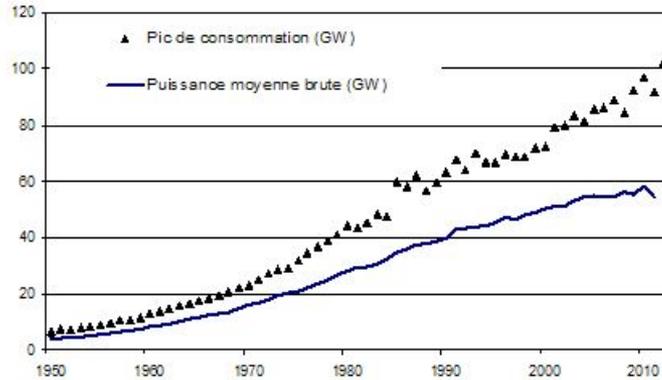


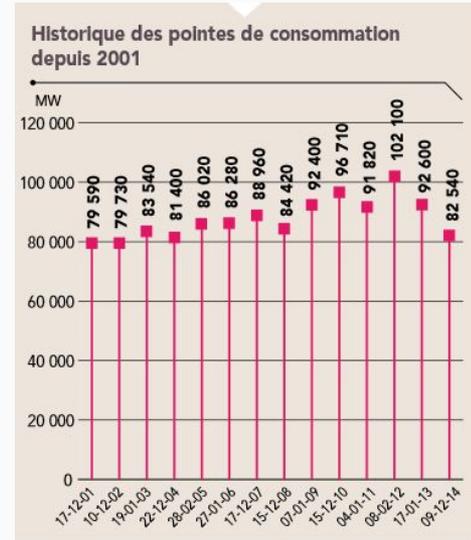
# Modélisation structurelle des prix de l'électricité et interaction stratégique

# Que peut-on attendre du marché de capacité?

Dans son dernier « bilan prévisionnel », publié en 2012, RTE observe que sur les dix dernières années, la pointe électrique a augmenté 2,5 fois plus vite que l'énergie consommée.



RTE prévoit que la sécurité d'alimentation électrique devrait être assurée jusqu'en 2015. A partir de 2016, elle devient plus tendue en raison notamment de la fermeture de certaines centrales thermiques à énergie fossile. A cette échéance, la puissance manquante est estimée à 1.2 GW et à 2.1 GW en 2017.



# Que peut-on attendre du marché de capacité?

## I. Présentation du mécanisme de “capacité”

- A. Origines du mécanisme
- B. Fonctionnement du mécanisme

## II. Modèle pour le prix de l'énergie

## III. Modèle pour le prix du certificat

- A. Modèle numérique
- B. Résultats remarquables

# Présentation du mécanisme de capacité

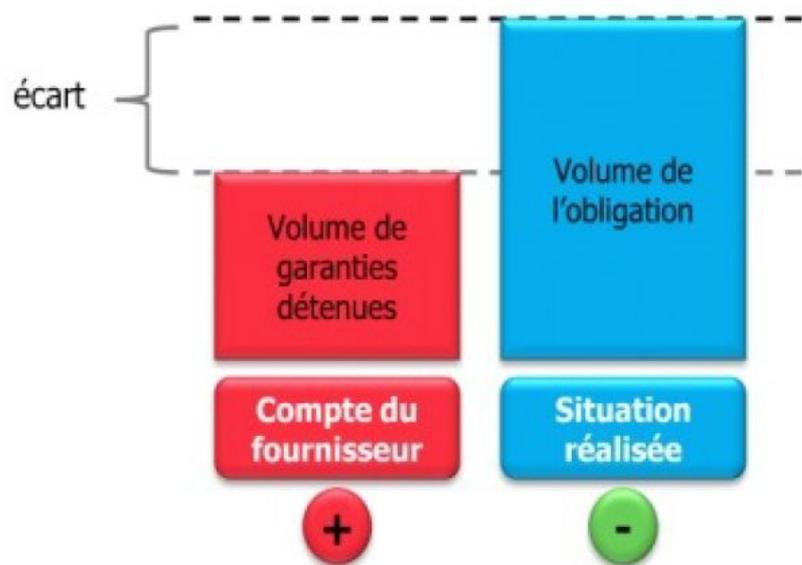
# Origines du mécanisme

- L'obligation de capacité est créée en 2012
- Objectif : faire face aux pics de demande d'électricité grâce aux moyens nationaux
- Problème : une centrale qui ne servirait que quelques jours par an mettrait des siècles à être rentable
- Solution : rémunérer les producteurs l'électricité pour leur disponibilité via les "certificats de capacité"

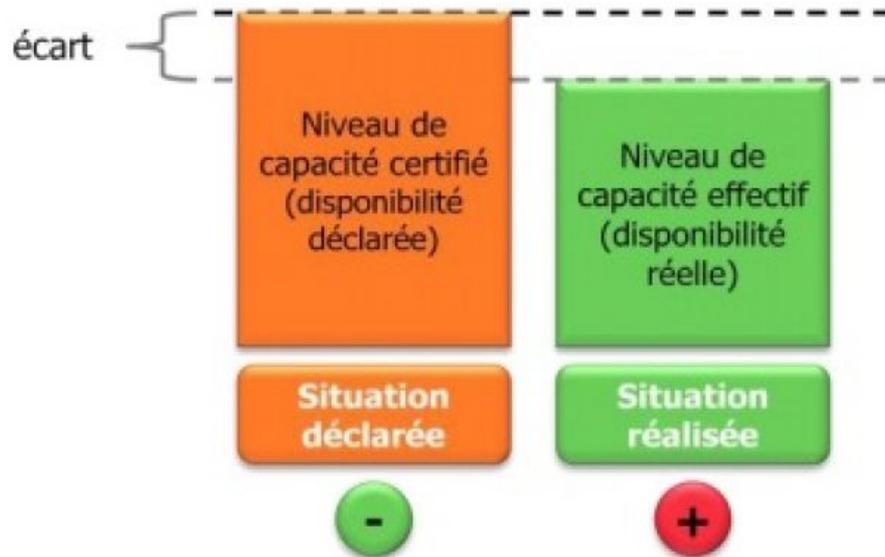
# Fonctionnement du mécanisme

- Les fournisseurs sont soumis à une “obligation de capacité “
- Les exploitants de capacité mettent à disposition leur capacités aux fournisseurs
- Les fournisseurs sont pénalisés pour l'écart entre le niveau de leur obligation et les garanties de capacités détenues
- Les exploitants de capacité sont pénalisés pour l'écart entre le niveau de capacité certifié et la contribution réelle de leurs capacités; mais récompensés s'ils ont plus contribué que ce à quoi ils s'étaient engagés

## Écart des fournisseurs

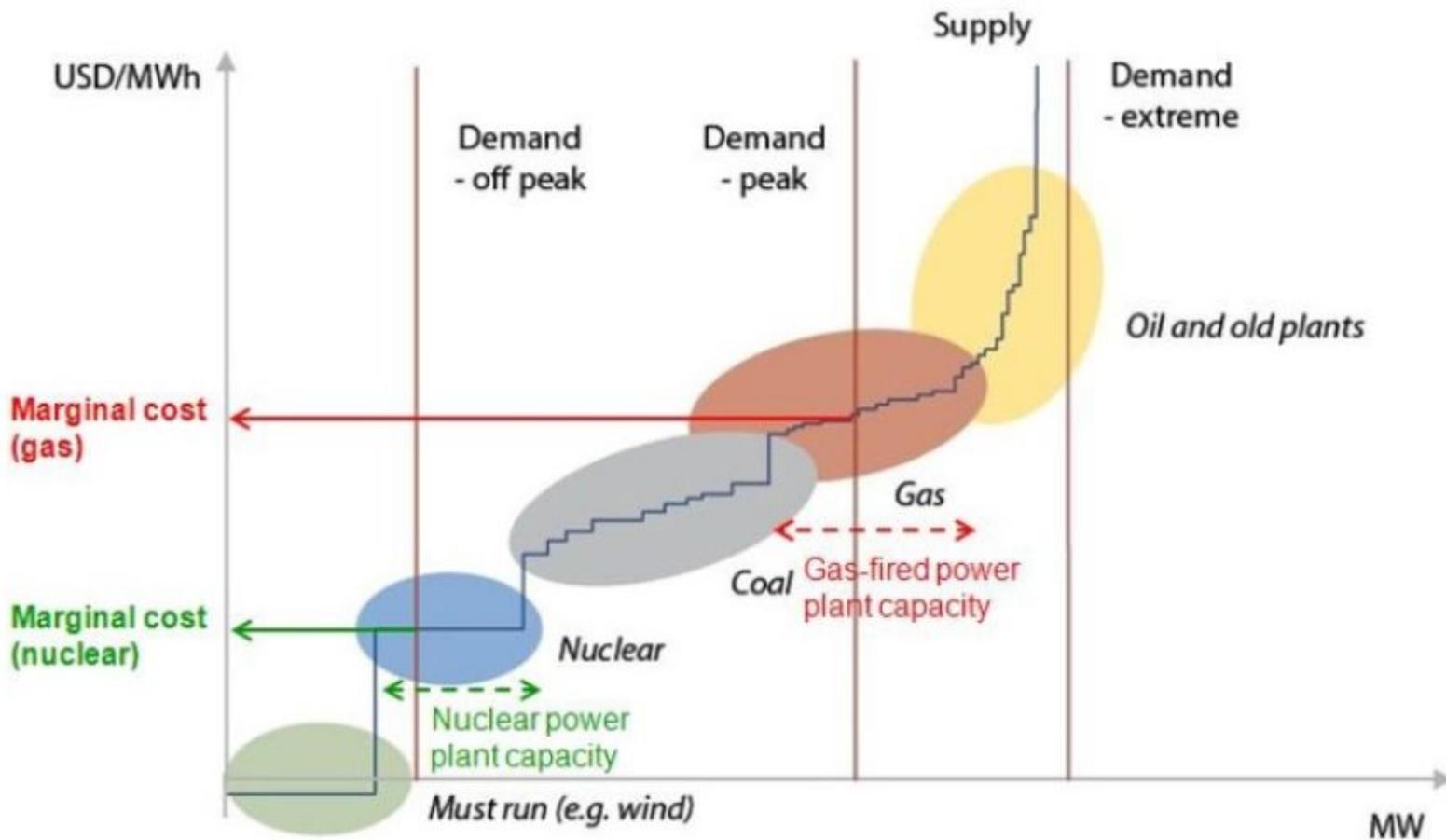


## Écart des RPC (périmètre de capacités)

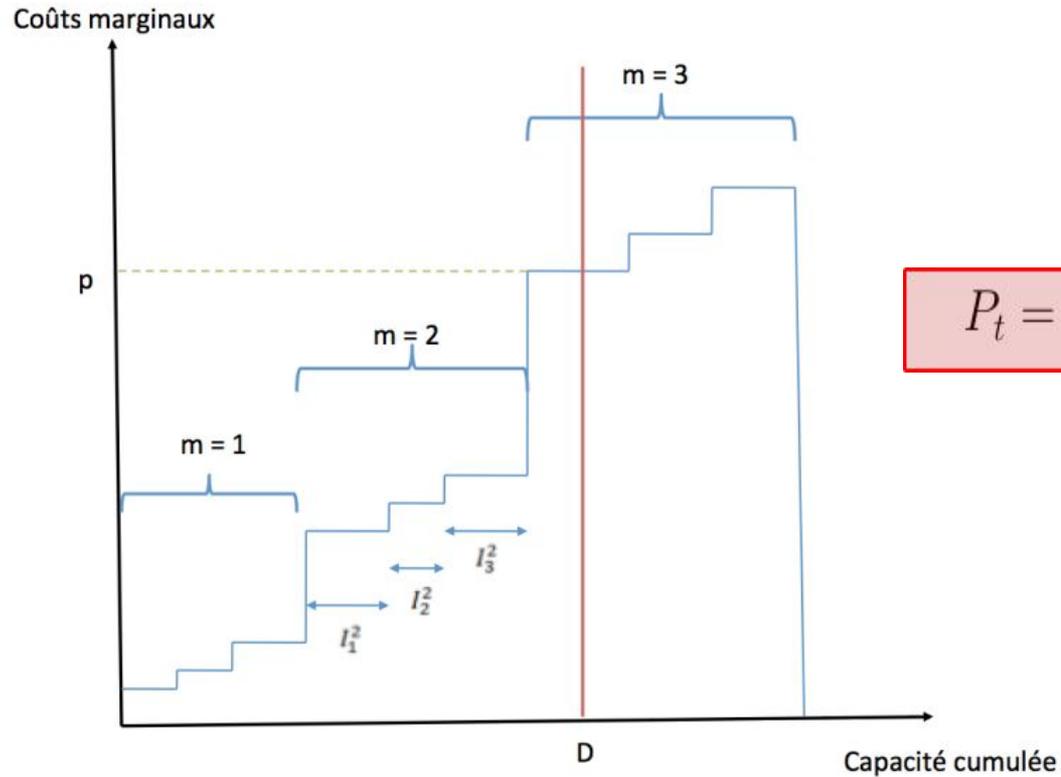


# Modèle pour le prix de l'énergie

# Technologie mobilisée en fonction du niveau de demande



# Coût de l'électricité en fonction de la demande



$$P_t = g(C_{max} - D_t) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_j^i 1_{D_t \in I_j^i}$$

# Modèle pour le prix du certificat

# Paramètres du modèle

## Paramètres

- Nombre de producteurs = 1
- Durée de l'étude du marché = 100 ans
- Prix de règlement de l'amende = 115% du prix de la capacité
- Prix de règlement des bonus = 85% du prix de la capacité
- Prix administré = 40 000 €/MW
- Ecart critique pour le système = 2GW
- Sensibilité à la punition = 1%
- Demande en énergie = normale ( demande, volatilité de la demande)
- Taux de croissance de la demande = 1.5%
- Volatilité de la demande = 5000 MW
- Coût des investissements = 2 €/W

## Outputs

- Prix de la capacité
- Taux de croissance des capacités installées (investissements)
- Viabilité du système (recettes des acteurs concernés, etc.)

# Fonctionnement du modèle numérique

- Création du marché/initialisation des paramètres
- Pour chaque année de l'étude :
  - Détermination de la capacité certifiée en fonction des résultats des années précédentes
  - Détermination du prix de la capacité en fonction de l'offre et de la demande historique
  - Simulation des 25 jours de contrôle des producteurs et calcul de leur pénalité financière
  - Calcul du résultats des producteurs

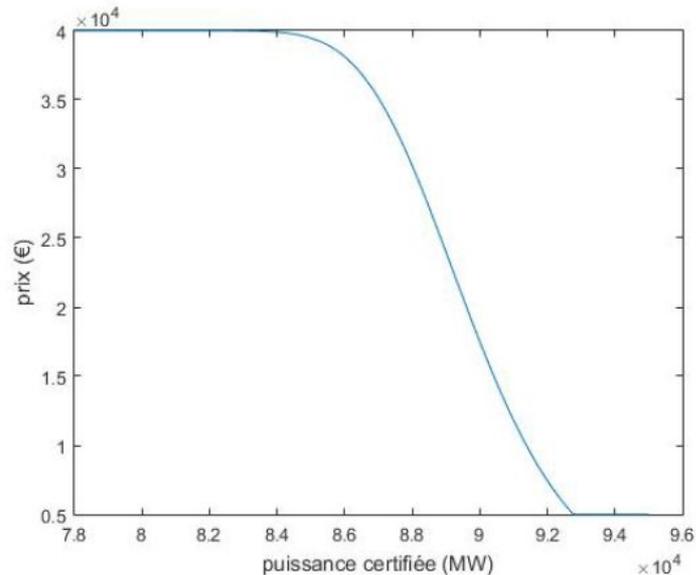
## Détermination du prix de la capacité

$$\mathbb{P}\left(\max_{i \in [1, n]} D_i \leq x\right) = \prod_{i=1}^n \mathbb{P}(D_i \leq x)$$

$$\mathbb{P}\left(\max_{i \in [1, n]} D_i \leq x\right) = (\mathbb{P}(D_i \leq x))^n$$

$$\mathbb{P}\left(\max_{i \in [1, n]} D_i \leq x\right) = \left(\mathbb{P}\left(\frac{D_i - \mu_t}{\sigma_t} \leq \frac{x - \mu_t}{\sigma_t}\right)\right)^n$$

$$\mathbb{P}\left(\max_{i \in [1, n]} D_i \leq x\right) = \left(F\left(\frac{x - \mu_t}{\sigma_t}\right)\right)^n$$



$$p_t(x, \mu_t, \sigma_t) = P_{adm} \mathbb{P}\left(\max_{i \in [1, n]} D_i \geq x\right) = P_{adm} \left(1 - \left(F\left(\frac{x - \mu_t}{\sigma_t}\right)\right)^n\right)$$

## Borne inférieure pour le prix du certificat de capacité

$\frac{p_t C_t}{C_{inv}} \geq \mathbb{E}(D_{t+1}^{pte} - D_t^{pte})$  où  $C_t$  est la capacité certifiée à l'année  $t$ .

Pour la filtration adaptée à la demande notée  $\mathbf{F}_t$ , on a

$$(D_{t+1} | \mathbf{F}_t) \sim N((1 + t_{cr})D_t, \sigma_{t+1}^2)$$

Puis :

$$\begin{aligned}\mathbb{E}(D_{t+1}^{pte} - D_t^{pte}) &= \mathbb{E}[\mathbb{E}(D_{t+1}^{pte} - D_t^{pte} | \mathbf{F}_t)] \\ &= \mathbb{E}((1 + t_{cr})D_t^{pte} - D_t^{pte}) \\ &= t_{cr} \mathbb{E}(D_t^{pte})\end{aligned}$$

d'où

$$p_t \geq C_{inv} \frac{t_{cr} \mathbb{E}(D_t^{pte})}{C_t}$$

Ici, on peut supposer que  $\mathbb{E}(C_t | \mathbf{F}_t) = D_t^{pte}$  puisque les fournisseurs certifieraient exactement la demande de pointe, indépendamment du prix s'ils la connaissaient. D'où

$$p_t \geq C_{inv} \frac{t_{cr} \mathbb{E}(\mathbb{E}(C_t) | \mathbf{F}_t)}{C_t} \geq C_{inv} \frac{t_{cr} \mathbb{E}(C_t)}{C_t}$$

D'où par l'inégalité de Jensen  $\forall t \quad \mathbb{E}(p_t) \geq C_{inv} t_{cr}$

# Résultats du modèle

## Incertitude sur la capacité certifiée par les producteurs

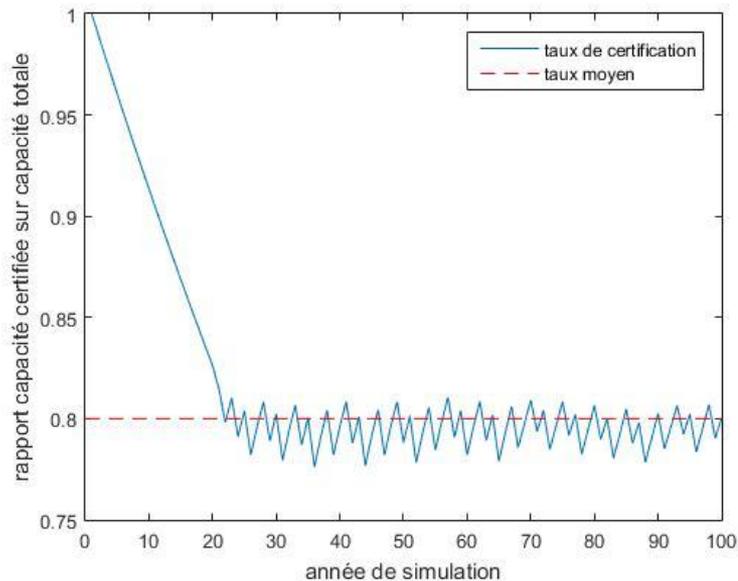
Sans incertitude sur leur capacité de production, les producteurs certifieraient 100% de leur moyen de production.

En pratique, il existe une incertitude sur la production, même pour les technologies “sûres” comme le nucléaire ou le charbon.

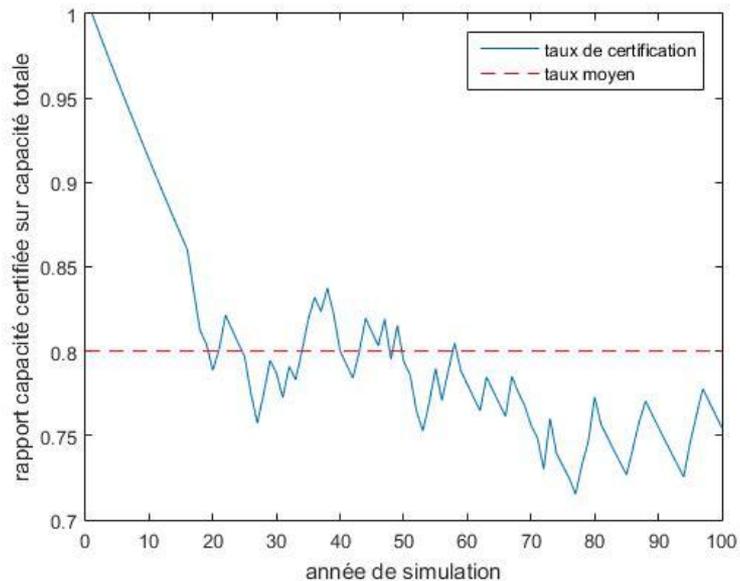
On peut s'attendre à ce que l'incertitude sur les capacités de production baissent les quantités certifiées par les producteurs.

# Incertitude sur la capacité certifiée par les producteurs

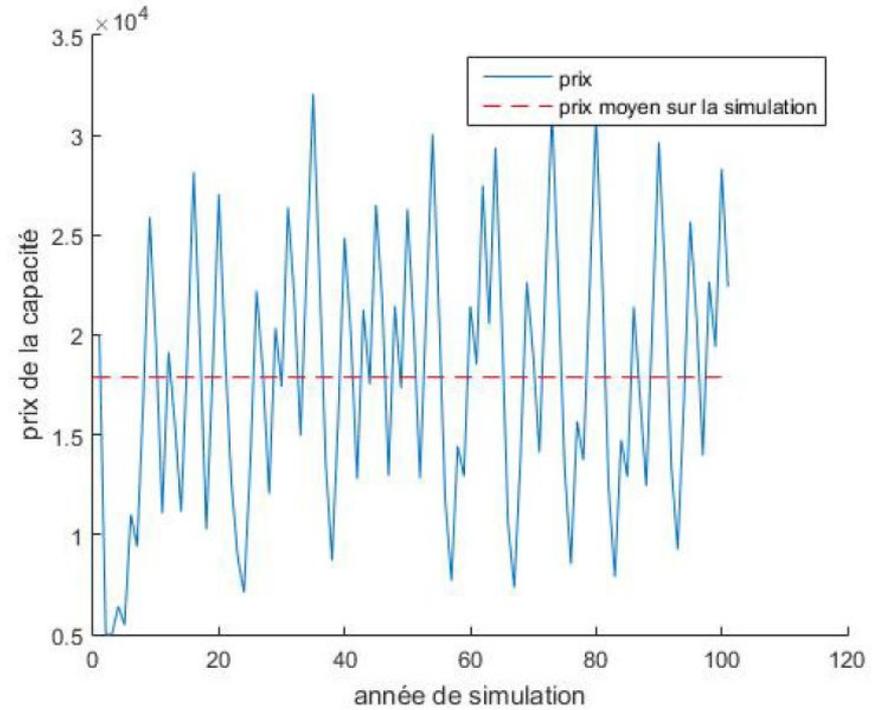
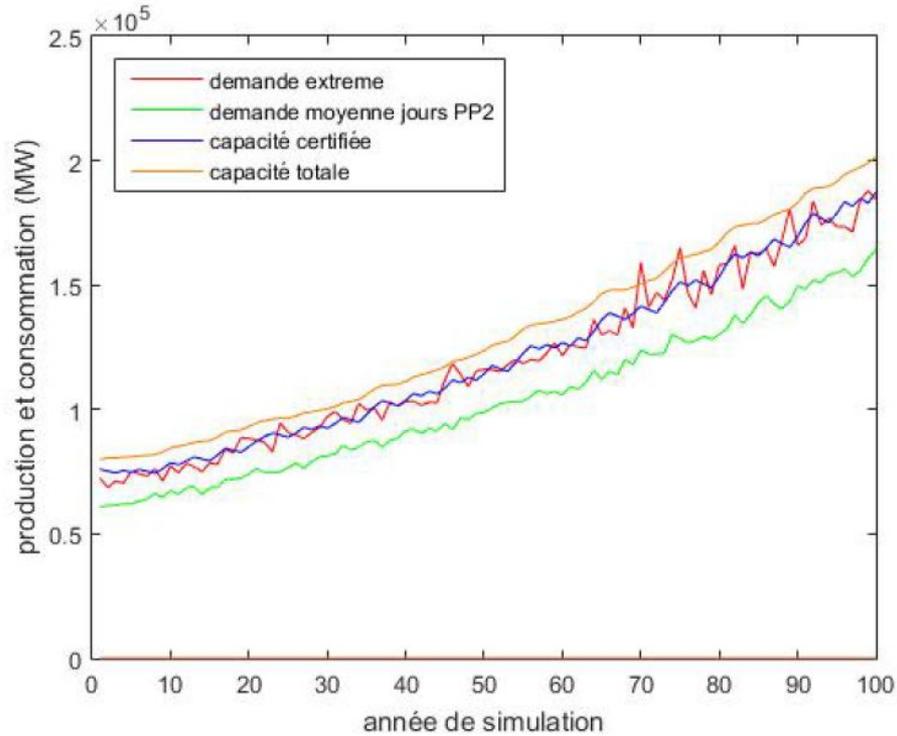
espérance 0.8  
variance  $3 \cdot 10^{-5}$



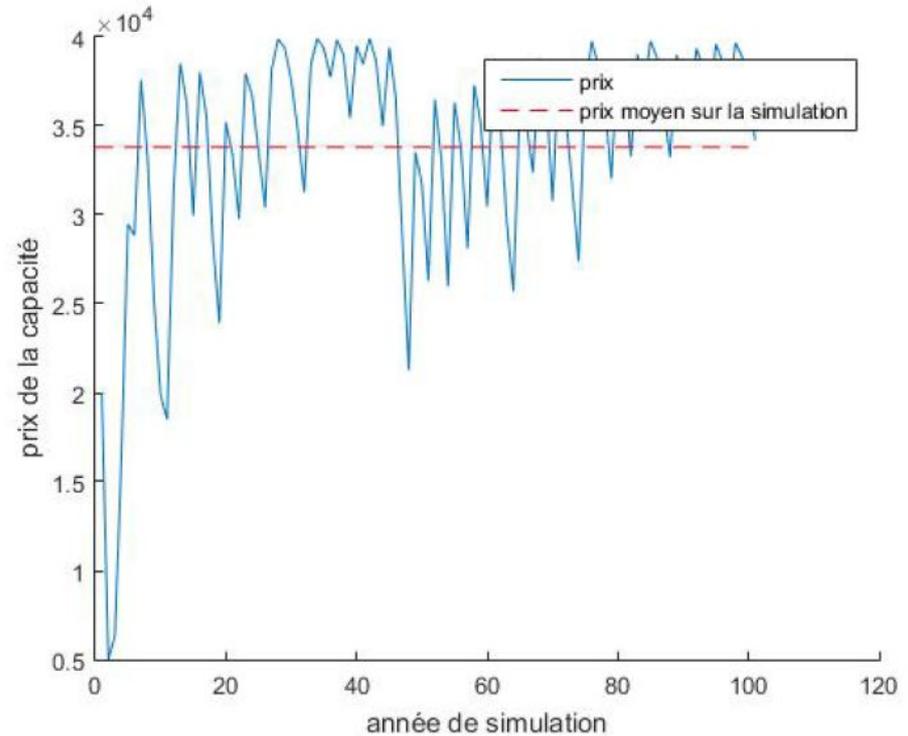
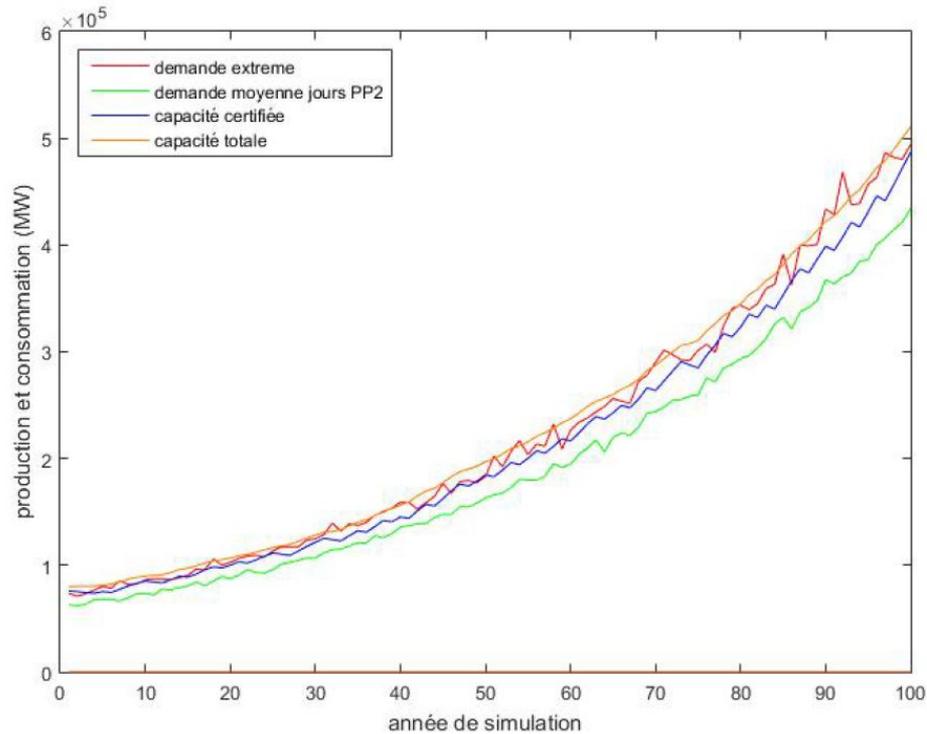
espérance 0.8  
variance 0.08



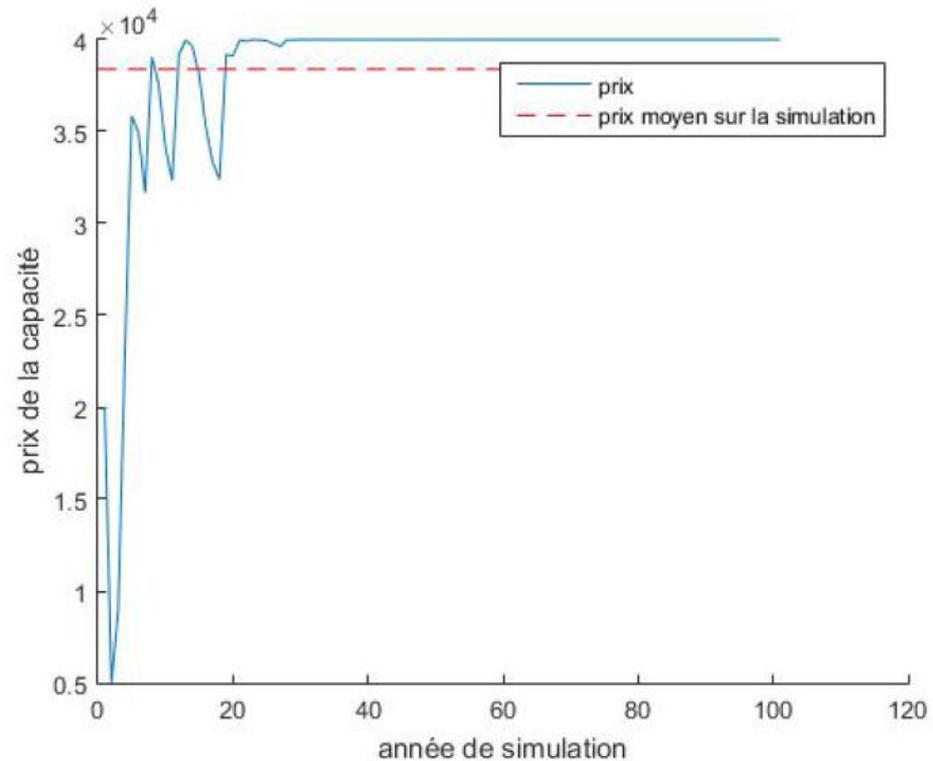
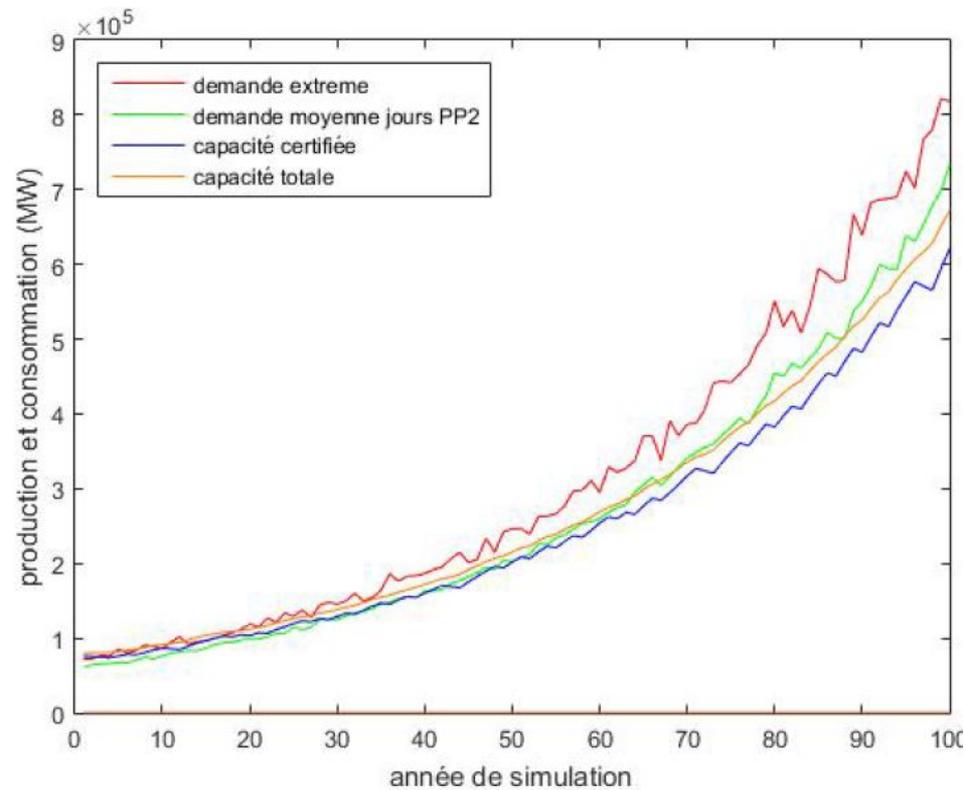
# Taux de croissance à 1%



# Taux de croissance à 2%



# Taux de croissance à 3%

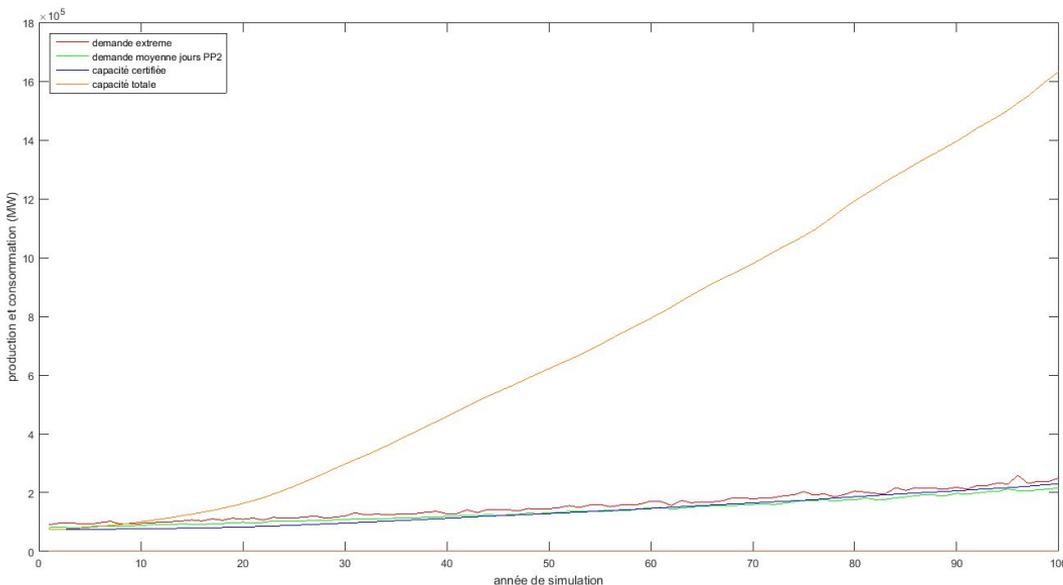


# Conclusion

- Le mécanisme de capacité permet donc bien de rendre attractif de nouveaux investissements pour les producteurs
- Tant que la croissance reste raisonnable, le prix de la capacité s'ajuste pour que les investissements soient possible
- Rte peut au besoin jouer sur les prix d'amende pour que le mécanisme continue de fonctionner en cas de croissance trop faible ou trop forte

## Remarques complémentaires

- Possibilité des producteurs de sous-certifier leurs capacités pour que les prix s'envolent :



Imposer un minimum de certification ?

Imposer une certification à x% aux fournisseurs comme en finance ?

$$\max_{\epsilon_t, \delta_t \in \mathbf{R}} \sum_{t \geq 0} \mathbb{E}[\epsilon_t C_t^p p_t - C_{inv} \delta_t C_t^p]$$
$$C_{t+1}^p = (1 + \delta) C_t^p$$