

(

**« A game-theoretic model for generation capacity adequacy in electricity markets: A comparison between different investment incentive mechanisms »**

Khalfallah Mohamed Haikel  
GATE (Groupe d'Analyse et de Théorie Economique)  
University of Lyon 2 (France)

# Introduction:

## Crise Californie

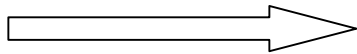
- ❖ Dérégulation :=====> Juin 2000: Prix d'électricité atteint un niveau historique
  
- ❖ Raisons de la crise:
  - ✓ Croissance très forte de la consommation
  - ✓ Absence de construction de nouvelles centrales
  - ✓ Pouvoir de marché
  
- ❖ L'échec de l'energy-only market:
  - Incertitudes, aversion aux risques des investisseurs, demande inflexible
  - Market power, manipulations des prix
  - Missing Money

## Introduction:

# Fiabilité du système électrique dans le long terme

### ❖ Solutions:

- Engagement de production (ex ante)..... ↓ Pouvoir de marché
- Garantir le niveau d'adéquation future (demande de pointe future+ réserve)
- Fournir les signaux nécessaires: revenus additionnelles et stables (demande de pointe, ↓incertitudes )



Mécanismes d'incitations aux investissements

## **Introduction:**

# **Mécanismes d'incitations aux investissements (Arriaga (2001), Oren (2003))**

## **Non-market mechanisms**

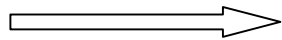
- ❖ Capacity payments:
  - Paiement supplémentaire / Capacité existante (période de pointe)
  - Pas d'engagement
  
- ❖ Achat des unités de pointes par le SO:
  - Interventionniste

# Introduction:

## Market-based mechanisms

### ❖ **Marchés de capacités à terme:**

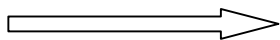
- Enchère **de capacité** (au minimum une année avant le temps réel), offre (prime, capacité), achat (demande de pointe future + marge)
- Engagement de production
- Remboursement des rentes infra-marginales : Périodes de tension(Pointe)  
quand l'engagement devient contraignant.



**Price cap endogène/incertain**

### ❖ **Options de fiabilité: (Call Option)**

- Enchère **d'énergie** (au minimum une année avant le temps réel), offre (prime, quantité ), achat (demande de pointe future + marge)
- Engagement de production
- Strike price fixé au moment de l'enchère: SO exerce son option si  $P > S$



**Price cap exogène/certain**

## Introduction:

# Marchés de capacités / Options de fiabilité

### Marchés de capacités

Enchère capacité  
Q=demande pointe + marge  
Offre/générateur: Prime/Capacité  
Incertitude: Demande et prix futurs

Période de tension  
Obligation d'offrir au marché  
Pénalité / sous-offre  
Paielement=  $P - Rente$

Etape mécanisme

t-1

Etape marché

t

Enchère énergie  
Q=demande pointe + marge  
Offre/générateur: Prime/quantité  
Incertitude: Demande et prix futurs

Si  $P > S$ : SO exerce son option  
Obligation d'offrir au marché  
Pénalité / sous-offre  
Paielement=  $\min(S, P)$

### Options de fiabilité

## Littérature:

### Mécanismes d'incitations aux investissements

- ❖ Etudes qualitatives des mécanismes
  - Arriaga (2001)
  - Oren (2003)
  - Joskow (2006): Missing money problem
  
- ❖ Modélisations des mécanismes d'incitations aux investissements:
  - Ford (1999): intérêt de « capacity payment ».....Réduire les cycles de constructions et les périodes de sous productions.
  - Botterud (2003), Botterud et al. (2005): Programmation dynamique stochastique, comparaison entre Subventions et « Dynamics Capacity payments »



## Littérature:

### Investissements dans le long terme /Concurrence

- ❖ Puneau et Murto (2003): investissement dans le LT, incertitude/demande, concurrence oligopolistique, Mixed complementarity problem, Open-Loop
- ❖ Chuang (2003): Generating expansion planning, investissement, capacité de réserve.
- ❖ Ventoza et al (2002): sans incertitude, 2 approches, MCP et MPEC

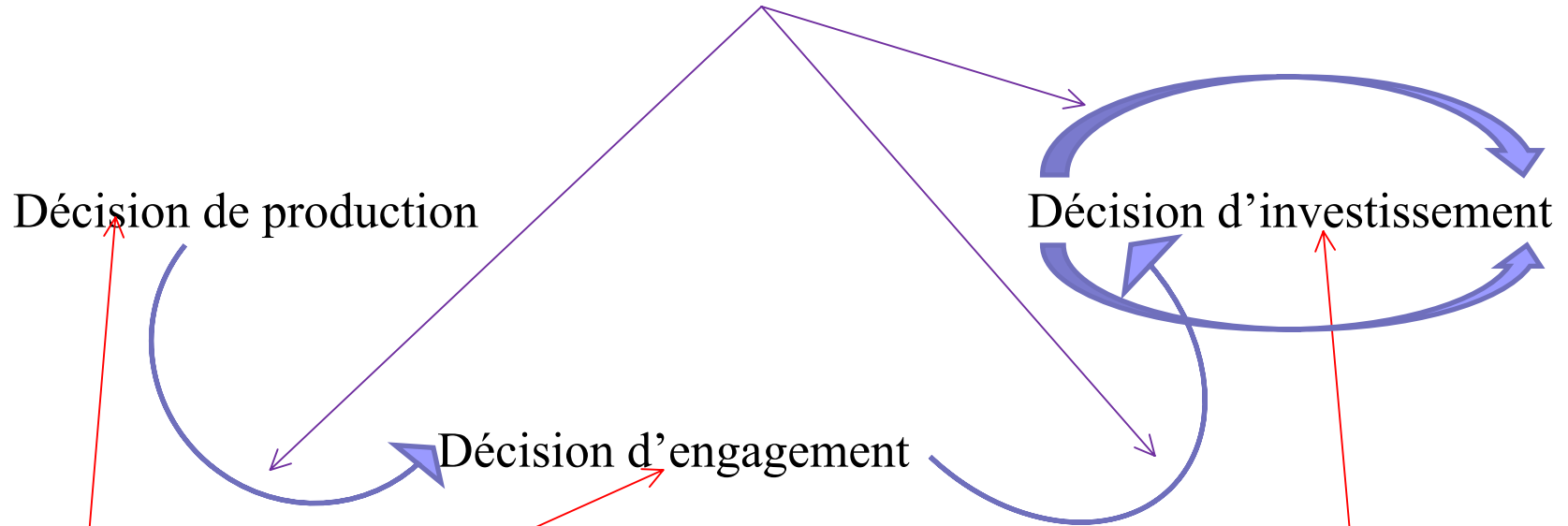


## Objectives du papier

- ✓ Une analyse comparée entre les options de fiabilités, marchés de capacités, paiements de capacités et l'All-Market.
- ✓ L'impact de chaque mécanisme sur:
  - Les incitations aux investissements
  - Les prix d'énergie
  - L'adéquation des capacités de production (marge de sécurité)
  - Manipulations des prix
- ✓ Une analyse de sensibilité:
  - La structure concurrentielle: Oligopole, Duopole, Monopole
  - Les paramètres de mécanismes
  - Comparaison Open loop / Closed loop

# Méthode

## Stochastic dynamic programming



Mixed complementarity problem

Nash en choix séquentielle

# Hypothèses générales

- ❖ 16 périodes
- ❖ 3 saisons (Base, semi-base et pointe)
- ❖ 3 producteurs spécialisés
- ❖ 3 stages: OF et MC
- ❖ 2 stages: CP et All-market
- ❖ Incertitude/Demande: Chaîne de Markov

# Hypothèses: Options de fiabilités et Marchés de capacités

## ❖ Stage investissement:

- Choix discret /période
- Délai de construction
- Nash en choix séquentiels

## ❖ Stage engagement:

- Enchère à t-1 de la production
- Quantité demandée = demande de pointe maximale anticipée
- Strike price: exogène (OF)
- Price cap: endogène =  $C_m$  de l'unité marginale (MC)
- Offre: Quantité / Prix (prime marginale) =====> Concurrence en quantité
- fonction de demande ce capacité (MC type 2)

## ❖ Stage production:

- Décision / saison
- En fonction de l'engagement et de la capacité installée
- Concurrence en quantité

## Modèle A: Options de fiabilité

- Maximisation du profit total espéré: c (générateur), t (période), s (saison) et i (scénario)

$$\max_{u_{c,t,i}, e_{c,t,i}, q_{c,t,s,i}} \sum_t \sum_s \sum_i E_w(\text{Profit}_{c,t,s,i})$$

Sous contraintes,

$$u_{c,t,i} = K_{c,t,i} - K_{c,t-cd,i}$$

contrainte sur l'investissement (délai de construction)

$$\sum_c e_{c,t,i} \leq Q_{s,t,i}$$

quantité engagée contrainte par la capacité installée

$$\sum_c q_{c,t,i,s} \leq D_{s,t,i}$$

quantité produite / saison

$$q_{c,t,i,s} \leq K_{c,t,i}$$

production totale inférieure ou égale à la demande

$$e_{c,t,i} \leq K_{c,t,i}$$

quantités acceptées dans l'enchère

# Modèle A: Options de fiabilité

## Marché d'énergie

Saison base et semi-base

$$\max_{q_{c,t,i,s}} (P_{t,i,s} - CV_{c,i,s}) \cdot q_{c,t,i,s} \cdot L_s$$

Avec,

$$P_{t,i,s} = a_s + b_s \cdot (D_{t,i,s} - \sum_c q_{c,t,i,s})$$

Prix d'énergie

$$CV_{c,i,s} = c_c + d_c \cdot q_{c,t,i,s}$$

Coût variable de production

Sous contraintes,

$$\sum_c q_{c,t,i,s} \leq D_{s,t,i}$$

$$q_{c,t,i,s} \leq K_{c,t,i}$$

## Saison Pointe

$$\max_{q_{1,c,t,i}, q_{2,c,t,i}} L_3 \cdot (S_{t-1,i^*} - CV_{c,t,i}) \cdot q_{1,c,t,i} + L_3 \cdot (P_{t,i} - CV_{c,t,i}) \cdot q_{2,c,t,i} - Pen \cdot (e_{c,t-1,i^*} - q_{1,c,t,i}) \cdot (D_{t,i} - \sum_c q_{1,c,t,i})$$

Avec,

$q_{1,c,t,i}$

Quantité produite issue de l'engagement

$q_{2,c,t,i}$

Quantité produite supplémentaire

Pen

Niveau de pénalité fixe

Sous contraintes,

$$q_{1,c,t,i} \leq e_{c,t-1,i^*}$$

Contrainte sur l'engagement du producteur à t-1

$$q_{1,c,t,i,s} + q_{2,c,t,i} \leq K_{c,t,i}$$

La quantité totale produite de c ne doit pas dépasser sa capacité installée

$$q_{2,c,t,i} \cdot (e_{c,t-1,i^*} - q_{1,c,t,i}) = 0$$

$$\sum_c q_{c,t,i,s} \leq D_{t,i,s}$$

- ❖ Résolution: Mixed complementarity problem
- ❖ Variational inequality (harker 1991) =====> Variable duale de la contrainte sur la génération totale est identique pour les 3 générateurs: Unicité de l'équilibre.

- ❖ Si Pénalité < Cm,  $\mathbf{q}_{1,c,t,i} = 0$  Et  $\mathbf{q}_{2,c,t,i} = 0$

- ❖ Si Pénalité > Cm,  $\sum_c \mathbf{e}_{c,t-1,i^*,s} \leq \mathbf{D}_{t,i,s}$

$$\mathbf{q}_{1,c,t,i} = \mathbf{e}_{c,t-1,i^*,s} \quad \text{et} \quad \mathbf{q}_{2,c,t,i} \geq 0$$

- ❖ Si Pénalité > Cm,  $\sum_c \mathbf{e}_{c,t-1,i^*,s} > \mathbf{D}_{t,i,s}$

$$\mathbf{q}_{1,c,t,i} = \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot \mathbf{e}_{c,t-1,i^*,s} + \mathbf{c} \cdot (\mathbf{e}'_{c',t-1,i^*,s}) \quad \text{et} \quad \mathbf{q}_{2,c,t,i} = 0$$



# Modèle A: Options de fiabilité

## Enchère énergie

$$\max_{e_{c,t,i}} \text{Prim}_{\text{opt},t,i} \cdot e_{c,t,i} + E_w(\text{Prof}_{c,t+1,i'}(e_{c,t,i}, e_{c',t,i}))$$

Sous contraintes,

$$e_{c,t,i} \leq K_{c,t,i}$$

$$e_{c,t,i} \leq \{Q_{t,i}, Q_{t,i} - e_{c',t,i}\}$$

Avec,

$\text{Prim}_{\text{opt},t,i}$  Prime demandée par la dernière unité acceptée

$$\text{Prim}_{c,t,i} = \max \left[ E(P_{t+1,i'}) - S_{t,i}; \underbrace{(E(C_{c,t+1,i'} - S_{t,i} \cdot L_3 - P_{1,t+1,i'} \cdot L_1 - P_{2,t+1,i'} \cdot L_2))}_{\text{Missing Money}} \right]$$

Missing Money

# Prix de l'enchère

$$\text{Prim}_{\text{opt},t,i} = \text{argmin} \text{Prim}_{\text{opt},t,i} \cdot Q_{\text{acp},t,i}$$

Sous contraintes,

$$(\text{Prim}_{\text{opt},t,i} - \text{Prim}_{c,t,i}) \cdot e_{c,t,i} \geq 0 \quad \text{Pour tout } c$$

Et

$$\min_{Q_{\text{acp},t,i}} Q_{t,i} - Q_{\text{acp},t,i}$$



□□□□, □□□□ □□□□ et □□□□ □□□□

# Modèle A: Options de fiabilité

## Décision d'investissement

- ❖ Nash en stratégies extensives
- ❖ Maximisation de la fonction de Bellman

$$\max_{u_{c,t,i}} E \left( \sum_t^{t+cd-1} (\text{Profit}_{c,f,i'}(K_{c,t}) - \text{Invs. cost}) + E( J^*_{c,t+cd}(K_{c,t} + u_{c,t,i})) \right)$$

**Avec,**

**Cd** Délai de construction

**J<sup>\*</sup><sub>c,t+cd</sub>** Profit optimal à t+cd

**K<sub>c,t</sub>** Niveau de capacité à t

**t ≤ f ≤ t + cd - 1**

## Modèle B: Marchés de capacités à terme

### ❖ Modèle B1: Mécanisme avec enchère:

Modélisation identique que les options de fiabilité pour les trois stages de décisions sauf:

- Strike price remplacé par le Coût marginal anticipé de l'unité de pointe

### ❖ Modèle B2: Mécanisme avec fonction de demande de capacité:

On remplace l'enchère capacité par :

$$PC = a - b \cdot \left( \frac{\sum_c e_{c,t,i}}{Q_{t,i}} \right)$$

Maximisation du profit: Stage mécanisme

$$\max_{e_{c,t,i}} \left( a - b \cdot \left( \frac{\sum_c e_{c,t,i}}{Q_{t,i}} \right) \right) e_{c,t,i} + E_w(\text{Prof}_{c,t+1,j} (e_{c,t,i}, e_{c',t,i}))$$

## Modèle C: Paiements de capacités

### ❖ Stage investissement:

- Choix discret /période
- Délai de construction
- Nash en choix séquentiels

### ❖ Stage production:

- Décision / saison
- Concurrence en quantité
- En période de pointe, revenu additionnel fixe par capacité installée

$$\max_{q_{c,t1}} L_3 \cdot (P_{t1} + PC_{t1} - CV_{c,t1}) \cdot q_{c,t1}$$

# Modèle D: Energy-only market

## ❖ Stage investissement:

- Choix discret /période
- Délai de construction
- Nash en choix séquentiels

## ❖ Stage production:

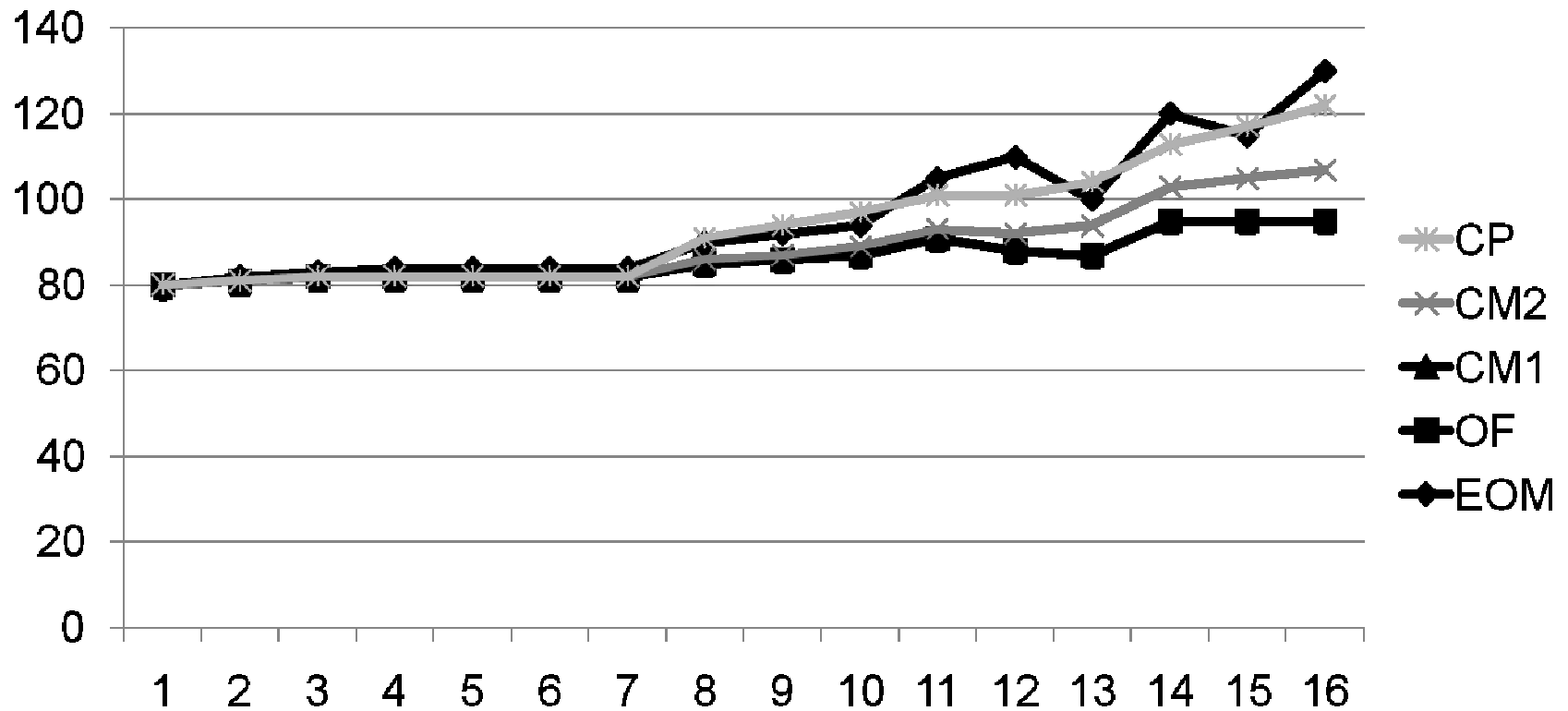
- Décision / saison
- Concurrence en quantité

=====> **Aucun engagement, aucune rémunération supplémentaire**

# Traitements

- ❖ Comparaison entre les 4 designs:
  - Adéquation: Solde de capacité, écart Demande – Production
  - Volatilité des prix, niveau des prix
  - Incitations au investissements adéquats
  - Manipulation des prix
  
- ❖ Sensitivité:
  - Cartel, Oligopole, Monopole
  - Sensitivité : Strike price, Pénalité, délai de construction,
  - Comparaison entre Open / Closed loop

## Résultat 1: Evolution du prix en période de pointe

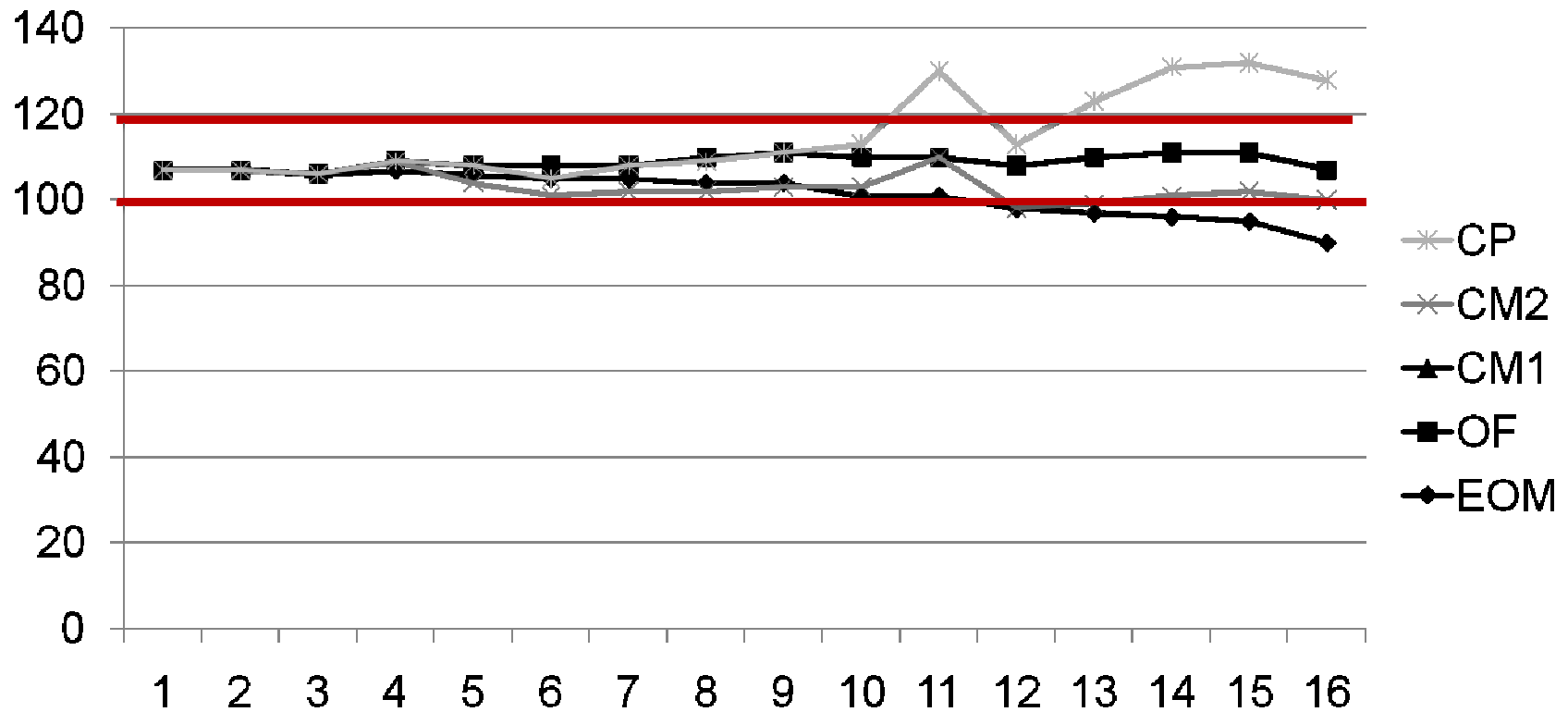




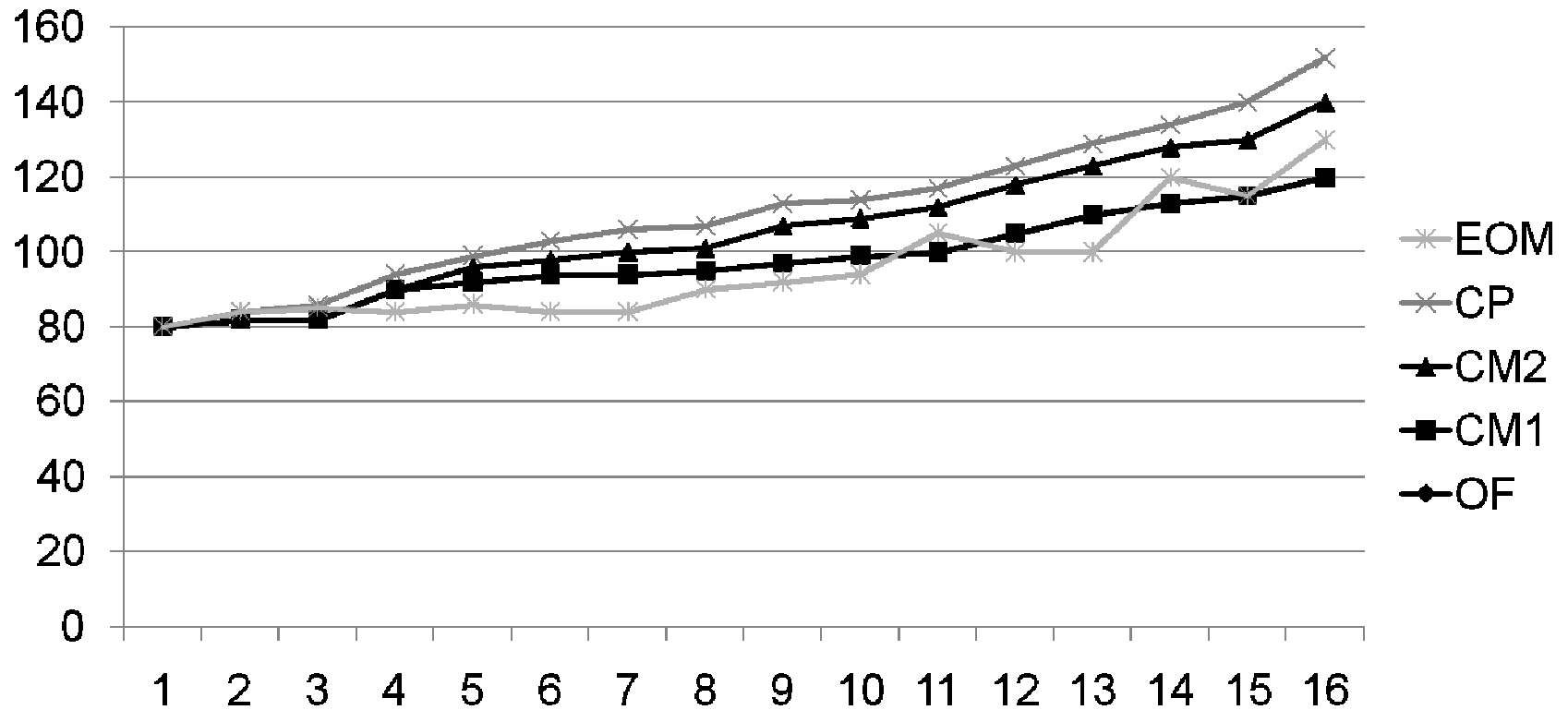
## Résultat 2: Ajout de nouvelles capacités

Périodes	EOM	OF	CM1	CM2	CP
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	750	750	750	750
4	0	1750	1750	1000	1750
5	750	1750	1750	1000	1750
6	750	2250	2250	1750	2250
7	[750 ; 1000]	4000	4000	3000	5000
8	[750 ; 1000]	[4000 ; 5000]	[4000 ; 5000]	[3000 ; 4000]	[5000 ; 6000]
9	[750 ; 1500]	[4000 ; 6000]	[4000 ; 6000]	[3000 ; 4000]	[6000 ; 6750]
10	[1750 ; 2000]	[5000 ; 6000]	[5000 ; 6000]	[3000 ; 5000]	[5500 ; 7000]
11	[1750 ; 2000]	[5000 ; 6000]	[5000 ; 6000]	[4000 ; 5000]	[6000 ; 8000]
12	[2750 ; 4000]	[6000 ; 8000]	[6000 ; 8000]	[5000 ; 7750]	[6500 ; 9000]

### Résultat 3: Adéquation de capacités de production



## Résultat 4: Coût total du mécanisme



❖ Manipulations des prix:

- Energy-only market, capacity paiement

❖ Sensitivité / Strike price:

-  $\uparrow \downarrow$  du strike price  $\longrightarrow$   $\downarrow \uparrow$  de la prime

❖ Sensitivité: Structure concurrentielle: Cartel, Monopole

- OF et CM1: adéquation de capacité, prix de marché identiques que l'oligopole, mais, le coût augmente avec le Cartel et le monopole

- CM2, CP et EOM:  $\downarrow$  de l'investissement et de la génération et  $\uparrow$  de la manipulation des prix

# Conclusion

- ❖ Dans un marché concurrentiel, l'introduction d'un « market-based incentive mechanism » est indispensable pour la fiabilité du système.
- ❖ Pas de différence entre les options de fiabilités et les marchés de capacités à terme avec un système d'enchère.
- ❖ L'introduction d'un paiement de capacité n'assure pas l'adéquation des capacités de production.
- ❖ Intérêt de l'économie expérimentale.