



# Contraintes technologiques : conditions techniques d'une transition énergétique intelligente

Nadia Maïzi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Centre de Mathématiques Appliquées  
MINES ParisTech

<sup>2</sup>Chaire Modélisation prospective au service du développement durable  
ParisTech

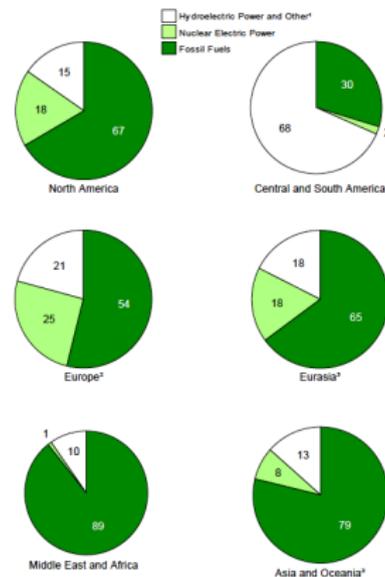
# La transition énergétique : une nécessité



Chaire ParisTech Modélisation prospective  
au service du développement durable

# Le futur électrique

- **Explosion de la demande** préfigure des investissements gigantesques dans le secteur électrique
- **Explosion des émissions** la production électrique pèse pour plus de 45% des émissions de dioxyde de carbone.
- **Raréfaction des ressources**



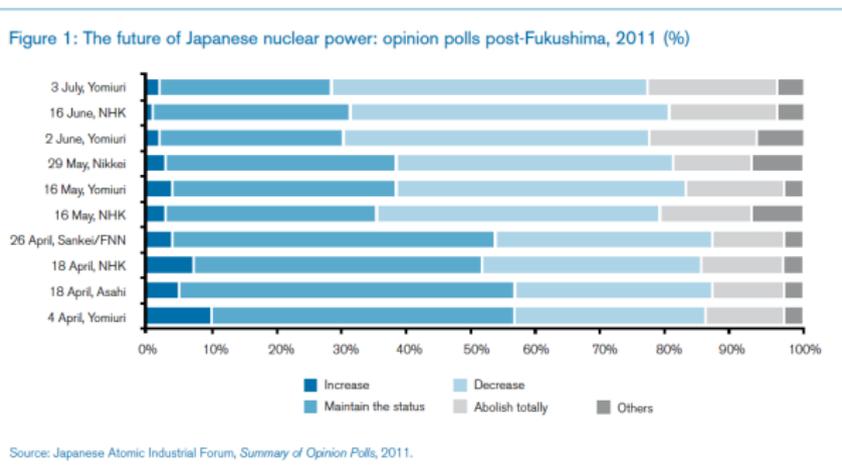
**Figure:** Production d'électricité par région

Source: AER 2009.

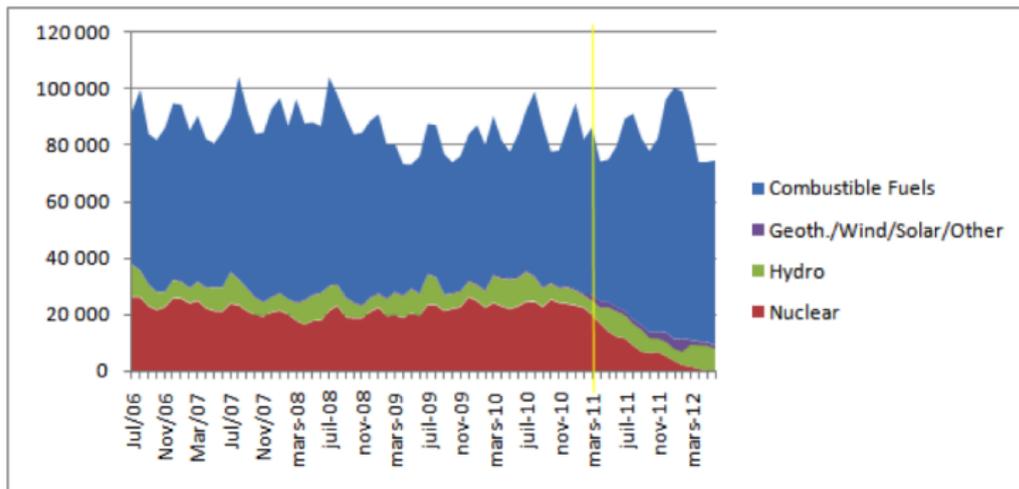
# Une rupture, le Japon

## Part de la production nucléaire dans la production d'électricité

- scénarios 2006 : 30 à 40 % en 2030
- scénario 2010 : 50 % en 2030
- stratégie du 29 juin 2012 : de 0% à 25% en 2030
- septembre 2012 : 0% en 2030



# Conséquences sur le système électrique japonais



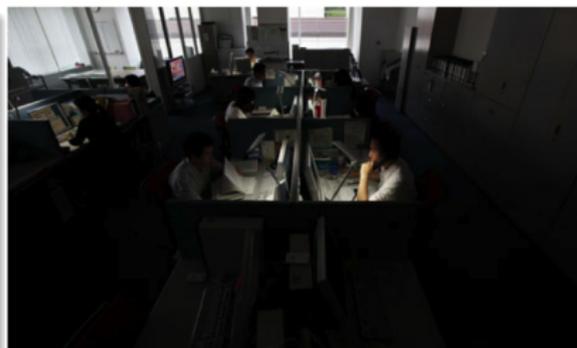
- Arrêt nucléaire en 14 mois
- Relai pris par des capacités thermiques  
GNL : entre mars 2011 et fin 2011, plus de 18GW de centrales thermiques (+300 % ou 2.6 GW/mois)

Production électrique mensuelle en GWh

# Conséquences sur la consommation japonaise

## Demande de réduction de la part du gouvernement aux EPCOs

- Objectif réduction demande Tokyo et Tohoku : -15% été 2010/été 2011
- Objectif réduction demande Kansai : -10%
- Obligatoire pour les industries
- Incitatif pour ménages et commerces



Nombreux morts par hyperthermie

# Vers une société bas carbone



Chaire ParisTech Modélisation prospective  
au service du développement durable

# Recommandations pour un système énergétique peu émissif

## Solutions en génération

- ☛ *Sources renouvelables et distribuées* sont des solutions alternatives attractives
- ☛ *Le nucléaire* est présenté comme une technologie zero-émission
- ☛ *Les technologies de capture et de stockage* présentent des opportunités majeures pour certaines régions

## Autres préconisations

- Solutions intégrées
  - 1 *Efficacité énergétique*
  - 2 Solutions *intelligentes* : grids, MDE, eau, ville durable ...
- Instruments de marchés (carbone, électrique, ...) : taxes, prix, subventions, ...
- Choix technologiques : *Mobilité* : électrique, biocarburants, ...

# Recommandations pour un système énergétique peu émissif

## Solutions en génération

- ☞ *Sources renouvelables et distribuées* sont des solutions alternatives attractives
- ☞ *Le nucléaire* est présenté comme une technologie zero-émission
- ☞ *Les technologies de capture et de stockage* présentent des opportunités majeures pour certaines régions

## Autres préconisations

- Solutions intégrées
  - ① *Efficacité énergétique*
  - ② Solutions *intelligentes* : grids, MDE, eau, ville durable ...
- Instruments de marchés (carbone, électrique, ...) : taxes, prix, subventions, ...
- Choix technologiques : *Mobilité* : électrique, biocarburants, ...

# Orientations politiques pour la part du nucléaire dans le mix

## Nuclear power plants : lifetime 40 years

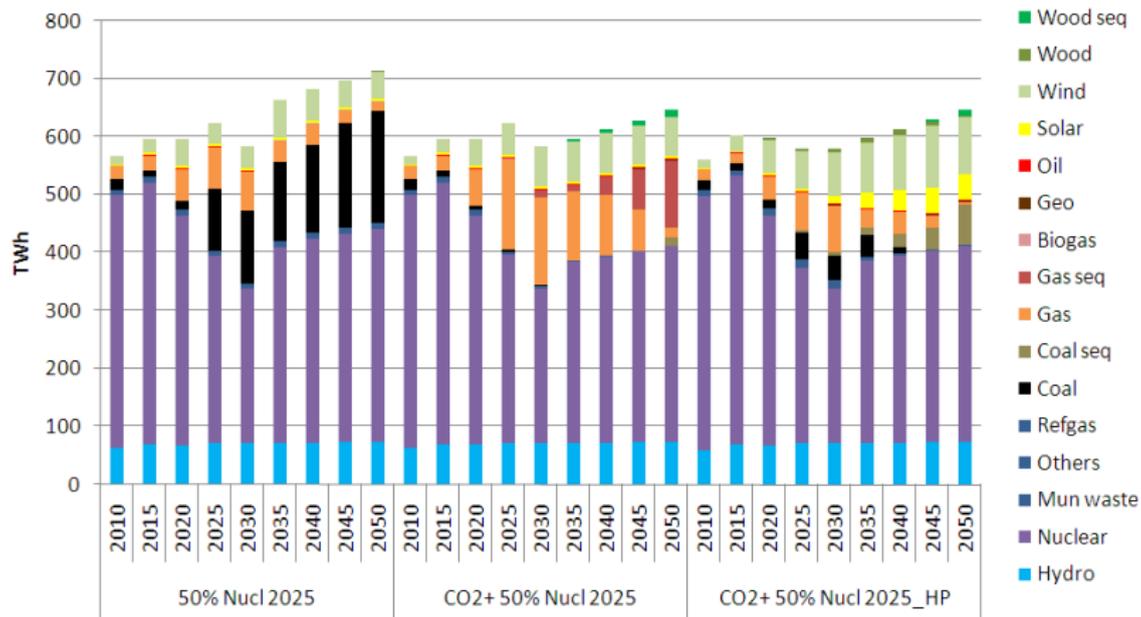


Figure: Mix électrique français suivant le niveau de la taxe CO<sub>2</sub>

# Elaborer une transition énergétique intelligente

Souhaitable, Plausible, Soutenable

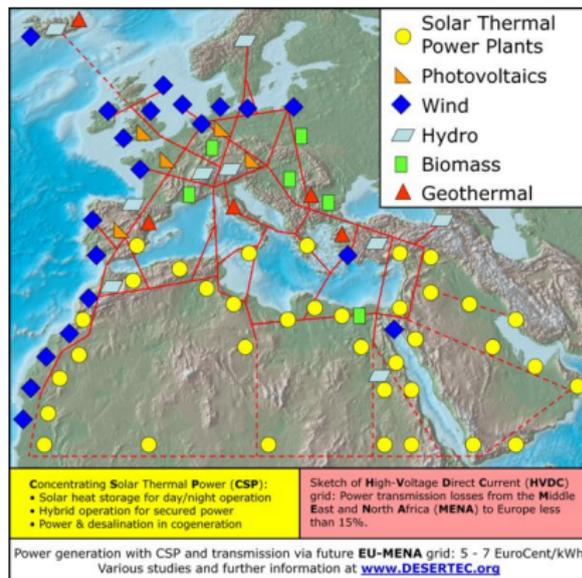
Débrouiller l'imbroglio de recommandations techniques à travers une réflexion sur le long terme, hors des cercles de décision, sans cesse revisitée et qui permette :

- de réconcilier les échelles de temps et d'espace
- de prendre en compte des externalités
- d'évaluer globalement les impacts des solutions prônées
- d'effectuer les arbitrages nécessaires tenant compte des compétitions et des substitutions

# Des conditions techniques de la transition énergétique intelligente



# Les enjeux techniques des nouveaux paradigmes



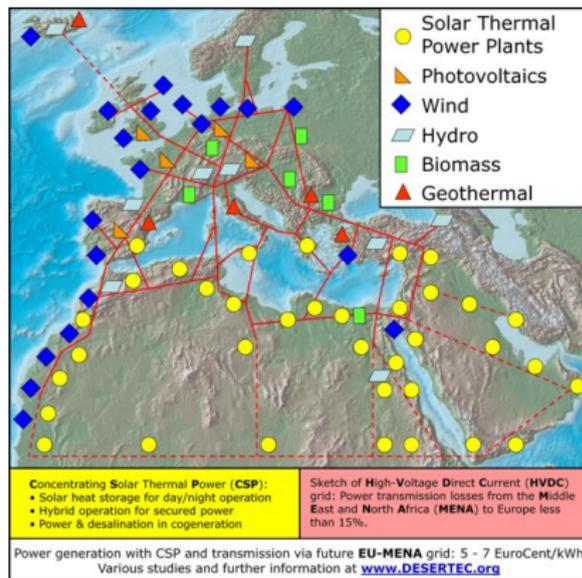
Les solutions telles que

- ① smart grids.
- ② Intégration de l'intermittence à grande échelle.
- ③ réseau centralisé/réseau décentralisé.

souèvent un certain nombre de questions

**Figure:** Production d'électricité tout renouvelable en 2050. *Source:* DESERTEC.

# Les enjeux techniques des nouveaux paradigmes



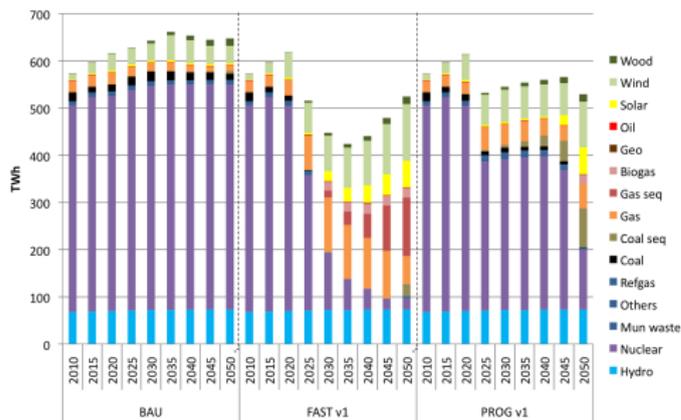
Les solutions telles que

- ① smart grids.
- ② Intégration de l'intermittence à grande échelle.
- ③ réseau centralisé/réseau décentralisé.

soulèvent un certain nombre de questions

**Figure:** Production d'électricité tout renouvelable en 2050. Source: DESERTEC.

# Question de la fiabilité des systèmes électriques



☞ Quid de la **pertinence** et la **plausibilité** des mix de production électrique évalués via les exercices de prospective long terme

Production électrique taxe et contrainte en volume



Figure: L'Europe pendant le blackout de l'Italie (28 Sept. 2003). Source: RTE.

# Puissances installées contraintes par la taxe

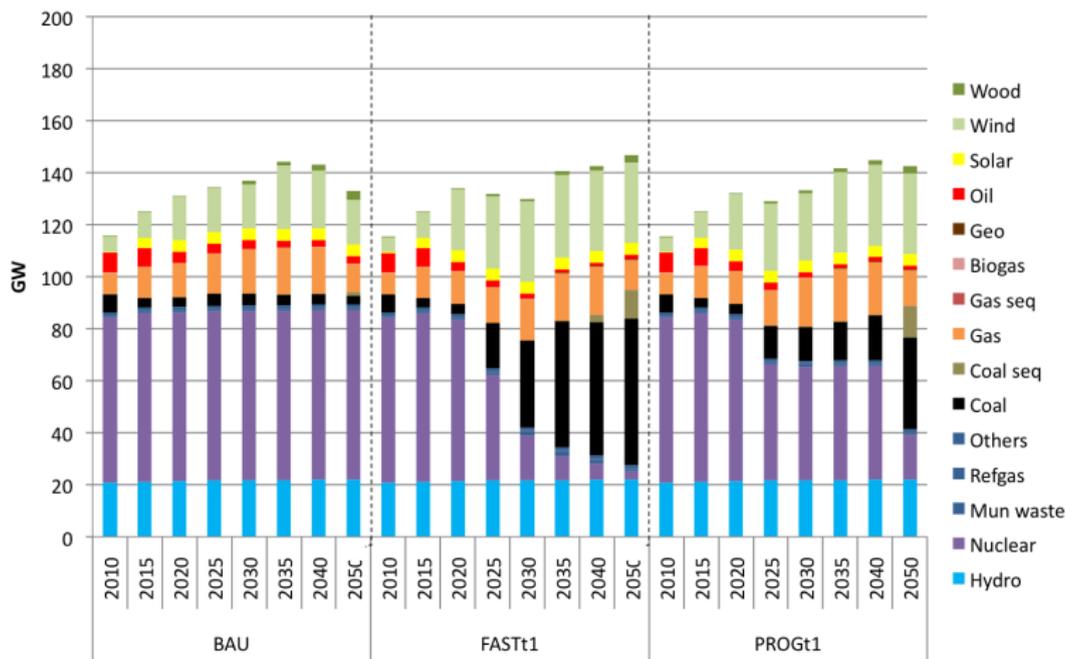


Figure: Capacités (contrainte par la taxe)

# Puissances installées contraintes par taxe + quantités

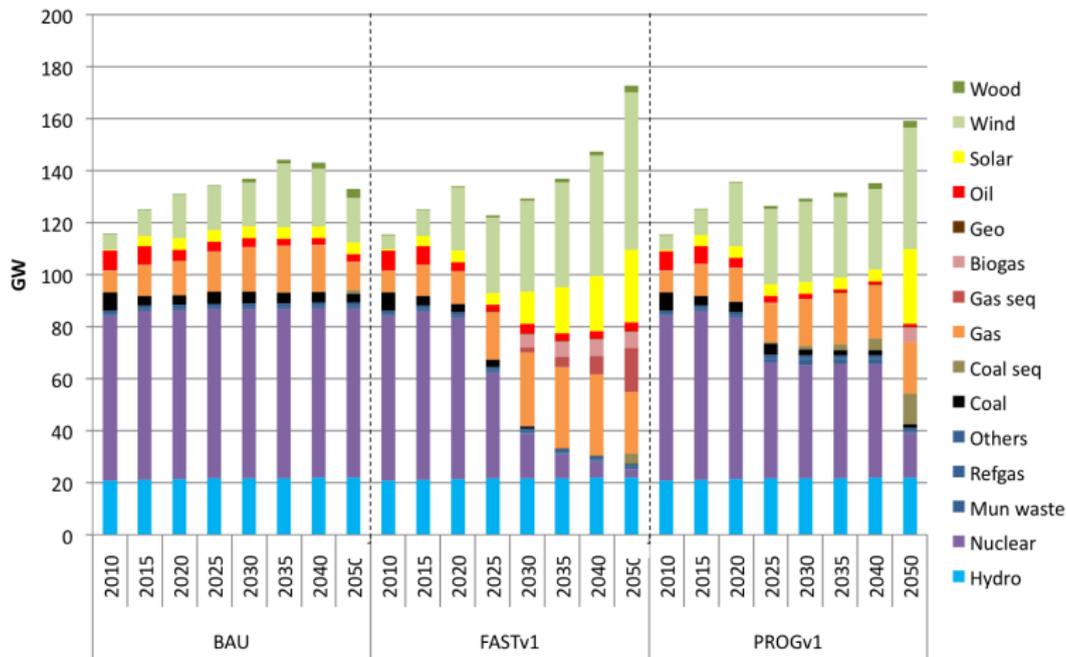


Figure: Capacités (contrainte par la taxe et les quantités)

# Nouvelles capacités installées pour une sortie rapide

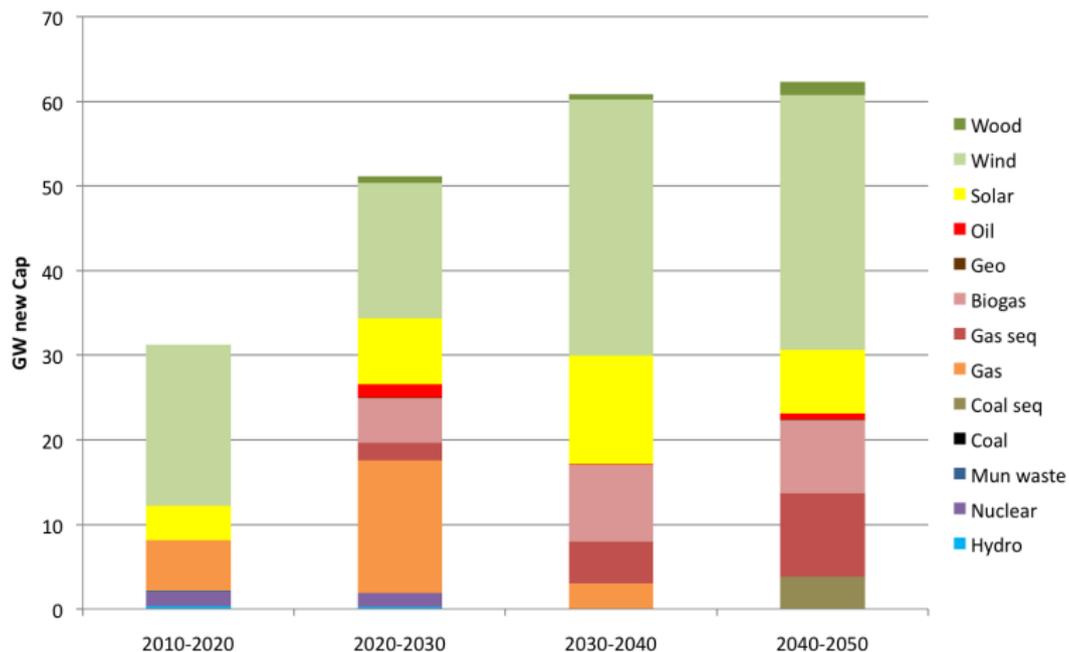


Figure: Nouvelles capacités installées pour FASTv1 (sortie 40 ans, taxe ETS et quantités)

# Des indicateurs de fiabilité

Brevet FR 11 61087. 2/12/2011

## Critère de fiabilité

- Des réserves suffisantes sont nécessaires à la fiabilité du système :
  - réserve magnétique : maintien du plan de tension (transmission) ;
  - réserve cinétique : maintien de la fréquence (production).

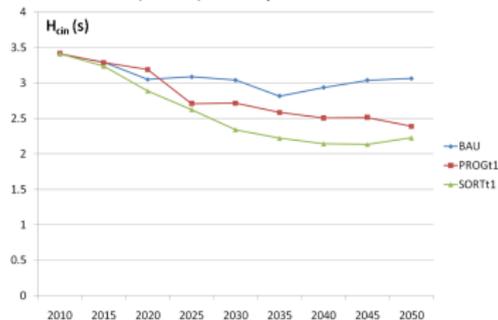
☞ **Le système sera d'autant plus fiable que les réserves sont grandes.**

Élaboration d'indicateurs qui évaluent le niveau de fiabilité  $H_{cin}$   
 $H_{mag}$  comme :

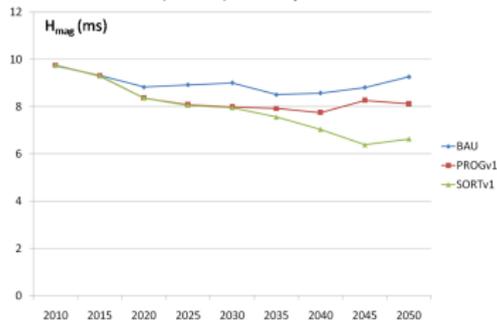
le temps dont on dispose pour rétablir la stabilité du système après une fluctuation de charge (équivalente à la capacité totale du système installé) via le contrôle de ses réserves.

# Fiabilité des scénarios évalués

BAU, PROGt1, SORTt1 : pointe été

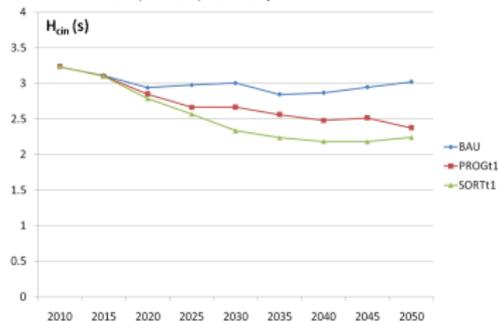


BAU, PROGv1, SORTv1 : pointe hiver



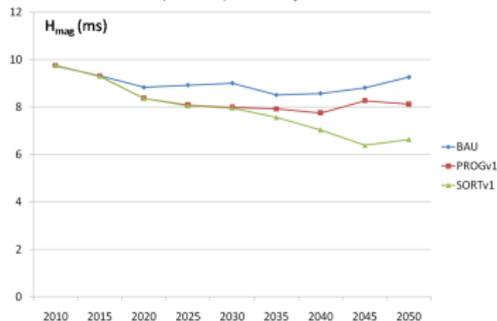
## Reserves Cinétiques

BAU, PROGt1, SORTt1 : pointe hiver



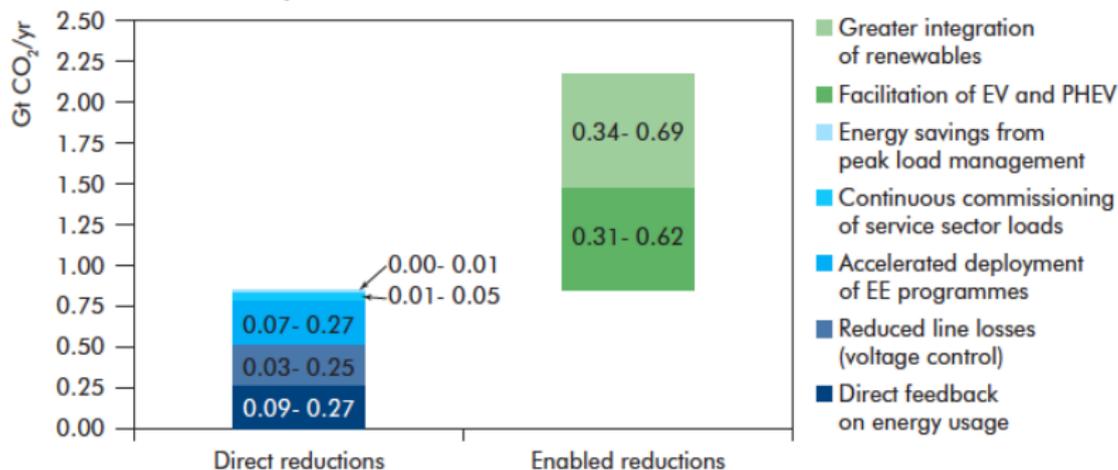
## Reserves Magnetiques

BAU, PROGv1, SORTv1 : pointe hiver



# Apport des smart grids pour le système électrique

**Figure 4.7** ▶ Smart grid CO<sub>2</sub> reductions in 2050 in the BLUE Map scenario compared to the Baseline scenario



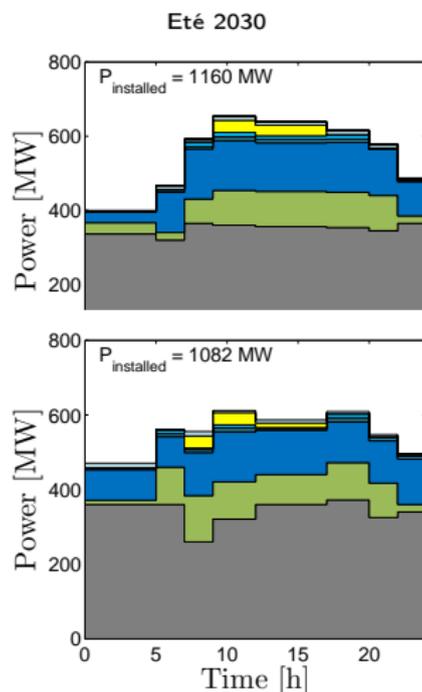
Note: The methodology for calculating CO<sub>2</sub> reductions has been adapted from EPRI (2008).<sup>9</sup>

## Key point

Smart grids have the potential to reduce CO<sub>2</sub> emissions in the electricity sector both directly and indirectly.

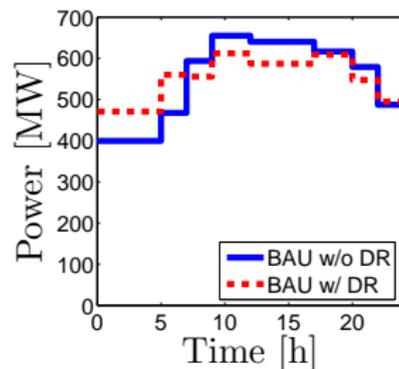
# Impact de la Demand Response

Thèse S. Bouckaert



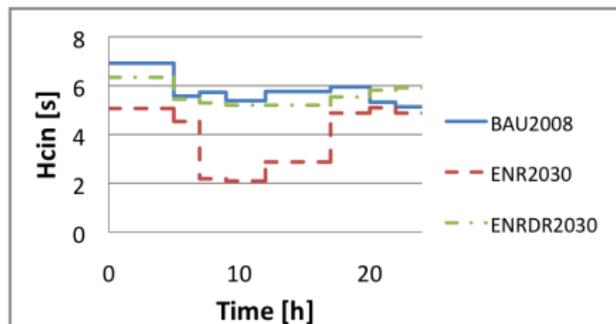
## Dynamique et Demand Response

- des gains en capacité installée long terme
- gestion de la demande et "unit commitment" court terme



# Impact de la Demand Response sur la fiabilité

■ La Demand response relève les indicateurs de fiabilité



Indicateur de fiabilité pour la réserve cinétique

Cas de la Réunion :

- BAU
- 100 % renouvelable en 2030
- 100 % renouvelable en 2030 + Demand response

# Une transition énergétique intelligente



Chaire ParisTech Modélisation prospective  
au service du développement durable

# Des scénarios de long terme techniquement plausibles

la condition de l'élaboration d'une transition énergétique intelligente ne doit pas dégrader pas le service au consommateur en garantissant à la fois

- 1 qualité de fourniture
- 2 niveau de fourniture
- 3 continuité de fourniture

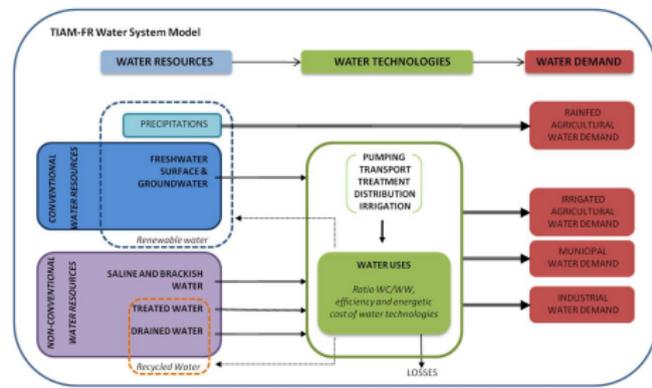
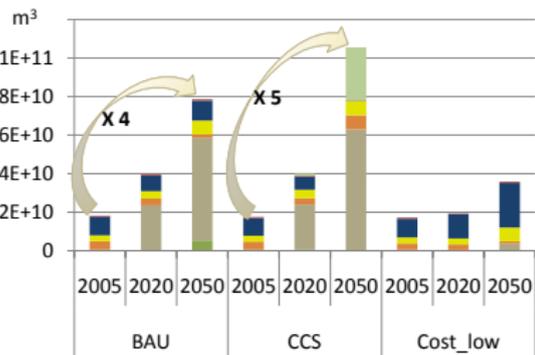
faute de quoi TOUTES les transitions seraient envisageables.

# Au delà, intégrer d'autres types d'externalités

☞ intégrer les synergies eau et énergie dans l'approche long terme



Eau douce pour la production électrique mondiale



# Au delà, intégrer d'autres types d'externalités

☞ intégrer les synergies eau et énergie dans l'approche long terme

## Water for energy

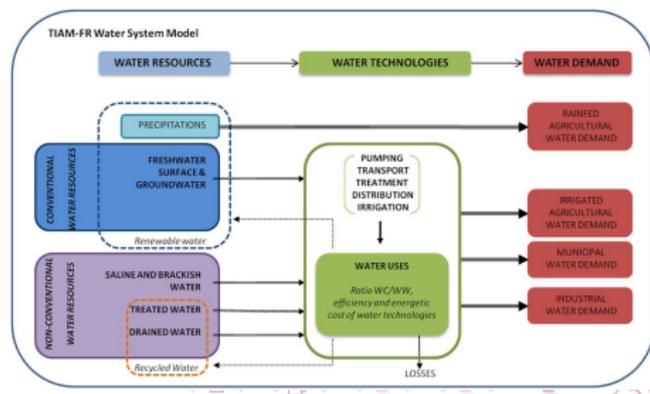
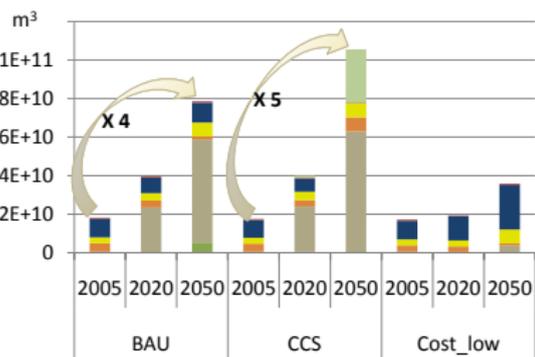
- Cooling systems
- Hydropower
- Extraction and mining
- Fuel production
- Emission controls



## Energy for water

- Pumping
- Transport
- Treatment
- Desalination

Eau douce pour la production électrique mondiale



## Contact

nadia.maizi@mines-paristech.fr

## Site Web

<http://www.modelisation-prospective.org/>

- Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique, M. Drouineau, Thèse MINES ParisTech (2011)
- Water modeling in an energy optimization framework - The water-scarce middle east context, A. Dubreuil, S. Bouckaert, S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi Applied Energy (2012)
- Smart grids and prospective modeling for the electricity sector. S. Bouckaert, E. Assoumou, N. Maïzi European Conference on Research Operational (2012)
- Le futur énergétique du Japon : Une rupture sociétale et énergétique ? Adrien Wacziarg, Thèse professionnelle mastère OSE (2012).



Chaire ParisTech Modélisation prospective  
au service du développement durable

# ANNEXES



Chaire ParisTech Modélisation prospective  
au service du développement durable

# Un modèle bottom-up :

## TIMES The Integrated MarkAl (market allocation)-EFOM System

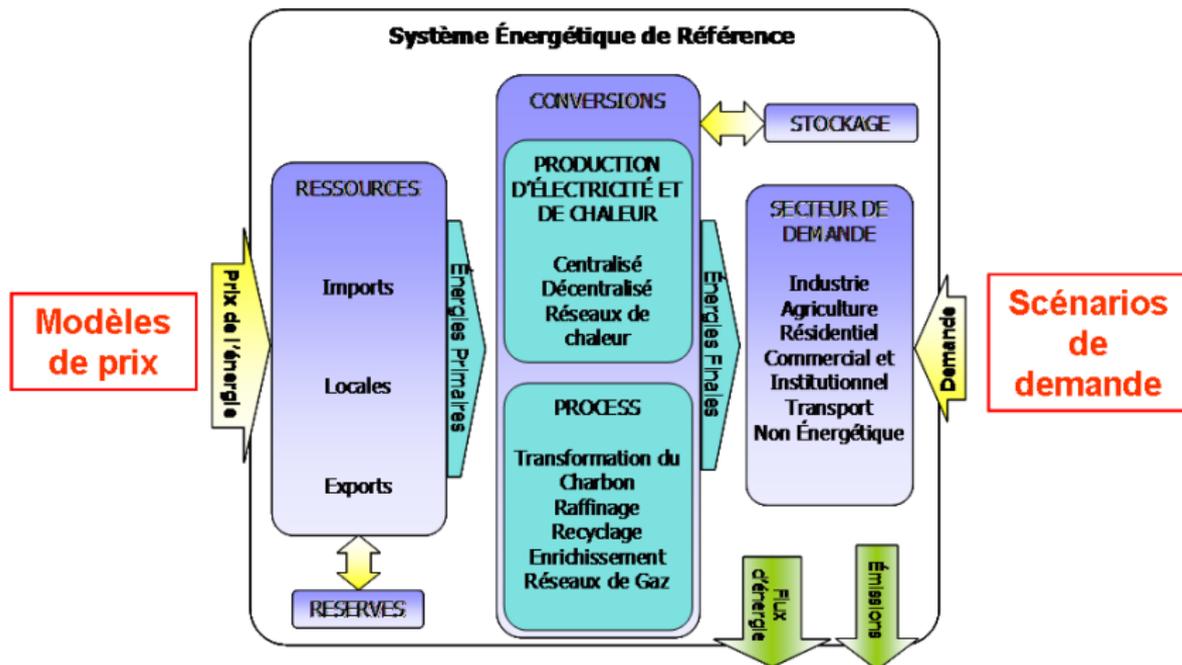
### *Le modèle TIMES*

### Un modèle technologique d'optimisation linéaire piloté par la demande

MarkAl-TIMES réalise une **optimisation technico-économique**

- 1 pour la **chaîne énergétique de référence** (RES):
  - de l'amont (production et offre énergétique)
  - à l'aval (secteurs économiques utilisant l'énergie finale)
- 2 pilotée par **la demande** et soumis à contraintes
- 3 sur un **horizon certain** : moyen ou long terme (20/50/100 ans)
- 4 pour un **objectif** : technique/économique/environnemental : (coûts économiques, émissions de polluants, ...)

# Le système énergétique de référence



Source Guerassimoff et al.

# Prices and Taxes assumptions

## CO<sub>2</sub> Taxes

### fossil prices : WEO assumptions

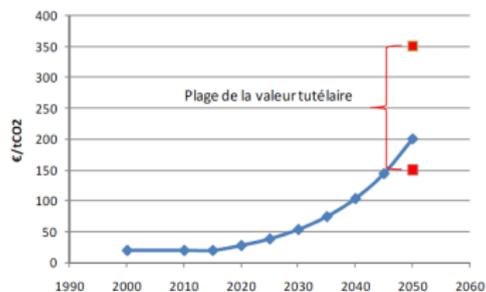
- 1 CO<sub>2</sub> = fix tax 20 euros/T
- 2 CO<sub>2</sub>+ = profile varying from 20 euros/T to 200 euros/T

- 1 low prices LP = WEO 2007

	2000	2030	2050
\$/boe	34.3	62.0	68.7
\$/MBTU	3.46	7.3	8.3
\$/ton	41.22	61.2	66.9

- 2 high prices HP = WEO 2009

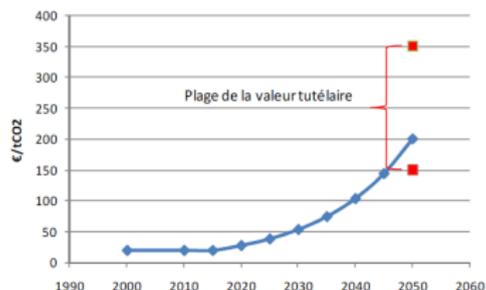
	2000	2030	2050
\$/boe	34.3	115	147
\$/MBTU	3.46	14	17.74
\$/ton	41.22	109.4	118.52



# Prices and Taxes assumptions

## CO<sub>2</sub> Taxes

- 1 CO<sub>2</sub> = fix tax 20 euros/T
- 2 CO<sub>2</sub>+ = profile varying from 20 euros/T to 200 euros/T



## fossil prices : WEO assumptions

- 1 low prices LP = WEO 2007

	2000	2030	2050
\$/boe	34.3	62.0	68.7
\$/MBTU	3.46	7.3	8.3
\$/ton	41.22	61.2	66.9

- 2 high prices HP = WEO 2009

	2000	2030	2050
\$/boe	34.3	115	147
\$/MBTU	3.46	14	17.74
\$/ton	41.22	109.4	118.52

# Elaboration d'indicateurs de fiabilité

Le modèle de prospective long terme

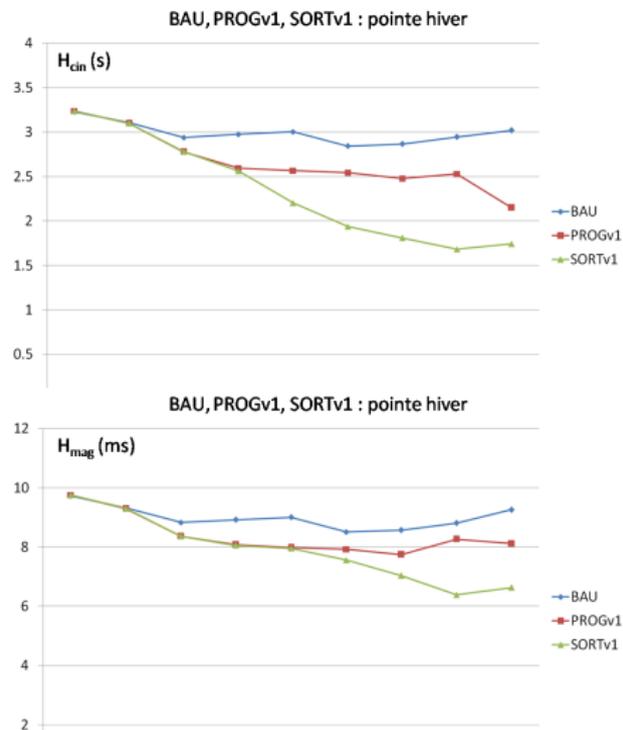
envisage des horizons longs de plusieurs décades

Les études de stabilité

mettent en jeu des échelles de temps s'échelonnant de quelques millisecondes à quelques heures

Réconcilier les échelles de temps : Une représentation agrégée des systèmes électriques permise par une approche thermodynamique pour considérer les échanges d'énergie

## Réserves Cinétiques et Magnétiques



## Sensibilité du mix de production : taxe ETS seule

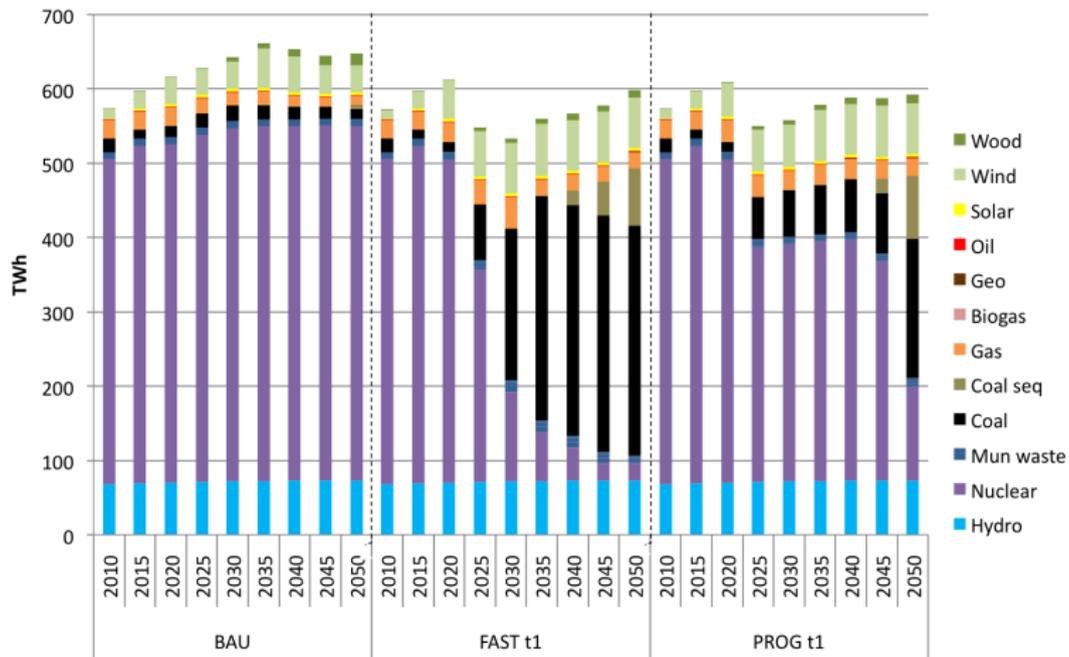
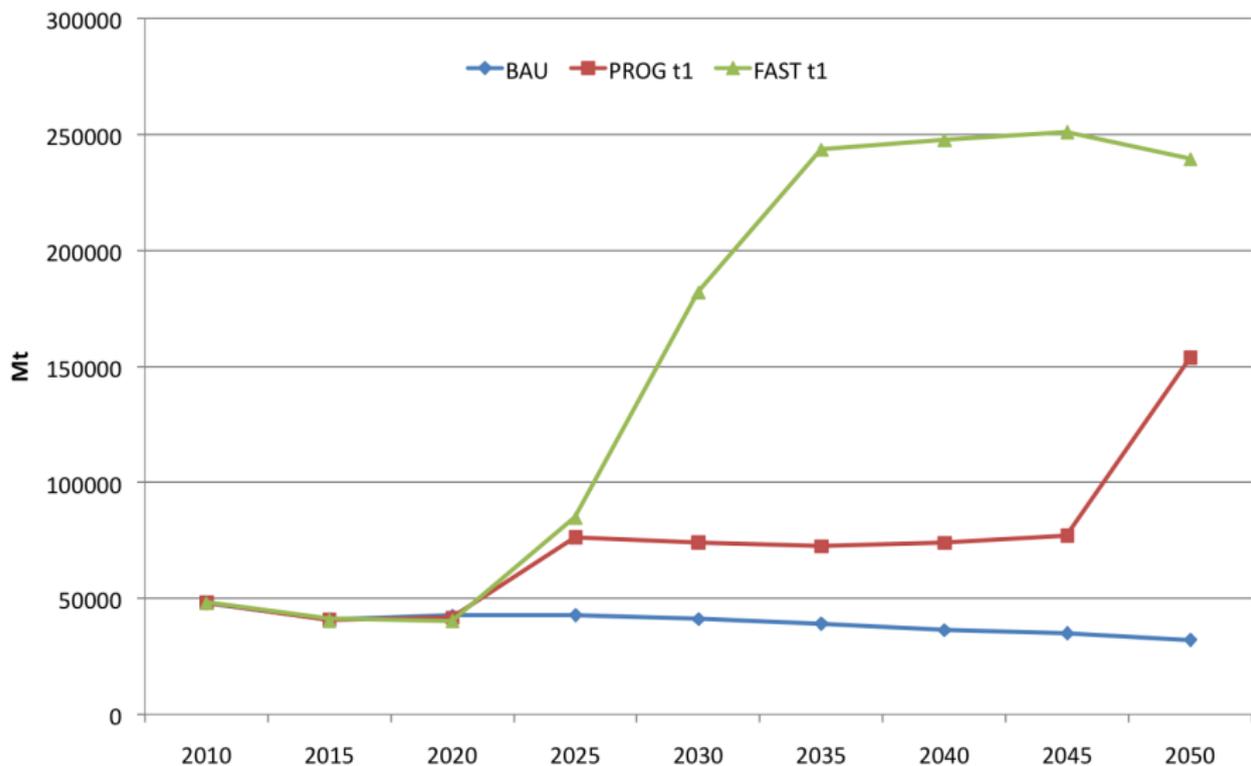


Figure: Production électrique (contrainte par la taxe)

# Sensibilité du mix de production : émissions de CO<sub>2</sub>



# Sensibilité du mix de production : taxe + quantités

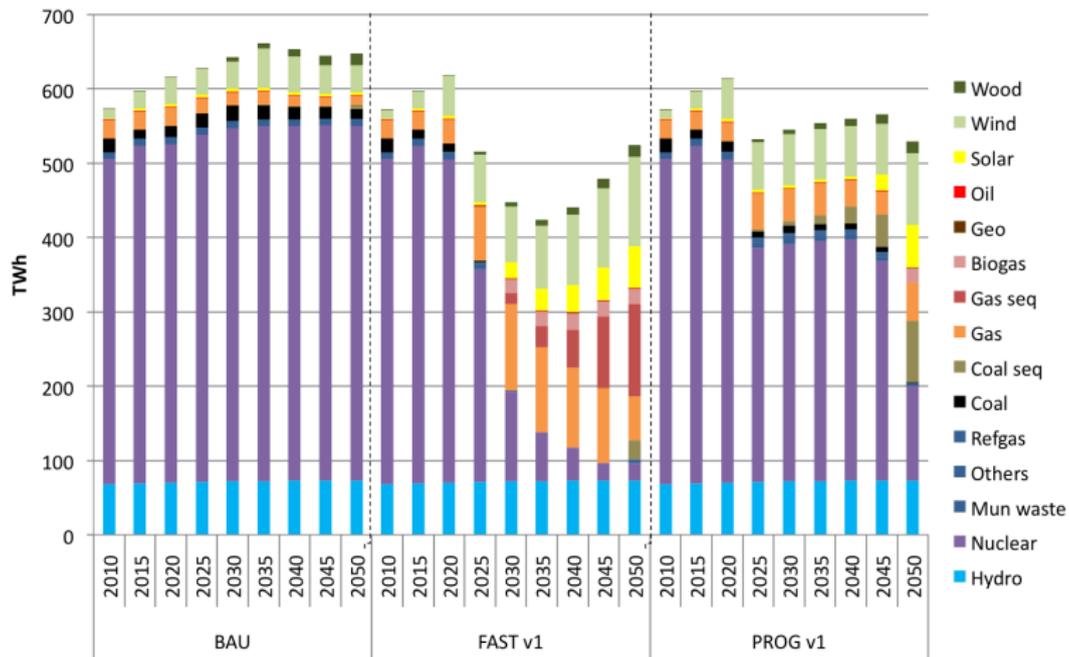


Figure: Production électrique (contrainte par la taxe et les quantités)

# Analyse du niveau des exportations: taxe ETS seule

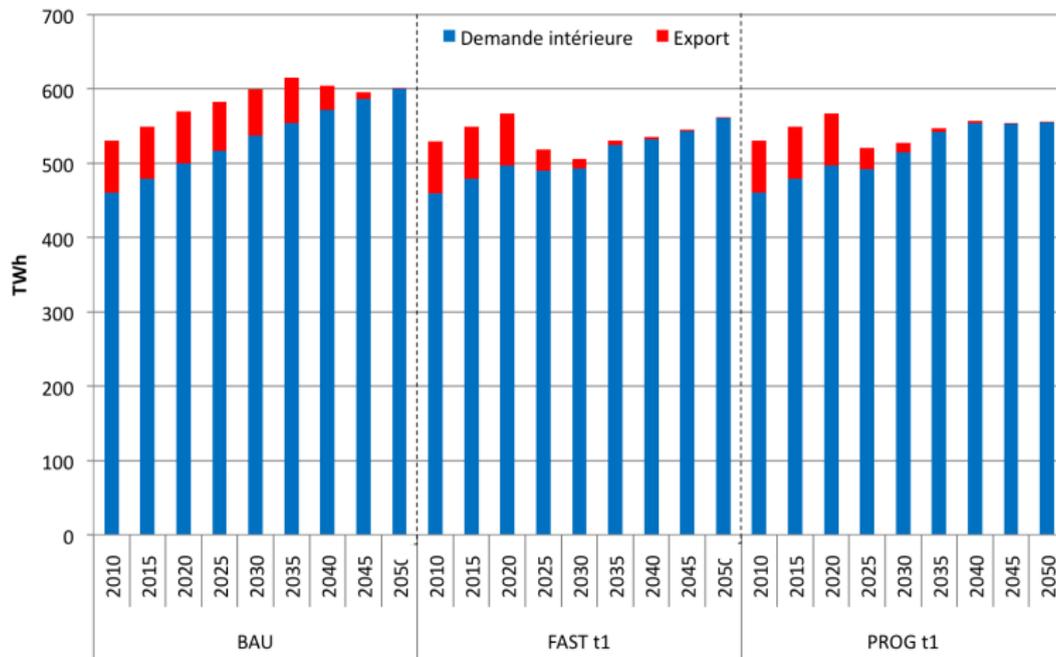
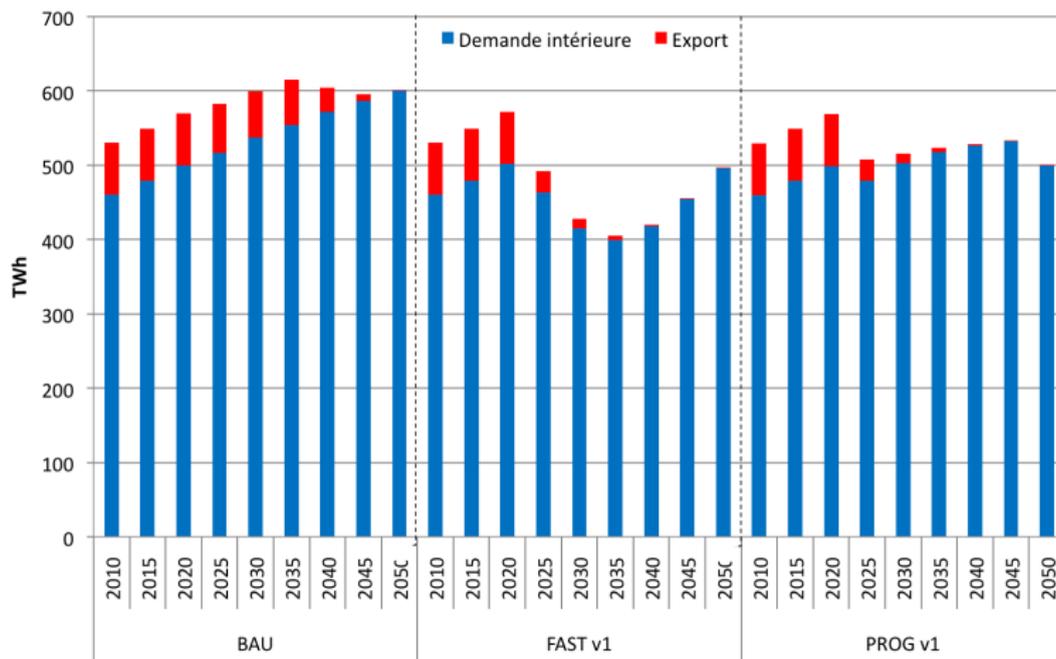


Figure: Exportations/Demande intérieure (contrainte par la taxe)

# Analyse du niveau des exportations: taxe + quantités



**Figure:** Exportations/Demande intérieure (contrainte par la taxe et les quantités)

# Fonction objectif de TIMES-FR électrique

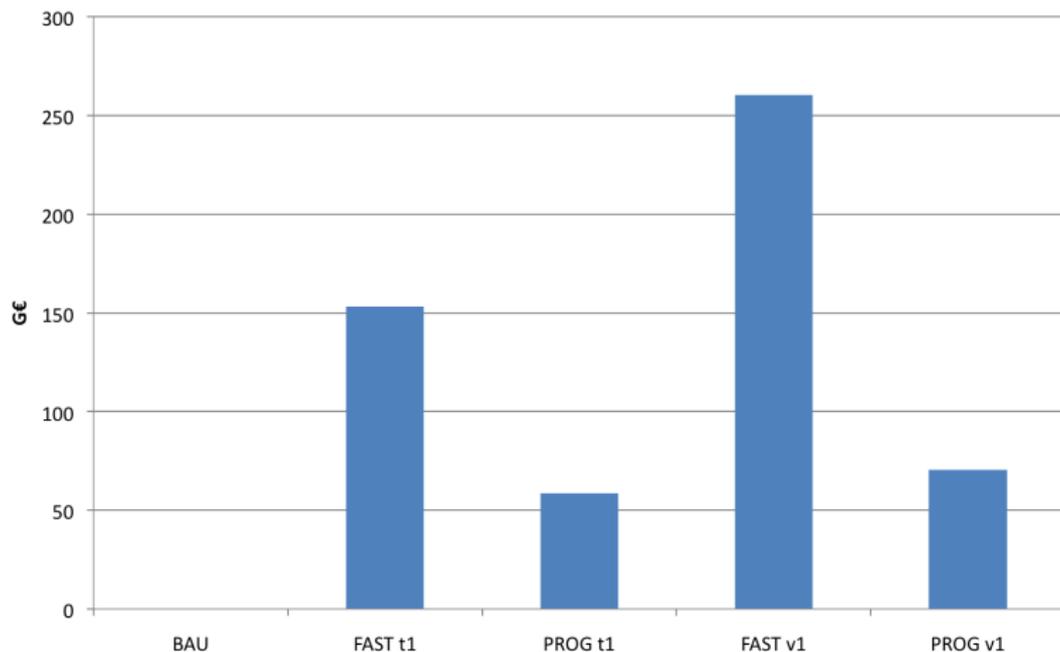


Figure: Surcoût par rapport au Coût total actualisé du BAU (actualisé en 2011)

# Nouvelles capacités installées pour un maintien à 65 GW

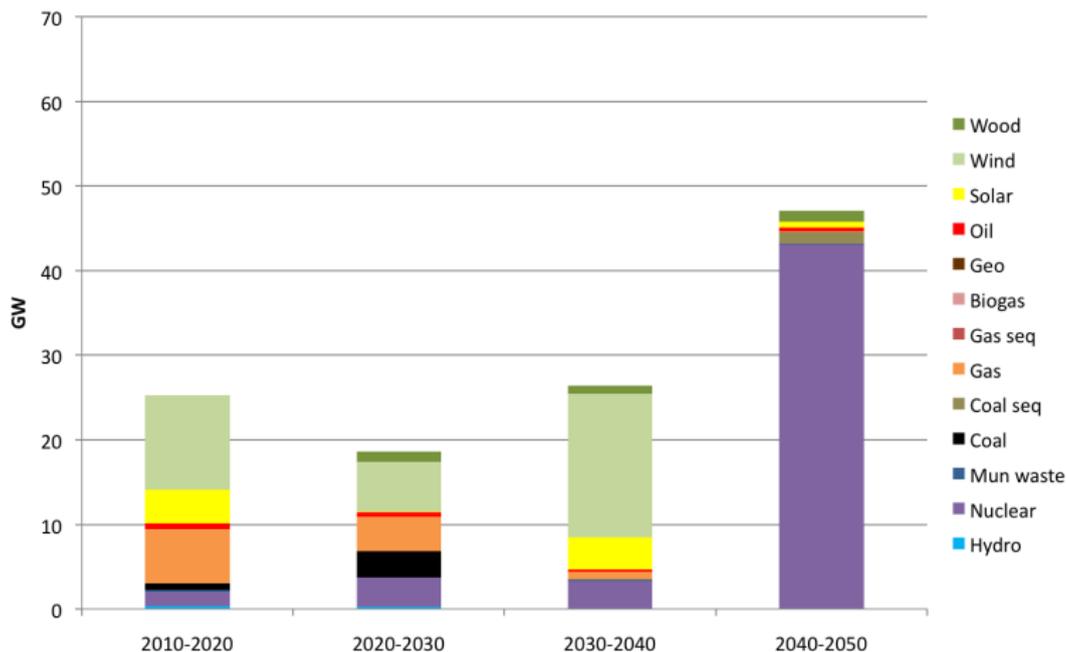


Figure: Nouvelles capacités installées pour le BAU

# Nouvelles capacités installées (avec les réacteurs prolongés)

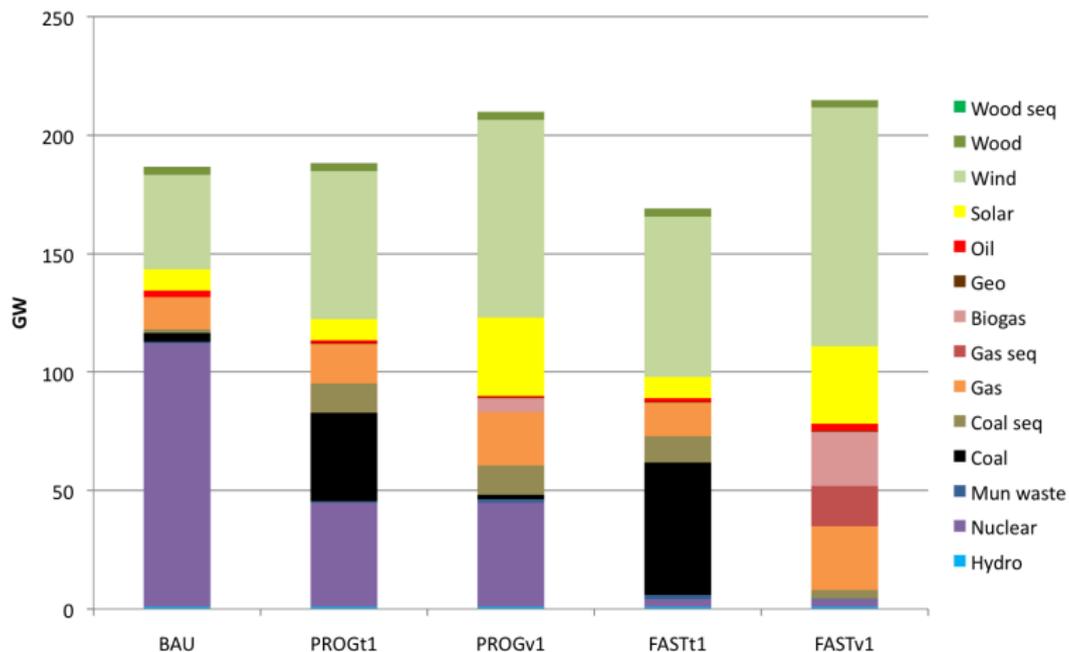


Figure: Nouvelles capacités installées par scénario

# Nouvelles capacités installées (sans les réacteurs prolongés)

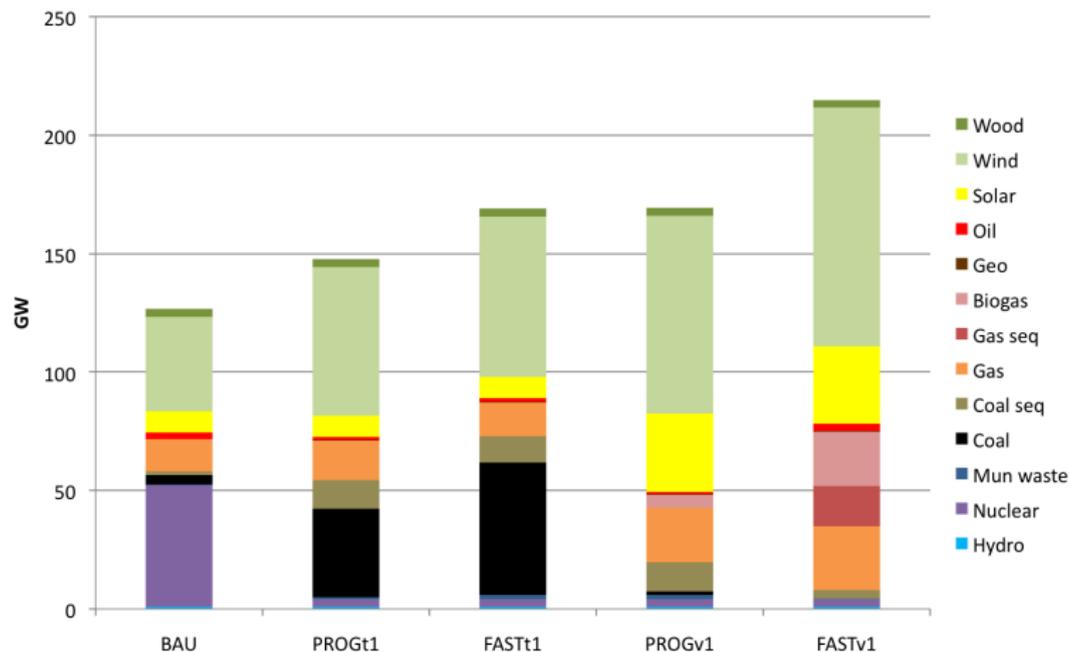
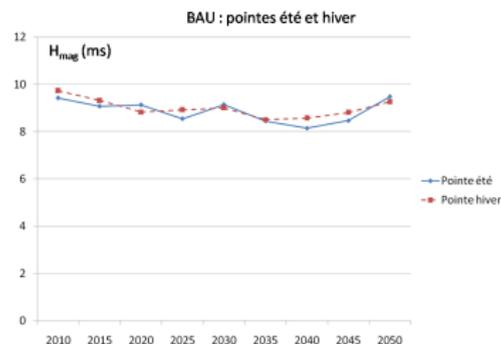
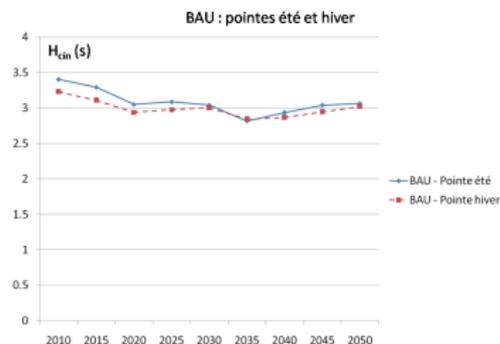
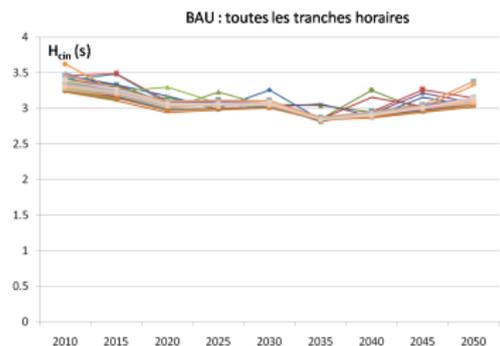


Figure: Nouvelles capacités installées par scénario

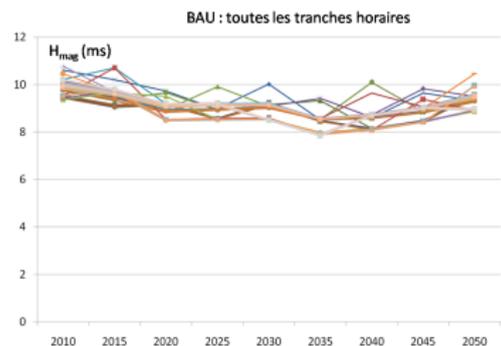
# Fiabilité du scénario BAU



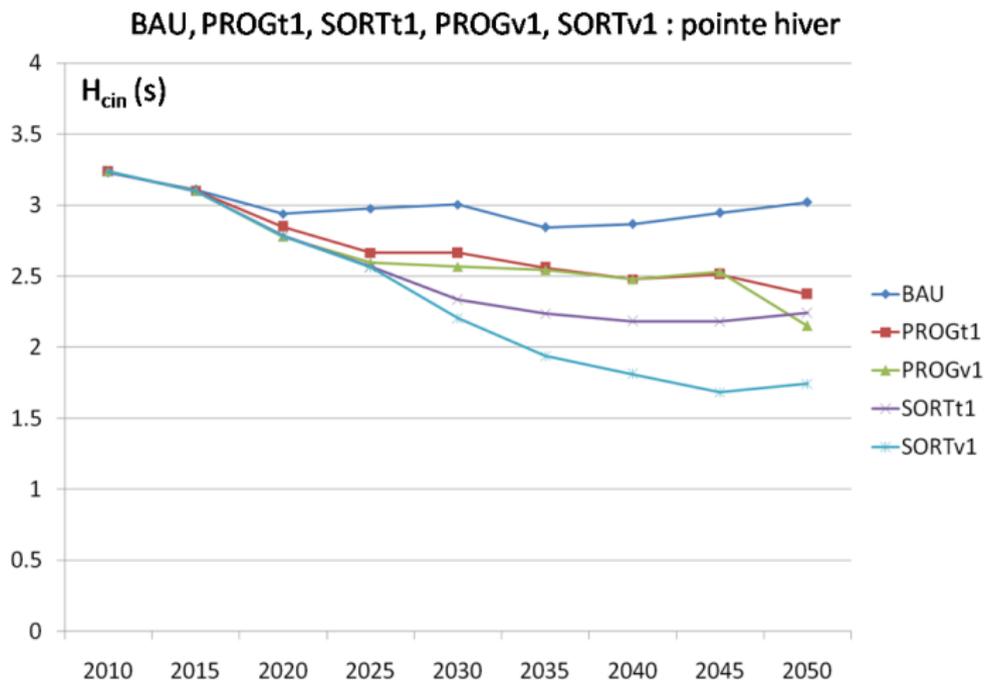
## Reserves Cinétiques



## Reserves Magnetiques



# Fiabilité : réserves cinétiques en pointe hiver



# Fiabilité : réserves magnétiques en pointe hiver

