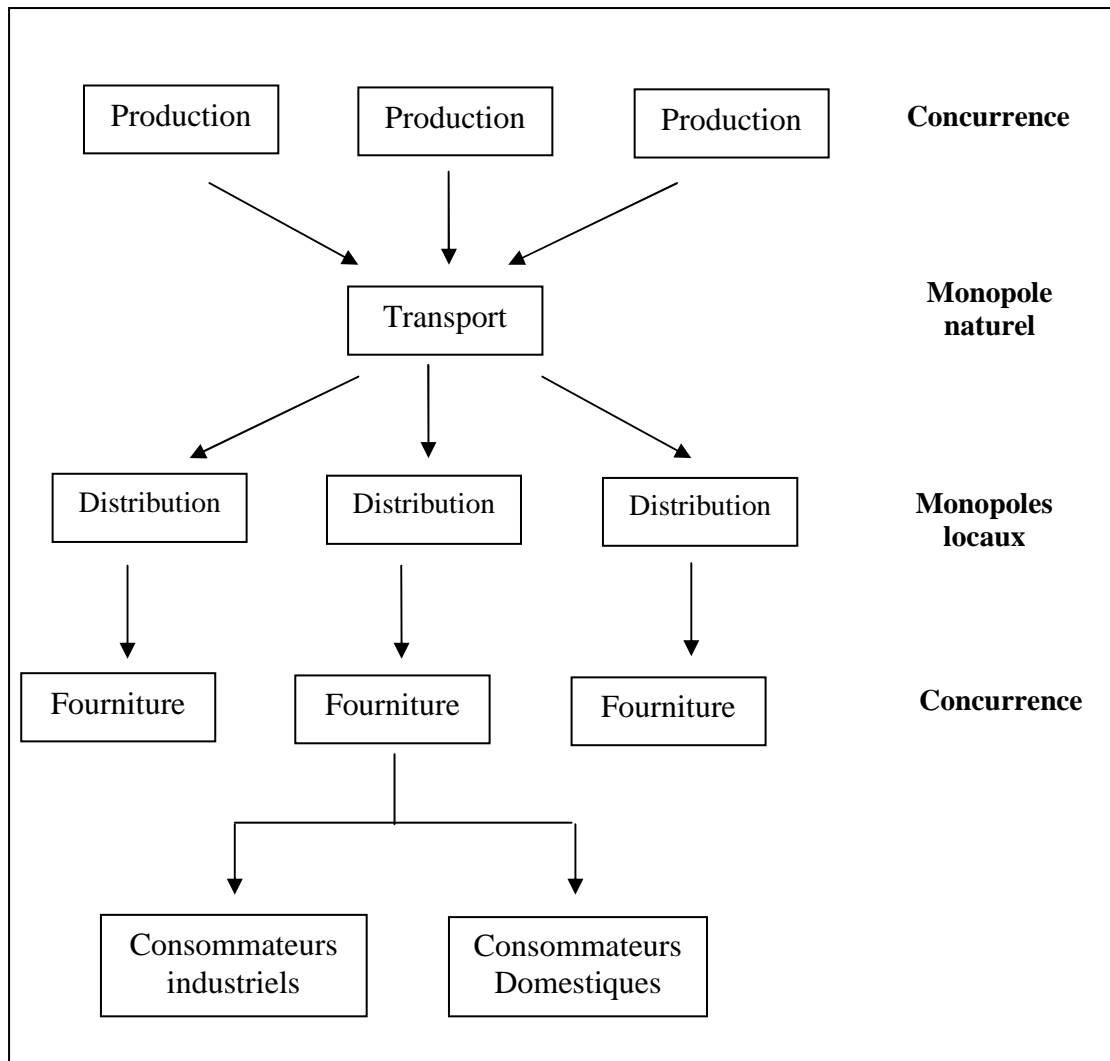


Figure I.1 Différents segments de marché de l'électricité

I.3.1 Objectif des compagnies de production

L'objectif pour le producteur est de maximiser son profit. Les solutions sont données par la résolution du problème de programmation linéaire suivant :

$$\begin{aligned} \max (\pi_i(q_i)) \quad \text{for } i = 1, \dots, n_g \\ q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max} \end{aligned} \quad (\text{I-1})$$

Avec :

$$\pi_i = pq_i - C_i(q_i) \quad i = 1, \dots, n_g \quad (\text{I-2})$$

π_i : est la fonction du profit de chaque compagnie « i »

q_i : est la quantité produite par la compagnie « i »

$C_i(q_i)$: est la fonction cout de chaque compagnie en fonction de la quantité

I.3.2 Objectif des consommateurs

L'objectif pour le consommateur est de maximiser son utilité économique :

$$\begin{aligned} \max \quad & (U_i(q_i)) \quad \text{for } i = 1, \dots, n_g \\ & q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max} \end{aligned} \quad (\text{I-3})$$

Avec :

$$U_i = u_i q_i - p_i q_i \quad i = 1, \dots, n_g \quad (\text{I-4})$$

U_i : est la fonction d'utilité économique de chaque consommateur « i »

q_i : est la quantité demandée par le consommateur « i » [12]

I.3.3 Objectif de l'ISO

L'opérateur système indépendant (ISO) a pour objectif la préservation de la fiabilité et la sécurité du réseau électrique en fixant les limites et les contraintes physiques des lignes de transport. Il doit, par ailleurs, justifier ces actions par la maximisation du bien être social (social welfare). Suivant la structure du marché de l'électricité, deux types d'opérateur système existent.

- **ISO minimaliste**

En général, L'ISO minimaliste se trouve dans les marchés à structure bilatérale dans lesquels l'ISO ne joue pas un rôle important. Son but est principalement de bien veiller à la sécurité du réseau électrique en faisant respecter les limites thermiques des lignes de transport par l'interdiction de quelques transactions économiques et l'acceptation d'autres.

- **ISO maximaliste**

En général, L'ISO maximaliste se trouve dans les marchés à structure centralisée (Pool Market) dans lesquels l'ISO joue un rôle beaucoup plus important que dans le cas minimaliste. En effet, il exécute un Unit Commitment (Répartition Economique) et un OPF (Optimal Power Flow) pour maximiser le "social Welfare" d'une part et faire respecter les contraintes d'équilibre production-consommation du réseau [4][13][14].

I.4 Structures du marché dérégulé

L'anatomie des marchés dérégulés de l'électricité à travers le monde montre que le processus de réforme a pris différentes formes. Les conditions économiques et politiques spécifiques à chaque pays, ont conduit à l'adoption de différents modèles de structures de marchés. Mais, du moment que la finalité est la même, tous les modèles de marché d'électricité dérégulés présentent des bases communes et des caractéristiques similaires.

Une des bases essentielles et communes à toutes les structures des marchés dérégulés est que les tâches : production, transport et distribution sont du ressort de différentes compagnies. Le processus de transformation et la période après transformation sont supervisés par l'autorité de Régulation dont le rôle est de tracer la ligne de conduite du fonctionnement du marché. Après la restructuration, la responsabilité de l'organisme régulateur se concentre sur la performance du marché.

Dans un marché dérégulé, le secteur de la production est un secteur compétitif. Les compagnies de production, peuvent prendre part au marché et vendre leurs productions. Un des principes le plus important dans un marché de l'électricité dérégulé est la non discrimination : tous les producteurs et consommateurs, respectant certaines conditions, doivent avoir un accès libre et équitable au réseau de transport [15].

Suivant les relations entre les différents agents du marché et la durée des contrats qui les lie, on distingue plusieurs structures du marché de l'électricité dérégulé.

I.4.1 Point de vue relationnel

Il y a trois façons de structurer le marché de l'électricité : verticale, centralisé et bilatérale.

1. *Structure verticale*

La forme la plus ancienne des marchés de l'électricité est le marché verticalement intégré, où chaque compagnie de production combine les rôles de producteur, de détaillant, de propriétaire du réseau de transport et de l'opérateur système. La désignation verticalement intégrée rapporte que les compagnies contrôlent toutes les étapes de la fourniture de l'électricité. Chaque compagnie a une concession sur un ou plusieurs secteurs géographiques, où elles ont un monopole de la vente au détail; le consommateur d'un marché verticalement intégré de l'électricité n'a aucune possibilité de choisir le fournisseur, mais doit acheter de la compagnie locale. Pour empêcher les compagnies d'électricité de tirer profit de son monopole, les activités sont régulées par des lois financières et techniques [13]. La figure I.2 représente la structure verticalement intégrée

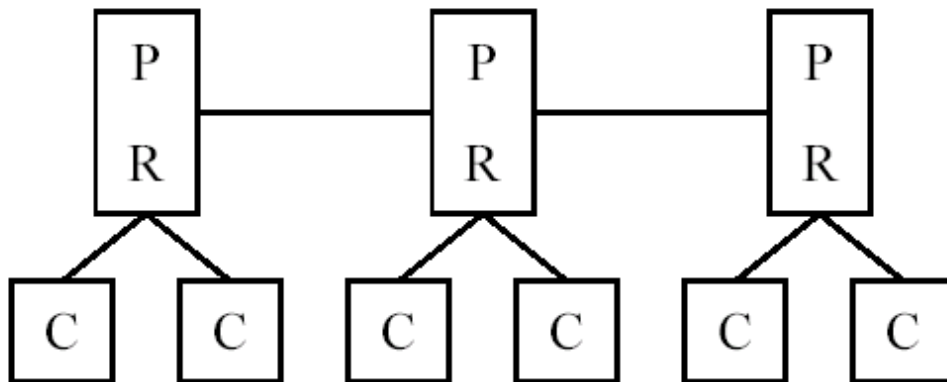
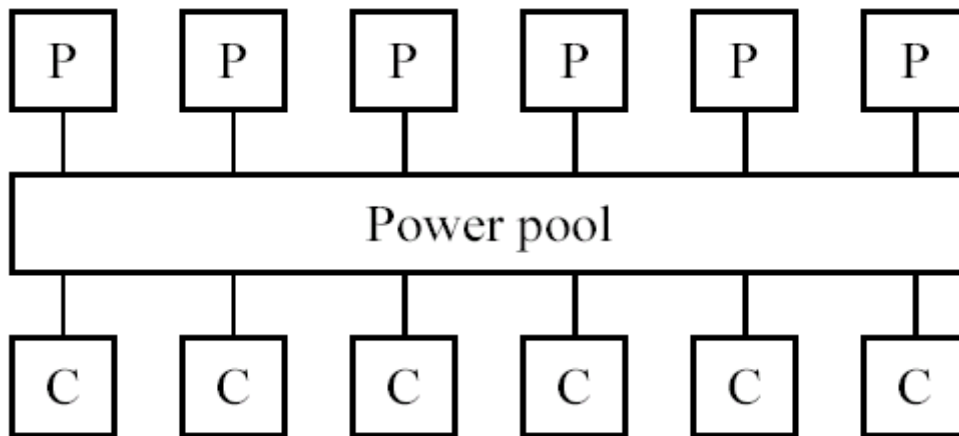


Figure I.2 Structure verticalement intégrée

2. *Structure centralisé*

La caractéristique d'un marché centralisé de l'électricité est que les producteurs et les consommateurs ne commercent pas directement. Les producteurs doivent soumettre leur offre de vente à un opérateur marché, laquelle est contrôlée par l'opérateur système. Dans certains cas, les consommateurs (représentés par un détaillant) soumettent également les offres d'achat à l'opérateur marché, tandis que dans d'autres cas l'opérateur système prévoit la charge pendant la période marchande

et achète la même quantité de l'opérateur marché; ainsi, l'opérateur système sert de détaillant à tous les consommateurs. Pour chaque période marchande, l'opérateur marché (Pool) détermine un prix de l'électricité pour le marché global ou un certain nombre de prix différents pour chaque partie du marché [13]. La figure I.3 représente la structure centralisée.



La figure I.3 structure centralisée

De nos jours, les marchés centralisés de l'électricité les plus connus sont établis en Nouvelle-Zélande, Australie, pays Scandinaves (Nord Pool) et dans la région orientale des Etats-Unis (PJM). La tâche de l'opérateur marché est de mener le marché centralisé à un optimum économique à court terme.

3. Structure bilatérale

Dans un marché bilatéral de l'électricité l'opérateur système a un rôle de surveillance. Contrairement au marché centralisé, les agents peuvent passer des contrats financiers librement sans passer par l'opérateur marché (toutes les transactions doivent cependant être rapportées à l'opérateur système, de sorte qu'après la période marchande, il est possible de vérifier que les agents aient respecté leurs contrats). Il n'y a aucun prix officiel de l'électricité, mais généralement il y a un Pool de puissance sur les marchés bilatéraux de l'électricité. Le prix de l'opérateur marché sert de directive à ces agents commerçant bilatéralement. La figure I.4 représente la structure bilatérale.

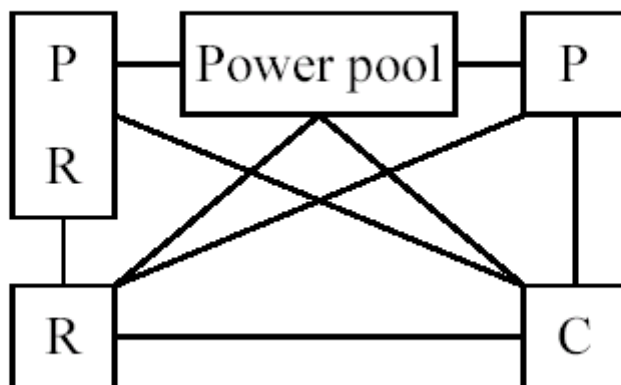


Figure I.4 structure bilatérale

Cette dernière structure procure plus de Liberté pour les consommateurs de choisir l'entreprise qui l'alimente en énergie électrique donc de négocier le prix de l'électricité. Les agents peuvent commercer librement sur un marché bilatéral de l'électricité, ce qui donne la possibilité à des agents tiers (qui sont désignés souvent sous le nom des commerçants indépendants) de servir d'intermédiaire entre les consommateurs et les producteurs. Ils achètent l'électricité directement des producteurs ou de l'opérateur et vendent aux consommateurs avec des prix plus élevés. L'existence de détaillants signifie une plus grande liberté de choix pour les consommateurs, donc une concurrence plus accrue que si la vente au détail était assurée seulement par les producteurs. La concurrence accrue ne s'applique pas uniquement au prix de l'électricité, mais il est également possible que les détaillants offrent un meilleur service (par exemple : plus d'employés au service à la clientèle répondant au téléphone) ou des produits spéciaux de l'électricité. Les détaillants peuvent également assurer une partie des risques en offrant des prix stables pendant des périodes plus longues que la période marchande [4] [13].

I.4.2 Point de vue contrats

1. Marché à Terme

Traditionnellement, la notion d'un contrat à long terme "prétend" que les clients et les producteurs puissent commercer une certaine quantité d'électricité à un certain prix. La prétention implicite est qu'un producteur spécifique fonctionnera pour

satisfaire la demande d'un client spécifique. Dans la mesure où les besoins du client changent, le client pourrait vendre le contrat sur un marché secondaire, et réciproquement pour le producteur. Le fonctionnement efficace du marché secondaire garantirait l'équilibre du marché [17].

Le marché à terme est un marché où les contrats sont établis au moins un jour (jusqu'à plusieurs mois) avant la période d'échange. Un marché à terme est un marché purement financier et non-obligatoire, il est prévu pour réduire la fluctuation des prix dans le marché immédiat, et permettre à des agents tiers d'acheter et de vendre de l'électricité en profitant de la disparité entre les prix dans le marché à terme et ceux du marché immédiat. Le marché à terme est généralement bilatéral, le respect des contraintes du système n'est pas obligatoire, et les différents agents ont le choix d'y participer ou pas. Le prix du marché est le prix d'équilibre pour lequel l'offre est égale à la demande.

Avec des états variables de l'offre et la demande, les producteurs et les clients verront des fluctuations dans les prix à court terme. Quand une demande est importante, une production plus chère sera adoptée, augmentant les prix d'équilibre du marché. Quand les contraintes de transport induisent le changement des coûts de congestion, les prix à différents endroits se voient différents aussi [12] [18].

2. Marché à Court-Terme (Spot)

C'est un marché où les contrats sont à court-durée (temps réel). Il est établi à chaque période d'échange (de 5min à 1 h). Ce marché est principalement centralisé du fait que les contraintes de stabilité et de sécurité du réseau doivent être respectées. L'opérateur système reçoit toutes les offres d'achat ou de vente des différents agents, et effectue un dispatching en se basant sur un écoulement de charge optimisé OPF dans lequel les producteurs les moins chers seront dispatchés en premier.

Le marché à court terme (en temps réel) inclut le commerce qui se produit pendant une période marchande. Un marché en temps réel est nécessaire pour plusieurs raisons. Les centrales qui passent des transactions pendant le marché à terme peuvent échouer et doivent être remplacées par d'autres unités de productions.

D'ailleurs, en commerçant sur le marché à terme il est difficile de prévoir le nombre d'agents qui vont réellement produire ou consommer. C'est par exemple le cas pour des centrales éoliennes, où la capacité de production disponible dépend de la vitesse du vent, laquelle est difficile à prévoir même quelques heures avant la période de la transaction [13].

Un marché Spot est pratiquement différent de n'importe quel autre marché, puisqu'il doit ajuster la demande et l'approvisionnement sans interruption pour maintenir le réseau électrique en équilibre. Ceci exige que chaque unité de production suive les consignes de l'opérateur système. Il accomplit donc la fonction des producteurs en laissant simultanément approvisionner le marché, tout en tenant compte de la coordination entre la production et de la distribution. Sur la base des offres de prix, un plan d'ordre de mérite est élaboré, tenant compte des coûts de transport et des contraintes. Cet ordre de mérite, détermine quelles unités seront fonctionnelles dans une période donnée.

L'opérateur marché détermine les prix de l'électricité à chaque période (par exemple chaque heure ou chaque demi-heure) pour refléter l'équilibre variant entre la demande et l'approvisionnement au cours du jour. Pendant que la demande change, différents types de centrales, avec un fonctionnement et des frais différents, sont dispatchés. Le coût marginal à court terme de la production de l'électricité ou le prix de système marginal (SMP), utilisé pour déterminer les prix, change également. Des prix peuvent être édités à l'avance pour permettre à de plus grands consommateurs de l'électricité d'ajuster leurs demandes sur cette information. Des prix réels sont typiquement déterminés par l'interaction stratégique des producteurs avec la demande. La figure I.5 montre le procédé de détermination des prix dans un marché centralisé de l'électricité, basé sur « l'ordre de mérite » ou la courbe d'approvisionnements de la production [16].

La majorité des marchés dérégulés d'électricité sont conçus pour inclure les différentes formes de marchés de base. Les transactions à terme peuvent être passées directement entre les producteurs et les consommateurs. A court terme, les

participants peuvent prendre part au marché immédiat (Spot) où l'énergie est échangée sous forme d'un marché centralisé (Pool).

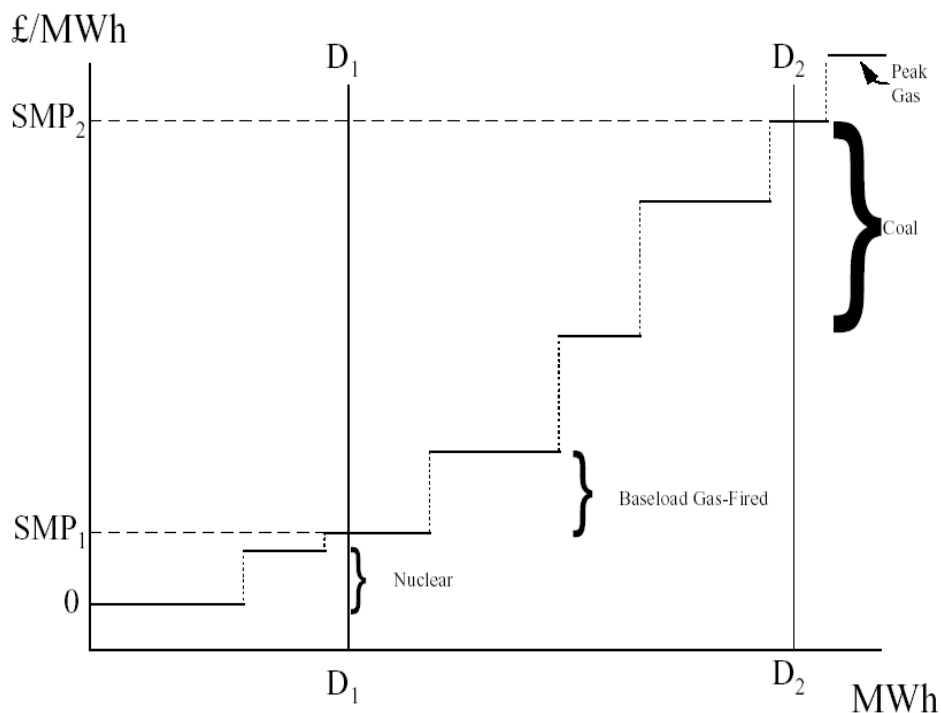


Figure I.5 Détermination des prix par le procédé d'ordre de mérite

L'expérience montre que les marchés qui offrent à ses participants la flexibilité de choisir entre les contrats bilatéraux à terme et un marché immédiat, ont les meilleures performances. La figure I.6 représente la structure générale d'un marché d'électricité.

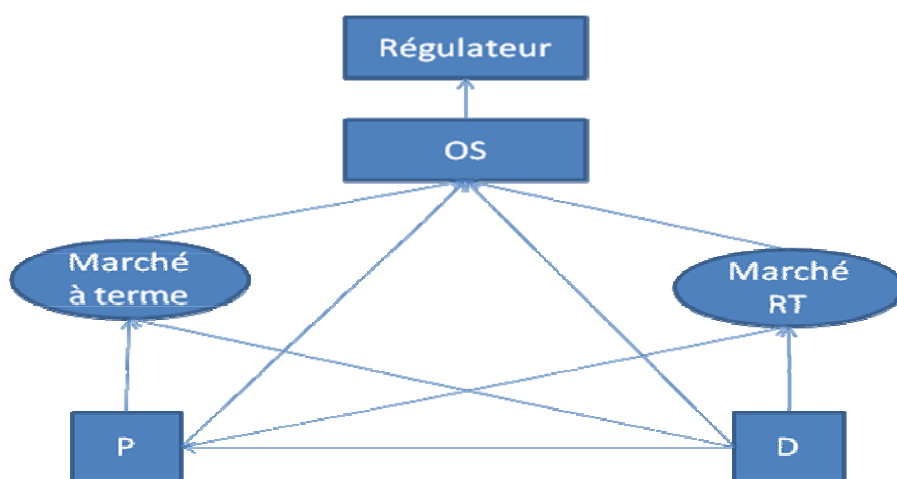


Figure I.6 Structure générale d'un marché d'électricité dérégulé

I.5 Problèmes de la dérégulation du marché de l'électricité

Depuis l'ouverture du marché Américain de l'électricité, alors que la hausse du nombre de producteurs aurait dû provoquer l'inverse, les prix ont fortement augmenté. Cela s'explique par la réticence de certains opérateurs à signer des contrats à long terme pour profiter d'éventuelles hausses de prix à court terme. Ceci entraîne une **spéculation** sur les contrats à terme, dont certains opérateurs ont fait leur principale source de revenu, tel Enron, avant sa faillite. De ce fait, le gouverneur de l'Etat de Californie fixe en 1999 un prix plafond ou «**price cap**» pour cinq années. A l'approche de l'été, les prix ont fortement augmenté, l'électricité de cet Etat étant principalement hydraulique. Une panne technique (causée par la chute d'un arbre) a enclenché un effet domino. Compte tenu des prix plafonnés, les agents du marché du gros avaient intérêt à ne pas honorer leurs contrats, laissant les usagers dans le noir [19].

A partir de ce constat, deux interprétations sont possibles :

Selon les libéraux, ces pannes sont le résultat d'une réglementation tarifaire contraignante sur un marché normalement régi par le jeu de l'offre et de la demande. En effet, dans un contexte de parfaite dérégulation du marché, sans prix plafond, cela ne serait pas arrivé. Les offreurs auraient honorés leurs contrats à un prix plus élevé, qu'ils auraient répercuté sur les clients. La preuve est la coupure du 14 août 2001 au **Nord-Est des Etats-Unis** : 50 millions d'américains privés d'électricité pendant 30 heures. L'origine de ce black-out n'est pas une insuffisance de production (en concurrence) mais une incapacité dans la distribution (réglementée). En effet, aux Etats-Unis, le transport d'électricité est soumis à un contrôle des prix qui n'incite pas les entreprises privées à investir dans la distribution. Depuis l'ouverture du marché américain de l'électricité, la demande s'est accrue de 35% en 10 ans alors que les moyens de distribution se sont élevés de 18%. Pour les dix années à venir, une hausse de la demande de 20% est anticipée, alors que les investissements programmés ne sont que de 6%. D'autres coupures sont donc à prévoir sur le continent américain. Selon les opposants à la libéralisation des marchés, une panne prolongée ne serait pas arrivée si le fournisseur d'électricité était un opérateur verticalement intégré (public ou non) ayant le souci du service public. La preuve est la multiplication de coupures dans les pays les plus ouverts à la concurrence. La logique de marché met les acteurs

dans une situation tendue telle qu'une panne technique n'est pas rapidement rétablie. Le coût d'une panne est jugé moindre que le surcoût lié à l'achat *spot* d'électricité à prix élevé ou moindre que le coût de la garantie d'approvisionnement (qui suppose une surcapacité permanente pour parer à de telles éventualités). Enfin et surtout, les fournisseurs d'électricité sont soupçonnés de limiter artificiellement l'offre pour faire monter les prix et bénéficier des opérations de commercialisation. En effet, certains de ces fournisseurs (dont Enron et Dynergy) sont aussi des acteurs importants du négoce d'électricité [9].

Les analyses effectuées sur ces différents marchés ont montré que la cause principale de ces problèmes est l'exercice du pouvoir du marché de quelques firmes sur les autres, notamment à cause des coalitions tacites entre les firmes et les contraintes sur le système de transport. Mais il reste que ce pouvoir du marché est lié à certaines périodes de l'année seulement et des règles sont mises en évidence afin d'éviter ce type de problèmes [19] [20].

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, le processus de restructuration du marché de l'électricité en passant d'une structure régulée monopolisée à une structure dérégulée oligopolistique dans plusieurs parties du marché. Les structures que le nouveau marché peut prendre ont été développées, en terme de relation entre les différents agents du marché et de la durée des contrats qui les relient. Le problème évident qui se pose dans ce cas est de trouver des outils d'analyses qui nous permettent d'aboutir à un point d'équilibre global du marché suivant les objectifs de chaque participant et selon la nature de l'interaction et le comportement stratégique de chacun. Dans le chapitre suivant, nous verrons le comportement microéconomique des agents et comment s'établir l'équilibre dans les différents marchés.

Chapitre 2

Introduction à la Microéconomie

Introduction

L'une des causes du passage du marché régulé monopole au marché dérégulé concurrentiel est l'espoir de voir la diminution des prix de l'électricité. Cette dérégulation se fera par l'ouverture du marché à la concurrence en incluant la concurrence entre différentes compagnies dans les différentes zones du marché de l'électricité. Le problème majeur de cette nouvelle structure est l'aboutissement au point d'équilibre du marché de sorte à obtenir le maximum de profit. Cette approche du marché est traitée par la théorie de la *microéconomie*.

II. Notions de base sur la microéconomie

II.1 Définition et objectif

La **microéconomie** (on rencontre aussi le terme micro-économie) est la branche de l'économie qui analyse le comportement économique au niveau d'entités individuelles telles qu'un consommateur ou une entreprise. Les consommateurs sont considérés comme des pourvoyeurs de travail et demandeurs de produits finis. Les firmes sont, quant à elles, des demandeuses de travail et des fournisseuses de produits finis et de consommations intermédiaires. La microéconomie, par opposition à la macroéconomie qui s'intéresse à des agrégats tels que l'emploi total, le revenu national, etc., développe essentiellement l'analyse des choix individuels et de leur coordination. La société est alors divisée en trois agents fondamentaux : les consommateurs, les producteurs, et les instances de régulations.

L'objet de la micro-économie est en premier lieu l'étude du comportement, supposé rationnel, des agents en termes de production et de consommation, ainsi que de la fixation des prix et des revenus. En effet, le but de la micro-économie est de trouver l'équilibre du marché, autrement dit les prix et les revenus qui équilibrent l'offre et la demande sur le marché. Pour cela, la micro-économie s'appuie sur des modèles mathématiques : le consommateur possède ainsi une Fonction d'utilité, et le producteur une fonction de production. Le « programme » du producteur est de maximiser son profit sous contrainte de production, et celui du consommateur est de maximiser son utilité sous contrainte de son revenu.

Les objectifs de la micro-économie sont :

- Analyser et prédire le comportement d'agents dans un environnement économique, technique et social donné ;

- Analyser et prédire les interactions sociales entre agents résultant de ces comportements ;
- Analyser le produit de ces interactions [21] [22] [23].

II.2 La théorie du consommateur

Le consommateur néoclassique opère, en fonction de ses goûts, des choix dans un ensemble de biens et services appelé ensemble de consommation. Le comportement du consommateur tient à s'attacher à un bien ou un service suivant son utilité de telle sorte que la satisfaction qu'il retire de cette consommation soit aussi grande que possible [24] [25].

II.2.1 Equilibre du consommateur

Désirs et besoins forment le moteur des comportements humains. Mais il est clair que pour satisfaire pleinement ses désirs, le consommateur devrait disposer de moyens infiniment grands. En réalité, nos moyens sont rien moins que limités et nos désirs illimités. Le microéconomiste en rend compte à l'aide de deux outils: la droite du budget d'une part, la fonction d'utilité de l'autre. Le comportement de l'agent rationnel se traduit par un programme très précis: "*maximiser sa satisfaction sous contrainte du revenu*".

Ainsi, la formulation générale du problème est la maximisation de l'utilité $U(q_1, q_2)$, ce que signifie la recherche d'une combinaison de quantités de biens Q_1 et Q_2 qui amènent le consommateur à son plus haut niveau de satisfaction compte tenu de son budget (son revenu R) et des prix P_1 et P_2 (les prix des biens Q_1 et Q_2 respectivement).

Le programme du consommateur est formulé comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } U(q_1, q_2) \\ \text{sous contrainte } R = p_1 \cdot q_1 + p_2 \cdot q_2 \end{array} \right. \quad (\text{II-1})$$

Pour illustrer ce problème, une résolution graphique est adoptée. Afin de maximiser son utilité, le consommateur tentera d'obtenir un panier de biens lui permettant d'atteindre la courbe d'indifférence la plus éloignée de l'origine O. Certaines sont hors d'atteinte comme la courbe 3 de la figure II.1. Ainsi le consommateur ne disposant pas d'un revenu suffisant pour atteindre cette courbe, seules les courbes 1 et 2 sont à sa portée. En choisissant la courbe 1, il sera indifférent entre les dotations A et B car elles lui apportent un niveau d'utilité identique. Toutefois, ce choix n'est guère satisfaisant car tout point du segment AB permet au

consommateur d'atteindre des niveaux d'utilités plus élevés. Le point de maximisation de l'utilité est le point E. En effet aucune autre dotation ne lui permet d'obtenir un niveau de satisfaction plus important. Le point E est appelé point d'équilibre du consommateur [24] [25] [26].

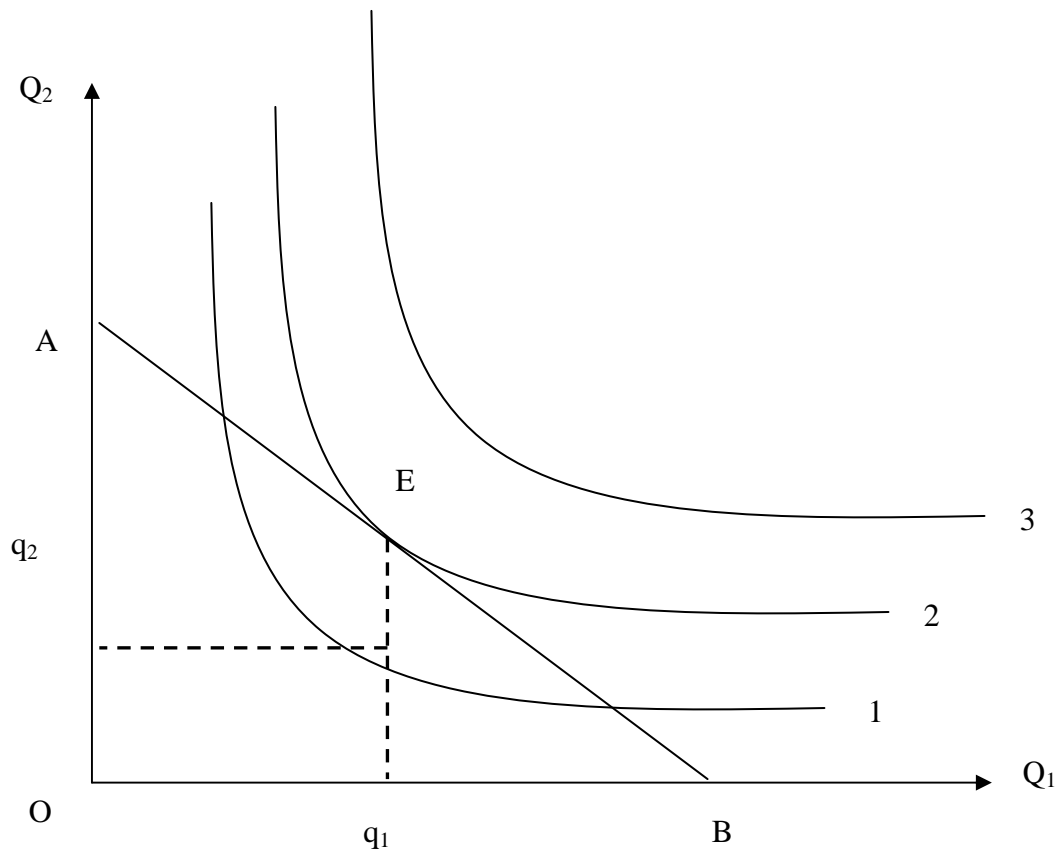


Figure II.1 Représentation du point d'équilibre du consommateur.

II.2.2 Fonction de demande individuelle et globale

La théorie microéconomique traditionnelle définit la fonction de demande comme étant la relation entre la quantité optimale demandée d'un bien et les valeurs possibles des variables qui la déterminent. Cette définition appelle plusieurs commentaires :

- La relation que la fonction établie concerne la quantité *optimale* demandée du bien considéré, en ce sens qu'elle vise le meilleur choix que le consommateur peut faire de ce bien. Ceci, en tenant compte non seulement de ses préférences mais aussi de la contrainte budgétaire du prix des biens et de son revenu limité.

- La fonction de demande est une fonction à plusieurs variables car le choix de consommation dépend: du prix du bien considéré, du prix des autres biens, du revenu du consommateur, de ses goûts et préférences, de sa richesse,... etc. Mais le prix du produit constitue le paramètre le plus important.

La demande optimale de Q_1 , comme celle de Q_2 , se détermine à partir des meilleurs choix de consommation. Ces derniers sont dictés au consommateur par la maximisation de son utilité sous la contrainte du budget dont il dispose et des prix des deux biens ; autrement dit, à partir des différents équilibres du consommateur selon les valeurs prises par son budget et par les prix des biens qui doivent composer son panier. Ainsi, l'ensemble des points d'équilibre forment la courbe consommation–prix à partir de laquelle est extraite la fonction de demande **individuelle**.

La demande **globale** sur le marché d'un bien particulier est égale à la somme des demandes **individuelles** [22] [27] [28].

II.3 Equilibre du producteur

II.3.1 Position du problème

Le producteur possède une fonction $Q=f(K, L)$. Il a la possibilité de choisir parmi toutes les combinaisons technologiques envisageables, en quantités L et K à leurs coûts unitaires C_L et C_K , la combinaison L^* et K^* qui maximise la quantité q^* de son produit compte tenu du budget total C_T dont il dispose. Le problème est identiquement le même avec celui du consommateur :

$$\begin{cases} \text{Max} & q = f(L, K) \\ \text{sous contrainte} & C_T = C_L L + C_K K + b \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

b : est le coût des facteurs fixes.

II.3.2 Minimisation du coût

Du point de vue technique, la meilleure combinaison n'existe pas: toutes sont équivalentes puisqu'elles sont associées aux mêmes résultats. Par conséquent, pour choisir

rationnellement l'une d'entre elles, la firme fera appel à un critère de décision économique. Il s'agit de minimiser les coûts.

Marchandise comme les autres, un facteur de production a un prix. Son coût d'utilisation est donc égal au prix unitaire multiplié par la quantité achetée. Une entreprise exploite ordinairement un grand nombre de facteurs, mais si elle les regroupe en deux catégories, le travail L et le capital K , le coût total sera donc:

$$C_T = wL + rK \quad (\text{II-3})$$

Avec :

w et r : les coûts unitaires.

Il y a autant de coûts, C , que de vecteurs d'inputs permettant de produire le bien X . La firme est rationnelle si elle choisit la combinaison technologique ayant le plus faible coût. On recherche donc les quantités d'inputs respectant la contrainte technologique et minimisant le coût total. Mathématiquement parlant, le problème prend la forme suivante [25] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \quad C_T = wL + rK \\ \text{s.c} \quad : \quad f(K, L) = X \end{array} \right. \quad (\text{II-4})$$

II.3.3 Maximisation du profit

Le but ultime de l'entrepreneur étant de maximiser le profit. On peut envisager un programme où l'entreprise est libre de faire varier aussi bien le niveau du budget consacré à l'achat des facteurs de production que le niveau de l'output produit. Le profit de l'entreprise est alors la différence entre le revenu total obtenu grâce à la vente de l'output et le coût de production supporté pour produire ce dernier, soit:

$$\pi = pX - C \quad (\text{II-5})$$

II.4 Théorie des marchés

II.4 .1 Définition

Le consommateur individuel considère les prix des biens comme des données et achète le panier qui maximise son utilité. L'entrepreneur quand à lui, fait face à des prix d'inputs et d'outputs donnés et produit le niveau d'output qui lui assure un maximum de profit. Le consommateur aussi bien que l'entrepreneur doit résoudre un problème d'optimisation. Les prix sont déterminés par le marché où les entrepreneurs et les consommateurs se rencontrent

pour échanger les biens. L'analyse de l'équilibre du marché entend ainsi décrire les mécanismes qui permettent de déterminer le prix de marché d'un bien et la quantité échangée.

Ainsi, un marché regroupe un ensemble d'acheteurs (les consommateurs) et un ensemble de vendeurs (les entreprises) d'un bien ou d'un service. Les comportements d'offre et de demande sont fonction de l'importance de ces deux ensembles. L'analyse économique distingue ainsi entre plusieurs structures de marché.

II.4 .2 Equilibre du marché

L'équilibre de marché, défini par un couple de prix et de quantité stables pour la période considérée, indique un équilibre durable des forces de l'offre et de la demande pour la marchandise en cause. Ces forces de marché, sous-entendus en grande partie par les niveaux de coût de production d'une part et par la rareté de l'autre, dépendent en fait d'un grand nombre d'autres facteurs: la stratégie des compagnies d'un coté, les prix et les revenus de l'autre. Ce couple est déterminé après l'interaction entre les forces de l'offre de la demande. Le point d'intersection entre ces courbes représente le point d'équilibre du marché et le couple (q^*, p^*) représente la quantité et le prix de ce point.

II.4.3 La concurrence parfaite

Elle se caractérise essentiellement par l'existence d'un grand nombre de vendeurs et d'acheteurs. La multitude de vendeurs et d'acheteurs a pour corollaire qu'aucun agent individuel ne peut influencer sur les conditions du marché et notamment sur les prix.

1. Les fonctions de demande

A l'origine, la fonction de demande d'un individu est en fonction de beaucoup de paramètres mais le plus influant sur la demande est bel et bien le prix. La forme de la demande du bien j par le consommateur i est la suivante:

$$D_{ij} = D_{ij}(p_j) \quad (\text{II-6})$$

La demande globale du marché est définie comme la sommation des demandes individuelles et prend la forme :

$$D = \sum_{i=1}^m D_{ij}(p_j) = D(p_j) \quad (\text{II-7})$$

2. Les fonctions d'offre

Les fonctions d'offre d'une compagnie peuvent être définies pour une très courte période (période de commercialisation) dans laquelle, le niveau de l'output ne peut pas varier ; pour une courte période (court terme) dans laquelle le niveau de l'output peut varier grâce à la variation du facteur variable ; et en fin pour une période longue (long terme) dans laquelle tous les facteurs sont variables.

Fonctions d'offre à très court terme

A court terme, l'entreprise présente un niveau de l'output X° fixe (invariable) à l'instant t . L'offre est fixe et égale à X° que l'entrepreneur tente de vendre au prix le plus élevé. Comme la quantité X° est déjà produite, le coût marginal de tout output inférieur à X° est nul. En outre, l'output dans cette très courte période ne peut pas être augmenté au delà de X° , ce qui implique que le coût marginal de tout output supérieur à X° peut donc être considéré comme infini. Par conséquent, la courbe du coût marginal est représentée par une droite verticale qui représente la courbe de l'offre individuelle.

Enfin, étant donné que l'output de chaque entreprise est fixe, l'offre globale de très court terme est également fixe et ne dépend pas du prix du marché. Par conséquent, l'offre globale est représentée par une droite verticale comme il est montré sur la figure II.2.

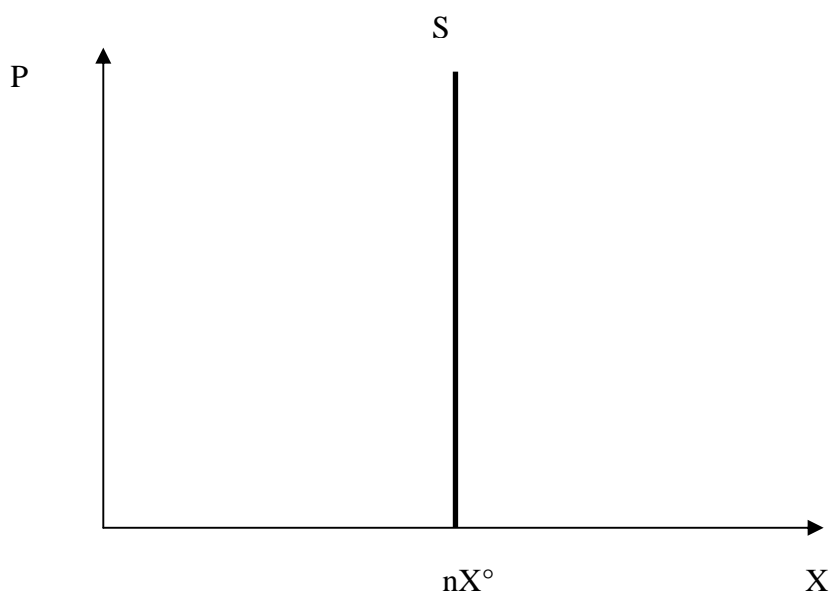


Figure II.2 L'offre globale du marché

La droite verticale S désigne donc la courbe d'offre du marché qui est la sommation des courbes de toutes les n entreprises individuelles présentes sur le marché.

Fonctions d'offre à court terme

Si une entreprise a pour but de maximiser son profit alors sa fonction d'offre est tirée des conditions du premier ordre pour la maximisation du profit :

$$p = C_{mg} \tag{II-8}$$

La Figure II.3 donne le profit de l'entreprise pour des niveaux de prix différents.

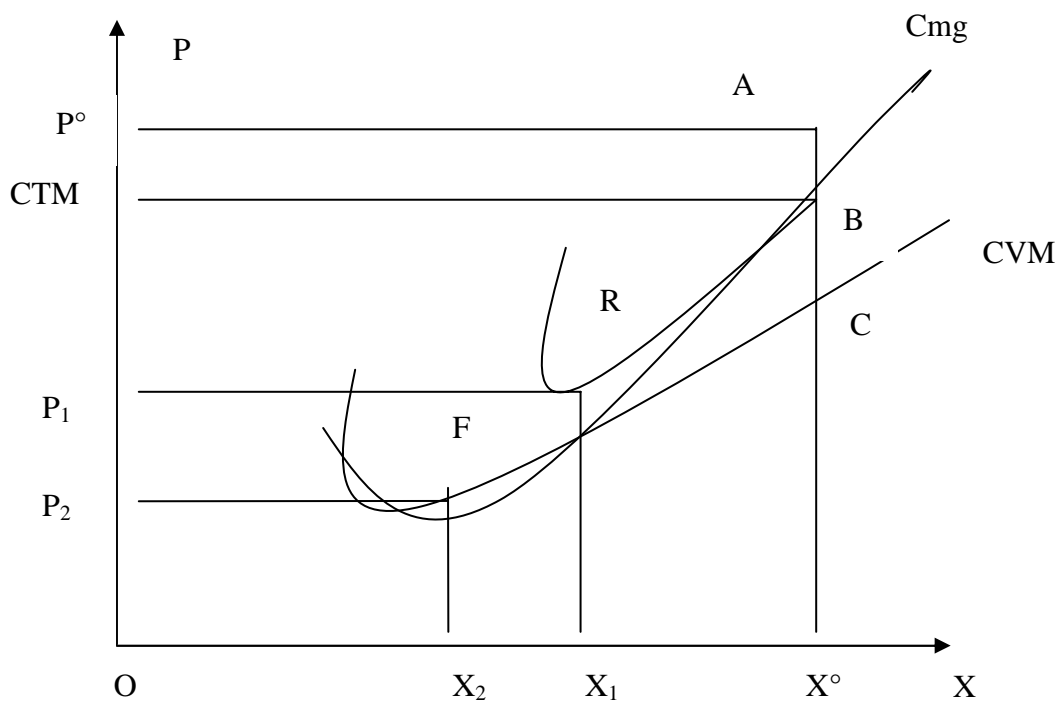


Figure II.3 Profits de l'entreprise pour des niveaux de prix différents

Si le prix du marché est P° , le revenu de l'entreprise est égal à la surface $OP^\circ AX^\circ$ tandis que son coût est représenté par la surface $OCTMBX^\circ$. Par conséquent, le profit pur est donné par la surface $CTMP^\circ AB$. Si le prix est P_1 le profit pur sera nul. Le point R au niveau duquel le coût marginal est égal au coût total moyen est appelé seuil de rentabilité. Si le prix est P_2 , l'entreprise ne couvre pas le coût fixe dans sa totalité.

Fonctions d'offre de long terme

L'output optimal de long terme d'une entreprise est obtenu par l'égalisation du prix donné par le marché et du coût marginal de long terme. Par conséquent, en suivant le même raisonnement fait sur la courbe d'offre de court terme, la courbe d'offre de long terme d'une entreprise, en concurrence parfaite, est identique à la portion de la courbe de coût marginal de long terme située au dessus du minimum de la courbe de coût moyen de long terme CM_L . La courbe de coût marginal de long terme de l'entreprise i est donnée par:

$$Cmg_{Li} = dCT_{Li} / dX_i = C'_i(X_i) \quad (\text{II-9})$$

Donc :

$$S_i = S_i(p) \quad \text{si } p \geq \text{Min}(CM_L) \quad i=1, \dots, n$$

L'offre globale des n entreprises est la somme des offres individuelles, soit:

$$S = \sum_{i=1}^n S_i(p) \quad (\text{II-10})$$

3. Equilibre en très court terme

Les forces du marché qui déterminent le prix et la quantité échangée peuvent être vues comme la confrontation entre la demande globale et l'offre globale. Le point d'intersection entre la courbe de l'offre et de la demande détermine le point d'équilibre du marché. Etant donné que l'offre globale est dépendante du temps, comme il est montré plus haut, des équilibres différents seront obtenus [22] [28].

En période de commercialisation, les entreprises ne peuvent opérer aucun ajustement. Le niveau de la production est fixé et ne peut pas varier. Chaque entreprise a donc une offre fixe qu'elle vend au prix établi par le marché. Par conséquent, la courbe d'offre de la branche ou courbe d'offre globale est égale à la somme des courbes d'offre individuelle et est représentée par une droite verticale. L'équilibre du marché est alors déterminé par l'intersection de la courbe d'offre globale et de la demande globale comme schématisé dans la figure II.4.

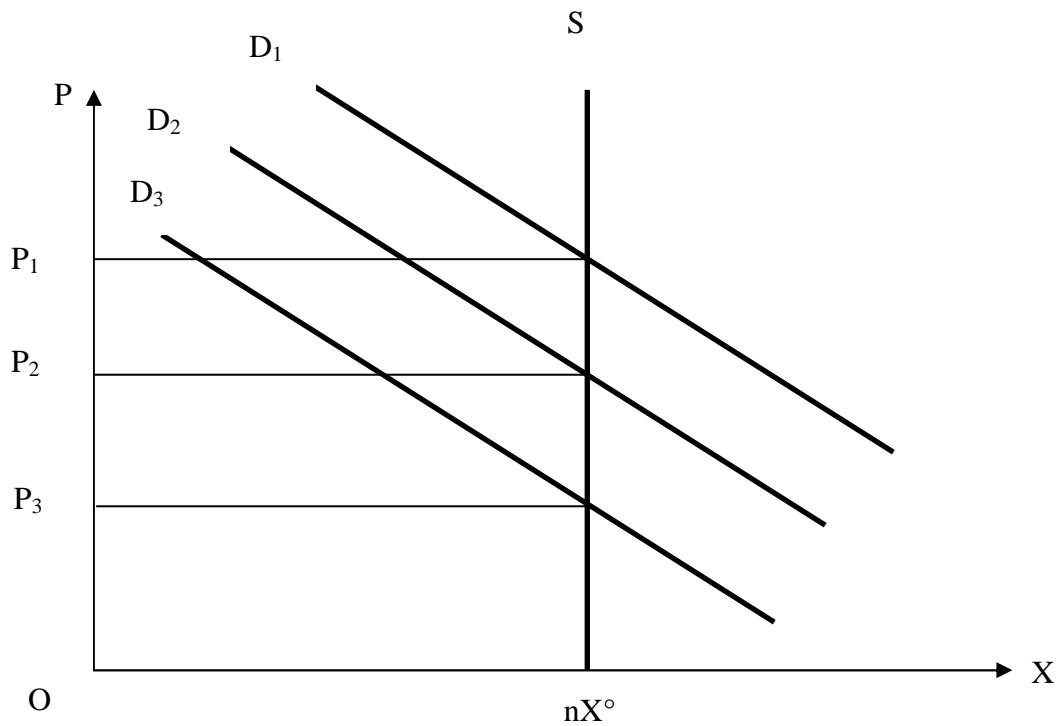


Figure II.4 Points d'équilibres du marché

L'équilibre du marché est obtenu au prix qui égalise la quantité offerte à la quantité demandée. Si la demande globale est représentée par la droite D_1 le prix d'équilibre est P_1 , si la demande globale est représentée par la droite D_2 , le prix d'équilibre est P_2 ,... etc. Comme l'offre est fixe pendant la période de commercialisation, le prix d'équilibre est déterminé uniquement par la demande. Par contre, pendant les deux autres périodes, l'équilibre du marché est déterminé non seulement par la courbe de demande mais aussi par la courbe de l'offre [22].

II.4.4 La concurrence imparfaite

On rappelle que les équilibres du marché se caractérisent par la grandeur relative des producteurs et des consommateurs échangeurs de produits et services. Les forces en présence agissent tout en subissant, malgré eux, les conditions de formation des prix. La concurrence imparfaite se différencie dans un grand nombre de variantes, lesquelles s'étendent d'une situation de monopole absolu à celle d'un oligopole pratiquant une concurrence limitée. On ne parle de concurrence imparfaite que relativement à un produit ou un service déterminé.

II.4.5 Le monopole

Le monopole pur, à la différence des conditions de concurrence parfaite, est une situation dans laquelle le produit ou le service en cause est offert par un seul producteur sur le marché. Dans ce dernier, seul le monopoleur exerce une force par la fixation du prix ou de la quantité

offerte. La raison pour la quelle il ne peut exercer de force unilatérale sur son marché provient du fait de la décroissance de la courbe de demande, c'est-à-dire qu'il ne peut imposer un prix important sans que la quantité vendue ne se voit diminuée.

Pour le microéconomiste, le monopole, comme toute autre firme d'ailleurs, n'a qu'une logique : la maximisation du profit qui est définie comme la différence entre le revenu et le coût total soit:

$$\pi(Q) = R(Q) - C(Q)$$

La maximisation résulte de l'annulation de la dérivée de π par rapport à Q . Le profit du monopoleur est maximum lorsque le revenu marginal (R_m) est égal au coût marginal (C_m) [24] [25].

II.5 L'oligopole

L'oligopole est une situation intermédiaire entre la concurrence parfaite et le monopole. Dans le cas d'oligopole, il y a un nombre réduit de vendeurs sur le marché rendant innégligeable l'action de chacun. Ainsi dans le cadre de l'oligopole, contrairement à la situation de concurrence parfaite, les décisions des entreprises, ont une incidence sur l'équilibre du marché. Pour prendre une décision de production ou de tarification, une entreprise doit donc anticiper les réactions des autres entreprises. Il existe une certaine interdépendance entre les décisions des firmes, qui correspond à l'existence de **comportements stratégiques** tenant compte des réactions des concurrents. Ces comportements peuvent conduire soit à des situations conflictuelles (**non-coopératives**), soit à des situations de **coopération** entre les firmes. De manière générale, les situations d'oligopole sont soutenues par des **barrières à l'entrée** qui découragent l'entrée de nouveaux concurrents [22] [23].

II.5.1 Modèle de Cournot

Le duopole de Cournot (Antoine Augustin COURNOT, 1838) correspond à une situation où chaque firme produit de manière isolée les quantités qu'elle apporte au marché. Ces quantités sont décidées en connaissant la structure du marché (nombre de concurrents =1), de la fonction de demande et aucune firme n'a les moyens d'apprendre à l'avance la production de son concurrent.

Afin d'établir leur plan optimal, les entreprises en duopole doivent donc anticiper le comportement de leurs concurrents, c'est-à-dire faire des conjectures. Relevant de la psychologie et de l'expérience des individus, la notion de conjecture est difficile à cerner et, plus encore, à mettre sous forme mathématique. Comme cela est souvent le cas face à une situation de ce type, la solution adoptée est la plus simple possible, solution qui prend la forme des conjectures "à la Cournot": chacune des entreprises composant le duopole considère l'offre de l'autre comme une donnée, un paramètre indépendant de ses propres actions. Ainsi, à chaque quantité q_1 offerte par l'entreprise 1 correspond une offre q_2^* de l'entreprise 2, qui maximise son profit au prix $p = f(q_1 + q_2^*)$, en supposant que ce prix est unique et qu'il égalise l'offre et la demande du bien (cette fonction est appelée fonction de demande inverse ; on suppose généralement qu'elle est strictement décroissante). Sous ces hypothèses, à chaque offre de 1 correspond une offre de 2.

La relation obtenue, qui est une fonction de réaction, peut être représentée par une courbe, dite courbe de réaction de l'entreprise 2. On définit de la même façon les fonctions et courbes de réaction de l'entreprise 1. La figure II.5 donne un exemple de courbes de réaction d'un duopole. Il y a équilibre, si et seulement si les deux entreprises maximisent simultanément leur profit, compte tenu du comportement de leur concurrent. Tel n'est pas le cas, par exemple, pour le couple $M = (q_1, q_2^*)$, puisque si l'entreprise 2 offre q_2^* , l'entreprise 1 a intérêt à offrir q_1' plutôt que q_1 (par définition même de sa fonction de réaction), et elle est donc incitée à quitter le point M. De même en ce qui concerne le point N, où c'est l'entreprise 2 qui a intérêt à modifier son offre. Ainsi, il ne peut y avoir équilibre qu'aux points où les graphes des fonctions de réaction se coupent, puisque alors les deux entreprises maximisent leur profit, compte tenu de l'offre de leur concurrent. Dans le cas du graphe, un équilibre existe et est unique ; il est donné par le point C. Un tel équilibre, défini pour des **conjectures à la Cournot**, est dit **équilibre de Cournot**. Si on reprend la terminologie de la *théorie des jeux*, c'est un concept de solution non coopérative, relevant de la catégorie des **équilibres de Nash** (d'ailleurs, on l'appelle parfois équilibre de **Cournot-Nash**). En effet, au point C, aucune entreprise n'a intérêt à changer unilatéralement son offre, car cela se traduirait par une baisse de son profit [29].

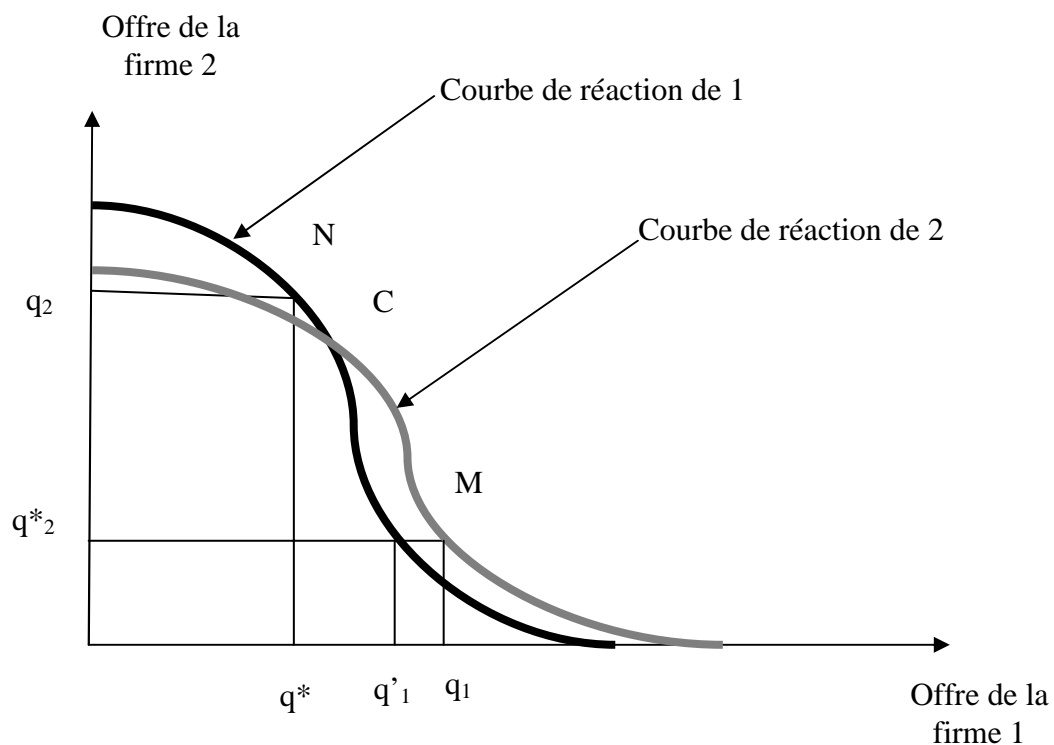


Figure II.5 Modèle de Cournot

Il y a encore plusieurs autres modèles de situation oligopole, mais le modèle de Cournot est le plus connu. Le comportement des firmes dans une compétition parfaite ou un monopole peut être traité par une simple optimisation, tandis que dans le cas d'un oligopole, elle requière une analyse avec la théorie des jeux [21].

II.6 Théorie des jeux

L'observation des interactions entre agents économiques a fait entrer la théorie des jeux dans la science économique. Cette théorie est née en 1944 avec l'ouvrage de John von Neumann et Oskar Morgenstern, "*la Théorie des jeux et du comportement économique*". Ses applications s'étendent bien au-delà de l'économie et constituent une théorie générale de choix rationnels, dans des conditions d'incertitude sur les choix des autres « joueurs ». La théorie s'applique également dans le domaine des relations internationales, par exemple lorsqu'on analyse différentes stratégies possibles de défense nucléaire. Néanmoins, le résultat le plus important de cette théorie fut fourni dès 1928 par le même homme : il s'agit du théorème du min-max. Dans les années 50, c'est surtout grâce aux travaux de Nash qui aboutirent à la

notion d'équilibre (de Nash), que la théorie progressa. Ces travaux remarquables valurent à Nash et à deux autres chercheurs le prix Nobel d'économie en 1994.

Jeux, théorie des (économies), branche de la science économique relative à la description ou à la prévision de comportements économiques à l'aide de concepts et de techniques tirés de la théorie des jeux née des mathématiques. De nombreuses décisions économiques sont influencées par la réaction attendue de la part d'autres agents économiques. Un exemple connu est le comportement des entreprises sur un marché où chacune d'elles dispose d'une grande part de marché (on parle alors d'un oligopole), de sorte que la politique de prix d'une compagnie est fonction de la réaction attendue de la part des autres. Par exemple, la société peut décider ou non de baisser son prix, selon qu'elle s'attend à ce que ses concurrents la suivront ou laisseront leurs prix inchangés. De la même manière, la stratégie d'un syndicat négociant avec la direction d'une entreprise dépend de la stratégie qu'il croit adoptée par la direction [22].

La théorie des jeux offre des analogies avec des jeux familiers tels que les échecs ou le bridge, dans lesquels la stratégie de chaque joueur dépend des « coups » ou des choix que les autres joueurs sont sensés effectuer. Mais l'analogie s'arrête là. En effet, pour déduire une stratégie optimale avec plusieurs suppositions sur les choix des autres agents économiques, la théorie des jeux doit tenir compte d'objectifs variés, des conséquences de l'adoption de différentes stratégies, de la possibilité ou non d'alliances entre les joueurs, du degré de contrainte des contrats passés entre joueurs (les fréquents échecs des pays membres de l'Organisation des pays exportateurs de pétrole à respecter leurs quotas de production trahissent un « contrat » dont la contrainte n'est pas absolue), de la probabilité pour un « jeu » d'être un « coup unique » ou d'être répété, le premier coup fournissant dans ce cas à tous les joueurs une information sur les stratégies adoptées, ...etc.

La théorie des jeux permet d'identifier des éléments importants caractérisant certains types de situation. La construction d'une matrice de « gain » est un outil d'analyse répandu. Dans le cas simple de deux joueurs, la matrice de gain indique le gain ou la perte de chaque joueur pour chacune des combinaisons de stratégies qu'ils peuvent adopter. Dans certains cas, la matrice de gain comporte un « point d'équilibre », ou équilibre de « Nash ». Un point d'équilibre apparaît lorsque, dans un jeu à deux joueurs X et Y, le choix de X est le plus favorable pour lui étant donné le choix de Y et le choix de Y est le plus favorable pour ce dernier étant donné le choix de X. Dans une telle situation, les choix sont clairement indiqués

et aucun joueur ne peut hésiter sur la stratégie à adopter. Il peut exister un point d'équilibre qui ne mène pas à une issue aussi souhaitable que dans le cas d'une coopération entre les deux joueurs ; le fameux « dilemme du prisonnier » en est un exemple. Deux individus suspectés d'avoir commis ensemble un cambriolage sont isolés chacun dans une cellule par la police, qui leur propose un marché. Chacun peut dénoncer son partenaire. Si aucun des deux n'accuse l'autre, ils seront libérés et pourront se partager le butin. S'ils s'accusent mutuellement, ils auront tous les deux une légère peine de prison. Si l'un des deux accuse l'autre sans être dénoncé, il pourra profiter de l'intégralité du butin, tandis que le prisonnier dénoncé purgera une forte peine. Le choix rationnel pour chaque prisonnier consiste à dénoncer l'autre. Un équilibre de Nash est atteint (chacun dénonce l'autre), mais cet équilibre ne correspond pas au meilleur gain possible pour les deux joueurs, qui serait atteint s'ils pouvaient coopérer (aucun prisonnier ne dénonce l'autre) [23].

II.6 .1 Définition d'un jeu

La théorie des jeux se propose, d'abord, de mettre sous forme mathématique des situations, appelées *jeux*, dans lesquelles des individus (les « joueurs ») à la recherche du gain maximum (hypothèse de rationalité) sont en interaction. Tout jeu, selon cette théorie, est donc constitué des trois éléments suivants :

1. Une liste de n joueurs, chacun étant caractérisé par un indice i , $i = 1, \dots, n$.
2. Un ensemble $\{S_1, \dots, S_n\}$, où S_i est l'ensemble des stratégies du joueur i ($i = 1, \dots, n$), dont il choisit un élément (en ayant pour but d'obtenir le gain le plus élevé possible), élément noté s_i .
3. Un ensemble de fonctions de gain $\{f_1(\times), \dots, f_n(\times)\}$, la fonction $f_i(\times)$ donnant le gain $f_i(s_1, \dots, s_n)$ du joueur i lorsque les choix des joueurs sont donnés par la liste - ou le vecteur - de stratégies (s_1, \dots, s_n) , avec $s_1 \in S_1, \dots, s_n \in S_n$.

Il y a situation de « jeu » parce que le gain de chaque joueur dépend évidemment de la stratégie qu'il choisit mais aussi de celles qui sont choisies par les autres joueurs.

Une *solution* d'un jeu est une liste de stratégies (une par joueur) de la forme : (s_1^*, \dots, s_n^*) ,

Où s_i^* est l'une des stratégies du joueur i ($s_i^* \in S_i$), $i = 1, \dots, n$.

Le point essentiel - et évident ici - à propos de toute solution d'un jeu, quelle qu'elle soit, c'est qu'elle résulte d'un *choix simultané* d'une stratégie par chacun des joueurs - ceux-ci prenant leur (unique) décision en ignorant celles des autres. Même dans le cas où chaque

joueur connaît “ tout ” sur les autres (on dit alors qu’il y a *information complète*), il ne peut pas, en règle générale, prévoir avec certitude leurs choix. Ses *croyances* concernant leur comportement sont donc un élément essentiel pour caractériser toute solution du modèle. Or, les croyances des joueurs sont des paramètres hors modèle (elles ne font pas parties des points 1., 2. et 3. qui caractérisent tout jeu), qui “ expliquent ” autant la “ solution ” retenue que les éléments même du modèle.

On pourrait avancer, intuitivement, que les croyances se sont formées, ou se forment, progressivement, “ en cours de jeu ” - de sorte que, d’exogènes, elles deviennent endogènes. Mais ce serait oublier que tout modèle de jeu suppose un choix unique (et simultané) de la part des joueurs [30] [31].

II.6.2 Formes d'un jeu

On distingue deux formes de représentation d'un jeu:

- **Forme normale** : représentée grâce à un tableau contenant les différentes stratégies des joueurs et leurs gains. L'exemple pris est celui du jeu : ciseaux, caillou et feuille où l'on associe par exemple le gain au nombre 1, le match nul à 0, la défaite à -1 . Si le gain est aléatoire (ex. du jeu de carte ou du lancer de dé), son gain ou son utilité est alors son espérance mathématique. Les règles sont les suivantes :

- Le caillou casse les ciseaux (Caillou > Ciseaux)
- La feuille enveloppe le caillou (Feuille > Caillou)
- Les ciseaux coupent la feuille (Ciseaux > Feuille)

Les gains sont représentés entre parenthèses : (Gain Joueur A, Gain Joueur B). Cette forme normale (Tableau II.1) convient à tout type d'information complète, qu'elle soit parfaite ou imparfaite.

- **Forme extensive** : représentée par un arbre qui décrit toutes règles du jeu relatif au choix de stratégie des différentes firmes. Supposant qu'il n'existe que deux firmes dans le monde des constructeurs d'ordinateurs, A et B. Avant de produire leurs ordinateurs, ces firmes doivent décider de rendre leurs machines compatibles ou non en adoptant le même système d'exploitation. La figure II.6 donne la représentation du jeu sous forme extensive [32].

Tableau II.1 Représentation Normale des jeux

		Joueur B		
		Pierre : P	Feuille : F	Caillou : C
Joueur A	Pierre : P	0, 0	-1, +1	+1, -1
	Feuille : F	+1, -1	0, 0	-1, +1
	Caillou : C	-1,+1	+1, -1	0, 0

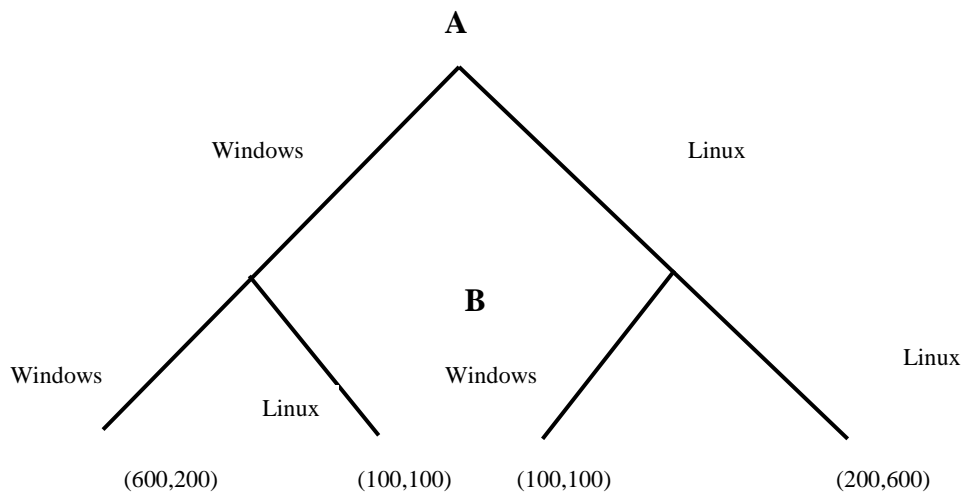


Figure II.6 Représentations extensives des jeux

II.6.3 Types de jeux

1. Selon le type d'information

Un jeu est dit à information *complète* si chacun des participants connaît :

- ses possibilités d'actions (l'ensemble des choix qu'il peut faire)
- l'ensemble des choix des autres joueurs
- les issues possibles et la valeur des gains qui en résultent
- les motifs des joueurs: chacun sait se mettre à la place des autres et sait ce que l'autre déciderait s'il était dans la même situation. Cette hypothèse est la rationalité, toujours

supposée de l'adversaire : tous les joueurs tentent de maximiser leurs gains et il n'y a que cela qui les intéresse.

On dit qu'un jeu est à information incomplète s'il manque de l'information (lorsqu'il n'y a pas de connaissance des gains, ou de certaines règles ...).

Dans les jeux à information complète, l'ordre des coups permet de distinguer 2 types de jeu

- S'il y a simultanéité des coups, comme dans le jeu des enfants où l'on choisit simultanément ciseaux, Pierre, feuille. On ne peut alors pas se décider en fonction de ce que joue l'adversaire puisqu'on joue en même temps. On dit qu'il y a information imparfaite.
- Dans le cas du jeu d'échecs par contre, les coups n'étant pas simultanés, mais successifs, vous disposez d'une information supplémentaire qui est le coup de l'adversaire. On dit alors qu'il y a information parfaite [31].

2. Selon la coopération

Au niveau des jeux *coopératifs*, on peut imaginer la coopération grâce à des contrats qui ne peuvent pas être remis en cause. Les joueurs peuvent éventuellement transférer les gains entre eux. Dans les cas extrêmes de coopération, où les gains sont répartis équitablement entre les joueurs (on recherche alors une somme de gains maximum), on peut considérer les joueurs comme un joueur unique qui chercherait à dégager un *intérêt général* et qui ensuite répartirait les gains entre les joueurs.

Partant de l'hypothèse que chaque joueur garde sa liberté d'engagement, l'objectif de la théorie des jeux non coopératifs est de caractériser les issues possibles d'une interaction stratégique lorsque les joueurs abordent cette interaction de manière rationnelle, c'est-à-dire de la manière la plus égoïste qui soit (ils veulent seulement maximiser leur propre bien). Dans ce modèle, il est impossible de communiquer et de se concerter entre concurrents.

II.6.4 Equilibre de Nash

John Nash a généralisé le concept d'équilibre de Cournot. L'idée de l'équilibre de Nash est extrêmement simple en soi et cohérent avec l'essence des jeux non-coopératifs. Les jeux non-coopératifs correspondent à des situations d'interactions entre individus libres dans leurs choix et poursuivant des objectifs propres et indépendants. Ces individus ne communiquent

pas avant le jeu et n'ont pas nécessairement le moyen de s'engager à poursuivre une stratégie particulière. Dans ce contexte, l'équilibre de Nash cherche les résultats qui sont *stables* par rapport aux déviations individuelles, donc unilatérales. L'absence de communication implique une absence de coordination explicite et des déviations multilatérales. Un équilibre de Nash (EN) est donc un résultat dont aucun joueur n'a envie de dévier unilatéralement, étant données les stratégies jouées par les autres joueurs. L'équilibre de Nash est l'un des *concepts clés* dans la théorie des jeux : il permet en effet de trouver les solutions à un jeu sous forme normale (de tableaux de gains) et lorsque l'on a un jeu à information imparfaite. Sa définition est mathématique et complexe mais on peut retenir la définition suivante : « **Ce sont les issues du jeu pour lesquelles aucun joueur ne regrettera à posteriori son choix. Les issues sont alors des équilibres de jeux** » [31] [33] [34].

Un point d'équilibre de Nash (dans le cas d'un jeu symétrique) est défini par :

$$f(S_1^*, \dots, S_i^*, \dots, S_n^*) > f(S_1^*, \dots, S_i, \dots, S_n^*) \forall S_i \in S$$

Avec S est l'ensemble des stratégies de l'agent i .

f : désignant la fonction objectif (fonction d'évaluation)

S : représentant l'ensemble des stratégies de l'agent i .

Par définition un point d'équilibre de Nash est un n -tuple S^* de manière à ce que la stratégie de chaque joueur maximise son profit si les stratégies des autres restent inchangées. La stratégie de chaque joueur est optimale par rapport à celles des autres [30] [35].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré certains aspects essentiels des comportements des différents agents dans un marché et leurs objectifs. Le problème d'équilibre d'un marché donné est différent suivant la nature de la concurrence dans le marché. Suivant que l'on se trouve dans une situation de monopole parfait ou dans une situation de concurrence parfaite, le problème est résolu comme étant un simple problème d'optimisation. Par contre dans un environnement oligopolistique, comme c'est le cas du marché dérégulé de l'électricité, une analyse avec la théorie des jeux est exigée car le point d'équilibre est influencé par les interactions stratégiques des firmes. Dans le prochain chapitre, nous présentons l'outil qui nous permettra de simuler ce comportement stratégique.

Chapitre 3

Présentation des Algorithmes Co- évolutionnaires Coopératifs

Introduction

Les algorithmes évolutionnaires (EA pour evolutionary algorithms) font partie de la famille des algorithmes d'optimisation stochastiques, au même titre que les algorithmes de Monté Carlo et l'algorithme du Recuit Simulé. Comme ce dernier, les algorithmes évolutionnaires sont inspirés d'un paradigme naturel, celui de l'évolution naturelle darwinienne sous la lumière du néo darwinisme sur la génétique moderne : L'émergence d'espèces adaptées le mieux à leurs milieux naturels est la conséquence de l'interaction entre la sélection naturelle et variations non dirigées [36] [37].

En d'autres termes, c'est l'individu le mieux adapté au milieu naturel qui survivra et qui se reproduira en dépit des autres, ce qui donne un caractère optimal à cet individu. Ce caractère correspond bien au caractère d'optimisation rencontré dans la recherche, ce qui a donné la naissance à des algorithmes se basant sur cette théorie appelés **Algorithmes Evolutionnaires**. Les EA ont montré leur capacité à éviter la convergence des solutions vers des optima locaux, aussi bien lorsqu'ils sont combinés avec des méthodes de recherche locale, telle la rétro propagation du gradient, que lorsqu'ils sont seuls [38] [39].

III.1 Principe

Les EA sont basés sur des principes simples. En effet, peu de connaissances sur la manière de résoudre ces problèmes sont nécessaires, même si certaines peuvent être exploitées afin de rendre plus efficace l'évolution (en effet, il n'est pas réaliste d'espérer obtenir une méthode d'optimisation raisonnablement efficace si aucune connaissance n'est disponible sur le domaine à traiter).

Les Algorithmes Evolutionnaires se basent sur la simulation du processus d'évolution naturelle. Parmi les théories d'évolution les plus admises, on trouve le paradigme néo darwiniste, qui est une reformulation de la théorie d'évolution de Darwin sur la lumière de la génétique moderne. Cette théorie affirme qu'une grande partie de l'histoire de la vie naturelle peut être expliquée par des processus physiques opérant sur les populations et les espèces. Ces processus sont : la reproduction, la compétition et la sélection.

Une population est un ensemble d'individus. Cette théorie considère un individu comme une dualité entre son patrimoine génétique "le *génotype*" et ses traits caractéristiques " le *phénotype*". Le génotype est un moyen de stockage des informations génétiques acquises, alors que le phénotype est la traduction de ces informations à l'échelle de l'individu. La reproduction, est une spécificité des organismes vivants, opérant sur le patrimoine génétique d'une population. Elle enveloppe deux processus : le croisement et la mutation. Le croisement combine les génotypes de deux individus pour engendrer une descendance. La mutation introduit une altération aléatoire des génotypes engendrés au cours du croisement pour garantir plus de diversité. La reproduction permet de créer de nouveaux individus et tend à accroître les tailles des populations existantes ou à créer d'autres populations [38].

Quel que soit le type de problème à résoudre, les EA opèrent selon les principes suivants : la population est initialisée de façon dépendante du problème à résoudre (*l'environnement*), puis évolue de génération en génération à l'aide d'opérateurs de *sélection*, de *recombinaison* et de *mutation*. L'environnement a pour charge d'évaluer les individus en leur attribuant une performance (ou *fitness*). Cette valeur favorisera la sélection des meilleurs individus, en vue, après reproduction (opérée par la mutation et/ou recombinaison), d'améliorer les performances globales de la population [39].

Les caractéristiques les plus significatives du néo darwinisme sont:

- l'individu est la cible première de la sélection.
- Les variations génétiques sont des phénomènes aléatoires.
- La variation génotypique est le produit du croisement et de la mutation.
- Une évolution graduelle peut incorporer des discontinuités phénotypiques
- Les changements phénotypiques ne sont pas tous dus à la sélection naturelle.
- L'évolution est un changement d'adaptation et de diversité.
- La sélection est un processus stochastique non déterministe.

III.2 Algorithme Evolutionnaire de base

Un Algorithme Evolutionnaire utilise :

- Une procédure d'initialisation qui génère une population initiale d'individus, bien que la possibilité d'imposer des points initiaux soit toujours envisageable.
- Une fonction d'évaluation déterminant l'adaptation ou la qualité des individus.
- Un critère d'arrêt qui détermine la convergence ou non, de l'algorithme, dépendant d'un ensemble de paramètres regroupés sous θ

Un algorithme évolutionnaire de base est représenté par :

Input : $\mu, \lambda, \theta_s, \theta_r, \theta_m$

1. $t=0$
2. $P(t) = \text{initialisation}(\mu)$
3. $F(t) = \text{évaluation}(P(t), \mu)$
4. **While** (le critère d'arrêt n'est pas atteint) **Do**
5. $P'(t) = \text{reproduction}(P(t), \theta_r)$
6. $F'(t) = \text{évaluation}(P'(t), \lambda)$
7. $P(t+1) = \text{sélection}(P'(t), F'(t), \mu, \theta_s)$
8. $t=t+1$
9. **end do**

Output choisir le meilleur individu ou la meilleur population

La première étape est l'initialisation de la population à μ individus qui peut être une initialisation aléatoire ou on donne des valeurs de nos choix. Puis on évalue cette population avec la fonction d'adaptation (fitness) pour déterminer les individus les mieux adaptés pour la reproduction. A partir de là, on reproduit les individus avec soit une mutation et/ou un croisement suivant le choix de l'algorithme utilisé, ce qui nous donne λ descendants qui seront évalués avec la fitness. Enfin, la sélection de la nouvelle population des parents est réalisée et le processus est répété jusqu'à la convergence de l'algorithme. La figure III.1 représente le principe d'un algorithme évolutionnaire standard [40] [41].

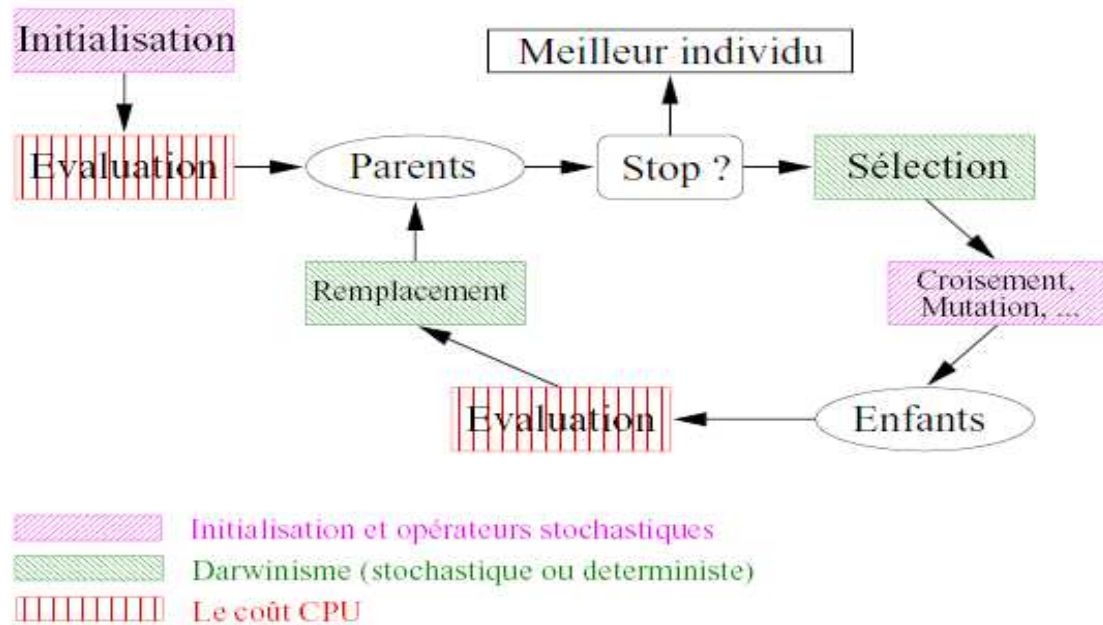


Figure III.1 Principe d'un algorithme évolutionnaire standard.

On peut remarquer que les paramètres de reproduction et de sélection sont des éléments indispensables pour les EAs, et suivant la nature de ces opérateurs, on aboutit à des variantes différentes des EAs.

III.3 Algorithmes Co-évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires (EAs) sont des méthodes heuristiques appliquées pour résoudre des problèmes difficiles en utilisant des notions biologiquement inspirées des règles d'évolution de Darwin. Ils ont été appliqués à une variété de problèmes, à partir de l'optimisation statique à l'ordonnancement d'atelier. EAs ont fréquemment un avantage par rapport à beaucoup de méthodes heuristiques de recherche locale traditionnelle quand les espaces de recherche sont fortement modaux, discontinus, ou fortement contraint. Le domaine de l'optimisation reste le domaine où ils excellent, mais la nature externe de la mesure pour l'évaluation des individus rend inefficace leurs applications à des problèmes complexes. Ce qui a poussé les chercheurs à élaborer une autre méthode de calcul évolutionnaire connu sous le nom des Algorithmes Co-évolutionnaires qui suivent le processus naturel: **La Coévolution** [42] [43]. Les Algorithmes Co-évolutionnaires ont un réel potentiel dans les domaines où les AE montre le plus de 'faiblesse', ce qui les rend un axe de recherche très important dans le domaine du calcul évolutionnaire [41].

III.3.1 Définition

Le terme "Coévolution" tel qu'il est utilisé dans la communauté du calcul évolutionnaire est loin d'être clairement défini [42].

Le biologiste Evolutionnaire Price (1998) définit la Coévolution comme suit:
" C'est un changement évolutionnaire induit réciproquement entre deux ou plusieurs individus de plusieurs espèces et populations".

Cependant les chercheurs dans le domaine du calcul évolutionnaire débattent sur la définition de la Coévolution.

Dans le cadre de Calcul Evolutionnaire, la Coévolution est : « *le processus d'adaptation mutuelle qui prend part entre un ensemble d'agents qui interagissent de manière stratégique. Les résultats de ces interactions révèlent une structure de 'récompense' qui guide l'évolution des agents vers un comportement de plus en plus adaptative. Ce processus d'adaptation est 'auto référencé' : lorsqu'un agent évolue vers l'exploitation des opportunités de 'récompenses' offertes par les autres agents, il crée de nouvelles opportunités qui peuvent être exploitées par les autres. De cette manière, la coévolution offre une Ecologie dynamique de générer de nouvelles possibilités d'un apprentissage évolutionnaire* » [43].

La réponse la plus simple est qu'un algorithme Coevolutionnaire est un algorithme évolutionnaire (ou collection d'algorithmes évolutionnaires) dans lequel la fonction d'évaluation (fitness) individuel est subjective, dans le sens où c'est une fonction de ses interactions avec d'autres individus des autres populations [42].

Tous les algorithmes évolutionnaires, Co-évolutionnaires ou pas, sont des méthodes de recherche basées sur la population et inspirées par le concept du choix normal (théorie de Darwin). Avant que nous puissions employer un algorithme évolutionnaire, nous devons d'abord choisir une représentation. Après, nous avons besoin d'opérateurs de variations appropriées comme "le croisement" et "la mutation". Mais la différence entre un algorithme Co-évolutionnaire et un évolutionnaire réside dans la façon d'approcher le problème et l'évaluation d'un individu avec la fonction objectif.

L'approche du problème pour les ACE est la même qu'avec celle des Algorithmes Génétiques (AG) qui sont convaincus que la résolution des problèmes est plus facile si on le décompose en petits sous problèmes. Goldberg avance: " **Comme un enfant construisant des forteresses magnifiques par l'arrangement de simples blocs en bois, un AG cherche l'optimalité des performances à travers la juxtaposition des schèmes courts de faible ordre et très performants**" [38].

Cette 'hypothèse' est la motivation première des ACE Coopératifs, depuis leurs élaborations par Potter et De Jong en 1994. Les deux auteurs se sont basés sur l'idée que pour résoudre des problèmes de plus en plus complexes, la notion explicite de modularité doit être introduite pour fournir une opportunité aux solutions complexes d'évoluer sous la forme de composants en interaction [41].

Les ACE sont aussi distingués aussi des AE traditionnels par leur évaluation, en se basant sur leur interaction avec les autres et la nature de cette interaction. Les ACE sont classés en [42] [43] :

- *Algorithmes Co-évolutionnaires Coopératifs*
- *Algorithmes Co-évolutionnaires Compétitifs*

III.3.2 Algorithmes Co-évolutionnaires Coopératifs

Dans les ACE compétitifs, les individus sont récompensés quand leurs adversaires sont mauvais et ils sont punis quand leurs adversaires sont bons. En d'autres termes, leur valeur de fitness dépendent de la compétition et les individus participants dans cette compétition sont appelés "*adversaire*".

Alternativement, dans la Coévolution coopérative la fitness d'un individu est basé sur la coopération avec les autres individus avec les quels il est en interactions. Les individus réussissent quand ils coopèrent bien (l'équipe à de bonnes performances) et les individus participants dans cette collaboration sont appelés "*collaborateurs*" [41] [42] [47].

Initialement les ACE Coopératifs sont conçus pour être une extension aux AG [41]. La décomposition est poussée, encore plus loin, vers la notion de modularité.

Les composants ne sont plus implicites, comme dans le cas des AG, mais ils sont explicites, et donc définis par l'utilisateur.

Un Algorithme Co-évolutionnaire Coopératif présente les caractéristiques suivantes :

- Les individus d'une espèce (ou population) représentent un composant de la solution potentiel.
- La solution complète est obtenue en assemblant un membre 'représentatif' de chacune des populations présentes.
- L'évaluation au niveau d'une population est définie en terme de l'adaptation de la solution complète dans laquelle le membre de la population participe.
- Le nombre de populations peut évoluer.
- L'évolution de chaque population est assurée par un Algorithme Evolutionnaire standard.

Même si les Algorithmes Evolutionnaires traditionnelles peuvent entretenir plusieurs populations (sous populations), la méthode d'évaluation est la seule différence notable entre un Algorithme Evolutionnaire et un ACE. De manière générale, pour chaque individu, on choisit de manière déterministe ou aléatoire, q individus (partenaires) de chacune des autres populations. L'adaptation de l'individu est prise comme la valeur moyenne de l'ensemble des interactions de cet individu avec l'ensemble de ces partenaires :

$$Fit(a^K) = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q F(P_i(a_i^1), \dots, P_K(a^K), \dots, P_N(a_i^N)) \quad (III-1)$$

Avec :

N est le nombre de populations

$a^n \in \{a_1^n, a_2^n, \dots, a_i^n\}$: a individus choisis de la population n

La manière la plus simple pour réaliser l'évaluation est de choisir le 'meilleur' individu de chaque population :

$$Fit(a^K) = F(P_i(a_{best}^1), \dots, P_K(a^K), \dots, P_N(a_{best}^N)) \quad (III-2)$$

III.3.3 Algorithme Co-évolutionnaire coopératif de base

Un ACE coopératif de base peut être défini comme suit [47] :

$P_i(t) = \{a_i^1(t), \dots, a_i^\mu(t)\}$: L'ensemble des parents de la population i à l'instant t

$P_i'(t) = \{a_i^1(t), \dots, a_i^\mu(t), \dots, a_i^\lambda(t)\}$ Les descendants de la population i à l'instant t

Input : $\mu, \lambda, \theta_s, \theta_r, \theta_m$

1. Initialisation
2. $P_i(0)$
3. $t=0$
4. **While** (le critère d'arrêt n'est pas atteint) **Do**
5. for $i=1$ to N do
6. $F_i(t) = \text{Fit}(P_i(t), q)$;
7. $P_i'(t) = \text{reproduction}(P_i(t), \theta_r, \lambda)$;
8. $F_i'(t) = \text{Fit}(P_i'(t), q)$;
9. $P_i(t+1) = \text{sélection}(P_i(t), P_i'(t), F_i(t), F_i'(t), \mu, \theta_s)$;
10. end for
11. $t=t+1$
12. **end do**

Output choisir le meilleur individu de chaque population

Après la création des populations initiales, l'ACE coopératif applique un Algorithme Evolutionnaire sur chaque population. L'adaptation de chaque individu est calculée sur la base de son interaction avec les autres, où chaque individu ne présente qu'une portion de la solution globale. Il est à noter qu'aucune restriction n'est posée sur la nature de l'algorithme évolutionnaire à utiliser dans l'ACE. Toutes les classes des algorithmes Evolutionnaires de base peuvent être utilisées sans distinction.

III.3.4 Stratégie d'Evolution (SE)

Plusieurs types d'évolution ont été développés, donnant naissance à trois grandes tendances : les Algorithmes Génétiques (ou *Genetic Algorithms* (GA)), les Stratégies d'Evolution (ou *Evolution Strategies* (ES)) et la Programmation Evolutive (ou

Evolutionary Programming (EP)). Une branche annexe, la Programmation Génétique (ou *Genetic Programming* (GP)) peut aussi rentrer dans ce type de systèmes [39].

La définition la plus admise est que le terme d'Algorithme Co-évolutionnaire fait référence à un algorithme dans lequel deux populations ou plus évoluent, à travers un Algorithme Evolutionnaire, et où l'adaptation d'un individu est fonction de son interaction avec les individus des autres populations. Il n'y a aucune indication sur la nature de l'Algorithme Evolutionnaire à utiliser même si la plupart des travaux se sont tournés vers l'utilisation des Algorithmes Génétiques comme algorithme de base pour les Algorithmes Co-évolutionnaires. Dans notre travail, nous avons élaboré un Algorithme Co-évolutionnaire Coopératif qui a une Stratégie d'Evolution comme algorithme de base.

Les ES sont apparues dans les années 70 avec les travaux de Ingo Rechenberg, qui ont été poursuivis par Hans-Paul Schwefel (Schwefel 84). La première particularité de ces méthodes est de coder les paramètres du problème à résoudre en nombres réels. Ceci implique une méthode de mutation adaptée aux réels. La seconde est d'effectuer une sélection déterministe des individus en ne choisissant que les ($n \geq 1$) individus classés selon leur performance. La troisième, enfin, est d'encoder les paramètres d'évolution directement dans le génotype afin de les faire évoluer au même titre que les valeurs des paramètres solutions du problème [39].

Les SE sont dédiées à la résolution de problèmes d'optimisation dans l'espace des vecteurs de réels. En 1965, Rechenberg a introduit l'algorithme (1+1) ES qui fait évoluer un seul individu et utilise la mutation Gaussienne pour assurer cette évolution. Il a proposé la règle 1/5 pour l'adaptation de la déviation standard de la mutation. En 1977, Schwefel a deux types de ES : (μ, λ) ES et $(\mu + \lambda)$ ES, avec $1 \leq \mu \leq \lambda$. Ces deux méthodes se différencient de la sélection déterministe utilisée [37] [46].

Les Stratégies d'Evolution constituent une des principales classes d'Algorithmes Evolutionnaires. A l'inverse des autres approches, les Stratégies d'Evolution ont été conçues, à l'origine, comme des méthodes d'optimisation numériques. Leurs premières applications étaient l'optimisation de la forme d'un corps dans un tunnel de vent. Comme tous les AE, les SE utilisent les opérateurs évolutionnaires standard : reproduction, évaluation et sélection.

Un individu, dans une SE, n'est jugé que sur son adaptation, indifféremment de ces constituants. L'adaptation décrite en termes de comportement de chaque individu est évaluée directement et constitue la seule indication de la survie d'un individu dans la population. Cette approche ne considère aucun partitionnement du problème.

- Aucun codage n'est utilisé, les individus sont considérés comme l'expression de leurs phénotypes, et les problèmes sont considérés dans leurs représentations d'origine.
- Les SE se basent essentiellement sur l'exploration de l'espace de recherche, et considèrent la mutation comme principal opérateur de recherche appliqué à tous les parents. La mutation est généralement gaussienne et peut être auto-adaptative ; elle affecte toutes les variables en même temps.
- L'adaptation d'un individu est évaluée directement, et elle est seule clé de sa survie, sans prendre en compte ses constituants. La sélection est généralement déterministe.

1. Opérateurs d'une Stratégie d'Evolution

Un Algorithme Evolutionnaire est, dans sa forme de base, une combinaison de trois processus appliqués à une population d'individus. Ces processus sont : la reproduction, la sélection et l'évaluation. C'est la définition de l'individu et les processus qu'il subit qui définissent un AE et les différences entre chaque algorithme [38].

• Représentation d'un individu

Un individu dans un AE représente un point de l'espace de recherche qui est une solution potentielle au problème. On distingue deux représentations d'un individu suivant la variété de l'AE utilisé : binaire et réelle. Initialement, le codage utilisé par les AG était en vecteurs binaires appelés chaînes de bits de longueur fixe l . Pour un problème mettant en jeu des variables entières, on peut représenter chacune de ces variables par un vecteur binaire $X = \{X_1, \dots, X_l\} \in \{0,1\}^l$.

Cette représentation s'adapte aussi à des problèmes où les solutions potentielles ont une représentation binaire canonique, comme les problèmes booléens. Elle

s'applique aussi pour des problèmes d'optimisation paramétrique continu, mais il est alors nécessaire de définir une technique de codage adéquat de \mathbb{R}^n vers $\{0,1\}^l$ [46].

Cependant, ce type de codage présente les inconvénients suivants :

- deux éléments proches dans l'espace de recherche ne décodent pas nécessairement deux individus voisins en terme de distance de Hamming. On évite ce genre de problème en utilisant un codage de Gray qui conserve une distance de Hamming de "1" entre deux individus consécutifs quelconques.
- Pour des problèmes où l'on veut une grande précision, le codage binaire peut rapidement devenir inadapté.

Ces inconvénients amènent à utiliser un autre type de représentation: la représentation réelle [46].

■ Représentation Réelle

Introduite indépendamment par l'école allemande des stratégies d'évolution, la représentation réelle a été utilisée dans les années 80/90 notamment par Eshelman et Schaffer, Michalewicz et Radcliffe pour les autres types d'AE. Le principe de cette représentation consiste à coder directement les variables du problème sans passer par le codage binaire intermédiaire. Ainsi, les individus ne sont plus des chaînes de bits mais des vecteurs réels. L'un des avantages majeurs de cette représentation est de conserver les variables du problème dans le codage lui-même, ce qui lui permet une meilleure prise en compte de la structure même du problème [46].

Les Stratégies d'Evolution ne sont pas concernées par la théorie des schémas, et considèrent le problème dans sa globalité sans aucun partitionnement. Ils considèrent que, dans l'absence d'évidences théoriques et empiriques sur l'utilité d'un quelconque codage, il n'est pas utile d'utiliser autre que la représentation réelle [38].

Considérant la mutation comme opérateur de recherche principale, se présentant sous forme d'une perturbation gaussienne multi variable, il est possible d'avoir à chaque individu un vecteur auxiliaire déterminant les paramètres de la mutation qui lui est appliquée [38].

En générale, un individu est représenté par trois vecteurs (X, σ, a) avec :

- $X : \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ vecteur objectif
- $\sigma : \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\} \in \mathfrak{R}^n$ vecteur des deviations standards.
- $a : \{a_1, a_2, \dots, a_{n(n-1)/2}\}$ vecteur des angles de rotation définissant la covariance entre les mutations en chaque dimension (il peut être nul dans le cas ou aucune covariance n'est considérée) [38].

2. La reproduction

- **Le croisement réel**

Les opérateurs de croisement introduits dans les AE sont de simples abstractions de processus naturels. Le croisement utilise deux individus ou plus (parents) pour créer au moins un nouvel individu (descendant) [38]. Le croisement est vu comme l'opérateur d'exploitation essentiel des AG. Son rôle consiste à combiner les génotypes de deux individus pour obtenir deux nouveaux, en échangeant un ou plusieurs fragments des deux génotypes. Mais dans le cadre des Stratégies d'Evolution, l'opérateur de croisement est considéré comme un opérateur secondaire.

Dans son ouvrage sur la théorie des stratégies d'évolution, Schwefel a imaginé un autre type de croisement où toute la population parente peut participer à la génération d'un enfant appelé le croisement global. Chaque parent est sélectionné indépendamment. Comme pour le croisement simple, selon la stratégie de génération des allèles de l'enfant, deux types de croisement global sont possibles : le croisement global discret et le croisement global intermédiaire [38] [45] [46]. La figure III.2 montre un exemple de croisement réel simple.

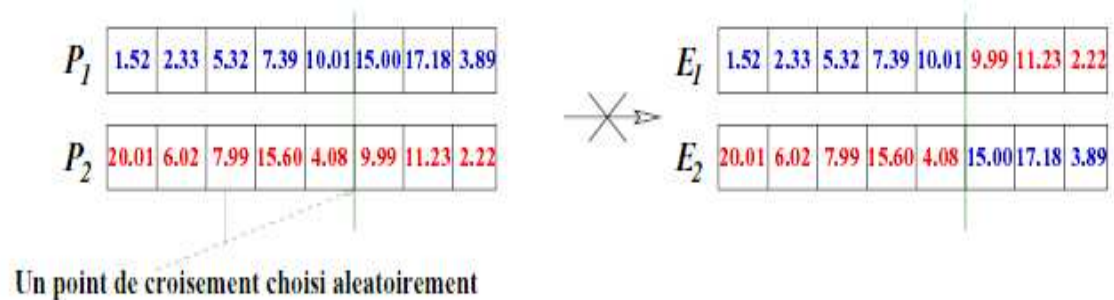


Figure III.2 Croisement réel

La représentation réelle permet cependant de développer toute une série de nouveaux types de croisement, principalement à base de combinaison linéaire de deux individus. Par exemple, nous pouvons citer **Le croisement arithmétique (barycentrique)** qui consiste à choisir deux gènes $P_1(i)$ et $P_2(i)$ dans chacun des parents à la même position « i », et à définir les gènes correspondants $E_1(i)$ et $E_2(i)$ chez les enfants par combinaison linéaire :

$$\begin{cases} E_1(i) = aP_1(i) + (1-a)P_2(i) \\ E_2(i) = (1-a)P_1(i) + aP_2(i) \end{cases} \quad \text{(III-3)}$$

D'autres types de croisement peuvent être définis mais il faut toujours essayer de développer des opérateurs adaptés aux problèmes que l'on traite.

- **La mutation réelle**

L'idée générale de la mutation est la modification avec une certaine probabilité d'un ou plusieurs gènes de l'individu sélectionné afin d'introduire de la variabilité dans la population (diversité génétique). Il peut :

- Favoriser l'exploitation si l'individu muté est proche de l'individu original.
- Favoriser l'exploration si l'individu muté est loin de l'individu original.

Le principe de l'opérateur de mutation réelle consiste généralement à ajouter une perturbation aléatoire, tirée selon une distribution de probabilité Gaussienne, aux différentes composantes de l'individu X

$$X'_i = X_i + \sigma N(0,1) \quad \text{(III-4)}$$

Où σ et $N(0,1)$ sont respectivement l'écart type de la mutation et une loi normale centrée d'écart type 1.

Le problème pour ce genre de mutation est le réglage de l'écart type. Pour cela, plusieurs stratégies adaptatives et auto adaptatives ont été développées.

La mutation Gaussienne adaptative : C'est la règle des 1/5 proposée par Rechenbergen 1973 qui consiste à mettre à jour la valeur de σ pour toutes les générations comme suit :

$$\sigma(t) = \left\{ \begin{array}{ll} \sigma(t-1)\beta & p_s < 0.2 \\ \sigma(t-1)/\beta & p_s > 0.2 \\ \sigma(t-1) & p_s = 0.2 \end{array} \right\} \quad (\text{III-5})$$

Où $0 < \beta < 1$ est le taux d'adaptation de σ et p_s l'observation des mutations réussies aux générations précédentes (performance de l'enfant est supérieure à celle du parent) [46] [38]

La mutation auto adaptative : L'auto adaptation de la mutation permet de régler la variance au cours du processus de recherche. Dans un premiers temps, une variation élevée est exigée pour pouvoir parcourir tout l'espace de recherche. Cette variation doit décroître au fur et à mesure que l'algorithme converge pour permettre une meilleure recherche locale et converger plus rapidement vers l'optimum [38].

Un individu est représenté par (X, σ) . Schwefel a développé la méthode suivante [38] [45] [46] :

$$\begin{aligned} \sigma'_i &= \sigma_i \exp(\tau_c N(0,1) + \tau N_i(0,1)) \\ X'_i &= X_i + N(0, \sigma'_i) \end{aligned} \quad (\text{III-6})$$

Fogel a développé la méthode suivante:

$$\begin{aligned} X'_i &= X_i + N(0, \sigma'_i) \\ \sigma'_i &= \sigma_i + \chi N(0, \sigma_i) \end{aligned} \quad (\text{III-7})$$

$\tau_c = \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{n}}}$, $\tau = \frac{1}{\sqrt{2n}}$ et χ sont des constantes.

3. La sélection

L'étape de sélection doit permettre de choisir les individus qui vont ensuite se reproduire au moyen des opérateurs de variation. Par définition, la sélection est un opérateur d'exploitation : le fait de sélectionner les individus les plus adaptés entraîne forcément une perte certaine de diversité. Par conséquent, une sélection trop forte

(favorisant trop les meilleurs individus au détriment des plus mauvais) peut conduire à une convergence prématurée de l'algorithme, vers un optimum local. Inversement, le fait de ne pas appliquer de sélection assez forte peut empêcher toute convergence. Cette étape doit donc être calibrée avec soin. Cependant il existe deux méthodes de sélection *déterministe* et *stochastique*. Dans le cadre des Stratégies d'Evolution seule la sélection déterministe et la sélection par tournoi sont considérées.

- ***Sélection déterministe***

La sélection déterministe trie les individus suivant leurs adaptations et crée la nouvelle génération en choisissant les meilleures solutions

La sélection déterministe est utilisée typiquement dans les Stratégies d'Evolution. Son caractère purement déterministe lui donne un rôle clef dans l'évolution vu qu'il guide la recherche vers les zones des meilleurs individus par ailleurs on peut dire que la sélection est le paramètre le plus important dans un AE.

Deux types de sélection existent, qui sont les sélections (μ, λ) et $(\mu+\lambda)$. La première consiste à sélectionner les μ meilleurs parmi les λ enfants, la seconde sélectionne les μ meilleurs individus parmi les μ parents de la génération précédente et les λ enfants créés (chaque parent créant λ/μ enfants avec $\lambda > \mu$). Cette dernière méthode permet de ne pas perdre les meilleurs individus d'une génération à une autre mais accroît les possibilités que la population converge prématurément vers une solution qui n'est peut être pas optimale mais qui représente un minimum local [39].

- ***Sélection par tournoi***

La sélection par tournoi n'utilise aussi que des comparaisons entre les individus, ne nécessite même pas de tri de la population. Elle possède un paramètre T, qui est la taille du tournoi. Pour sélectionner un individu, on tire T uniformément dans la population et on sélectionne d'une manière déterministe le meilleur de ces T individus. Au cours d'une génération il y a autant de tournoi que d'individus à sélectionner. Cette méthode est caractérisée par une pression de sélection en générale plus forte que les méthodes proportionnelles (pour qu'un individu peu performant puisse être sélectionné, il faut que les autres soient moins bons que lui). De plus, elle est la moins chère en termes de coût d'exécution [44] [46].

Cette méthode est la plus utilisée dans le cadre des AE, car elle présente de nombreux avantages:

- Simple d'implémentation et assez intuitive.
- Aucun calcul supplémentaire n'est exigé.
- Aucune mise en échelle de la fonction d'adaptation n'est utilisée et les valeurs de l'adaptation négatives sont admises.
- Peut être utilisé indifféremment pour la minimisation ou la maximisation
- Méthode idéale pour une implémentation parallèle, plusieurs sélections peuvent être utilisées en même temps [38].

III.4 Applications à l'Optimisation

Pour pouvoir observer le comportement des ACE coopératifs face aux AE traditionnel appliqués à un problème d'optimisation, nous effectuons un certain nombre de tests en utilisant des fonctions de tests '*standards*'. Pour cela nous utilisons deux algorithmes : une Stratégie d'évolution standard et un ACE coopératif à base de Stratégie d'évolution. Nous avons opté pour les Stratégies d'Evolution à cause de leur efficacité reconnue dans le domaine d'optimisation. Pour placer les deux algorithmes à pied d'égalité, nous utilisons des Stratégies d'Evolution pour les deux, tout en appliquant les paramètres optimaux pour chaque algorithme. Nous assurons que les deux algorithmes effectuent le même nombre d'évaluations et que chacun dispose du même nombre total d'individus.

Nous utilisons les fonctions de testes suivantes [43] :

- **Modèle sphérique**

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2; x \in \mathfrak{R}^n$$

Avec un minimum globale en $x=0$, $f_1(0)=0$, $-5 \leq x \leq 5$

- **Fonction de Rastringin**

$$f_2(x) = 10 * n + \sum_{i=1}^n \left((a_i x_i)^2 - 10 \cos(2\pi x_i) \right)$$

Avec un minimum globale en $x=0$, $f_2(0)=0$, $-5.12 \leq x \leq 5.12$

- **Fonction de Schwefel**

$$f_3(x) = 418.9829 * n + \sum_{i=1}^n x_i \sin(\sqrt{x_i})$$

Avec un minimum globale en $x=0$, $f_3(0)=0$, $-500 \leq x \leq 500$

Nous utilisons une SE qui est aussi l'algorithme de base pour notre ACE coopératif avec les caractéristiques suivantes :

- Mutation gaussienne uniforme.
- Croisement uniforme
- Sélection déterministe de type ES (M+L) avec $M=10$, $L=50$ et la taille d'un individu est 3.

III.4.1 Exemple N°1

Dans cet exemple nous utilisons les deux Algorithmes pour optimiser la fonction Sphérique avec un minimum globale en $x=0$, $f_1(0)=0$, $-5 \leq x \leq 5$

1. Avec la stratégie d'évolution

La figure III.3 présente la caractéristique de convergence de cet algorithme.

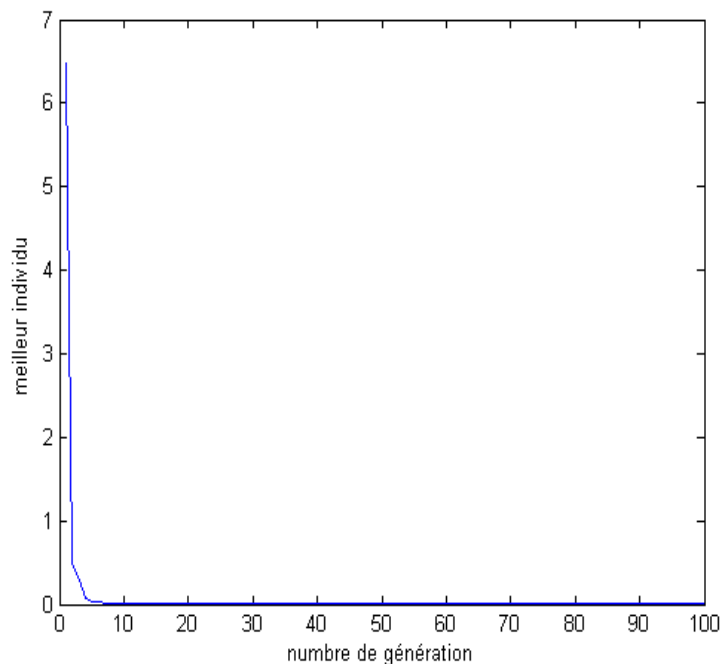


Figure III.3 Caractéristique de convergence SE pour f_1

2. Avec l'ACE

La figure III.4 présente la caractéristique de convergence de cet algorithme

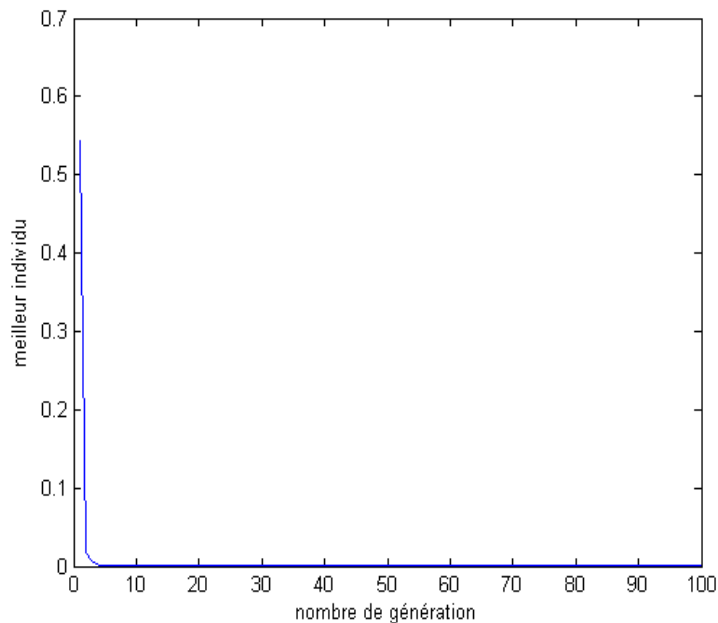


Figure III.4 Caractéristique de convergence ACE pour f_1

III.4.2 Exemple N°2

Dans cet exemple, nous utilisons les deux Algorithmes pour optimiser la fonction de Rastrigin avec un minimum global en $x=0$, $f_2(0)=0$, $-5.12 \leq x \leq 5.12$

La particularité de cette fonction est que l'optimum global est entouré d'un grand nombre d'optima locaux. La difficulté réside essentiellement dans le fait que les optima locaux les plus susceptibles à une convergence prématurée sont les plus proches de l'optimum global. Dans le cas de $n=10$, l'optimal global est entouré de 20 optima locaux. La forme de cette fonction pour $n = 2$ est donnée par la figure III.5. Pour converger vers l'optimum global, l'algorithme de recherche doit éviter tous les optima locaux.

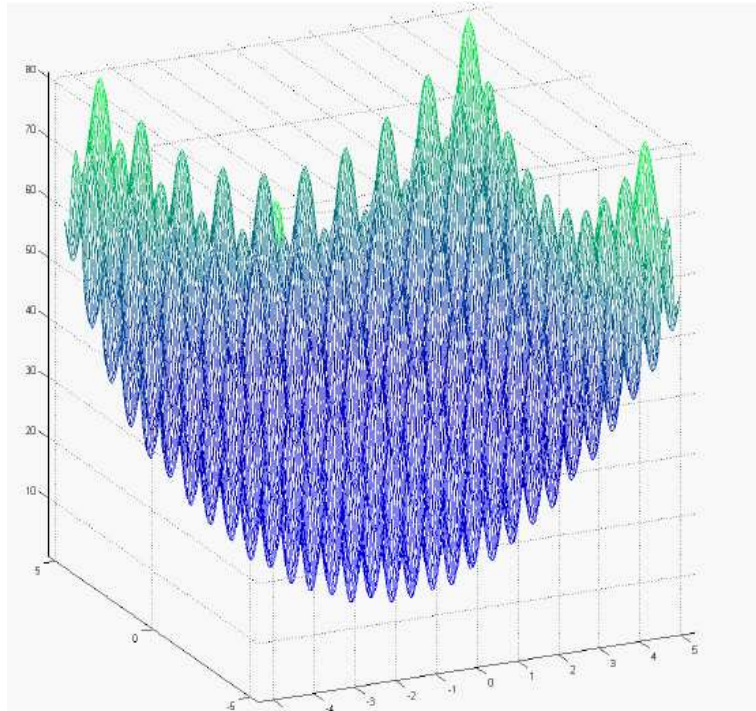


Figure III.5 Forme de f_2 pour $n = 2$

1. Avec la stratégie d'évolution

La figure III.6 présente la caractéristique de convergence de cet algorithme.

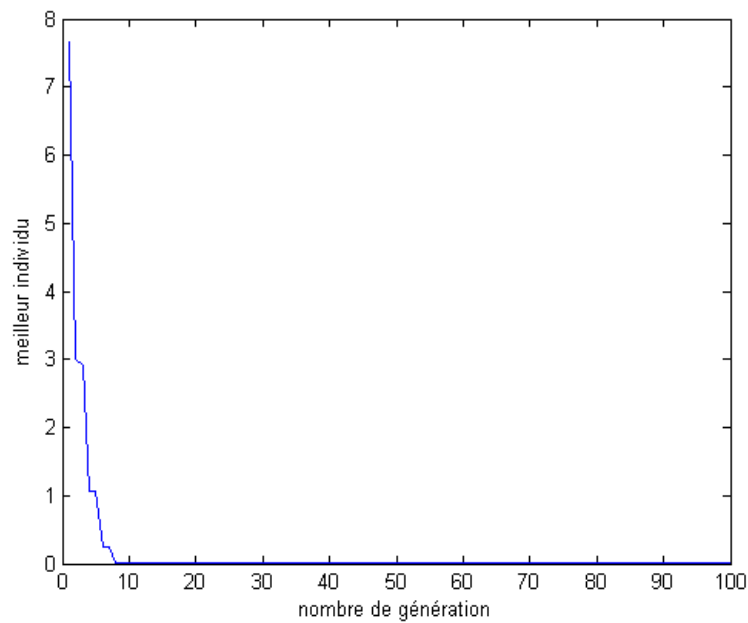


Figure III.6 Caractéristique de convergence SE pour f_2

2. Avec l'ACE

La figure III.7 présente la caractéristique de convergence de cet algorithme

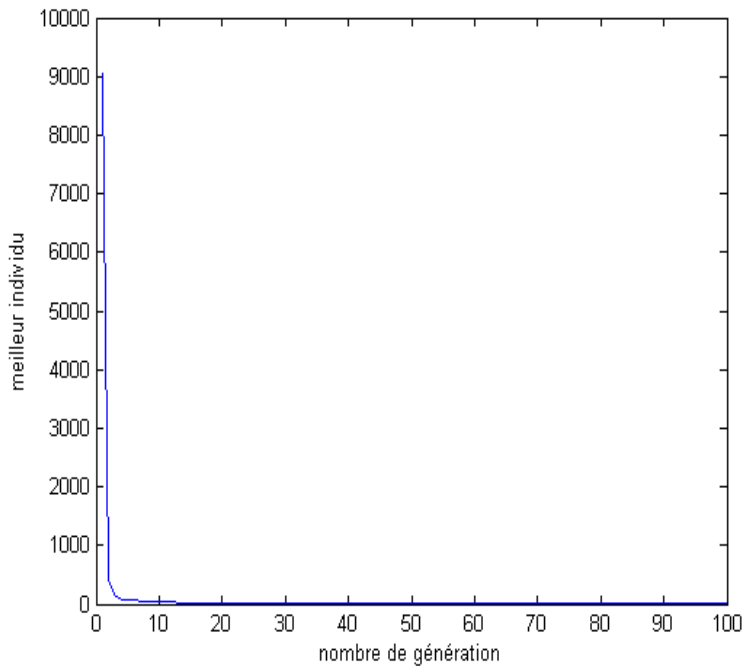


Figure III.7 Caractéristique de convergence ACE Coopératif pour f_2

III.4. 3 Exemple N°3

Dans cet exemple nous utilisons les deux Algorithmes pour optimiser la fonction de Schwefel avec un minimum globale en $x=0$, $f_3(0)=0$, $-500 \leq x \leq 500$. La caractéristique principale de cette fonction est la présence d'optima locaux éloignés de l'optimum global destiné à conduire l'algorithme d'optimisation à une convergence prématuré vers une solution sub-optimale. La difficulté principale de cette fonction est que pour trouver l'optimum global tout en évitant les optima locaux, l'algorithme de recherche doit couvrir l'ensemble de l'espace de recherche, qui est assez conséquent. La forme de cette fonction pour $n = 2$ est donnée par la figure III.8 :

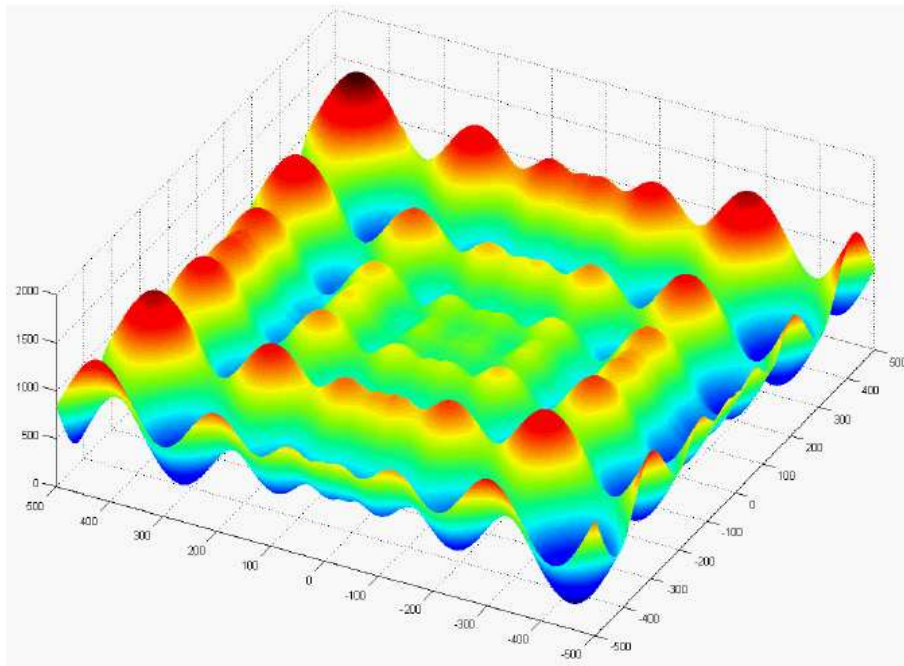


Figure III.8 Forme de f_3 pour $n = 2$

1. Avec la stratégie d'évolution

La figure III.9 présente la caractéristique de convergence de cet algorithme.

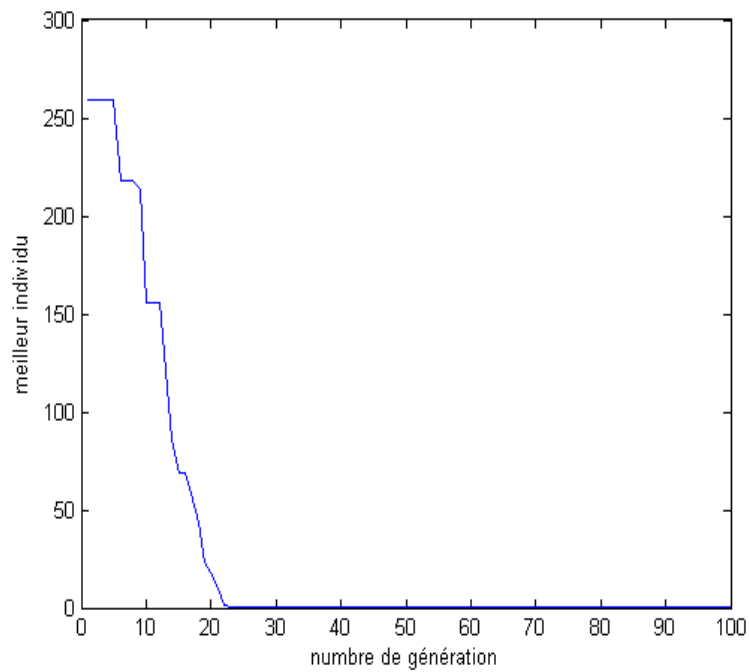


Figure III.9 Caractéristique de convergence SE pour f_3

2. Avec l'ACE

La figure III.10 présente la caractéristique de convergence de cet algorithme

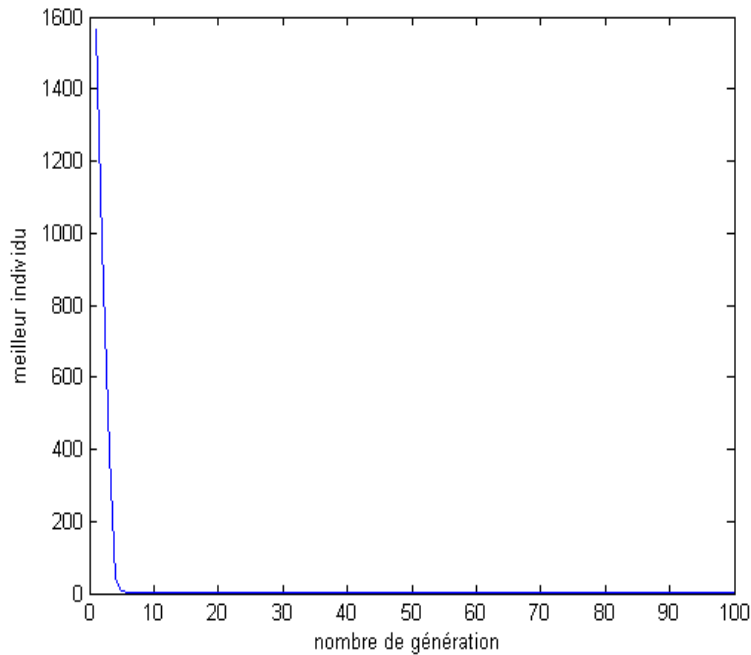


Figure III.10 Caractéristique de convergence ACE pour f_3

Pour les Algorithmes Evolutionnaires nous remarquons que :

- La convergence de l'algorithme vers l'optimal global est assurée quelque soit la fonction à optimiser et la complexité de l'espace de recherche.
- Pour la troisième fonction, l'algorithme n'a pas convergé rapidement à cause de la complexité de la fonction et de l'espace de recherche, la convergence a pris quelques générations de plus.

Pour le cas des algorithmes Co-évolutionnaires, nous obtenons de meilleurs résultats, même pour la troisième fonction où l'algorithme évolutionnaire a montré quelques faiblesses pour converger.

Conclusion

- La Stratégie d'évolution converge vers l'optimum global, mais ses performances se voient limités par la complexité et la taille de l'espace de recherche.
- L'ACE coopératif est plus performant que les Algorithmes Evolutionnaires, en plus il n'est pas perturbé par la taille de l'espace de recherche et le nombre d'optima locaux présents. Il converge plus rapidement et a besoin de moins d'évaluation pour trouver l'optimum global.

Chapitre 4

Modélisations du Marché et Résultats de Simulations

Introduction

Depuis que la dérégulation du marché de l'électricité a été lancée, les différentes structures du marché sont apparues. L'anatomie de la puissance dérégulée sur le marché mondial a fait que le processus de réforme a pris un certain nombre de différentes formes dans plusieurs pays. Les raisons économiques et politiques, dues aux conditions locales, ont menés à l'adoption de différents paradigmes pour les structures du marché. Cependant, il y a une base commune et certaines caractéristiques semblables qui peuvent être trouvées à tous les marchés dérégulés de l'électricité. La base la plus commune des marchés dérégulés est l'aspect concurrentiel du secteur de production. Les compagnies de production (fournisseurs) peuvent prendre des parts sur le marché et vendre leur production et l'autorité de régulation doit garantir un accès juste au réseau à tous les agents du marché [48] [15].

Actuellement, les marchés de l'électricité sont des oligopoles dans lesquels les performances se situent entre une concurrence parfaite et un monopole parfait [49] ; D'où l'importance de l'introduction d'une analyse utilisant le concept de la théorie des jeux. En effet, le caractère des firmes dans ce genre de marché est stratégique : la décision d'une firme est prise en tenant compte de la décision des autres firmes pour maximiser leur profit.

Ces dernières années, différents modèles d'équilibre ont été utilisés dans l'analyse de l'interaction stratégique entre les participants à un marché de l'électricité, y compris les modèles d'oligopole de Cournot, de Bertrand, de Stackelberg, d'équilibre de Supply Function (SFE), et de connivence...Etc. Parmi lesquels, les modèles de Cournot et de SFE sont les modèles les plus intensivement utilisés pour analyser les marchés de l'électricité [50][51].

IV.1 Présentation des modèles d'équilibre

IV.1.1 Approche de Bertrand

Dans le modèle standard de la concurrence de Bertrand, les vendeurs sont identiques, avec des prix et des revenus unitaires constants et aucune contrainte de

capacité de production (ils approvisionnent les consommateurs infiniment en quantité) pour approvisionner le marché sur la base des offres des prix aux consommateurs. Cette forme de concurrence mène inexorablement les vendeurs au prix du coût marginal; une offre des prix au-dessus de coût sera délogée par un autre vendeur puisqu'elle a comme conséquence des bénéfices positifs, et une offre des prix inférieurs aurait comme conséquence des pertes.

On dit souvent à la suite de **Joseph Bertrand**, que l'équilibre-type de ce modèle serait l'équilibre concurrentiel ; mais cela n'est vrai que dans le cas très particulier où les deux entreprises ont un coût marginal constant, le même pour toutes, et des capacités de production illimitées (ou, du moins, pouvant servir toute la demande du bien). En effet, dans ce cas, aucune des entreprises n'a intérêt à augmenter son prix par rapport à l'autre car cela entraînerait la perte de toute sa clientèle. Le prix d'équilibre doit aussi être égal au coût marginal car s'il lui était strictement supérieur, alors chaque entreprise serait incitée à baisser (très légèrement) son prix pour capter la clientèle de l'autre, et il n'y aurait donc pas équilibre.

Mais, en dehors de ce cas très particulier, l'équilibre concurrentiel n'est pas une solution du modèle où les entreprises fixent les prix, tout au moins si on retient les hypothèses habituelles (par exemple le coût marginal croissant). En effet, si cet état se réalisait, alors chaque entreprise serait incitée à s'en écarter par une action unilatérale ; considérant le prix et la quantité offerte par l'autre comme une donnée, elle aurait intérêt à agir comme un monopole avec la demande "restante", qui s'adresse à elle, en augmentant son prix jusqu'à ce que sa recette marginale soit égale au coût marginal. Evidemment, comme les deux entreprises sont incitées à agir dans le même sens, il y aurait un mouvement à la hausse des prix, qui serait toutefois limité par la perte de clientèle qu'il entraînerait [52].

Dans la structure même du modèle de Bertrand, il ne peut pas être appliqué à l'étude du marché de l'électricité car il s'appuie sur l'hypothèse que les producteurs n'ont pas de limite de production et font la concurrence dans les prix quel que soit la demande. Mais dans la réalité des marchés de l'électricité, les producteurs ont toujours une limite de production qu'ils ne peuvent pas dépasser d'où l'incapacité du modèle à représenter le marché de l'électricité. Un autre inconvénient est que le prix du marché

converge rapidement vers le cout marginal, ce qui pose des problèmes aux sociétés concurrentes et n'incite pas les autres à rentrer dans le marché.

IV.1.2 Approche de connivence des prix

Armstrong, Cowan et Vickers (1994) notent également que la nature répétée de l'interaction entre les producteurs qui offrent de l'énergie quotidiennement dans le marché crée un environnement favorable pour la connivence tacite des prix, laquelle peut mener encore à des majorations plus élevées des prix au-dessus des coûts.

- L'interaction est répétée quotidiennement, le prix du marché et les quantités vendues par chaque producteur sont connues par le public, permettant une connaissance des stratégies des agents du marché.
- Les acheteurs et les déclarations de capacité de chaque producteur sont édités et publiquement disponibles, laissant les producteurs surveiller directement le comportement de leurs concurrents, et par conséquent détecter clairement - et punir probablement - des déviations des stratégies collusoires ou coordonnées.

Ces facteurs sembleraient faire la connivence tacite des prix dans les marchés centralisés particulièrement. Cependant, contre cette hypothèse, est le fait que la même information d'offre et de prix soient disponible au régulateur, qui aura clairement intérêt à surveiller le comportement des producteurs contre des comportements collusoires.

IV.1.3 Approche d'Enchère

Von der Fehr et Harbord (1992) (1993) ont modélisé la concurrence des prix dans le marché de l'électricité d'Angleterre et du Pays de Gales. Ils ont démontré que sous l'installation institutionnelle existante, il était susceptible d'avoir un dispatching inefficace et des prix au-dessus de l'évaluation de coût, même en l'absence de la connivence et des contrats à long terme.

IV.2 Modèle de Cournot

Rappelons brièvement que la concurrence à la Cournot est une concurrence par les quantités. Les firmes présentes sur le marché produisent toutes le même bien

homogène et connaissent parfaitement la demande et les capacités de production de leurs concurrentes. Leur nombre est suffisamment faible pour que chacune puisse influencer le prix du marché. Un comportement stratégique devient donc possible. Sur un marché à la Cournot, toutes les firmes ont le même comportement adaptatif, qui consiste à fixer sa production en fonction des productions concurrentes. Ce processus de tâtonnement leur permet d'obtenir une production optimale, c'est-à-dire celle qui maximise leur profit [53].

Cournot a consacré en 1838 cinq chapitres des recherches aux structures de marché; le modèle célèbre de duopole puis d'oligopole se trouve dans son chapitre VII. Dans un duopole, les entreprises maximisent leur profit, chacune de son côté. Elles connaissent la fonction de demande, et chacune fait l'hypothèse que ses décisions ne provoqueront pas de modification dans le comportement de l'autre; ainsi chaque producteur considère que la production de son concurrent restera au niveau qu'il constate (hypothèse de "conjectures nulles"), et ce à chaque moment. Le prix de marché est unique, et solde la production (la demande est toujours égale à l'offre). Pour bien comprendre le déroulement de l'interaction de Cournot et l'aboutissement à l'équilibre du marché, on considère l'exemple suivant qui est un duopole de Cournot [52].

Notons ainsi les variables:

- q_1, q_2 : niveaux de production des firmes 1 et 2; $Q = q_1 + q_2$
- \bar{q}_1, \bar{q}_2 : niveaux de production de 1 et 2 conjecturés respectivement par 2 et 1.
- $C_1(q_1), C_2(q_2)$: les coûts de production des firmes 1 et 2
- $C_{m1}(q_1), C_{m2}(q_2)$: les coûts marginaux des firmes 1 et 2
- $\pi_1(q_1), \pi_2(q_2)$: les profits des firmes 1 et 2
- $p(q_1 + q_2)$: le prix de marché ($p(\cdot)$ est la fonction de demande réciproque)

Le profit de chaque producteur est donné par:

$$\begin{cases} \pi_1(q_1) = q_1 \cdot p(q_1 + \bar{q}_2) - C_1(q_1) \\ \pi_2(q_2) = q_2 \cdot p(\bar{q}_1 + q_2) - C_2(q_2) \end{cases} \quad (\text{IV -1})$$

Les conditions de maximisation indépendante des deux profits sont données par:

$$p(q_1 + \bar{q}_2) + q_1 \frac{dp}{dQ} - C_{m1}(q_1) = 0 \quad (\text{IV-2})$$

$$p(\bar{q}_1 + q_2) + q_2 \frac{dp}{dQ} - C_{m2}(q_2) = 0 \quad (\text{IV-3})$$

Ces deux équations peuvent être considérées comme des fonctions implicites: la première définit q_1 en fonction de \bar{q}_2 , c'est-à-dire qu'elle exprime, pour chaque valeur que peut prendre \bar{q}_2 , la *meilleure réponse* de la firme 1: c'est la **fonction de réaction de 1** ou $q_1 = R_1(\bar{q}_2)$. Il en est de même, en échangeant 1 et 2, de la deuxième équation qui est la **fonction de réaction de 2**, $q_2 = R_2(\bar{q}_1)$. Ces fonctions de réaction sont décroissantes, ce qui signifie que plus une firme s'attend à ce que la production de son concurrent soit élevée, plus sa production optimale est faible.

Les producteurs ainsi définis se trompent en général dans leurs conjectures, parce leur concurrent (concurrents s'il y a plus de deux firmes) modifiera (modifieront) sa (leur) production une fois qu'il aura ajusté la sienne. Mais il est possible de définir une situation dans laquelle les conjectures se révèlent toutes justes: c'est l'*équilibre de Cournot*. L'équilibre de Cournot est un ensemble de décisions de production (q_1^*, q_2^*) telles que [12] :

$$q_1^* = R_1(q_2^*) \quad \text{et} \quad q_2^* = R_2(q_1^*)$$

La figure IV.1 représente graphiquement ce problème.

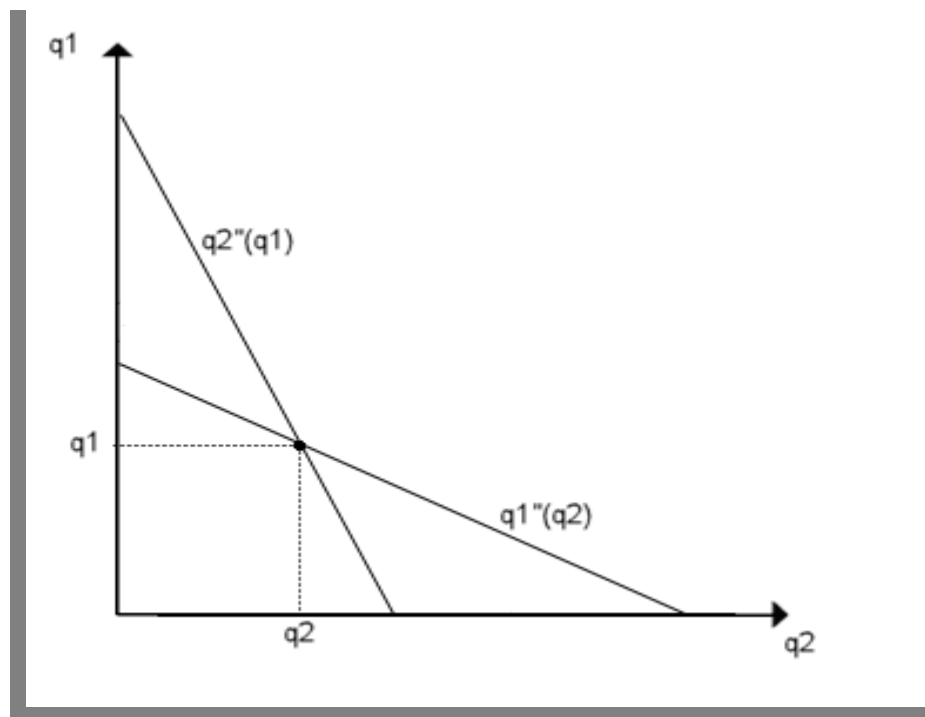


Figure IV.1 Equilibre de Cournot

Dans le contexte d'un marché de l'électricité, le modèle de Cournot semble un point de départ approprié, utilisé sous diverses formes pour analyser des marchés de l'électricité par Andersson et Bergman (1995), Oren (1997) et Hogan (1997). L'autre concept non coopératif de base d'équilibre, l'équilibre de Bertrand, dans lequel les sociétés concurrencent dans les prix, est soutenu par la prétention que n'importe quelle société peut capturer le marché entier par l'évaluation au-dessous des autres et peut augmenter le rendement pour satisfaire une telle demande. Depuis les contraintes significatives des capacités de production sur les marchés de l'électricité, cette prétention n'est plus tenable. A cause de ses raisons, le modèle de Bertrand ne peut être utilisé pour l'analyse d'un marché de l'électricité [53].

Cependant, dans le modèle de Cournot toutes les firmes choisissent leurs quantités à produire simultanément dans le but de maximiser leurs profits en tenant compte des stratégies des autres concurrents dans le marché de l'électricité. Il existe un autre modèle qui se base sur le même concept que celui du modèle de Cournot, c'est-à-dire la compétition en quantité qui est le modèle de Stackelberg. Contrairement au modèle de Cournot où les agents du marché prennent leurs décisions simultanément, dans le

modèle de Stackelberg il n'y a pas de simultanéité, mais une entreprise appelée « leader » prend la décision en premier et puis les autres suivront en fonction de la stratégie du leader [54] [55] [56].

IV.3 Modèle de Fonction d'approvisionnement (SF)

Andersson et Bergman (1995) ont étudié la relation entre le prix d'équilibre et la distribution de nombre et de grandeurs des sociétés sur le marché en utilisant des prétentions de Cournot. Borenstein et autres (1997) avaient l'habitude un modèle de Cournot pour analyser le potentiel pour la puissance du marché au New Jersey (USA). Oren (1997) avait l'habitude d'utiliser le modèle de Cournot pour analyser l'impact des congestions sur le réseau et montrent comment les générateurs peuvent profiter de ces congestions. De même, Hogan (1997) a développé un modèle de Cournot en présence des contraintes de transmission pour analyser le comportement des sociétés dominantes. Borenstein et Bushnell (1999) avaient l'habitude des données concernant les coûts historiques pour simuler la concurrence statique arrogante de Cournot du marché de l'électricité de la Californie. Smeers et Wei (1999) et Hobbs et autres (2002, 2003) ont utilisés la compétition de Cournot pour modeler un marché européen oligopolistique de l'électricité et pour analyser l'inefficacité potentielle de l'évaluation de transmission. Younes et Ilic (1997), Berry et autres (1998), Stoft (1999), Cunningham et autres (2002) et Willems (2002) avaient utilisés également cette approche pour analyser les rapports entre le pouvoir du marché et les contraintes de transmission, par exemple, comment la congestion crée potentiellement les marchés partiels qui pourraient encourager le comportement stratégique. Néanmoins, dans quelques circonstances, par exemple, (des périodes d'une basse demande), Hobbs (1986), Aghion et Bolton (1987), et Wolfram (1998) ont suggéré que les modèles de Bertrand pourraient être une approche appropriée [56] [57].

Tandis que les modèles de Cournot et de Bertrand sont relativement flexibles, ce ne sont pas des méthodes réalistes pour modéliser la concurrence stratégique d'interactions dans la plupart des marchés européens par exemple. Harvey et Hogan (2000) ont argué du fait que la formulation de Cournot a été habituellement justifiée en se basant sur sa convenance analytique plutôt que sa puissance descriptive. Des modèles de Cournot sont basés sur des offres pures de quantité, mais sur la plupart des marchés de l'électricité, les stratégies des sociétés sont des fonctions non

décroissantes réelles de prix en fonction de la quantité. Afin de capturer ce dispositif commun d'architecture du marché de l'électricité, le concept "équilibre de Supply Function" (SFE) a été présenté comme approche alternative pour modéliser l'interaction stratégique. Particulièrement pour l'analyse de la puissance du marché sur des marchés de l'électricité, Kahn (1998) a argué du fait que, alors que la flexibilité de l'approche de Cournot le rendait attrayant à l'analyste, l'approche de SFE était conceptuellement supérieure. Le modèle Supply Function est devenu un outil largement répandu pour étudier l'interaction stratégique des agents dans un marché de l'électricité oligopole qui remplace le modèle de Cournot qui souffre du fait qu'il n'est pas un modèle pratique et qu'il n'y a jamais d'interaction en quantité. Donc, le concept de Supply Function qui se base sur l'octroi des firmes une fonction reliant la quantité donnée à son prix qui est le cas pour le marché de l'électricité. On voit bien que le principe de SF est un principe qui relie le concept de Cournot et de Bertrand entre la concurrence dans les quantités et dans les prix ce qui lui offre cette particularité d'être plus flexible et plus réaliste que les deux autres modèles.

L'approche de SFE a été employée pour un certain nombre d'analyses importantes. Green et Newbery (1992) et Bolle (1992) étaient les premiers à utiliser l'approche d'équilibre de Supply Function sur des marchés de l'électricité. Leur objectif était d'estimer le niveau de la concurrence sur le marché concret britannique de l'électricité. Bohn et al (1999) ont adapté l'approche de fonction d'approvisionnement pour l'analyse de l'échange de puissance de la Californie. Rudkevich et autres (1999) ont également employé l'approche de SFE pour analyser les offres stratégiques et pour essayer de prévoir le comportement commun des participants du marché [58] [59]. Day et autres (2001) ont prolongé l'approche de SFE en présentant l'anticipation des sociétés au sujet du rendement des rivaux (Conjectured Supply Function). Hobbs et Rijkers (2002) ont appliqué un modèle semblable aux marchés du Bénélux, Français et Allemand afin d'analyser l'inefficacité de transmission en Europe. En Europe, quelques analyses également ont été faites récemment en Espagne. Ciarreta et Espinosa (2003), par exemple ont analysé l'exécution de la piscine espagnole en utilisant une approche d'équilibre de fonction d'approvisionnement. Pour mesurer la puissance du marché Ciarreta et Espinosa comparent le comportement des sociétés des grands producteurs et des plus

petits. Ils ont conclu que les grands générateurs exploitaient leur puissance du marché et soumettaient uniformément des courbes d'approvisionnements avec des prix plus élevés que leur repère concurrentiel [56] [60].

IV.4 Formulation du marché à terme

Il y a en générale deux formes de marché, la première est le marché centralisé et la deuxième est le marché bilatéral, la différence entre ses deux structures réside dans la formulation de la fonction de demande et de la fonction d'approvisionnement.

Dans notre travail, nous utilisons le modèle de Cournot et le Modèle de Fonction d'approvisionnement (SF) pour l'analyse de l'équilibre du marché. Dans le jeu de Cournot, les sociétés prennent leurs décisions sur des quantités à produire au même temps. Chaque entreprise se comporte indépendamment pour maximiser son bénéfice sans communication ou coalition avec d'autres agents. Par contre le modèle de SF les stratégies des sociétés ne sont pas dans les quantités seulement mais dans des fonctions de quantités et leurs prix que les agents donnent la quantité et le prix de cette quantité.

Il est bien connu que le jeu de Cournot et le jeu de SF ait un équilibre de Nash, dans lequel chaque société a son bénéfice maximum supposant que d'autres sociétés ont jugé leurs sorties fixées. Ainsi, quand toutes les sociétés atteignent le point d'équilibre, aucun n'a l'incitation pour changer unilatéralement ses sorties. Dans notre cas, nous considérons le marché à terme modélisé par :

$$p = D^{-1}(p) = A - B \sum_{i=1}^{n_g} q_i \quad (\text{IV-4})$$

IV.4.1 Marché centralisé

Sur un marché centralisé, il n'y a aucun contact direct entre les fournisseurs et les consommateurs. L'Opérateur Système Indépendant (ISO) rassemble les offres de puissance qui seront mises en jeu par les participants du marché. Puis des générateurs et les charges sont expédiés de telle manière qui mène à la maximisation du bien-être social et de préserver les contraintes du système. Tous les agents participants au jeu

dans un marché centralisé sont représentés par leurs fonctions d'offres pour les producteurs et de la fonction de demande globale pour la charge (acheteurs) [51] [48].

Supposons maintenant qu'il y a n_g producteurs d'énergie, chacun d'eux a sa fonction de coût suivante:

$$C_i(q_i) = a_i q_i^2 + b_i q_i + c_i \quad i = 1, \dots, n_g \quad (\text{IV-5})$$

Avec :

$$q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max}$$

Là où q_i est la quantité produite par la société i

a_i, b_i et $c_i \geq 0$ sont les coefficients de la fonction de coût.

Et nous supposons qu'il y a n_d consommateurs, chacun d'eux est caractérisé par sa fonction de demande :

$$D_j(p) = D_j^o - e p_j \quad j = 1, \dots, n_d \quad (\text{IV-6})$$

Où :

$D_j(p)$ est la fonction de demande du consommateur j en fonction du prix de l'électricité

P_j est le prix de l'électricité

D_j^o est l'interception de la fonction de demande qui correspond à la valeur pic de la demande.

$e \geq 0$ est l'élasticité contre le prix

Le profit de chaque agent est défini par :

$$\pi_i = p q_i - C_i(q_i) \quad i = 1, \dots, n_g \quad (\text{IV-7})$$

IV.4.2 Marché Bilatéral

Dans le marché bilatéral chaque consommateur est défini par sa fonction de demande inverse. Les agents essayent de maximiser leurs profits en jouant sur la quantité d'énergie à vendre à chaque distributeur.

Le prix que chaque consommateur peut payer pour acquérir une quantité d'énergie donnée est défini par sa fonction de demande inverse :

$$p_j^f = A_j - B_j \sum_{i=1}^{n_g} q_{ij} \quad j = 1, \dots, n_d \quad (\text{IV-8})$$

Le profit de chaque agent est défini par :

$$\pi_i^f = \sum_{j=1}^{n_d} p_j^f q_{ij}^f - c_i \left(\sum_{j=1}^{n_d} q_{ij}^f \right) \quad (\text{IV-9})$$

IV.4.3 Jeu de Cournot

Dans le jeu de Cournot, les sociétés prennent leurs décisions sur des quantités à produire en même temps. Chaque entreprise se comporte indépendamment pour maximiser son bénéfice sans communication ou coalition avec d'autres agents [49].

Le prix d'équilibre est établi quand la demande égalise l'offre :

$$D = \sum_{i=1}^{n_g} q_i \quad (\text{IV-10})$$

Comme on la vu le prix est égal à l'inverse de la fonction de demande donc ; l'expression du prix sera :

$$p = D^{-1}(p) = A - B \sum_{i=1}^{n_g} q_i \quad (\text{IV-11})$$

Et le profit de chaque firme i a pour expression :

$$\pi_i = pq_i - C_i(q_i) \quad i = 1, \dots, n_g \quad (\text{IV-12})$$

Le point d'équilibre est obtenu lorsque la condition suivante sera satisfaite :

$$\begin{aligned} \max (\pi_i(q_i)) \quad \text{for } i = 1, \dots, n_g \\ q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max} \end{aligned}$$

On fait varier la quantité q_i de chaque entreprise jusqu'à ce que chaque firme aura optimisé son profit, et l'équilibre de Nash-Cournot est atteint quand aucun des producteurs n'a intérêt à changer unilatéralement sa stratégie (quantité produite).

IV.4.4 Jeu de Fonction d'Approvisionnement (SF)

Nous reprenons le même modèle utilisé dans [50] qui suppose qu'il y a n_g producteurs sur le marché, et que leur fonction coût est (VI-1), mais le coefficient c_i est nul. Supposons que les règles du marché indiquent que la fonction d'approvisionnement de chaque entreprise s'exprime par:

$$S_i(p) = \frac{1}{2\tilde{a}_i} (p - \tilde{b}_i) \quad i = 1, \dots, n_g \quad (\text{IV-13})$$

Le prix d'équilibre est établi quand la demande égalise l'offre :

$$D(p, t) = \sum_{i=1}^{n_g} S_i(p) \quad (\text{IV-14})$$

Avec :

$$D(p, t) = D_0(t) - ep \quad (\text{IV-15})$$

On voit que le prix n'est plus fonction de la quantité mais de la fonction d'approvisionnement, c'est-à-dire fonction des deux paramètres \tilde{a}_i et \tilde{b}_i .

Les paramètres \tilde{a}_i et \tilde{b}_i sont choisis par chaque firme i de façon que le coefficient $\tilde{a}_i \geq 0$.

Différentes restrictions à la paramétrisation de la fonction d'approvisionnement sont rapportées dans la littérature. Baldick récapitule cette paramétrisation en quatre catégories :

- 1) a - paramétrisation ; où chaque firme peut choisir \tilde{a}_i arbitrairement positive en choisissant au préalable \tilde{b}_i soit égale à b_i .
- 2) b - paramétrisation ; où chaque firme peut choisir \tilde{b}_i arbitrairement positive en choisissant au préalable \tilde{a}_i soit égale à a_i .
- 3) $(a \propto b)$ paramétrisation ; où chaque firme choisit \tilde{a}_i et \tilde{b}_i de telle manière a ce qu'ils ont une relation linéaire fixe, c'est-à-dire on choisit au préalable une constante $K \geq 0$ de telle sorte que $a_i = k \tilde{a}_i$ et $b_i = k \tilde{b}_i$
- 4) (a, b) paramétrisation ; où chaque firme choisit \tilde{a}_i et \tilde{b}_i arbitrairement [51] [52] [58] [62].

Dans le quel le profit de chaque firme i a comme expression :

$$\pi_i = pq_i - C_i(q_i) \quad i = 1, \dots, n_g$$

Le point d'équilibre est obtenu quand la condition suivante sera satisfaite :

$$\max_{q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max}} (\pi_i(q_i)) \quad \text{for} \quad i = 1, \dots, n_g$$

On fait varier les paramètres \tilde{a}_i et \tilde{b}_i de chaque entreprise jusqu'à ce que chaque firme ait optimisé son profit, et l'équilibre de Nash est atteint quand aucun des producteurs n'a intérêt à changer unilatéralement sa stratégie suivant la paramétrisation optée par le producteur [48].

IV.5 Approche

IV.5.1 Théorie des jeux

Un marché oligopole est un marché de concurrence parfaite nécessitant juste une étude d'optimisation de fonctions simples. Dans le cas d'un marché oligopole, les décisions des différents agents dans le marché ont une influence sur le comportement des autres agents et par conséquent une influence sur l'équilibre du marché. D'où l'importance d'une étude stratégique qui se traduit par une analyse mathématique spéciale du marché oligopole faisant appel à la « *Théorie des jeux* ».

Pour les marchés de l'électricité, les ingrédients de base du jeu sont:

- **Jeu** : est un ensemble de règles qui disciplinent l'interaction entre les concurrents.
- **Payoff** : c'est la fonction d'évaluation ou de performance, dans notre cas, c'est la maximisation du profit des firmes.
- **Stratégie** : c'est l'offre d'un agent du marché en terme de quantité ou de prix ou de fonction qui tend à maximiser son **Payoff**.
- **Mouvement** : c'est la solution du problème de maximisation de payoff prise par un concurrent étant données les stratégies des autres agents.
- **équilibre de Nash** : c'est la situation du jeu où aucun des agents n'a intérêt à changer unilatéralement sa stratégie, et une déviation de ce point entraîne automatiquement une perte de performance [49] [63] [64].

Soit un point d'équilibre de Nash (dans le cas d'un jeu symétrique) défini par :

$$p(S_1^*, \dots, S_i^*, \dots, S_n^*) > p(S_1^*, \dots, S_i, \dots, S_n^*) \forall S_i \in S$$

Avec S : l'ensemble des stratégies

Par définition, un point d'équilibre de Nash est un n-tuple S^* de manière à ce que la stratégie de chaque joueur maximise son profit si les stratégies des autres restent inchangées. La stratégie de chaque joueur est optimale face à celles des autres

IV.5.2 Algorithmes Co-évolutionnaires

Ils constituent un outil parfait de simulation pour la théorie des jeux dans lesquels les populations d'individus représentent les firmes ou les agents du marché et les individus des populations représentent les stratégies des différentes firmes, qu'on fait

évoluer à travers un algorithme évolutionnaire dans le quel la fonction d'évaluation (fitness) est le profit que chaque firme tend à maximiser.

Dans notre travail, l'algorithme Co-évolutionnaire Coopératif utilisé est basé sur les Stratégies d'Evolution qui constituent une des principales classes des Algorithmes Evolutionnaires [65].

IV.6 Cas étudiés

IV.6.1 Marché centralisé

Pour valider notre approche et examiner l'efficacité de l'algorithme proposé dans le cas d'équilibre du marché de l'électricité, une étude sur le modèle rapporté par Chen et all dans [50] est traitée. Pour ce faire, nous avons considéré le modèle de Cournot et les paramétrisations « a » et « b » pour le modèle de SF.

Un Algorithme Co-évolutionnaire se basant sur une Stratégie d'évolution (1+m), est utilisé avec les caractéristiques suivantes :

- Taille des parents $m = 1$
- Taille des descendants $L = 5$
- Mutation gaussienne
- Une Sélection déterministe
- Nombre de générations $N_{max} = 200$

Le système se compose de 5 firmes stratégiques évoluant dans le marché de l'électricité de l'Angleterre et des pays de Gales (England &Wals Electricité Market). Le tableau IV.1 donne les coefficients de la fonction de coût de chaque firme.

Tableau IV.1 Coefficients de la fonction Coût

Firm's Cost Function	Firm No. i	a_i [£/(MW) ² h]	b_i (£/MWh)
$C_i(q_i) = a_i q_i^2 + b_i q_i$	1	1.3435	12
	2	2.3075	12
	3	0.8945	8
	4	0.9650	8
	5	2.3075	12

On donne aussi l'élasticité $e = 0.1$ GW/(£/MWh) et l'interception de la fonction de demande $D_o(t)=10+25(1-t)$, $0 \leq t \leq 1$, a $t = 0$, correspond au pic de la demande ; donc $D_o = 35$ GW, d'où la fonction de demande D est :

$$D = 35 - 0.1p \tag{IV-16}$$

$$p = D^{-1}(p) = A - B \sum_{i=1}^{n_g} q_i \tag{IV-17}$$

a) Résultat avec le modèle de Cournot

La compétition dans le modèle de Cournot se fait par le changement de quantité, donc les stratégies des firmes dans le marché est un ensemble de quantités variables et chaque agent entre en interaction avec les autres afin de maximiser son profit.

$$\begin{aligned} \max & (\pi_i(q_i)) \quad \text{for } i = 1, \dots, n_g \\ q_i^{\min} & \leq q_i \leq q_i^{\max} \end{aligned}$$

Avec le profit de chaque firme i donné par :

$$\pi_i = pq_i - C_i(q_i) \quad i = 1, \dots, n_g$$

En utilisant notre Algorithme, les résultats montrés dans la figure IV.2 donnent l'évolution des quantités des 5 firmes en fonction du nombre de générations. Il y a convergence vers une solution optimale qui correspond exactement à celle trouvée dans [50].

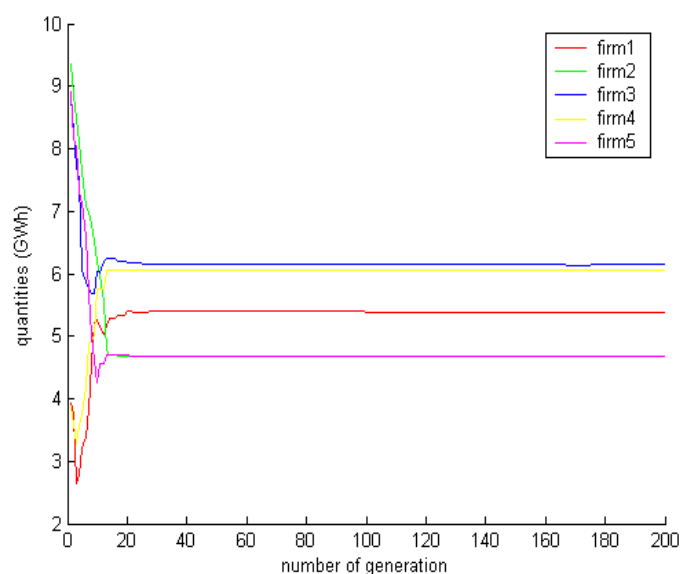


Figure IV.2 Evolution des quantités

b) Résultat avec le modèle de Supply Function

La concurrence dans le modèle de Supply Function se fait par l'introduction d'une fonction qui lie la quantité à son prix. Les agents du marché ne donnent pas une liste de stratégie qui repose sur les quantités mais sur un couple quantité-prix (q, p). Contrairement au modèle de Cournot, dans le modèle de Supply Function, on doit d'abord calculer la quantité ensuite le prix est déduit.

1) a-paramétrisation

Comme précédemment définie, la a- paramétrisation consiste à égaliser le \tilde{b}_i avec le b_i donné dans le tableau IV.1 et on fait varier le coefficient \tilde{a}_i jusqu'à avoir la solution optimale. Ainsi, la stratégie des firmes devient alors l'ensemble des coefficients \tilde{a}_i .

2) b-paramétrisation

La b- paramétrisation consiste à égaliser le \tilde{a}_i avec le a_i donné dans la table IV.1 et on fait varier le coefficient \tilde{b}_i jusqu'à avoir la solution optimale. Ainsi, la stratégie des firmes devient alors l'ensemble des coefficients \tilde{b}_i .

Les résultats montrés dans la figure IV.3 donnent l'évolution des coefficients des 5 firmes en fonction du nombre de génération.

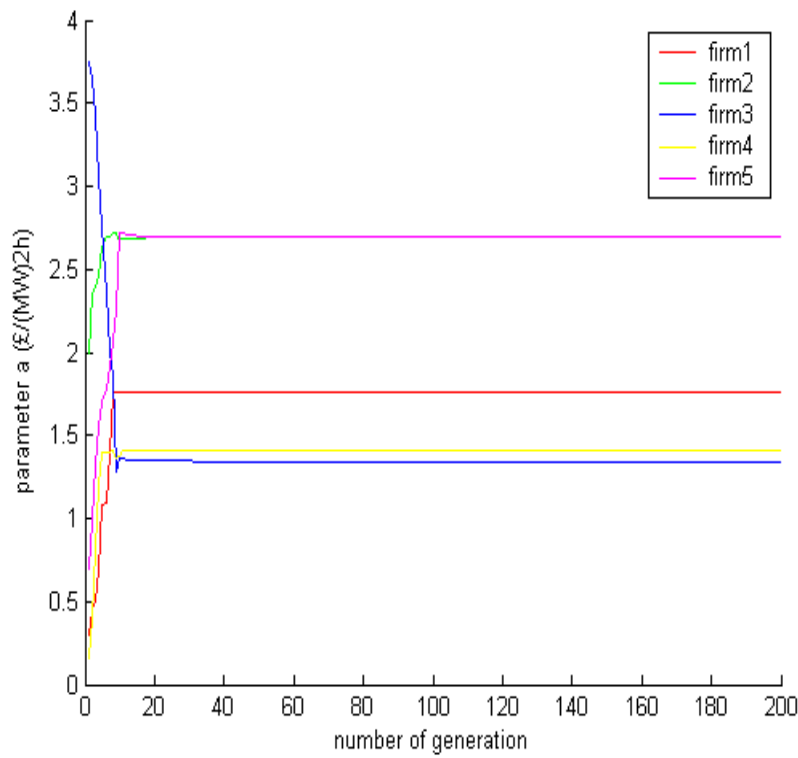


Figure IV.3 L'évolution des paramètres \tilde{a}_i

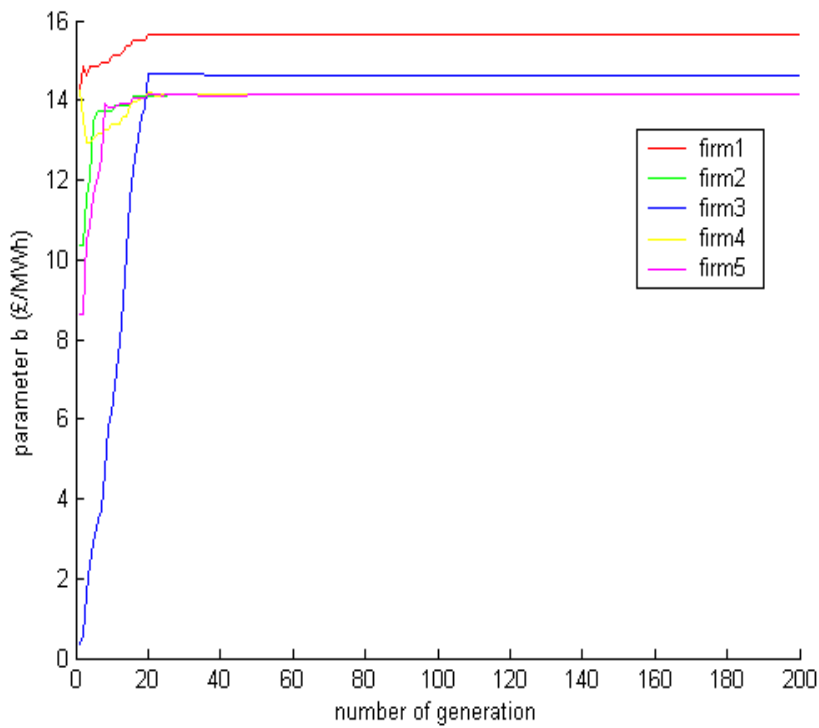


Figure IV.4 L'évolution des paramètres \tilde{b}_i

Nous constatons clairement, d’après les résultats obtenus sur les figures IV.3 et IV.4, que notre algorithme converge bien vers une solution optimale et que cette solution correspond à celle trouvée dans [50]. Nous retrouvons les mêmes quantités et les mêmes coefficients pour les 5 firmes. Les résultats de simulations sont rapportés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 Résultats de simulation

Test Cases	Firm	a_i [£/(MW) ² h]	b_i [£/(MW)h]	q_i [GWh]
Cournot	1	_____	_____	5.390
	2			4.678
	3			6.141
	4			6.068
	5			4.681
a-param	1	1.7608	12	_____
	2	2.6938	12	
	3	1.3449	8	
	4	1.4086	8	
	5	2.6931	12	
b-param	1	1.3435	15.660	_____
	2	2.3075	14.130	
	3	0.8945	14.624	
	4	0.9650	14.141	
	5	2.3075	14.131	

IV.6.2 Marché Bilatéral

Dans cet exemple, nous utilisons un réseau à 03 Nœuds, avec deux producteurs et trois consommateurs:

- Les producteurs sont définis par leurs coûts marginaux :
 - $C_1 = 15 \text{ \$ / MWh}$
 - $C_2 = 20 \text{ \$ / MWh}$
- Les consommateurs sont représentés par leurs fonctions de demande inverse :
 - $D_1^{-1} = 40 - 0.08 q_1$
 - $D_2^{-1} = 40 - 0.08 q_2$
 - $D_3^{-1} = 40 - 0.08 q_3$

a) Résultats avec le Modèle de Cournot sans contraintes

En appliquant notre algorithme, on retrouve l'évolution du profit de chacune des deux firmes sur la figure IV.5. Le tableau IV.3 donne les quantités vendues par chaque firme pour chaque consommateur.

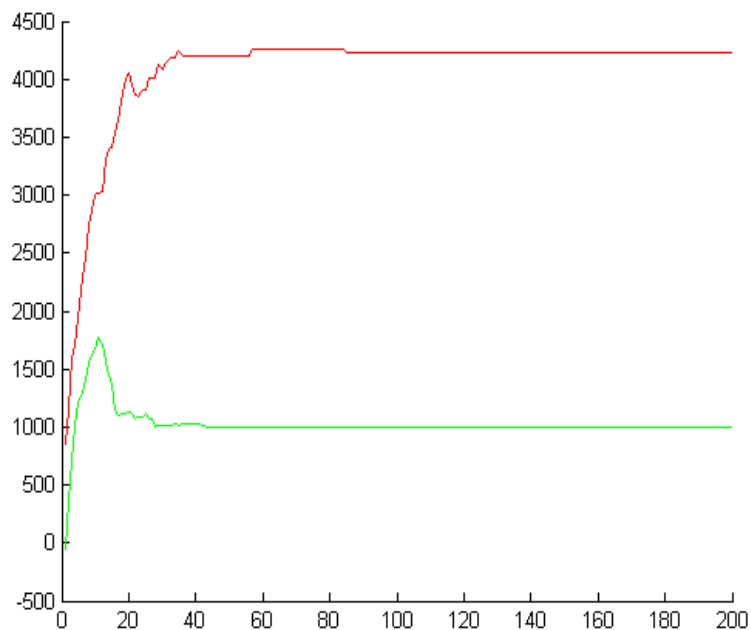


Figure IV.5 Evolution du profit de chaque firme

Tableau IV.3 Quantités vendues par chaque firme pour chaque consommateur.

Quantité vendue par la firme 1 (MWh)			Quantité vendue par la firme2 (MWh)			Production de chaque firme	
S11	S12	S13	S21	S22	S23	Pg1	Pg2
124.2167	124.9598	186.3854	62.8057	62.5341	88.0672	433	200

b) Résultats avec le Modèle de Cournot avec contraintes

Dans le cas présent, nous considérons une limite de transport de 25MW sur la ligne entre les noeuds 1-2, qui a comme expression :

$$\frac{\theta_1 - \theta_2}{x_{11}} \leq P_{12}^{\max} \quad (IV-18)$$

Pour introduire les contraintes de la ligne, nous utilisons une fonction de pénalité, donc le profit de chaque firme est donné par :

$$\pi_{ci} = \pi_i - k(dp > 0) * dp * P_{12}^{\max} \quad (IV-19)$$

Avec :

$$dp = \left| \frac{\theta_1 - \theta_2}{x_{12}} \right| - P_{12}^{\max} \quad (IV-20)$$

En appliquant notre algorithme, on retrouve l'évolution du profit de chacune des deux firmes sur la figure IV.6, le tableau IV.4 donne les quantités vendues par chaque firme pour chaque consommateur.

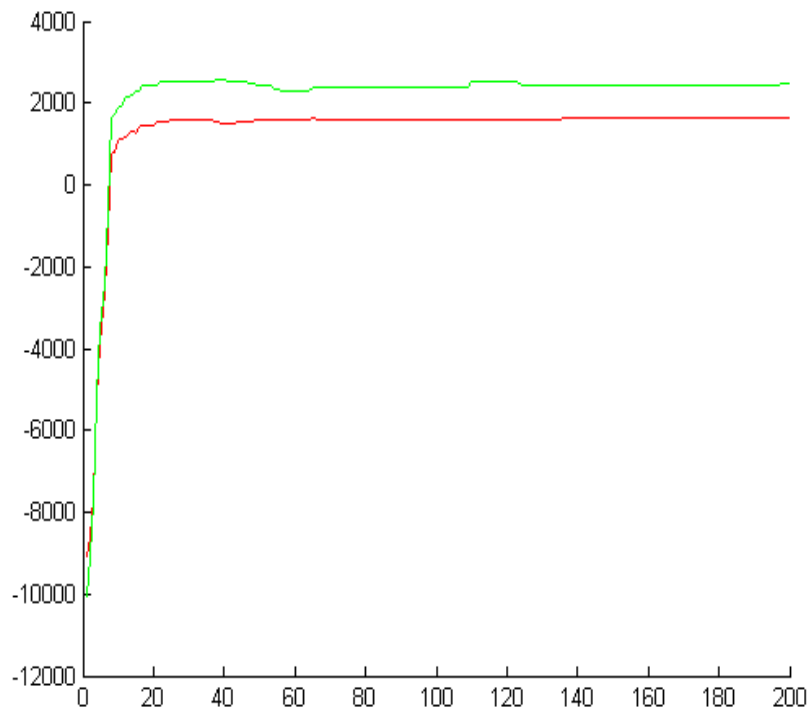


Figure IV.6 Evolution du profit de chaque firme

Tableau IV.4 quantités vendues par chaque firme pour chaque consommateur.

Quantité vendue par la firme 1 (MWh)			Quantité vendue par la firme2 (MWh)			Production de chaque firme	
S11	S12	S13	S21	S22	S23	Pg1	Pg2
101.547	51.2239	10.7924	115.055	100.813	117.241	164	332

D'après les deux figures IV.5 et IV.6, nous remarquons que le profit de la deuxième firme a augmenté dans le cas où les contraintes thermiques des lignes de transport sont considérées. Inversement le profit de la première firme a diminué et cela pourrait s'expliquer par l'exercice du pouvoir du marché de la firme 2 sur la firme 1 à cause des congestions dans les lignes et l'augmentation du prix de l'électricité. Ce qui a limité la production de la firme 1 et empêché de suivre la firme 2 à cause du pouvoir du marché exercé par cette dernière. On peut aussi remarquer que les firmes tentent de changer de stratégies afin d'augmenter le profit mais l'opérateur système empêche la transaction à cause des limites thermiques.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de montrer, à travers les simulations effectuées sur les deux structures du marché considéré, que l'Algorithme Co-évolutionnaire Coopératif converge bien vers une solution. Cette dernière correspond à l'équilibre du marché qui est un équilibre Cournot-Nash dans lequel, si une des firmes change sa stratégie elle voit son profit diminué. Ainsi, aucune compagnie n'a intérêt à dévier unilatéralement de ce point.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons présenté une nouvelle approche de modélisation du marché de l'électricité sous sa forme dérégulée. Les différentes structures du marché ont été développées aussi bien du point de vue relation entre les agents que du point de vue durée de leur contrat financier.

Nous avons aussi montré qu'une des caractéristiques les plus communes aux marchés dérégulés est l'ouverture du secteur de production à la concurrence. Ce qui leur confère la particularité d'être des oligopoles, à cause du nombre restreint de concurrents dans le marché qui tendent à maximiser leur profit. Pour ce faire, une analyse avec la théorie des jeux permet d'obtenir le point d'équilibre du marché pour lequel toutes les sociétés maximisent leurs profits.

Nous avons formulé le problème d'optimisation dans lequel nous avons opté pour les algorithmes Evolutionnaires. Ces derniers ont montré leur efficacité dans ce domaine. Nous avons élaboré un Algorithme Co-évolutionnaire Coopératif à base de stratégie d'évolution qui nous a permis d'atteindre nos objectifs.

D'une part, notre approche nous a permis de simuler les interactions stratégiques des firmes dans le marché à terme avec les deux structures : Centralisé et Bilatéral en utilisant les deux modèles d'interaction oligopolistique : Cournot et SF. Les résultats obtenus montrent que notre algorithme converge vers le point d'équilibre du marché qui est par définition un équilibre Nash-Cournot pour le quel aucune firme n'a intérêt de dévier de sa stratégie unilatéralement.

D'autre part, nous avons montré que les Algorithmes Co-évolutionnaires présentent des capacités remarquables dans le domaine d'optimisation et que les Stratégies d'Evolution sont un très bon algorithme de base pour les Algorithmes Co-évolutionnaires, conçus à l'origine comme une extension des Algorithmes Génétiques.

Bibliographie

Bibliographies

[1] Georgios Stamtzis: "Power transmission cost calculation in deregulated electricity market" The present research work has been published with the financial support of DAAD(German Academic Exchange Service)03. Dezember 2003.pp2-10

[2] Robert Priddle Executive Director: « Electricity Market Reform an IEA Handbook » International Energy Agency.pp19-25

[3] Tooraj Jamasb, Michael Pollitt: "Electricity Market Reform in the European Union: Review of Progress toward Liberalization & Integration" Updated 24 March 2005.pp9-15

[4] Carl Blumstein, L.S. Friedman, and R.J. Green: « The History of Electricity Restructuring in California » This paper is part of the Center for the Study of Energy Markets (CSEM) Working Paper Series.pp4-15

[5] Catherine Wolfram. UC Berkeley, NBER and UCEI: « The Efficiency of Electricity Generation in the U.S. After Restructuring » June 2003. This paper is part of the Center for the Study of Energy Markets (CSEM) Working Paper Series.pp4-6

[6] James B. Bushnell, Erin T. Mansur, and Celeste Saravia : « Vertical Arrangements, Market Structure, and Competition: An Analysis of Restructured U.S. Electricity Markets » February 15, 2005. This paper is part of the Center for the Study of Energy Markets (CSEM) Working Paper Series.pp1-3

[7] Marie-Anne Plagnet : L'ouverture à la Concurrence de L'industrie Electrique : Le Rôle de la Politique de la Concurrence et des Mesures Corrective. Thèse Docteur de l'Ecole des Mines de Paris 28 Septembre 2005.pp11-53

[8]Loi Lei Lai:« Power System Restructuring and Deregulation: Trading, Performance and Information Technology ». John Wiley & Sons, LTD, Chichester. New York.pp50-70

[9] Karine Chakir, Economiste: « La dérégulation du marché européen de l'électricité : motivations, enjeux et modalités ».

[11] Afzal S_ Siddiqui: « Price Elastic Demand in Deregulated Electricity Markets » Environmental Energy Technologies Division Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley California 94720. May2003. Pp1-5

[12] Raquel Garc-Bertrand and Antonio J. Conejo : « ElectricityMarket Equilibrium Model withConstraints Involving Prices » International Conference on Mathematical and Statistical Modeling in Honor of Enrique Castillo. June 28-30, 2006.

[13] Mikael Amelin: « On Monte Carlo Simulation and Analysis of Electricity Markets » Doctoral Thesis Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering, Stockholm 2004.pp13-25

[14] Ahmed-Amine Lajdici, M. BOUDOUR: « Computing Electricity Market

Equilibrium using Coevolutionary Algorithms Considering Transmission Constraints» Accepted on SSD Conference 2008.

[15] A.A. LADJICI; M. BOUDOUR: « Nash Cournot Equilibrium of a Deregulated Market using Competitive Coevolutionary Algorithm » ICEEE08, Laghouat, Algeria.

[16] Nils-Henrik von der FEHR, David HARBORD: « Competition in Electricity Spot Markets Economic Theory and International Experience » Department of Economics University of Oslo and Market Analysis Ltd Oxford.pp23-35

[17] WILLIAM W. HOGAN: « Competitive Electricity Market Design: A Wholesale Primer » December 17, 1998 Center for Business and Government John F. Kennedy School of Government Harvard University Cambridge, Massachusetts 02138.pp2-22

[18] WILLIAM W. HOGAN: « A Competitive Electricity Market Model» Massachusetts 02138 Draft October 9, 1993 (Prepared for the Harvard Electricity Policy Group).pp16-21

[19] Sophie Meritet, : « L'émergence de pouvoir de marché dans les marchés électriques : le cas des Etats-Unis » Université Paris IV-Dauphine, Place du Maréchal de Lattre de Tassigny, 75775 Paris Cedex 16, France. pp4

[20] Severin Borenstein, James Bushnell, and Christopher R. Knittel: « Market Power in Electricity Markets: Beyond Concentration Measures » working papers POWER PWP-059r.February 1999. pp7-24

[21] Wikipédia from Wikipedia the free online encyclopedia: www.wikipedia.org

[22] Rachid bendib:" Microéconomie : Traitement Mathématique".L'office des publications universitaires.

[23] Encarta Encyclopédie universelle.

[24] S. Djari, Professeur à l'université d'Alger: "Théorie microéconomie: Aide mémoire" msd edition Hdra, Alger 2006.

[25] Bernard Dupont et Arnaud Rys:" Introduction à la Microéconomie" Edition Arnaud Colin, Paris 1993.

[26] Michel Glais: " Microéconomie" Edition Economica 1975.

[27] Christian Biales, Professeur: " La Demande : Analyse Microéconomique Appliquée".

[28] Robert L.Heilbroner : " Comprendre La Microéconomie"traduit de l'anglais vers le français Michel Glais. Edition Economica nouveau tirage 1976.

[29] Economie et société : "La concurrence imparfaite : le duopole". www. Economie et société.com.

[30] www.google.com : "Le Talon D'Achille De La Théorie Des Jeux "cours en format pdf.

[31] Vanacker. Stéphane: " Quelques Résultats Et Applications Surprenants De La Théorie Des Jeux". Etude Bibliographique Ecoles des Mines de Douai Promotion 2003.

[32] Thiery.Pénard: "La Théorie Des jeux Et Les Outils D'analyse Des comportements Stratégiques" Université De Renne 1, CREM, Octobre 2004.

[33] Amazon livre : "Les jeux non-coopératifs avec information complète" Deuxieme Partie, Equilibre de Nash 1951.

[34] Theodore L. Turocy Texas A&M University; Bernhard von Stengel London School of Economics: "Game Theory" CDAM Research Report LSE-CDAM-2001-09 October 8, 2001.

[35] Lucie Ménager et Olivier Tercieux : « Fondements épistémiques de concepts d'équilibre en théorie des jeux » 17 janvier 2006, EUREQua,

[36] Saadi Leila: "Optimisation Multiobjectifs par Programmation Génétique" pour l'obtention du grade de magister, Université de Batna 2007.pp39

[37] Kamal Abboud: " Algorithmes Evolutionnaires Assistés par des Méthodes D'apprentissage en Grandes Dimensions". Phd 2004 .pp19-28

[38] Ladjici Ahmed Amine: "Calcul Evolutionnaire: Application sur l'Optimisation de la Planification de la Puissance Réactive". Pour l'obtention du grade de magister, Ecole National Polytechnique d'Alger, 2005. pp1-50

[39] Anne Spalanzani: " Algorithmes Evolutionnaires pour l'Etude de la Robustesse des Systèmes de Reconnaissance Automatique de la Parole". Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'Université Joseph Fourier - Grenoble I (Spécialité Informatique Systèmes et Communication) 1999. pp27-39

[40] Nicolas Godzik: " Approches Evolutionnaires pour la Robotique Modulaire et Anticipatoire". Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur en Sciences de l'Université Paris-Sud - Paris XI (spécialité Informatique) 2005 pp39-45

[41] Ladjici Ahmed Amine : « Algorithmes Co évolutionnaires Coopératifs Application sur l'Optimisation » Laboratoire des Systèmes Electriques Industriels Département d'Electrotechnique USTHB 05/2007 pp 3-14

[42] R. Paul Wiegand,: " An Analysis of Cooperative Coevolutionary Algorithms A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy at George Mason University 2003 pp1-33.

[43] Sevan Gregory Ficici:" Solution Concepts in Coevolutionary Algorithms" A Dissertation Presented to the Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Department of Computer Science Jordan B. Pollack, Advisor In

Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy, 2004 pp1-31.

[44] Olga Roudenko: " Application des Algorithmes Evolutionnaires aux Problèmes d'Optimisation Multi-Objectif avec Contraintes". Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur en Mathématique. 2004.

[45] Franciszek Seredynski, Albert Y. Zomaya, and Pascal Bouvry : "Function Optimization with Coevolutionary Algorithms". Polish -Japanese Institute of Information Technologies, Koszykowa 86, 02-008 Warsaw, Poland

[46] Hatem Hamda: « Algorithmes Evolutionnaires pour l'Optimisation Topologique de Formes » Phd.

[47] Mitchell A. Potter and Kenneth A. De Jong:" A Cooperative Coevolutionary Approach to Function Optimisation". Published in the Third Parallel Problem Solving from Nature, Jerusalem, Isreal, pp-249-257.

[48]: A.A. LADJICI; M. BOUDOUR: «Supply Function Equilibrium of a Deregulated Electricity Market using Competitive Coevolutionary Algorithms » Electrimax, Quebec, Canada.

[49] E. Bompard, Yuchao Ma, E. Ragazzi : « Micro-economic Analysis of the Physical Constrained Market : Game theory Application to Competitive Electricity Markets » ASI/B7-310/98/679-026ECLÉE -Turin.

[50] H. Chen, K. P. Wong, , X. Wang, , C. Y. Chung: « A Coevolutionary Approach to Modeling Oligopolistic Electricity Markets ».0-7803-9156-X/05 2005IEEE.

[51] H. Chen, K. P. Wong, X. Wang, C. Y. Chung, : « A Coevolutionary Approach to Analyzing Supply Function Equilibrium Model ». IEEE transaction on power system 0885-8950/ 2006IEEE.

[52] Economie et Société rubrique en ligne: « La concurrence imparfaite : le duopole» Bernard Guerrien "La concurrence imparfaite" n°254 des Cahiers français pages 32 à 4. jeudi 9 mars 2006.

[53] Severin Borenstein, James Bushnell, and Christopher R. Knittel: « Market Power in Electricity Markets: Beyond Concentration Measures » working papers POWER PWP-059r. February 1999.

[54] Tao Li and Mohammad Shahidehpour and Ali Keyhani,: « Market Power Analysis in Electricity Market Using Supply Function Equilibrium Model » IMA Journal of Management Mathematics (2004) 15,339-354.

[55] Christopher J. Day, Benjamin F. Hobbs, and Jong-Shi Pang: « Oligopolistic Competition in Power Networks: A Conjectured Supply Function Approach ». Working papers POWER PWP090r. February 2002.

[56] François Boisseleau, Tarjei Kristiansen, Konstantin Petrov, Wim van der Veen : «A Supply Function Equilibrium Model with Forward Contracts – An Application to Wholesale Electricity Markets ».

[57] Ross Baldick, Ryan Grant, and Edward Kahn :« Linear Supply Function Equilibrium: Generalizations, Application, and Limitations ». Working papers POWER PWP078r. August, 2000.

[58] Ramteen Sioshansi, Shmuel Oren :« How Good are Supply Function Equilibrium Models: An Empirical Analysis of the ERCOT Balancing Market » Berkeley, CA 94720

[59] Talat S. Genc & Stanley S. Reynolds: « Supply Function Equilibria with Pivotal Electricity Suppliers»Department of Economics, University of Guelph, Ontario, Canada N1G 2W1. December 2005.

[60] Ross Baldick and William Hogan:« Capacity Constrained Supply Function Equilibrium Models of Electricity Markets: Stability, Non-decreasing constraints, and Function Space Iterations » . Working papers POWER PWP089r. December, 2001 (Revised August 2002).

[62]Hui Niu, Member, IEEE, Ross Baldick, Senior Member, IEEE, and Guidong Zhu: «Supply Function Equilibrium Bidding Strategies With Fixed Forward Contracts » IEEE transactions on power systems, vol. 20, And N °. 4, NOVEMBER 2005.

[63] Kee Bo Sim, Dong- Wook Lee, and Ji-Yoon Kim:« Game Theory Based Coevolutionary Algorithm: A New Computational Coevolutionary Approach ». International Journal of Control, Automation, and System, vol 2 , n°4,pp.463-474, December 2004..

[64] Javier Contreras,. Matthias Klusch and Jacek B. Krawczyk: «Numerical Solutions to Nash-Cournot Equilibria in Coupled Constraint Electricity Markets » IEEE transactions on power systems, vol. 19, And N °. 1, February 2004.

[65] A.TIGUERCHA, A.A. LADJICI : «Algorithmes Coévolutionnaires Coopératifs appliqués à l'Optimisation Multi-Objectifs» ICEEE08, Laghouat, Algeria.