



CHOIX D'INVESTISSEMENT ET INCERTITUDES AUTOUR DES FILIÈRES DANS LA DÉCABORNISATION DU MIX ÉLECTRIQUE EUROPÉEN

Gildas SIGGINI, Sophie DEMASSEY, Edi ASSOUMOU

Centre de Mathématiques Appliquées, France

Financement: Clim2Power

Contexte

Du besoin de l'étude du système électrique européen dans son ensemble:

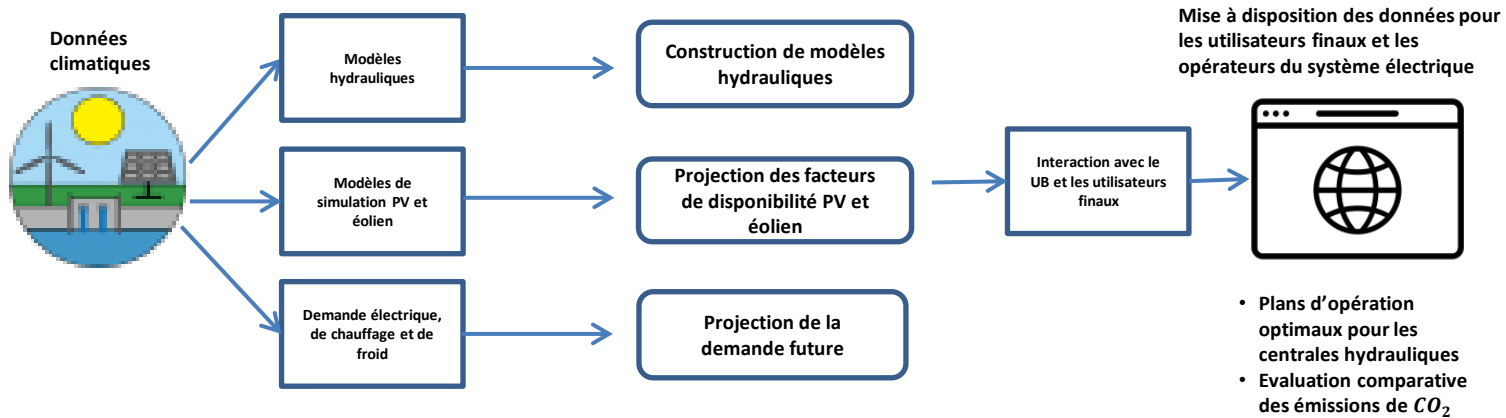
- Un système interconnecté avec de fortes interdépendances
- Une remise en question de la flexibilité et de l'adéquation du système due à la forte pénétration d'énergies renouvelables
- Des objectifs environnementaux communs et des politiques environnementales différenciées
- Une allocation optimale des investissements en cohérence avec les projets de développement transfrontaliers





Contexte

Clim2Power

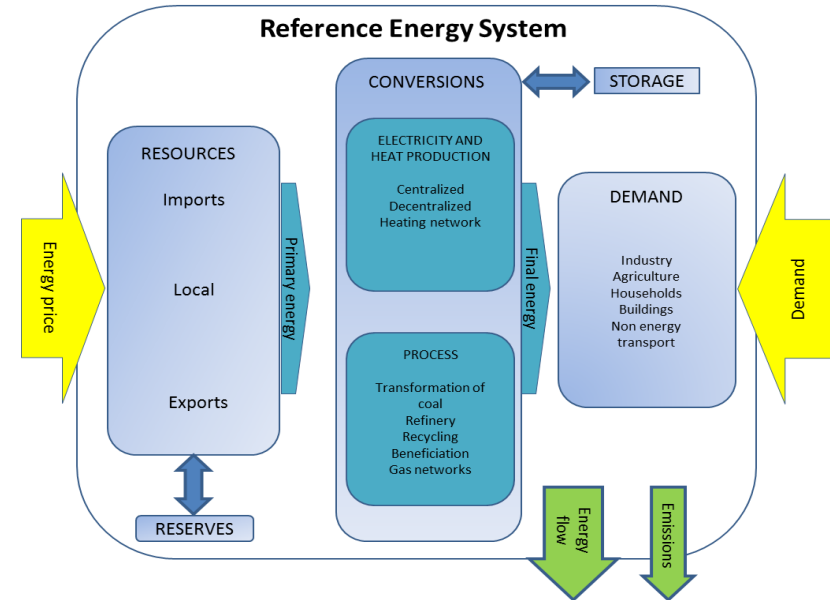


Le modèle TIMES: eTIMES-EU

- Développé dans le cadre du programme ETSAP de l'AIE

Exploration des futurs possibles du système énergétique reposant sur:

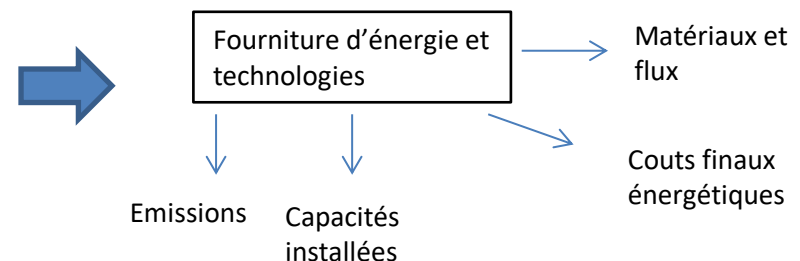
- Une représentation détaillée du système énergétique et des futures options technologiques
- Des données en entrée sur les prix des commodités
- Une flexibilité dans la décomposition temporelle
- Driver** : Demande finale de services énergétiques
- Des scénarios contrastés
- Un modèle mathématique d'optimisation



Optimisation linéaire

$$\min \left(\sum_i c_i X_i \right)$$

$$\sum_i a_{ji} X_i \geq b_j \quad \text{et} \quad X_i \geq 0$$

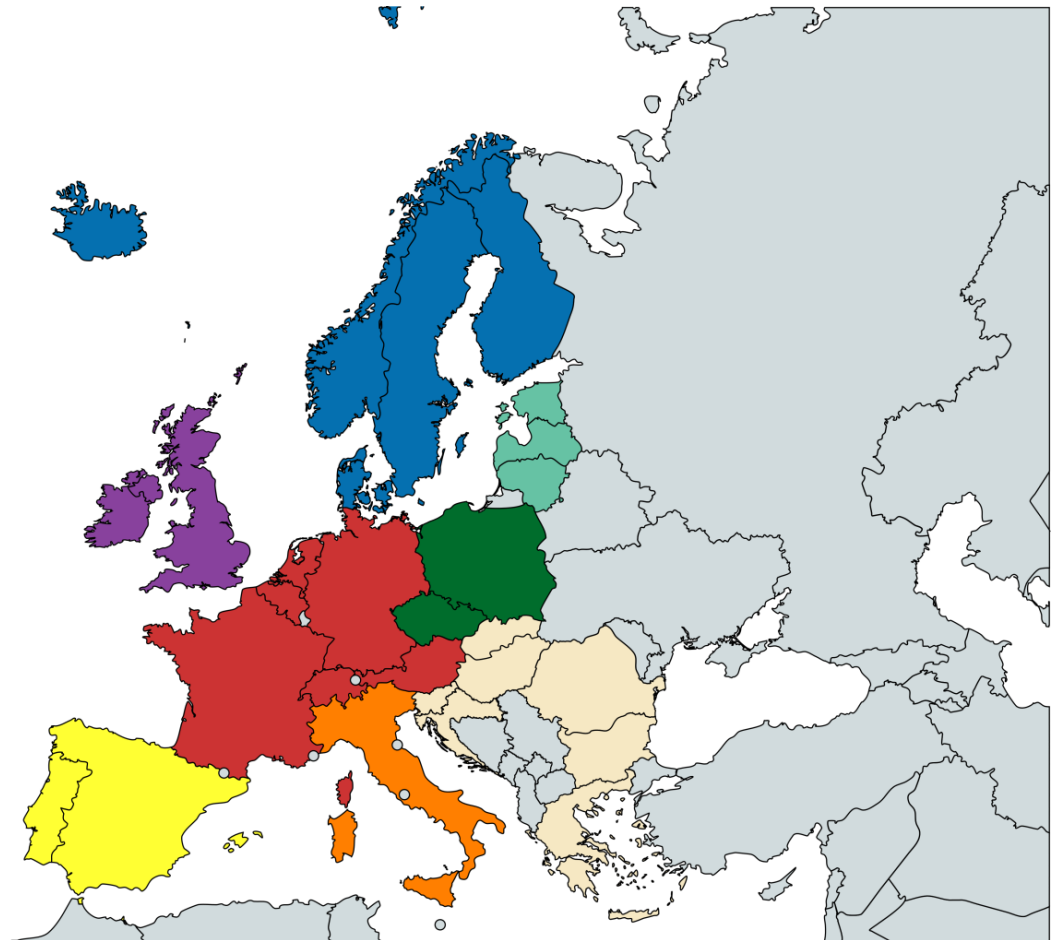


Le modèle TIMES: eTIMES-EU

■ Résolution spatiale

Regions considered

- CWE region
- CEE region
- Nordic & Western Nordic
- British Island
- Iberian peninsula
- NEE region
- Alpine peninsula
- SEE region

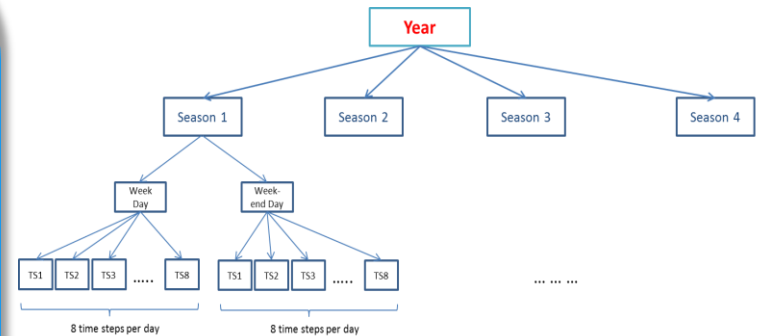
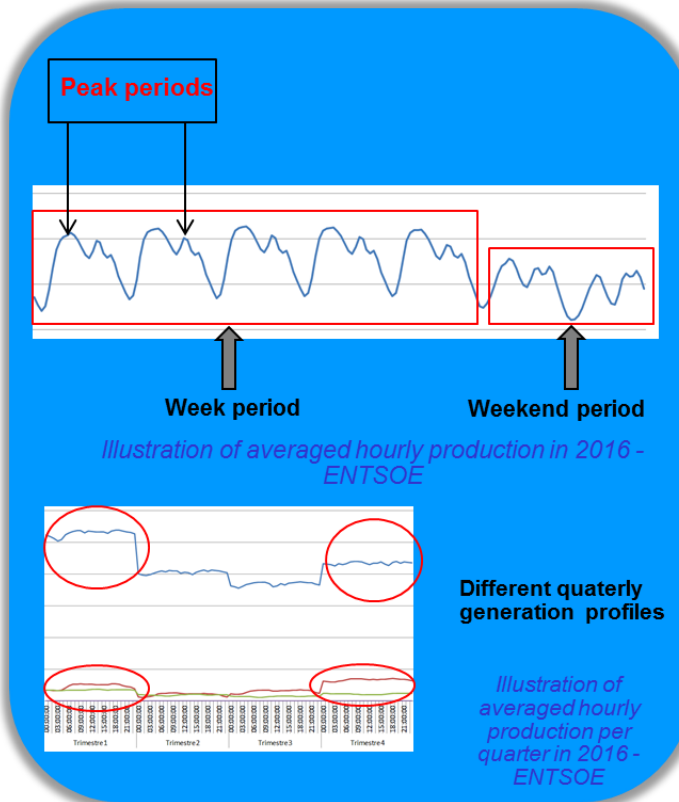


Created with mapchart.net ©

8 groupes de régions interconnectées

Le modèle TIMES: eTIMES-EU

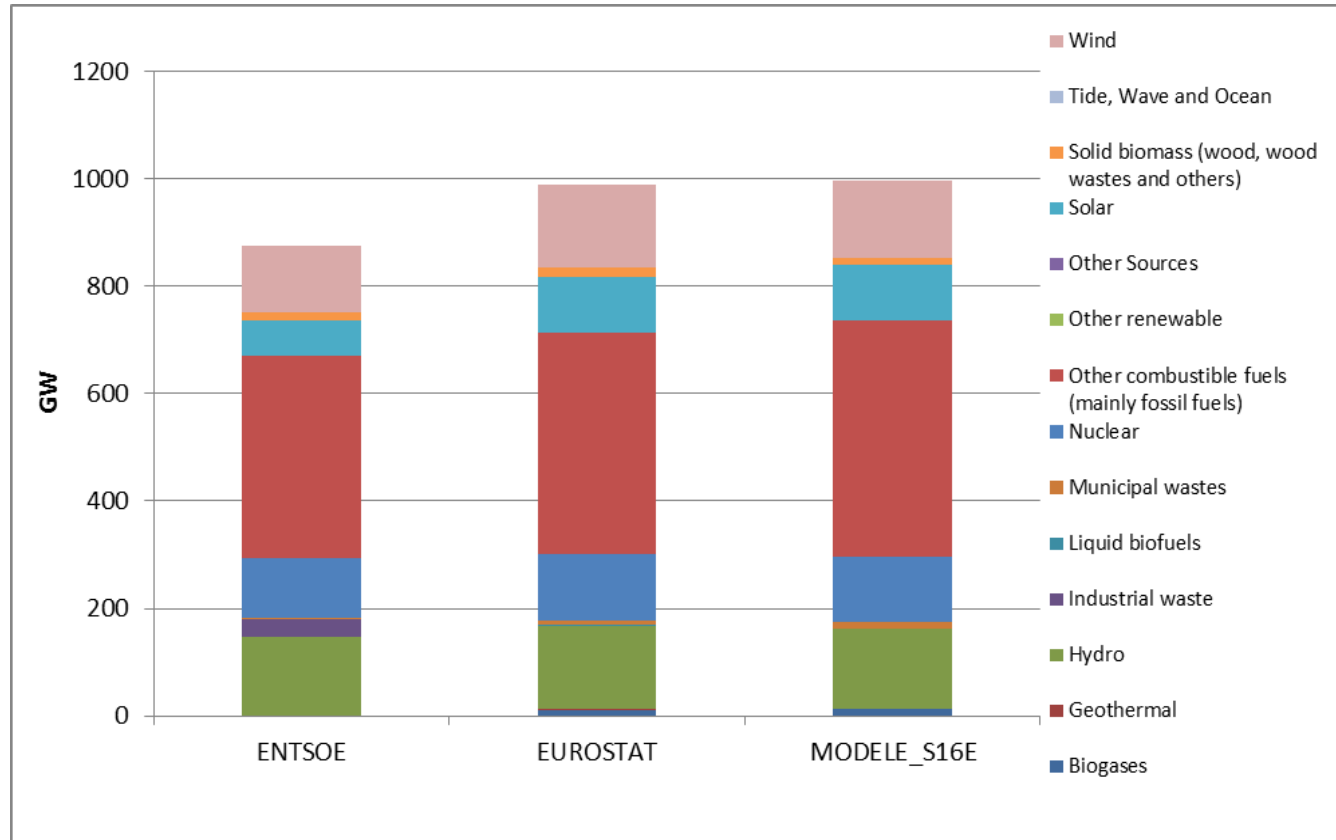
■ Résolution temporelle



➤ 64 jours-types (4 saisons, 2 jours types par semaine, pas de temps de 3h)

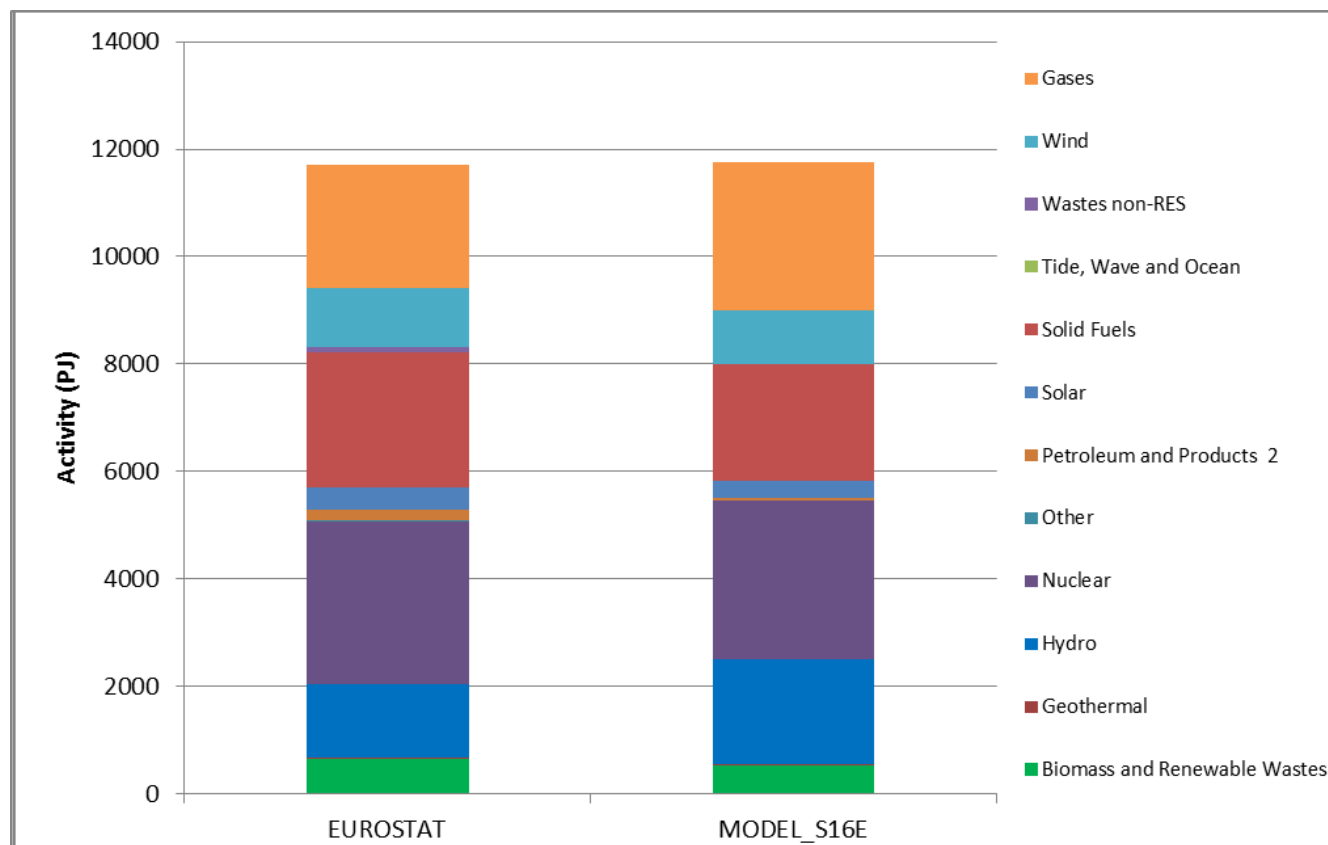
Le calibrage du modèle: capacités installées

Calibrage de l'année de base avec les données ENTSOE et EUROSTAT



Le calibrage du modèle: production et émissions de CO_2

Calibrage de l'année de base avec les données ENTSOE et EUROSTAT



Emissions de CO_2 : 1019 Mt (Agora Energiewende) vs. 997 Mt dans le modèle

Scénarios de décarbonisation

BASE

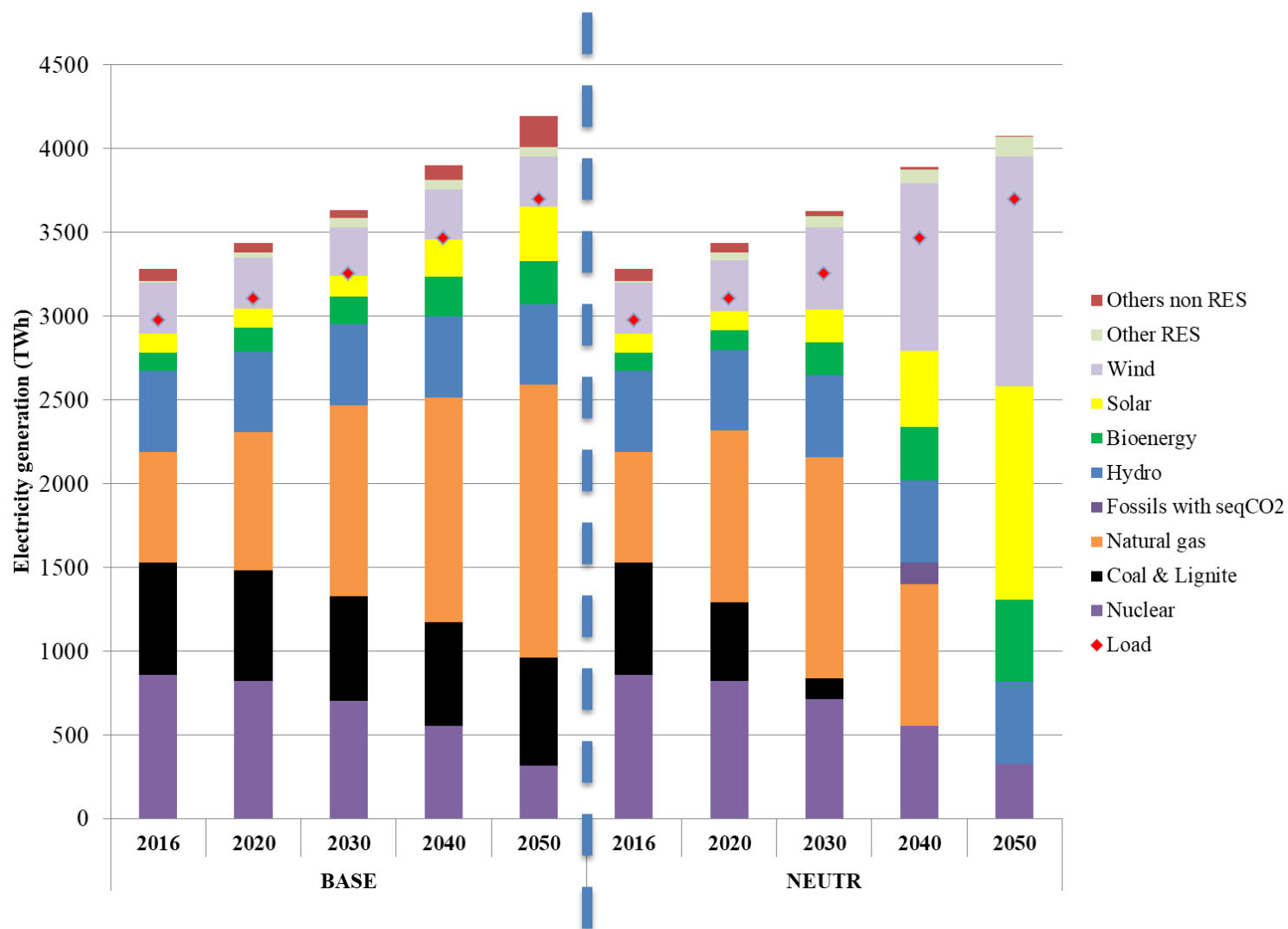
- Prix de la tonne CO_2 faible: 5 €/tonne en 2016 et 35 €/tonne de 2030 à 2050
- Taux d'actualisation: 8%

NEUTR scenario

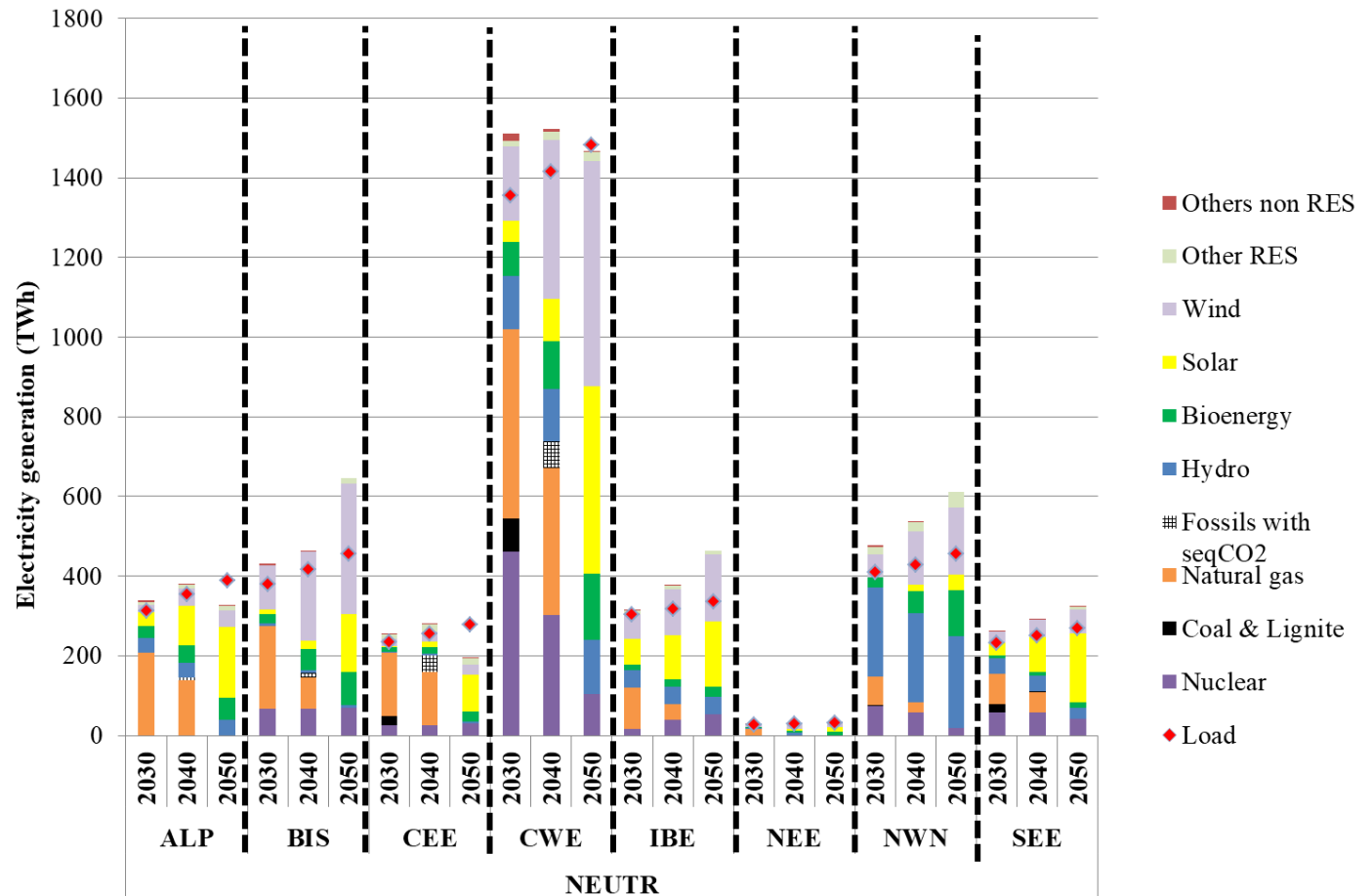
- Evolution similaire du prix de la tonne CO_2
- 0 Mt CO_2 en 2050



Premiers résultats



Premiers résultats



Introduction de la variabilité climatique

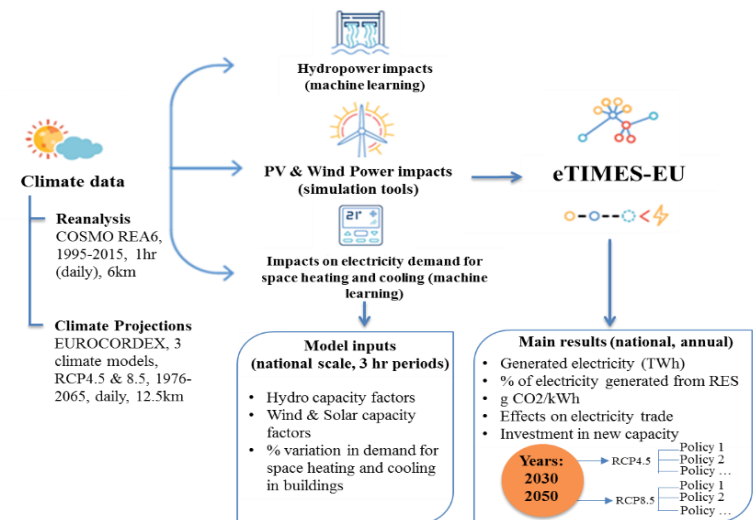
■ Buts

- Traduire la variabilité climatique en termes de disponibilité des moyens de production,
- Quantifier l'impact de la variabilité sur le mix électrique: incertitudes autour de la production, niveaux d'échanges, pénétration des renouvelables

■ Méthodologie

GCM	RCM	Code
ICHEC-EC-EARTH	DMI-HIRHAM5	D45, D85
IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-INERIS-WRF331F	F45, F85
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REMO2009	J45, J85

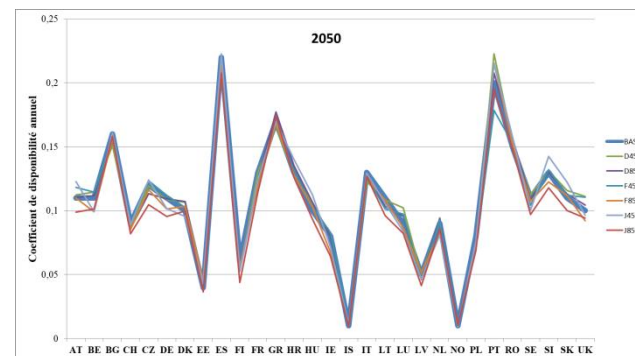
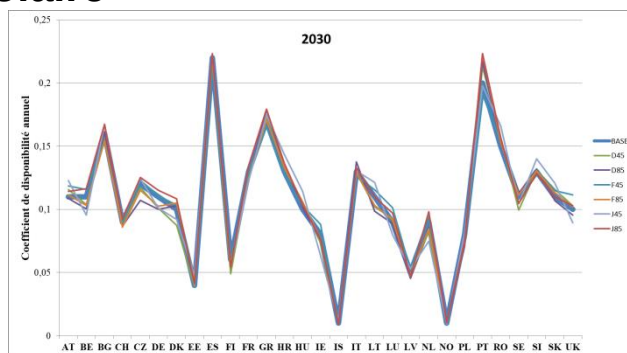
GCM: Global Climate Model
RCM: Regional Climate Model



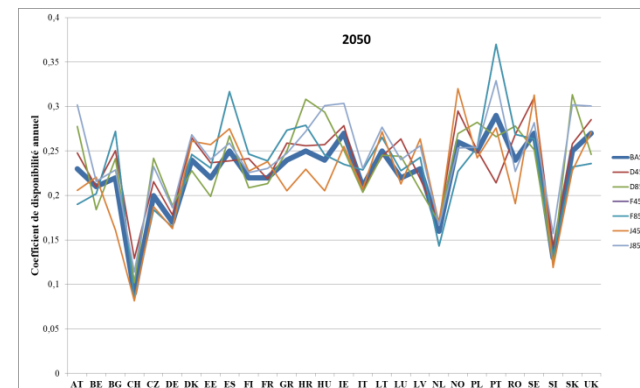
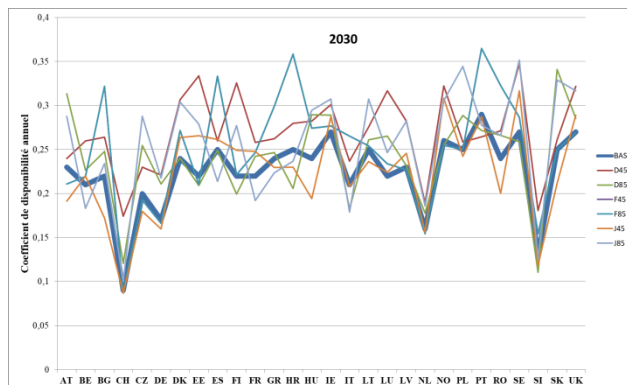
Introduction de la variabilité climatique

Indicateur: Coefficient de variation $k = \frac{\text{ecartype}}{\text{moyenne}}$

Solaire

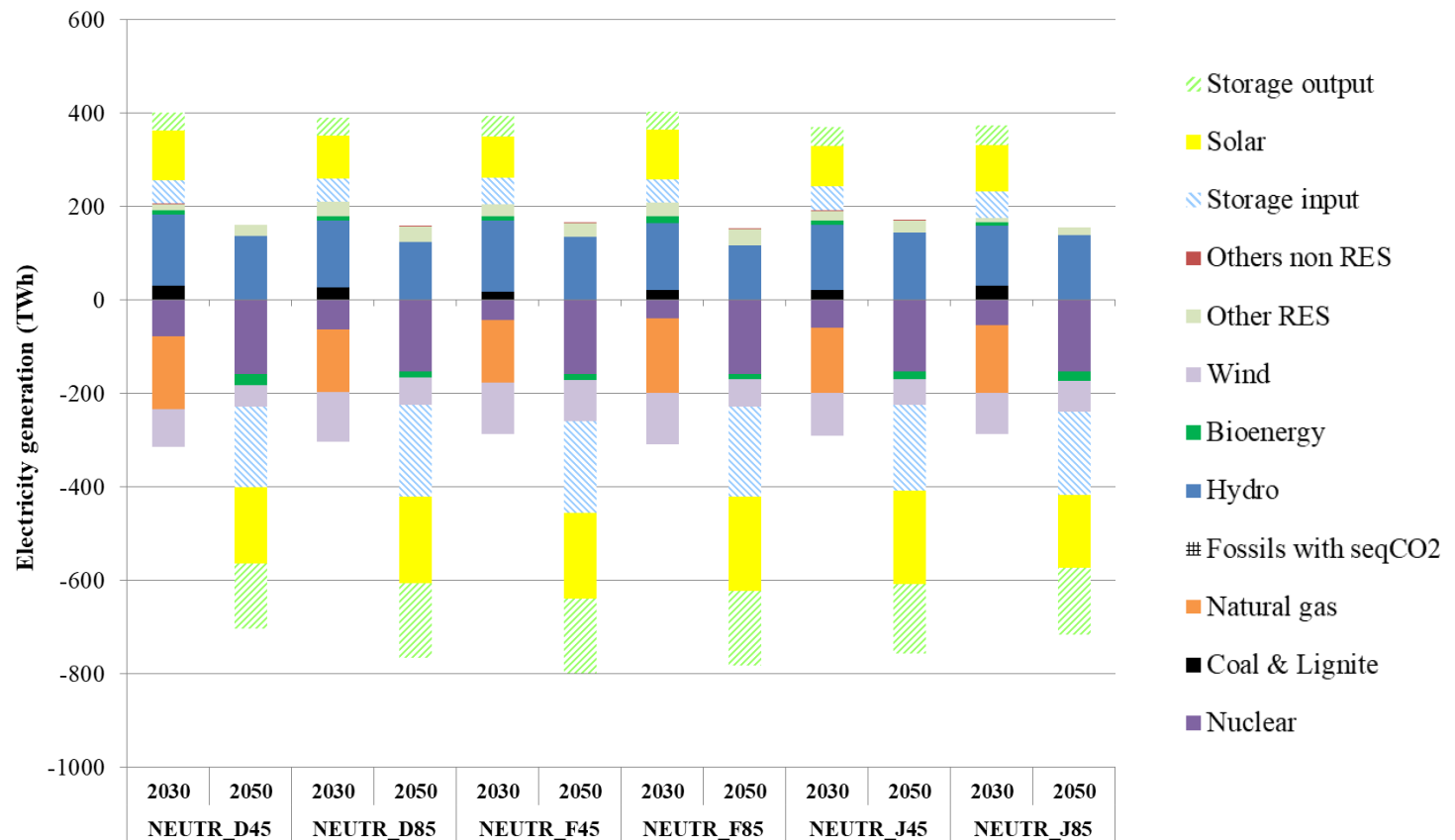


Eolien

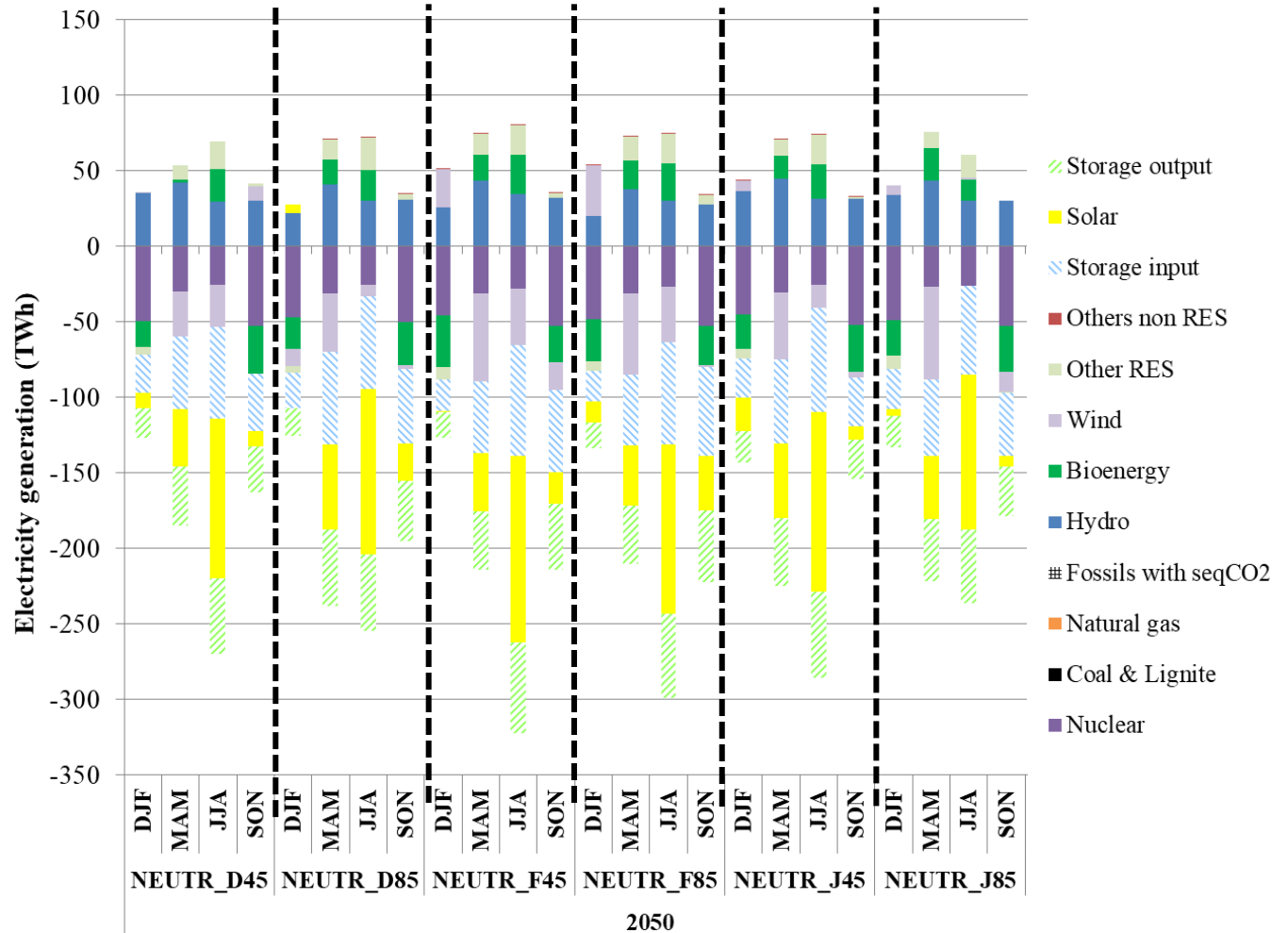


Coefficient de variation	2030	2050
Solaire	2-20%	2-23%
Eolien	8-30%	5-19%

Premiers résultats



Premiers résultats



Premiers résultats

Variation de la production par région (valeur de k)

Region / Moyen de production	Hydro	Bioenergy	Solar	Wind	Other RES
Alpine Peninsula (ALP)	13%	6%	10%	9%	0%
British Islands (BIS)	42%	3%	5%	1%	25%
Central East Europe (CEE)	16%	3%	6%	6%	0%
Central Western Europe (CWE)	12%	2%	5%	3%	0%
Iberian (IBE)	25%	3%	3%	10%	23%
Nordic & Eastern Nordic (NEE)	24%	4%	9%	2%	0%
Nordic & Western Nordic (NWN)	17%	2%	4%	0%	10%
South Eastern Europe (SEE)	30%	3%	22%	14%	0%

- Une forte sensibilité de la production hydraulique dans les régions BIS, IBE, NEE et SEE
- La production solaire est sensiblement impactée dans les régions ALP et SEE

Conclusion

Prochaines étapes

- Développement d'indicateurs pertinents pour la caractérisation des différences: part de renouvelables dans le mix, évolution du prix de l'électricité, variations des investissements, émissions de CO_2 ...
- Lancement des autres scénarios climatiques
- Désagrégation des résultats à l'échelle NUTS2
- Couplage avec un modèle de puissance





Merci pour votre attention!

Gildas SIGGINI

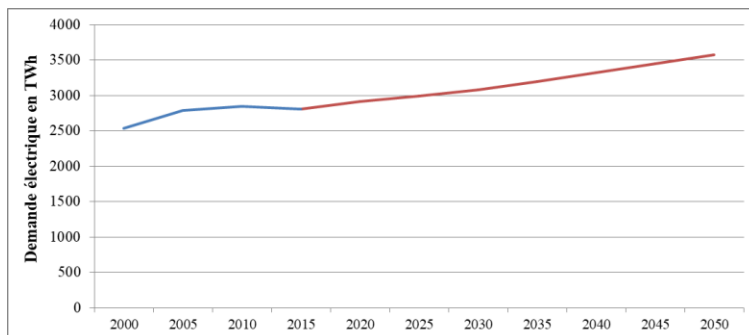
E-mail: gildas.siggini@mines-paristech.fr

Centre de Mathématiques Appliquées, France

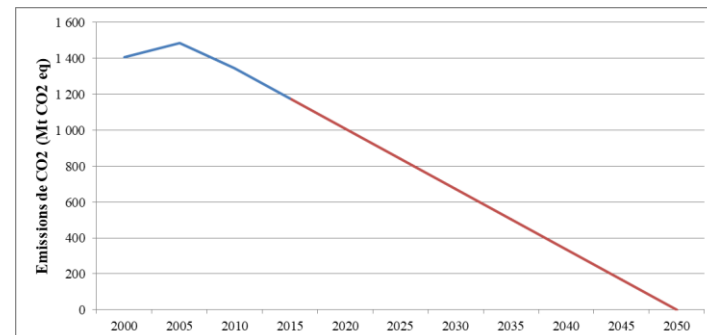
Introduction de la variabilité climatique

Concentrations en eqCO_2 , en 2100 [ppm eqCO_2] Désignation de la catégorie (plage de concentration) ⁹	Sous-catégories	Position relative des RCP ⁵	Émissions cumulées de CO_2 ³ [Gt CO_2]		Changement des émissions en eqCO_2 à comparer à 2010 [%] ⁴		Changement de température (par rapport à 1850-1900) ^{5, 6}					
			2011-2050	2011-2100	2050	2100	Hausse de la température atteinte en 2100 [°C] ⁷	Probabilité de ne pas dépasser au cours du XXI ^e siècle la hausse de température indiquée ⁸				
								1,5 °C	2,0 °C	3,0 °C	4,0 °C	
< 430	Des niveaux inférieurs à 430 ppm eqCO_2 n'ont été pris en compte que dans un petit nombre d'études portant sur un modèle.											
450 (430-480)	Plage complète ^{1,10}	RCP2,6	550-1300	630-1180	entre -72 et -41	entre -118 et -78	1,5-1,7 (1,0-2,8)	Plus improbable que probable	Probable	Probable	Probable	
500 (480-530)	Sans dépassement de 530 ppm eqCO_2		860-1180	960-1430	entre -57 et -42	entre -107 et -73	1,7-1,9 (1,2-2,9)	Improbable	Plus probable qu'improbable			
	Avec dépassement de 530 ppm eqCO_2		1130-1530	990-1550	entre -55 et -25	entre -114 et -90	1,8-2,0 (1,2-3,3)		À peu près aussi probable qu'improbable			
550 (530-580)	Sans dépassement de 580 ppm eqCO_2		1070-1460	1240-2240	entre -47 et -19	entre -81 et -59	2,0-2,2 (1,4-3,6)		Plus improbable que probable ¹²			
	Avec dépassement de 580 ppm eqCO_2		1420-1750	1170-2100	entre -16 et 7	entre -183 et -86	2,1-2,3 (1,4-3,6)					
(580-650)	Plage complète	RCP4,5	1260-1640	1870-2440	entre -38 et 24	entre -134 et -50	2,3-2,6 (1,5-4,2)	Improbable ¹¹	Improbable	Plus probable qu'improbable	Plus improbable que probable	
(650-720)	Plage complète		1310-1750	2570-3340	entre -11 et 17	entre -54 et -21	2,6-2,9 (1,8-4,5)					
(720-1000)	Plage complète	RCP6,0	1570-1940	3620-4990	entre 18 et 54	entre -7 et 72	3,1-3,7 (2,1-5,8)		Plus improbable que probable			
> 1000	Plage complète	RCP8,5	1840-2310	5350-7010	entre 52 et 95	entre 74 et 178	4,1-4,8 (2,8-7,8)		Improbable ¹¹	Improbable		Plus improbable que probable

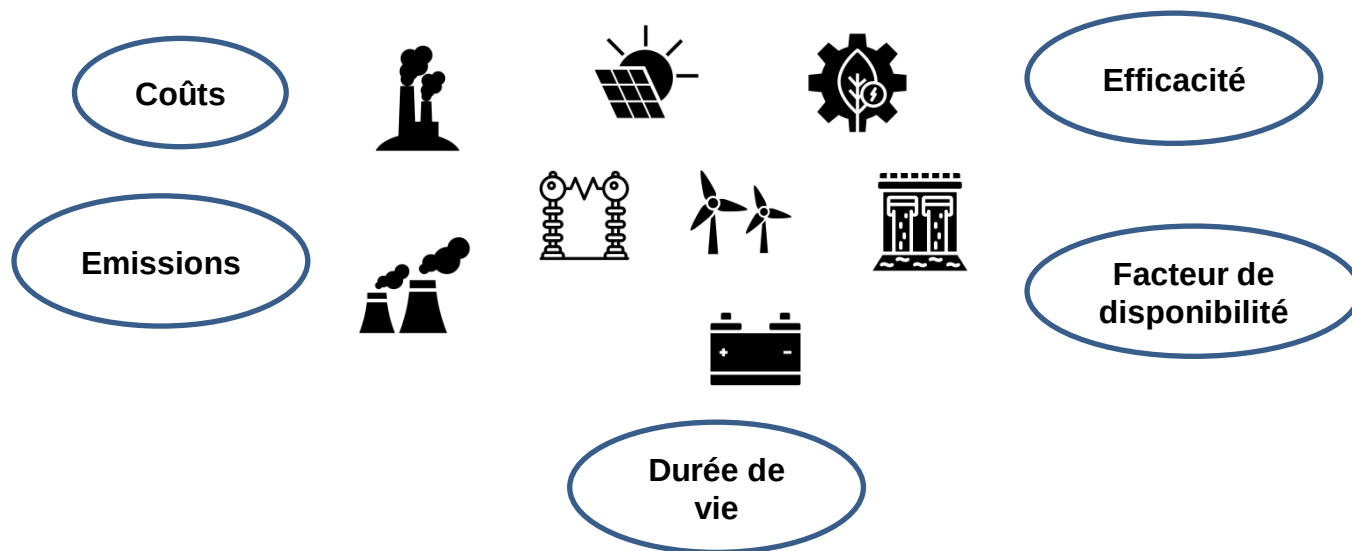
Quel mix pour la décarbonisation du secteur électrique?



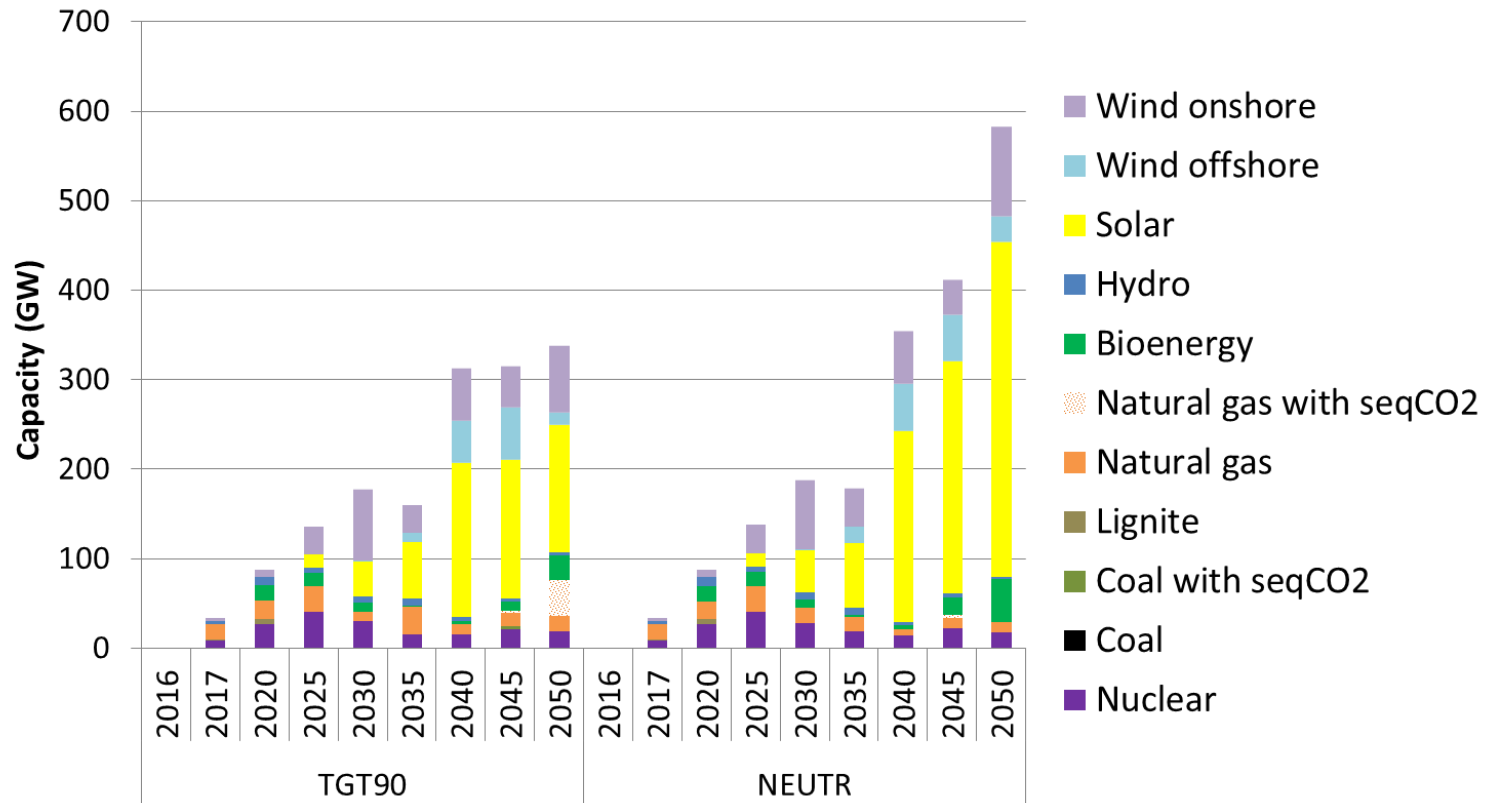
Evolution projetée de la demande électrique (EU Reference Scenario 2016)



Trajectoire des émissions de CO_2 (réduction linéaire entre 2016 et 2050)



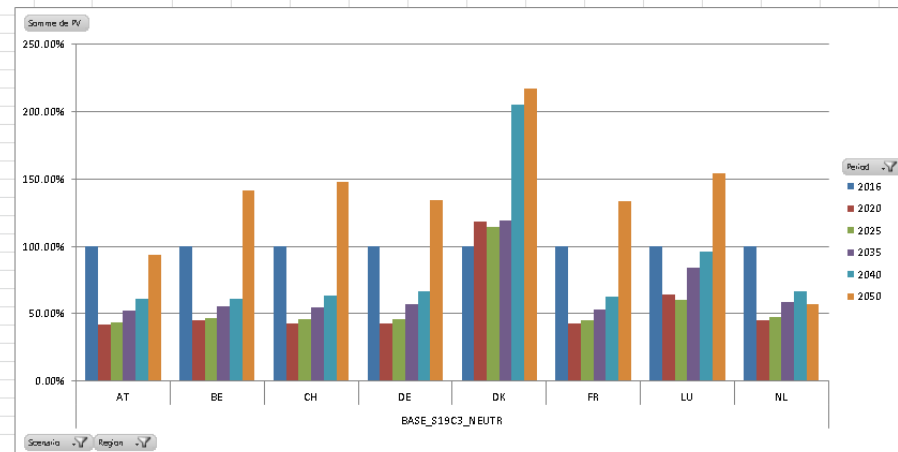
First results – Newly installed capacity



Tremendous growth rate from 2035 to 2050:
 ≈75 GW of solar per year in the NEUTR scenario

First results – Electricity prices

Region	2016	2020	2025	2035	2040	2050	Total général
AT	100.00%	42.04%	43.68%	52.28%	60.91%	93.51%	
BE	100.00%	44.85%	46.83%	55.69%	61.06%	141.31%	
CH	100.00%	43.06%	45.83%	54.51%	63.59%	147.54%	
DE	100.00%	42.95%	45.83%	56.91%	66.39%	134.25%	
DK	100.00%	118.82%	114.26%	119.49%	205.33%	217.67%	
FR	100.00%	43.01%	45.15%	53.41%	62.89%	133.63%	
LU	100.00%	63.98%	60.47%	84.38%	96.34%	154.53%	
NL	100.00%	63.98%	60.47%	84.38%	96.34%	154.53%	
Somme de PV							
10	Valeur : 100.00%						
10	Ligne : BASE_S19C3_NEUTR - LU						
10	Colonne : 2016						



Raise of 25,83% in the NEUTR scenario for the CWE region

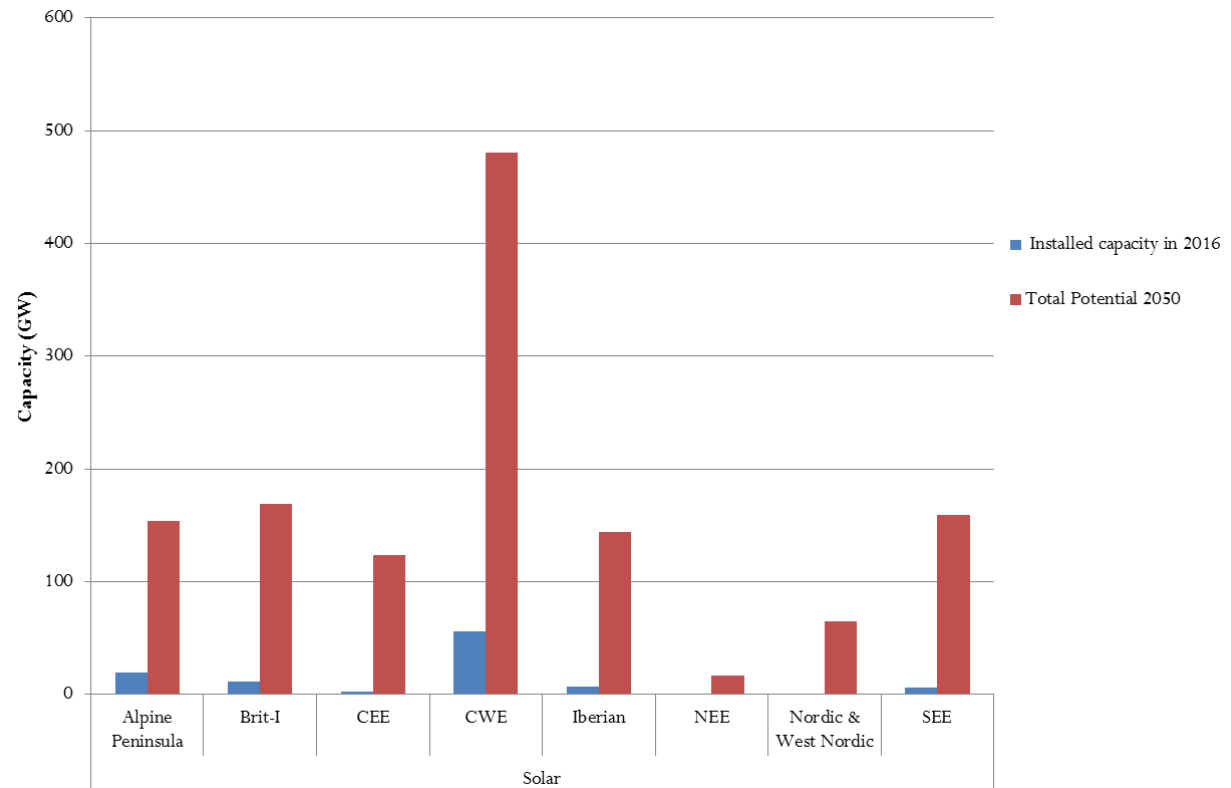
Diminution of 55% in the Iberian Peninsula

Diminution of 43% in the British Island

Overall raise of 24,83% in 13 countries

Renewable potentials and constraints

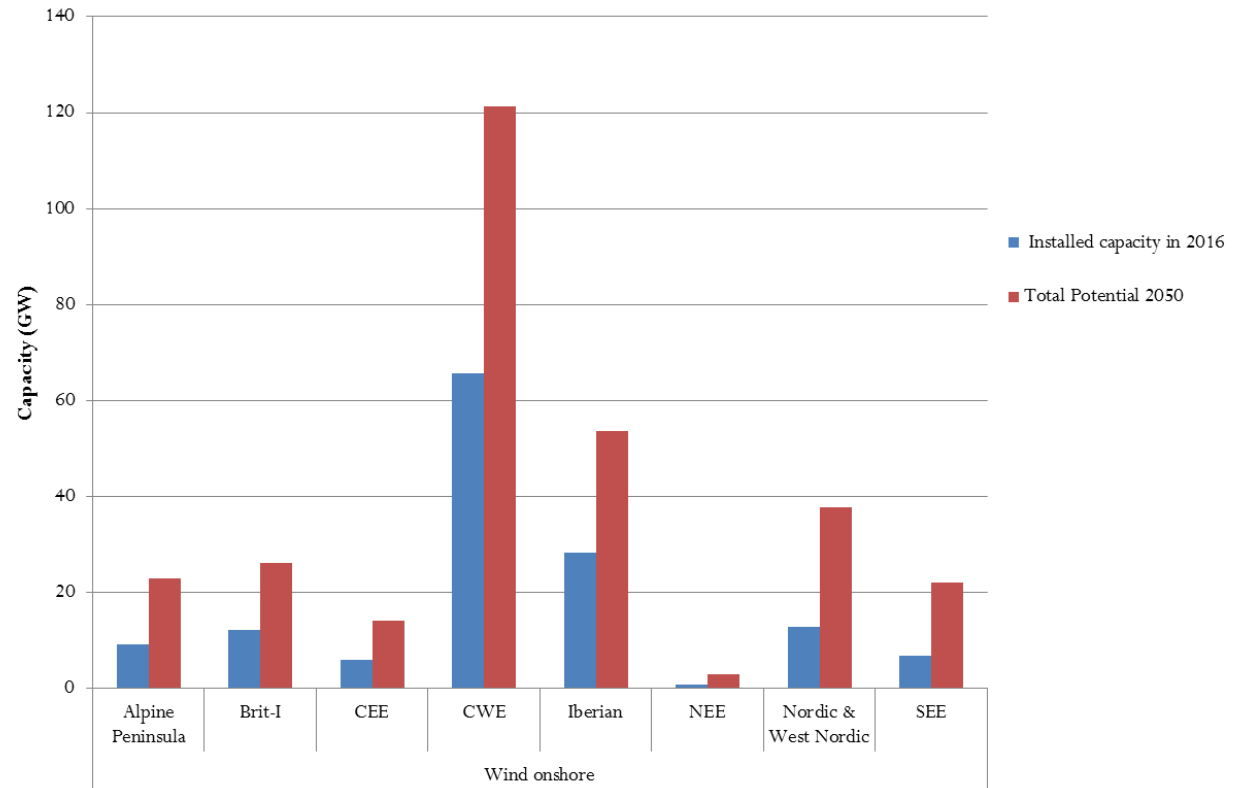
Renewable potential



Source: JRC-EU-TIMES model

Renewable potentials and constraints

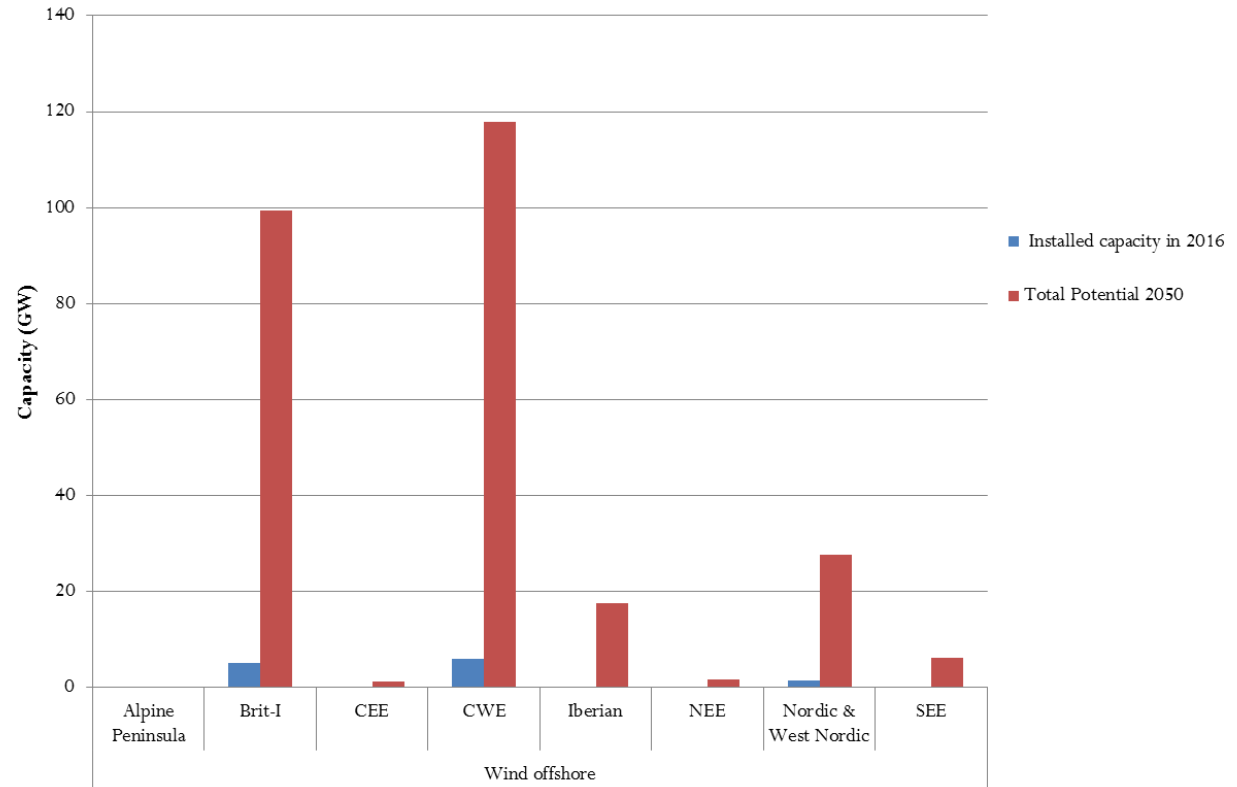
Renewable potential



Source: JRC-EU-TIMES model

Renewable potentials and constraints

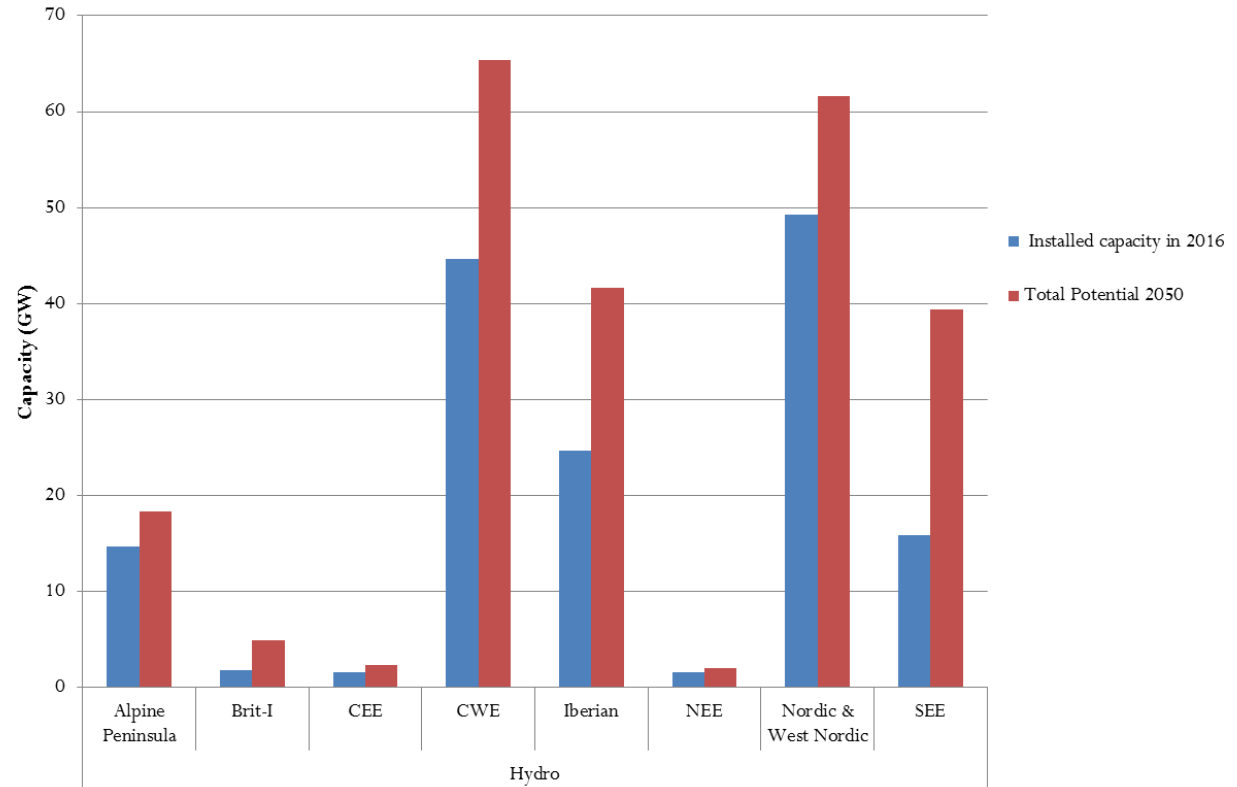
Renewable potential



Source: JRC-EU-TIMES model

Renewable potentials and constraints

Renewable potential



Source: JRC-EU-TIMES model

Renewable potentials and constraints

Deployment rate

- Calibrated with historical values
- Follows trends and future development announced
- Country and year specific

Coal phase out policies

- All announced phase-out policies implemented and supposed to arrive at said date except for Germany
- Limit on installed capacity for Germany

Nuclear policies

- No reduction constraint of nuclear activity in France
- Limit on installed capacity for France

General hypothesis

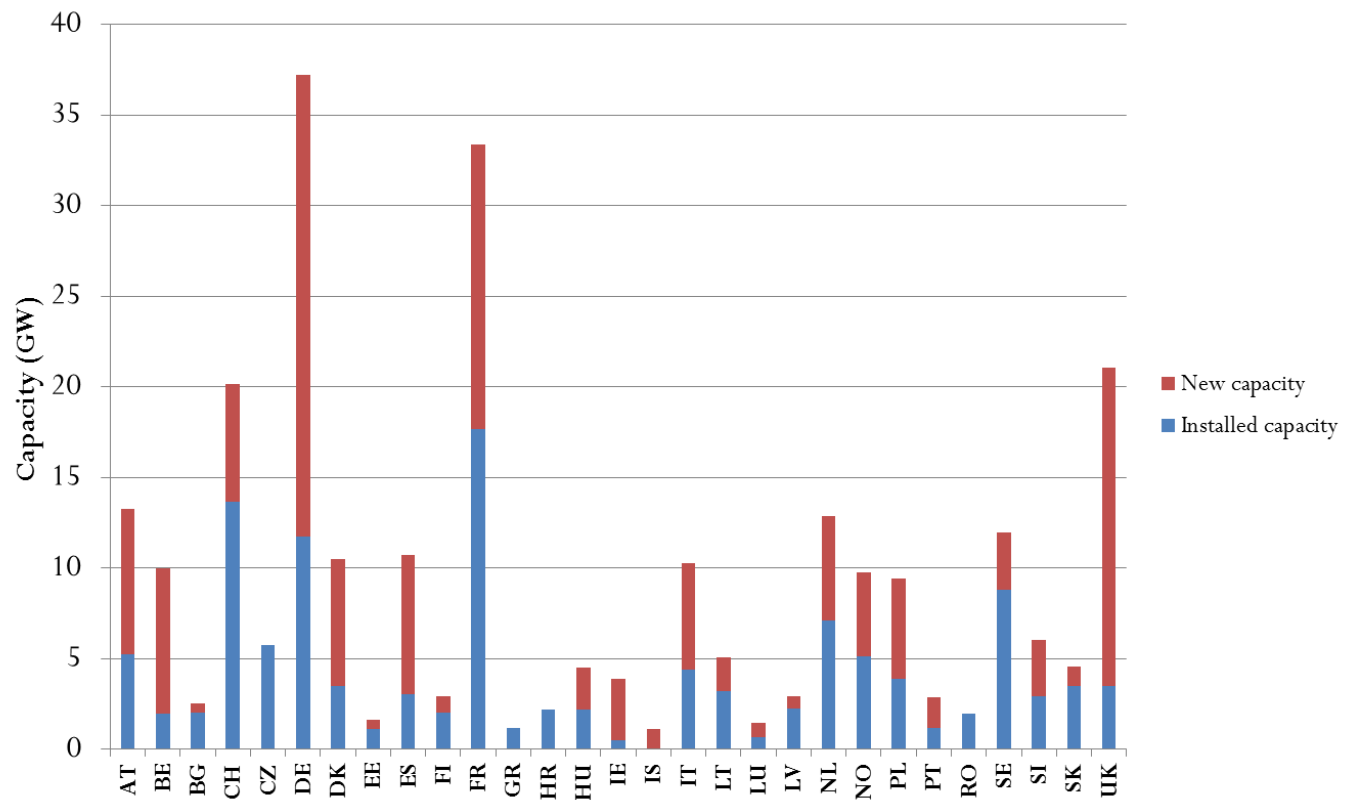
- Discount rate: 8%



Renewable potentials and constraints

Interconnection development

- Calibrated with TYNDP2016 until 2030





Electric demand

