



# La smart energy dans tous ses "états" : contribution des études de l'avenir lointain

Nadia Maïzi

<sup>1</sup>MINES ParisTech, PSL Research University, CMA - Centre de mathématiques appliquées,  
CS 10207 rue Claude Daunesse 06904 Sophia Antipolis Cedex, France

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

**Journée de la Chaire MPDD en collaboration avec Schneider electric**

# Prospective du secteur de l'énergie

*Voir loin n'est donc pas seulement un devoir envers la communauté et même notre civilisation, mais c'est bien souvent pour l'entreprise une question de vie ou de mort, de vitalité ou de sénescence. (A Landucci)*

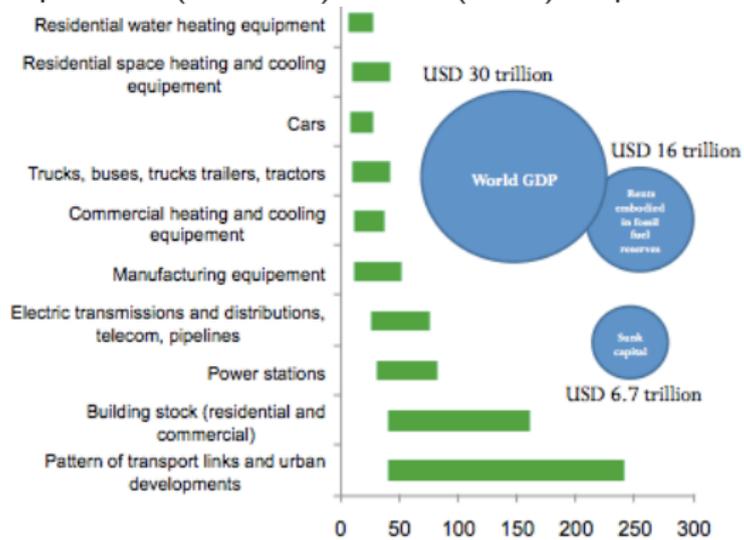


Chaire ParisTech Modélisation prospective  
au service du développement durable

# Conjugaison de deux enjeux

- Intensité et inertie des investissements
- Reponsabilité dans le bilan des émissions mondiales de GES du secteur de l'énergie évaluée à 2/3 par l'AIE en 2015.

Durée de vie du capital investi (OCDE 2012) en années (en vert) et répartition du GDP (en bleu)



# Adopter une démarche prospective pour construire l'Avenir

## La démarche

Explorer le futur  
à partir de la  
connaissance du présent et du  
passé

## L'objet

Dans le but d'examiner les  
**évolutions possibles**  
en fonction  
des décisions prises, des  
actions réalisées.

*La prospective cherche à fixer des objectifs possibles auxquels il faudra parvenir : l'avenir non pas comme une chose déjà décidée, et qui petit à petit, se découvrirait à nous, mais comme une chose à faire.* G. Berger

# Une prospective de la smart energy

## Comment réconcilier

- 1 ambition climatique

la **décarbonation** de la grille : qui conduit aux substitutions vers le vecteur électrique (gaz to power, intermittence)

- 2 périmètre, décliné selon les éléments structurants suivants

Le caractère **systemique** : multi vecteurs

Le caractère **spatial** : points d'injection multiples (sources localisées)

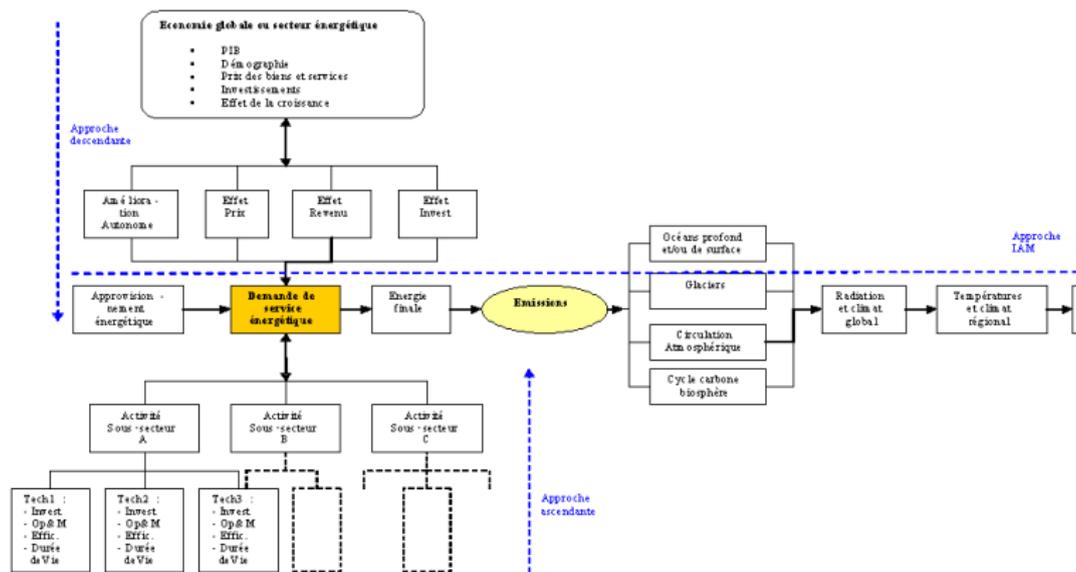
- 3 enjeux de long terme, de différents ordres

qualité de fourniture : **fiabilité**

compétition avec les autres usages : **eau comme externalité**

# Savoir décrypter et arbitrer la multiplicité d'outils disponibles

- ☞ selon la prédominance économique, technologique ou climatique des modèles/approches qui les ont générés



Source AIE et Parson & Fisher-Vanden & Assoumou (2005)

# Compétitions, substitutions et cohérences préservées

lorsque l'on parle de **smart energy**

## TIMES

Un modèle technologique d'optimisation linéaire, ouvert, développé dans le cadre de l' ETSAP (AIE)

- piloté par la demande
- sur un horizon certain : moyen ou long terme (50/100 ans)
- dont l'objectif est la minimisation du coût total actualisé du système énergétique

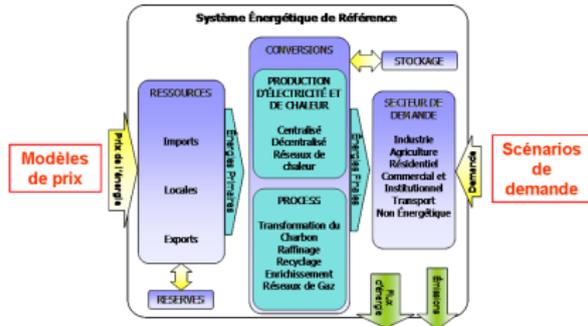


Figure: système énergétique de référence de TIMES

# fiabilité de la smart energy



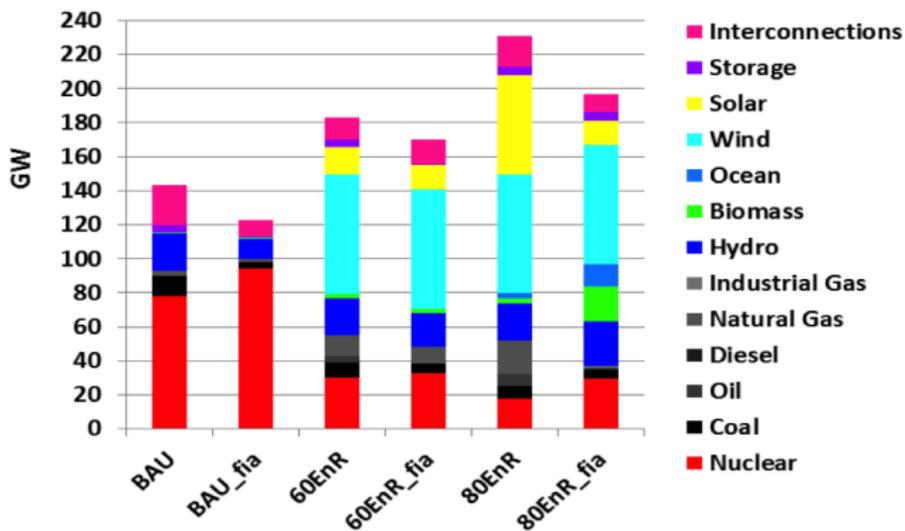
L'Europe pendant le blackout de l'Italie (28 Sept. 2003)

Source: RTE.



Chaire ParisTech Modélisation prospective  
au service du développement durable

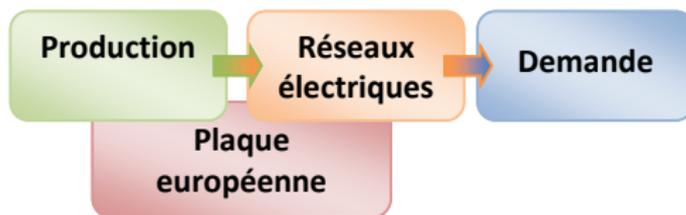
# Des conditions de pénétration du renouvelable



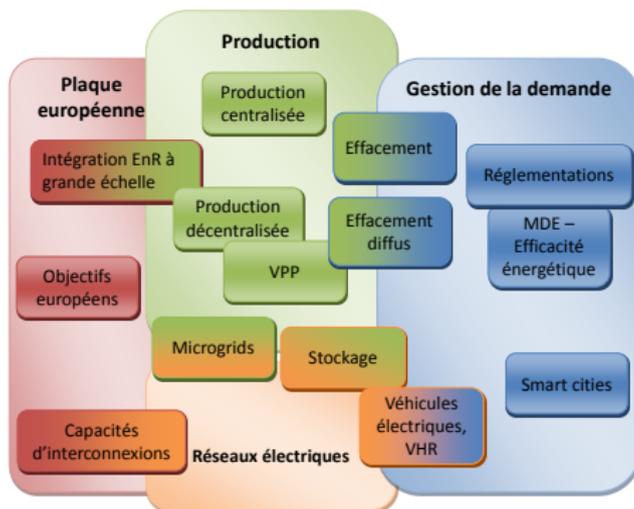
**Figure:** Capacité de production d'électricité installée en 2050 dans le scénario BAU et dans différents scénarios de pénétration du renouvelable dans le système électrique français

[V. Krakowski. Pénétration du renouvelable et stratégies de déploiement du réseau électrique : réconciliation des échelles spatiaux-temporelles dans les exercices prospectifs de long terme. thèse MINES ParisTech.]

# Avant : l'organisation classique du système électrique

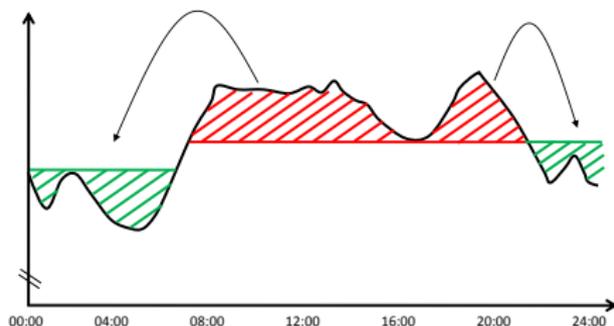


# Après : le système électrique intelligent



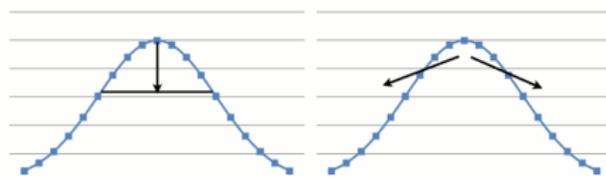
## ☞ Effacement de consommation électrique

# Lissage de la courbe de charge par le pilotage de la demande



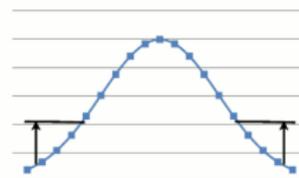
Pilotage par la demande (Demand Response)

Méthode de gestion pour lisser la courbe de charge



Peak Clipping

Load Shifting



Valley Filling

- 1 Load shifting : décalage temporel de l'usage (ECS, lave vaisselle, lave linge, sèche linge)
- 2 Peak clipping : coupures courtes de l'usage (réfrigération, chauffage, climatisation et ventilation)
- 3 Valley filling : exploitation des périodes creuses (recharge des batteries VE)

# Impact long terme de la gestion de la demande

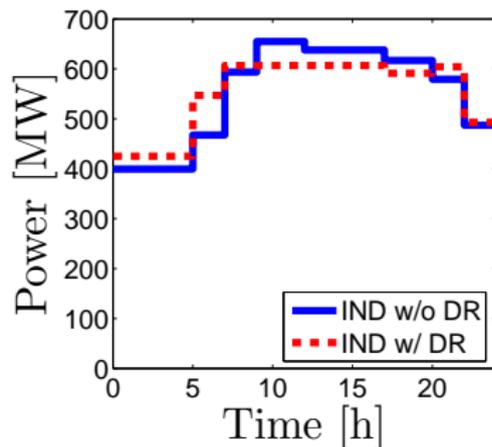
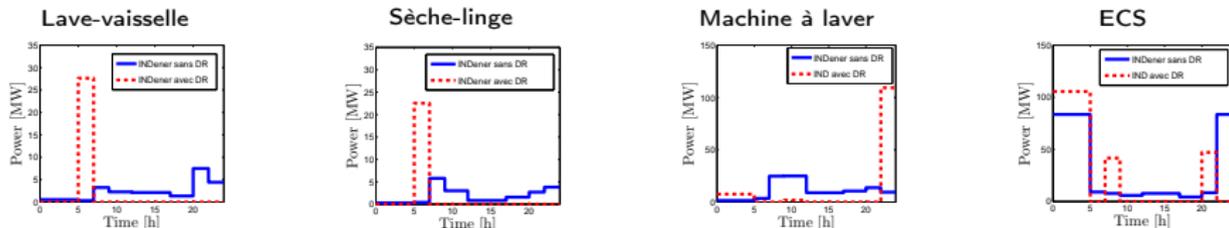


production électrique : 100%  
renouvelable en 2030

- Scénario Indépendance énergétique (INDener)  
Maximum : 30% EnR  
**intermittentes**

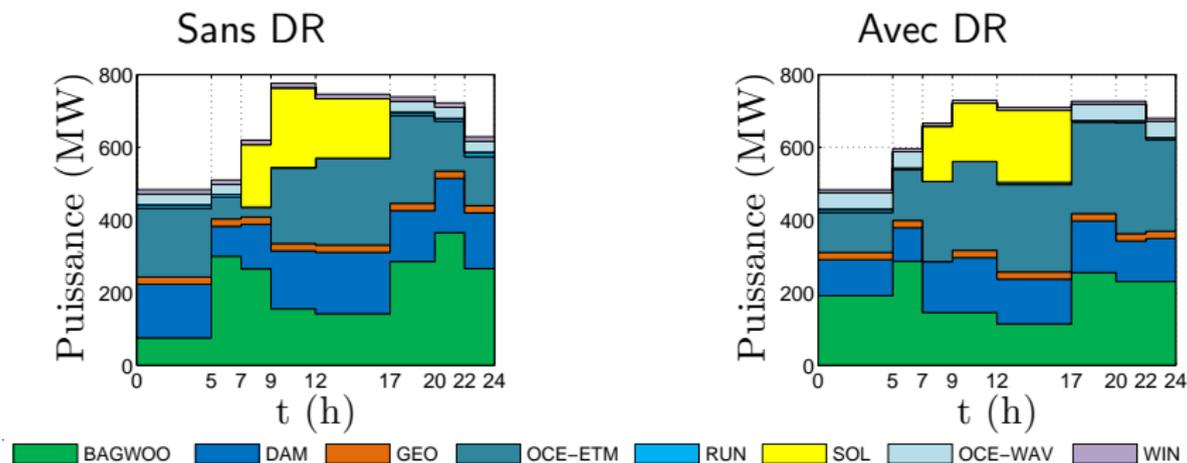
# Ecrêtement des pointes avec la DR report long

Courbes de charge d'une journée type en été 2030 avec un scénario INDENR : report longue durée des quatre usages



Journée type en été 2030

# Diminution de la capacité totale installée avec la DR



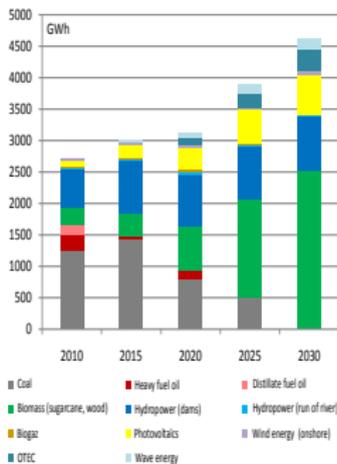
Mix de production électrique pour une journée type ouvrée d'été en 2030 d'un scénario 100 % EnR avec et sans recours aux reports de charge

- ☛ ***DR longue durée : diminue la capacité totale installée de 11 %***
- ☛ ***DR longue durée et DR courte durée : diminuent la capacité totale installée de 16.7 %***

# La règle des 30% comme garantie du niveau de fiabilité ?

## Mix de production

100% renouvelable 2030 et règle des 30%

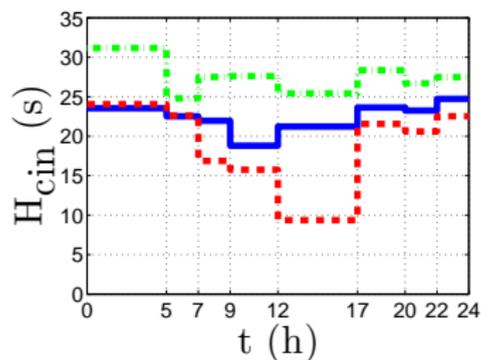


— 100 % EnR

--- PV-OCE

--- REF-2008

un jour d'été typique

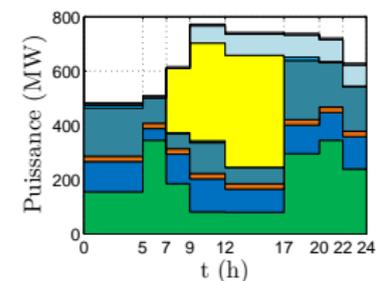


- 100 % EnR : maximum 30 % de production instantanée intermittente
- PV-OCE : aucune contrainte sur la production intermittente
- REF-2008 : niveau de réserve cinétique en 2008

# Aller au delà des 30 % d'EnR intermittentes

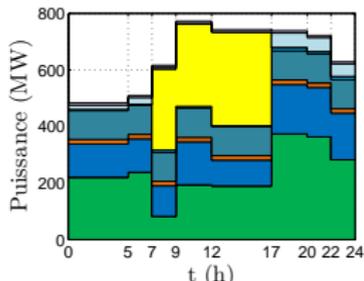
## Mix de production électrique d'une journée type en été 2030

Sans contrainte de fiabilité

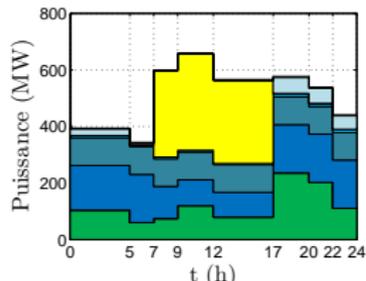


■ BAGWOO 
 ■ COB 
 ■ DAM 
 ■ GEO 
 ■ OCE-ETM 
 ■ RUN 
 ■ SOL 
 ■ OCE-WAV 
 ■ WIN

$$\forall t : H_{cin,t} \geq \min(H_{cin,2008})$$



Contrainte + GD  
+ Stockage



- *Part des EnR intermittentes  $\geq 50\%$*

- *↗ de la capacité installée de 9.4 %*

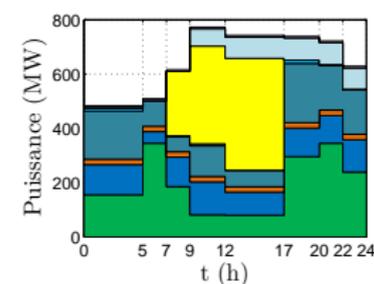
- *Part des EnR intermittentes  $\geq 50\%$*

- *↘ de la capacité installée de 6 %*

# Aller au delà des 30 % d'EnR intermittentes

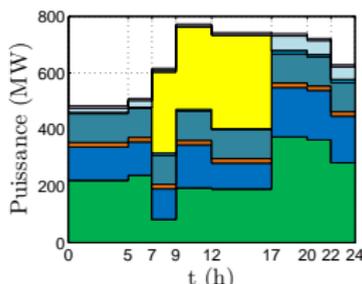
## Mix de production électrique d'une journée type en été 2030

Sans contrainte de fiabilité

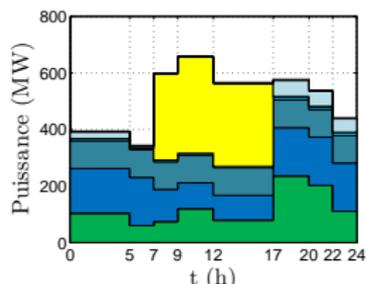


- **Part des EnR intermittentes  $\geq 50\%$**
- **$\nearrow$  de la capacité installée de 9.4 %**

$$\forall t : H_{cin,t} \geq \min(H_{cin,2008})$$



Contrainte + GD  
+ Stockage

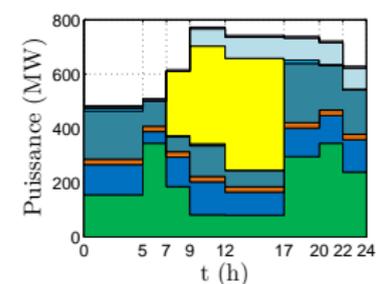


- *Part des EnR intermittentes  $\geq 50\%$*
- *$\searrow$  de la capacité installée de 6 %*

# Aller au delà des 30 % d'EnR intermittentes

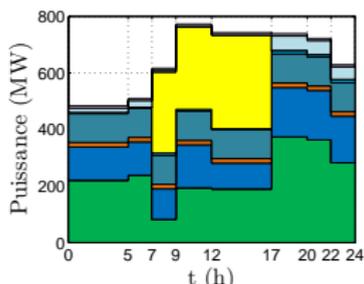
## Mix de production électrique d'une journée type en été 2030

Sans contrainte de fiabilité

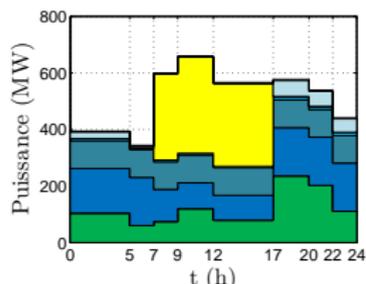


■ BAGWOO 
 ■ COB 
 ■ DAM 
 ■ GEO 
 ■ OCE-ETM 
 ■ RUN 
 ■ SOL 
 ■ OCE-WAV 
 ■ WIN

$$\forall t : H_{cin,t} \geq \min(H_{cin,2008})$$



Contrainte + GD  
+ Stockage



- **Part des EnR intermittentes  $\geq 50\%$**
- ↗ **de la capacité installée de 9.4 %**

- **Part des EnR intermittentes  $\geq 50\%$**
- ↘ **de la capacité installée de 6 %**

# From time reconciliation to space aggregation

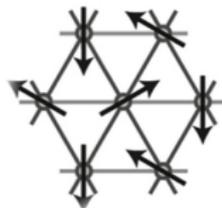
☞ So far, the assumption that synchronism is unconditionally achieved, whatever the regime and the fluctuation, enabled to implicitly add  $E_{cin}$

But, even if the reserves indicators are high, **synchronism is the necessary condition** ensuring that the system is able to withstand a load fluctuation :

☞ this requires namely the **equirepartition of magnetic energy**.

The critical behavior is captured thanks to a dedicated lattice model

2d-DoF (DoF physical) objects (here **the rotors of the generators**) are coupled within a 2D lattice **the grid**



From phase transition theory it comes that fluctuation on the iso-energy states [Kosterlitz-Thouless, 1973] is not unconditionally synchronized (ordered) for this lattice (2d-DoF/2D) and may experience a disordering process under long-range soft modes.

## Towards a synchronism indicator

The universality of phase transitions and critical phenomena theory allows to study the synchronism with a dedicated model where

- (Kuramoto, 1984) brings coherence of fully-correlated oscillator population with noise  $\dot{\theta}_i = \omega_i - \frac{K}{N} \sum_j \sin(\theta_i - \theta_j)$

where  $\omega_i$  is the natural frequency of the  $i^{\text{th}}$  oscillator,  $K$  a coupling constant (admittance) and  $N$  the number of oscillators (rotors),  $\theta_j$  the angles between the rotors.

- Synchronism is ensured for tight enough binding (Dörfler, 2013):

$$\lambda_2(G) \geq \lambda_{\text{critical}} = \max_{\{i,j\} \in \varepsilon_G} \left( \|P_i - P_j\|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

enabling to derive a new indicator  $\lambda_2(G) / \lambda_{\text{critical}} \geq 1$

Thus synchronism is not unconditionally achieved:

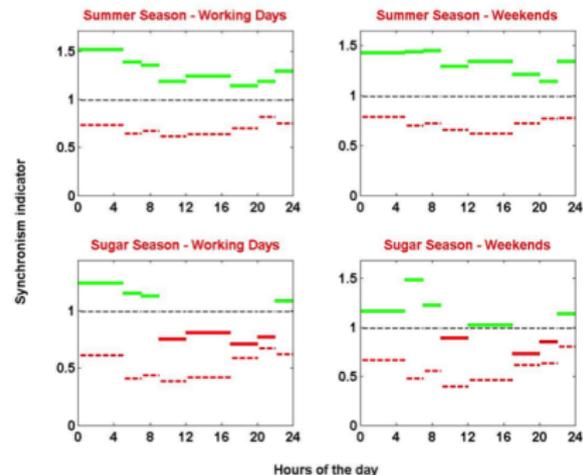
- 1 factors for desynchronization ( $\lambda_{2,G}$  weak) are:  $N$  large, weak and sparse couplings between generators;
- 2 factors favouring synchronism are: strong and highly correlated couplings between generators (copper plate).

# Reunion 100 % RE in 2030

- Scenario where the reserves indicators are high



## Synchronism indicator



current (dashed) and strengthened grid (solid)

- dispersed energy (summer) provides a more resilient grid

# Intégrer l'eau comme externalité

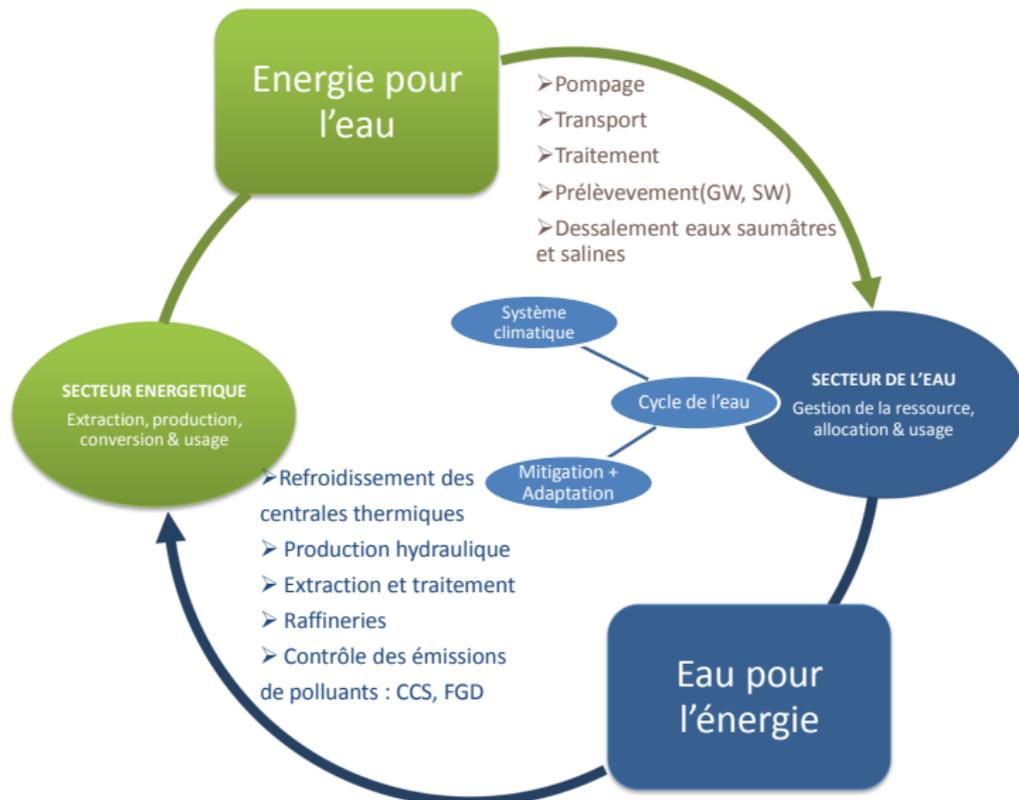


intégrer les synergies eau et énergie



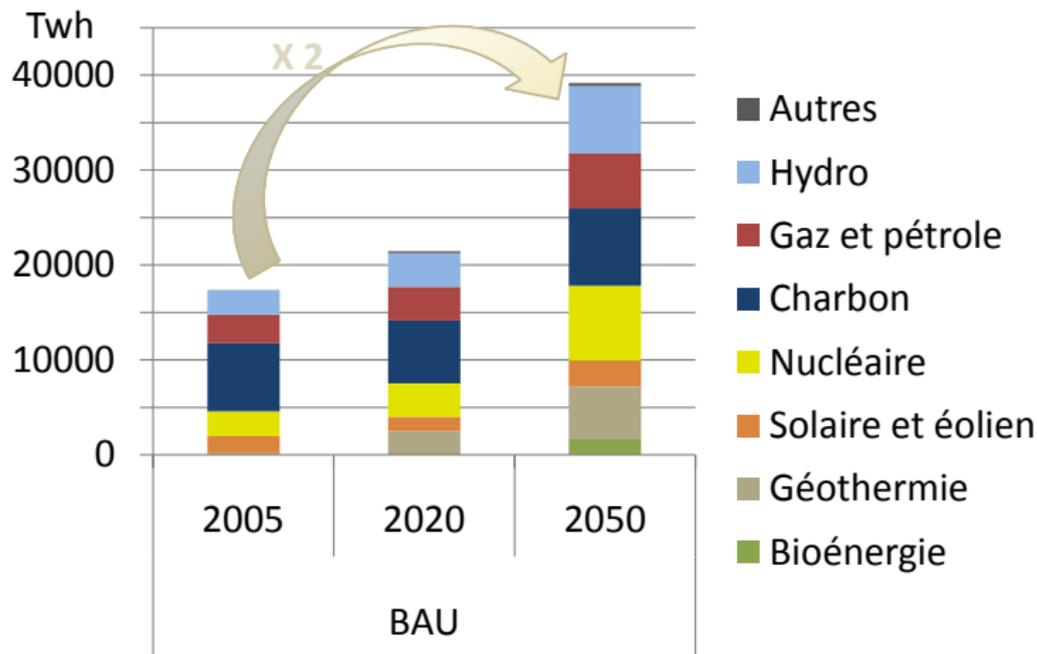
Chaire ParisTech Modélisation prospective  
au service du développement durable

# L'Eau pour l'Énergie



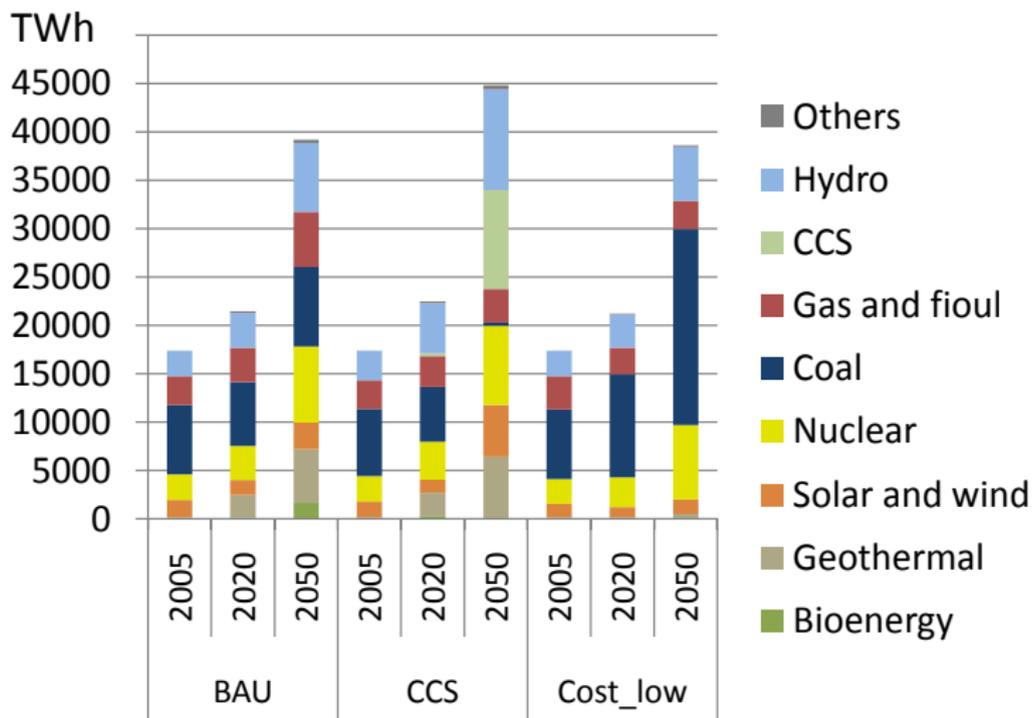
# Impact des choix énergétiques sur l'eau

## Production d'électricité mondiale par source d'énergie



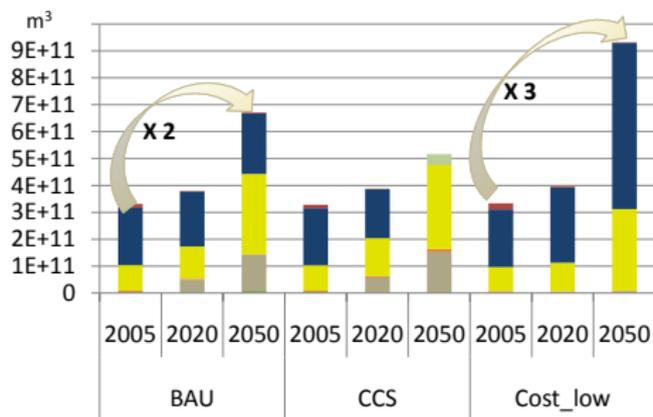
# Réglementation environnementale et coûts d'extraction

- CCS : contraint le système à une élévation max. de température de 2°C en 2100
- Cost\_low : coûts d'extraction des ressources fossiles plus faibles



# Réglementation environnementale et coûts d'extraction

## Prélèvements d'eau douce

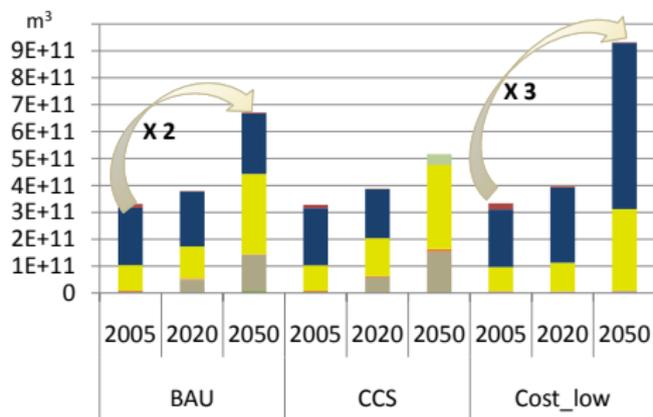


## Consommations d'eau douce

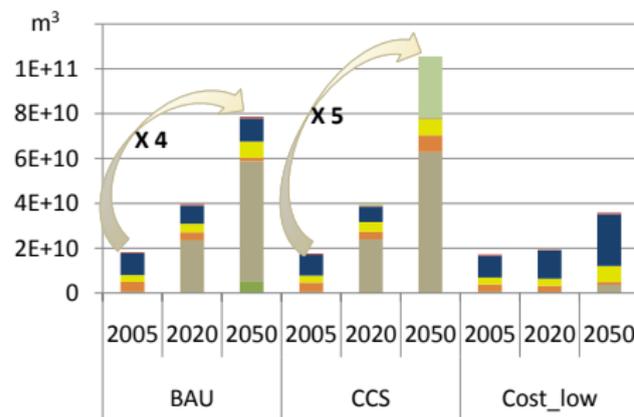
■ Bioénergie 
 ■ Géothermie 
 ■ Solaire 
 ■ Nucléaire 
 ■ Charbon 
 ■ Gaz et pétrole 
 ■ CCS

# Réglementation environnementale et coûts d'extraction

## Prélèvements d'eau douce



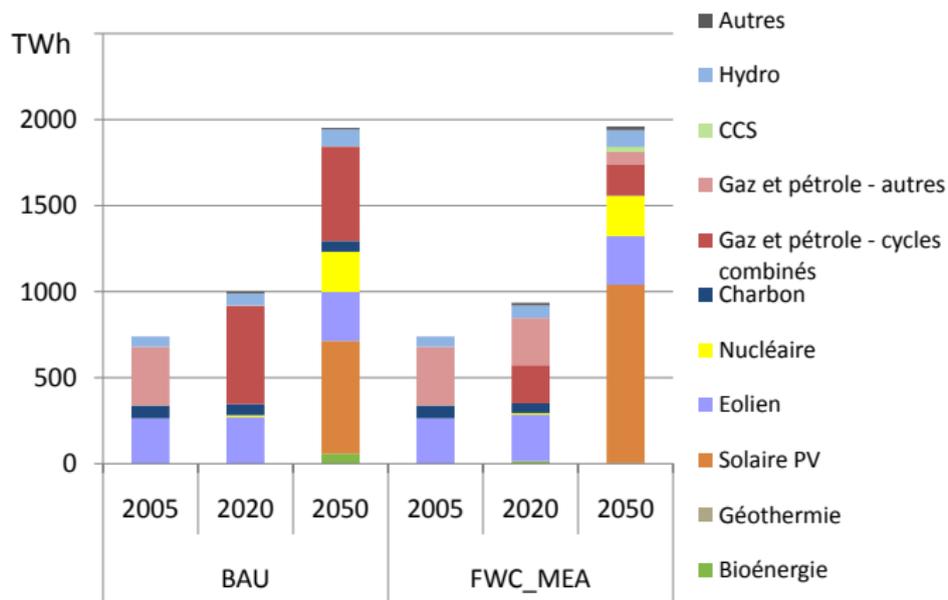
## Consommations d'eau douce



■ Bioénergie 
 ■ Géothermie 
 ■ Solaire 
 ■ Nucléaire 
 ■ Charbon 
 ■ Gaz et pétrole 
 ■ CCS

# L'eau comme une contrainte

- *FWC\_MEA* : consommations d'eau douce du Moyen-Orient jusqu'en 2100  $\leq$  consommations en 2005



Empreinte en eau importante de certaines technologies

# Une prospective de la smart energy

## s'appuie sur une méthodologie qui

- prend en compte les externalités
- intègre les contraintes qui conditionneront le bon fonctionnement du système
- évalue les compétitions sectorielles
- intègre les comportements pour dépasser le postulat de l'humain docile sur lequel reposeraient les gisements de flexibilité.

Cette démarche est la condition de l'élaboration d'une smart energy qui contribue **aux trajectoires bas carbone**s compatibles avec l'enjeu climatique.

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



Chaire ParisTech Modélisation prospective  
au service du développement durable