

$$\frac{1}{\alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} invcost_i(t) \cdot I_i(t) + \sum_{t \in T} \frac{1}{(1 +$$

$$\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \cdot C_i(t) + \sum_{i \in PRC} varom_i(t) \cdot$$

$$\sum_{EEL} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varom_i(t) \cdot P_{lzy}(t)$$

$$\sum_{EENC} \sum_s cos_{ks}(t) \cdot IMP_{ks}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} cos_{ks}(t) \cdot IMP_{ks}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$

# L'ère post-Accord de Paris des systèmes énergétiques

## Analyse des défis de décarbonation avec le modèle TIAM-FR

Sandrine SELOSSE

MINES ParisTech, PSL Research University, CMA-Centre de Mathématiques Appliquées  
Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

# Accord de Paris : comment les modèles répondent aux enjeux de décarbonation ?

2/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

## LE MODELE

- Version française du modèle ETSAP-TIAM (***TIMES Integrated Assessment Model***)
- Optimisation, programmation linéaire, bottom-up, multirégional

$$NPV = \sum_{r=1}^R \sum_{y \in YEARS} (1 + d_{r,y})^{REFYR-y} * ANNCOST(r,y)$$

où

*NPV est la valeur nette actualisée du coût total pour toutes les régions sur la période considérée ;*

*ANNCOST (r,y) est le coût total annuel dans la région r à l'année y ;*

*dr,y est le taux d'actualisation ;*

*REFYR est l'année de référence pour l'actualisation ;*

*YEARS est l'ensemble des années et R est l'ensemble des régions (15 régions)*

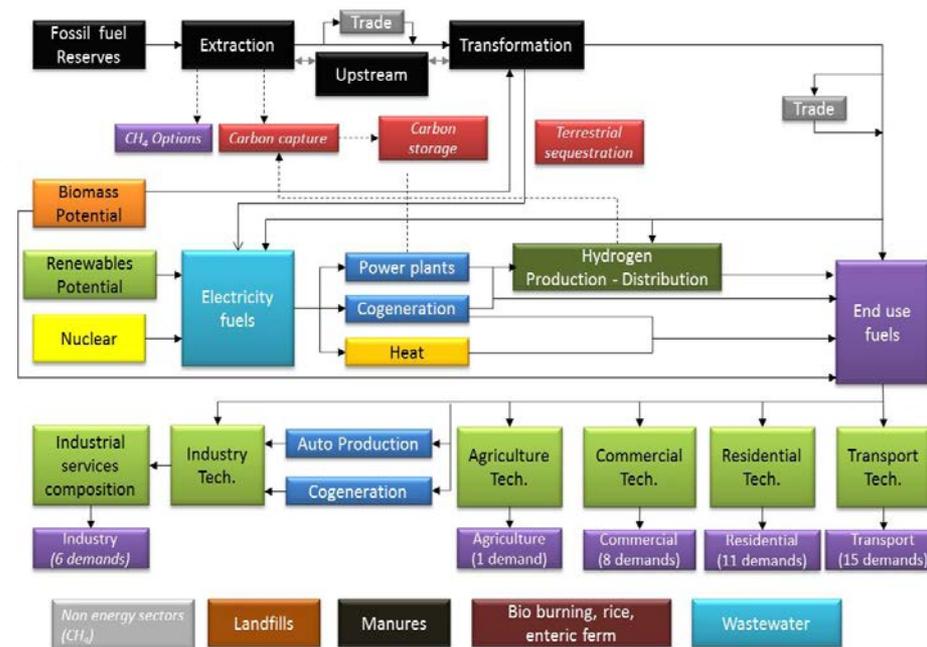
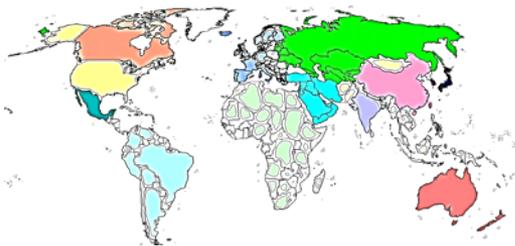
# Implémentation de scénarios des futurs possibles à long terme des systèmes énergétiques

3/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

## Variation qualitatives et quantitatives suivant les types d'inputs et les données d'entrée

- Les demandes de services énergétiques (satisfaction des demandes de services énergétiques au coût global minimum et donc décisions d'investissement, fourniture d'énergie primaire et d'échanges d'énergie)
- Les potentiels des ressources primaires et les vecteurs énergétiques
- La liste et la description de technologies
- Les émissions dont il faut tenir compte
- Le périmètre géographique et temporel (valeurs des paramètres technologiques et économiques spécifiques à chaque technologie, région, période)
- Les paramètres de politiques



# Accord de Paris : comment les modèles répondent aux enjeux de décarbonation ?

4/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

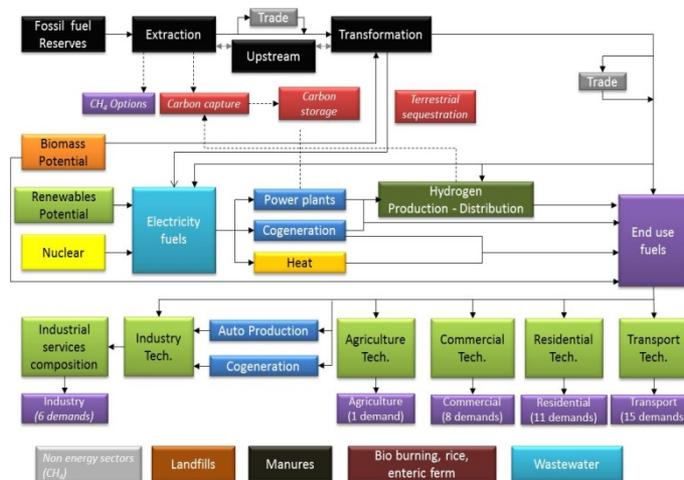
## LE MODELE



## L'ANALYSE

- **TIAM-FR : TIMES Integrated Assessment Model**
- Optimisation, programmation linéaire, bottom-up, multirégional
- Modèle technico-économique

- La solution primale
  - Investissements technologiques
  - Niveaux d'exploitation/fonctionnement des technologies
  - Les imports/exports de chaque commodité échangeable
  - Les niveaux d'extraction de chaque ressource primaire
  - Les flux de commodité input/output de chaque technologie
  - Les émissions par technologie, par secteur et totales
- La solution duale
  - La « valeur fictive » (*shadow price*) de chaque commodité



# Qu'apportent les modèles par rapport aux enjeux de décarbonation ?

5/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} i_n$$
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$
$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com$$
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$
$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

- 1 -

**Clé de lecture des engagements climatiques  
et  
mise en perspective régionale par rapport à  
l'objectif climatique global**

# Spécification des scénarios : trajectoires décarbonées de l'ère post-Accord de Paris

6/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} i_n$$
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$
$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s co$$
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} pr$$
$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

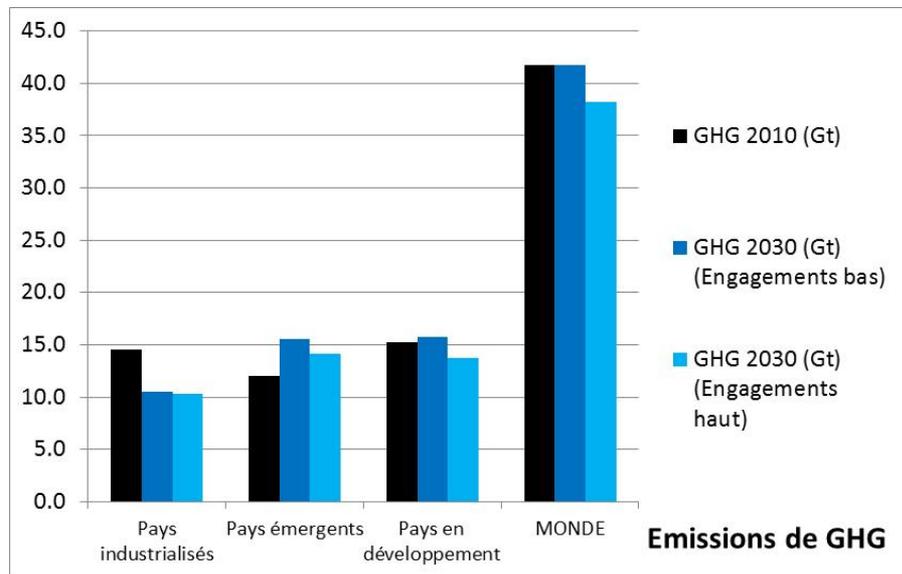
- **Un scénario régional considérant l'Accord de Paris et les NDCs**
  - Engagements conditionnels d'ici (2025)2030
  - Hypothèses régionales à 2050 suivant un réengagement contrasté des NDCs
- **Un objectif global à 2050 en ligne avec l'objectif de 2°C**
  - 40 %
  - 50 %
  - 70 %

réduction des émissions de GES d'ici 2050 par rapport à 2010



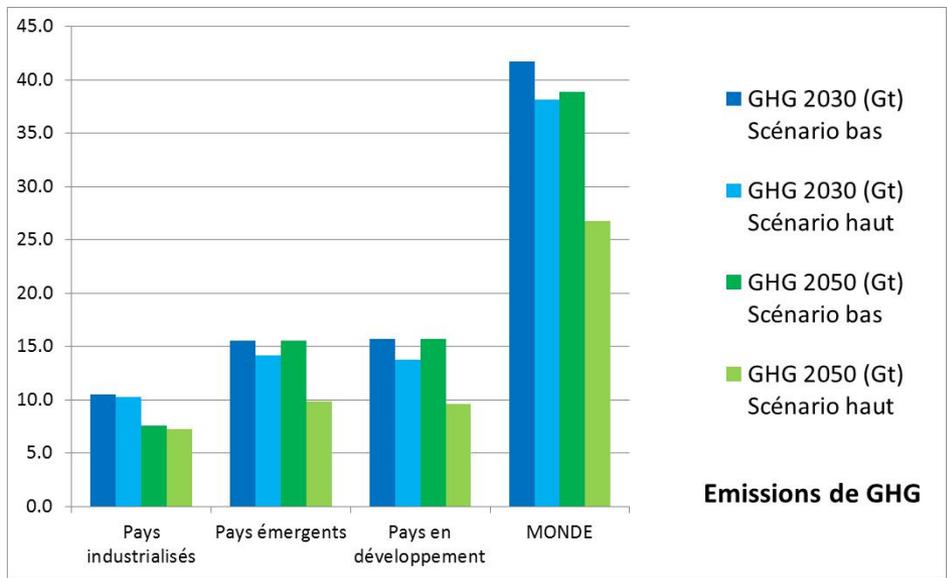
**C  
I  
B  
L  
E  
S  
  
2  
0  
3  
0**

Regions	Année de référence	Année cible	Niveau de réduction	Type de réduction	Réduction 2010-2030 (Bas)	Réduction 2010-2030 (Haut)
<b>Pays industrialisés</b>						
<b>Europe (WEU-EEU)</b>	1990	2030	40%	Emission reduction	-29.5%	
<b>USA (USA)</b>	2005	2025	26% - 28%		-27.6%	-30.3%
<b>Australie et Nouvelle-Zélande (AUS)</b>		2030	26% - 28%		-26.0%	-28.0%
<b>Canada (CAN)</b>	30%		-25.8%			
<b>Japon (JPN)</b>	2013		26%		-24.8%	
<b>Pays émergents à forte croissance</b>						
<b>Chine (CHI)</b>	2005	2030	60% - 65%	Carbon intensity	6.5%	-6.8%
<b>Inde (IND)</b>			33% - 35%		122%	115.5%
<b>Pays en développement</b>						
<b>Russie (FSU)</b>	1990	2030	25% - 30%	Emission reduction	16.1%	8.4%
<b>Mexique (MEX)</b>	BAU		25% - 40%		-25.3%	-40.2%
<b>Corée du Sud (SKO)</b>			37%		-35.8%	-35.8%
<b>Afrique (AFR)</b>	BAU		15% - 30%		10.3%	-9.1%
<b>Moyen-Orient (MEA)</b>			15% - 30%		6.8%	-12.1%
<b>Pays asiatiques en développement (ODA)</b>			15% - 30%		-4.5%	-21.4%
<b>Amérique Latine (CSA)</b>	<i>NDCs extraits du modèle TIMES-ALyC</i>				1.4%	-4.5%



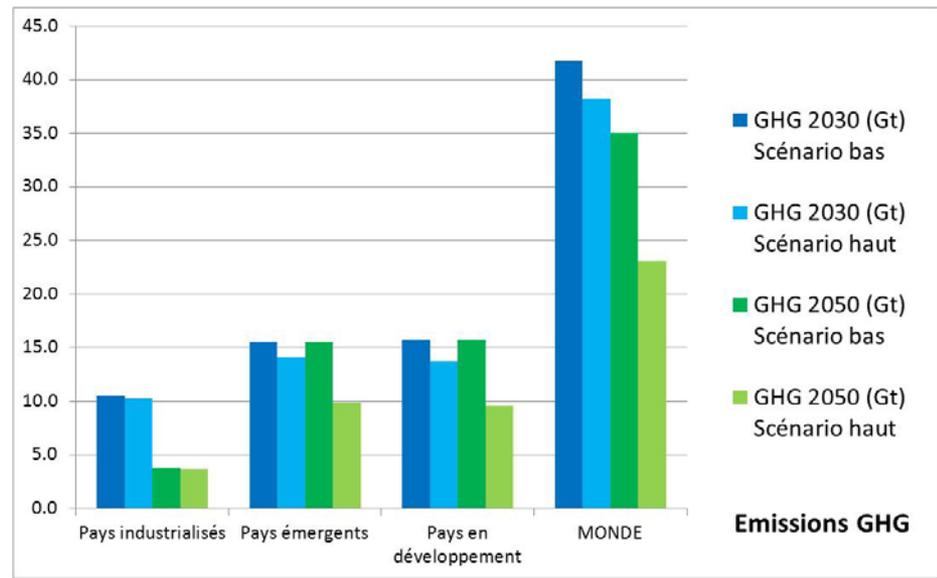
C I B L E S 2 0 5 0 ( 1 )

Regions	Année de référence	Année cible	Niveau de réduction	Type de réduction	Réduction 2030-2050 (LowLow)	Réduction 2030-2050 (UpUp)
<b>Pays industrialisés</b>						
Europe (WEU-EEU)	2030	2050	Effort 2030-2050 similaire à 2010-2030	Réduction des émissions	-29%	
USA (USA)					-28%	-30%
Australie et Nouvelle-Zélande					-26%	-28%
Canada (CAN)					-26%	
Japon (JPN)					-25%	
<b>Pays émergents à forte croissance</b>						
Chine (CHI)	2030	2050	Scénario bas : un peak à 2030 Scénario haut : 30 % de réduction en 2050 par rapport à 2030 (Haut)	0%	30%	
Inde (IND)						
<b>Pays en développement</b>						
Russie (FSU)	2030	2050	Scénario bas : un peak à 2030 Scénario haut : 30 % de réduction en 2050 par rapport à 2030 (Haut)	0%	-30%	
Mexique (MEX)						
Corée du Sud (SKO)						
Afrique (AFR)						
Moyen-Orient (MEA)						
Pays asiatiques en développement (ODA)						
Amérique Latine (CSA)						



C I B L E S 2 0 5 0 ( 2 )

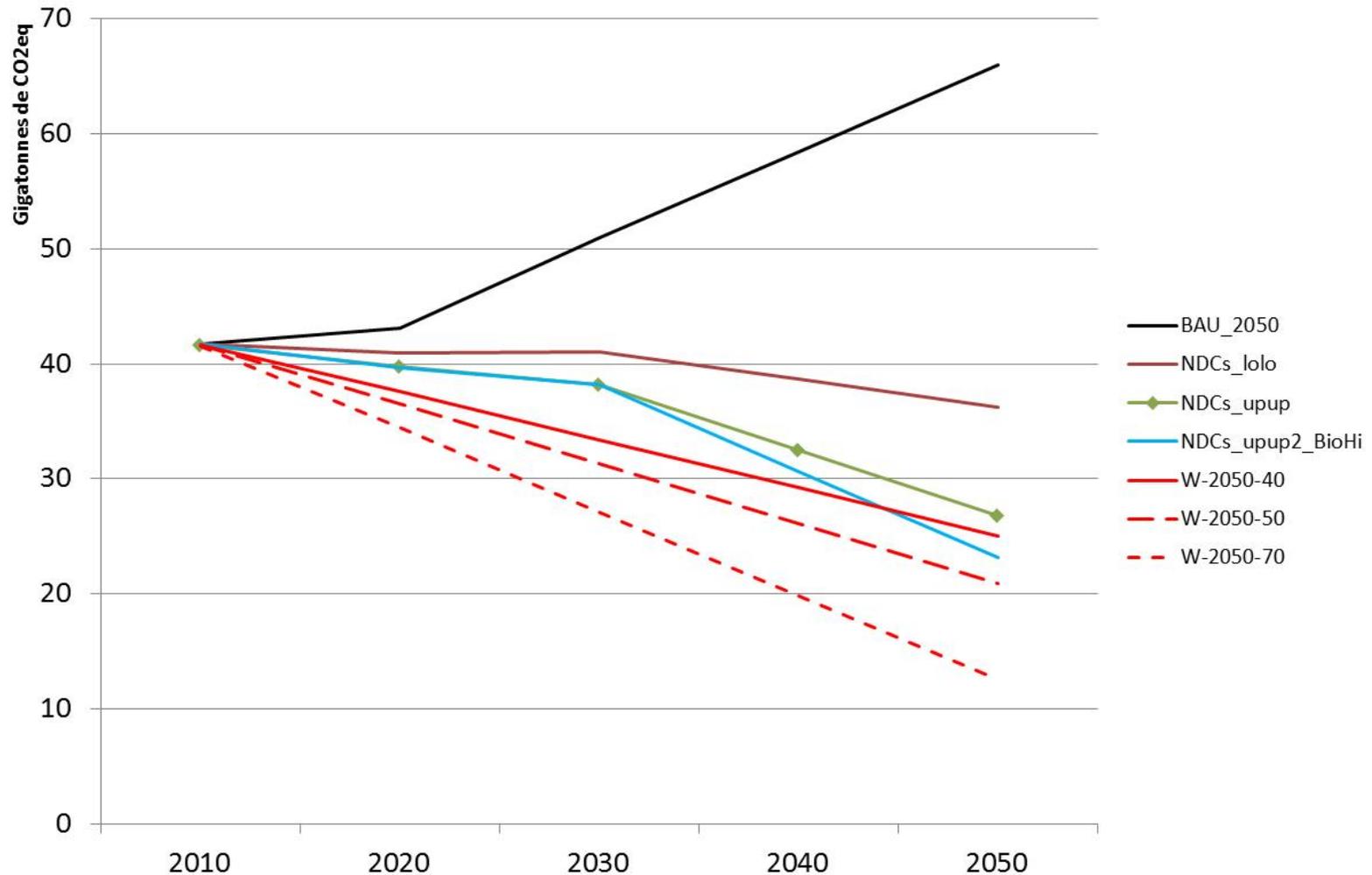
Regions	Année de référence	Année cible	Niveau de réduction	Type de réduction	Réduction 2030-2050 (LowLow)	Réduction 2030-2050 (UpUp)
<b>Pays industrialisés</b>						
Europe (WEU-EEU)	2030	2050	Effort 2030-2050 double de celui en 2010-2030	Réduction des émissions	-65%	
USA (USA)					-64%	-65%
Australie et Nouvelle-Zélande					-63%	-64%
Canada (CAN)					-63%	
Japon (JPN)					-62%	
<b>Pays émergents à forte croissance</b>						
Chine (CHI)	2030	2050	Scénario bas : un peak à 2030 Scénario haut : 30 % de réduction en 2050 par rapport à 2030 (Haut)		0%	30%
Inde (IND)						
<b>Pays en développement</b>						
Russie (FSU)	2030	2050	Scénario bas : un peak à 2030 Scénario haut : 30 % de réduction en 2050 par rapport à 2030 (Haut)		0%	-30%
Mexique (MEX)						
Corée du Sud (SKO)						
Afrique (AFR)						
Moyen-Orient (MEA)						
Pays asiatiques en développement (ODA)						
Amérique Latine (CSA)						



# Emissions mondiales de GHG

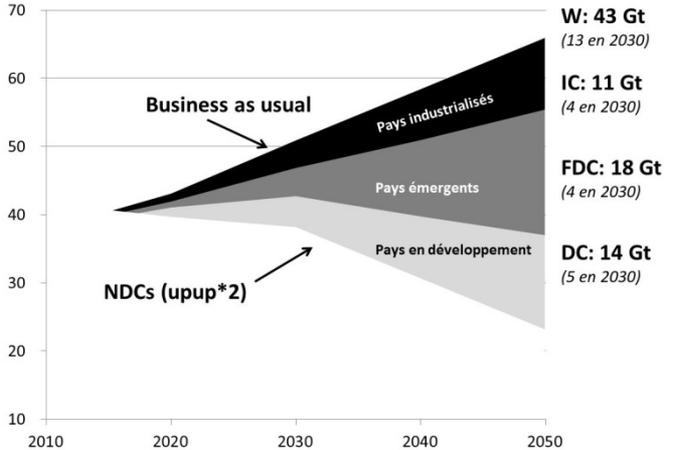
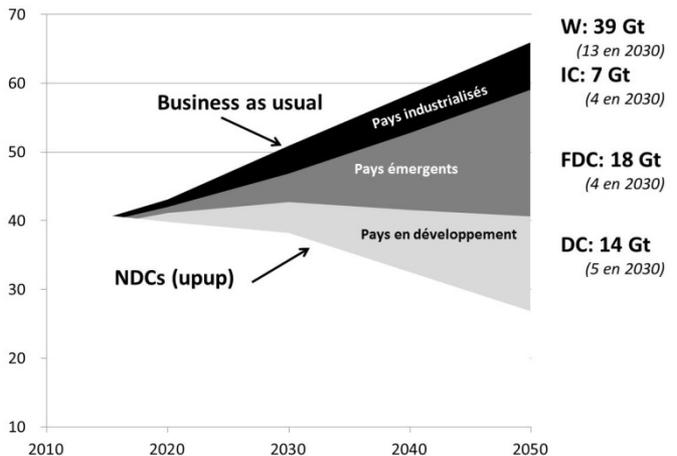
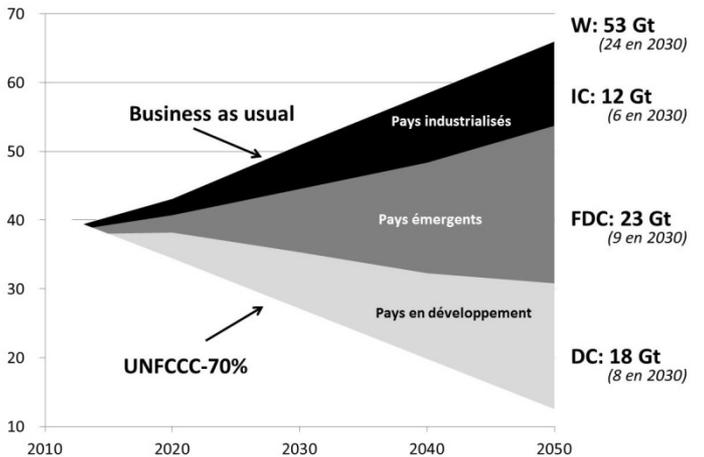
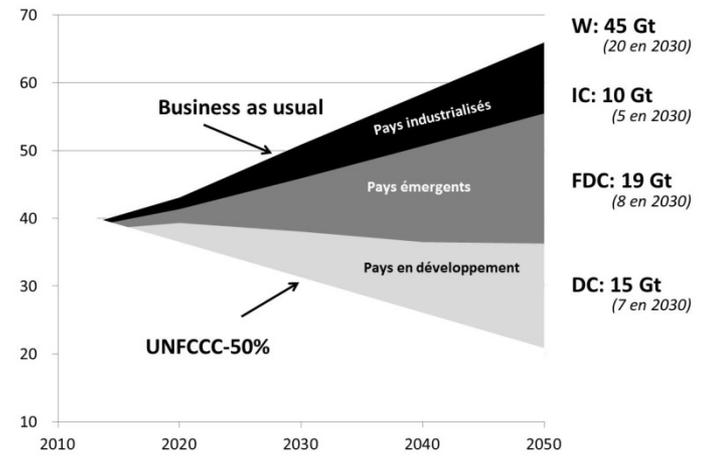
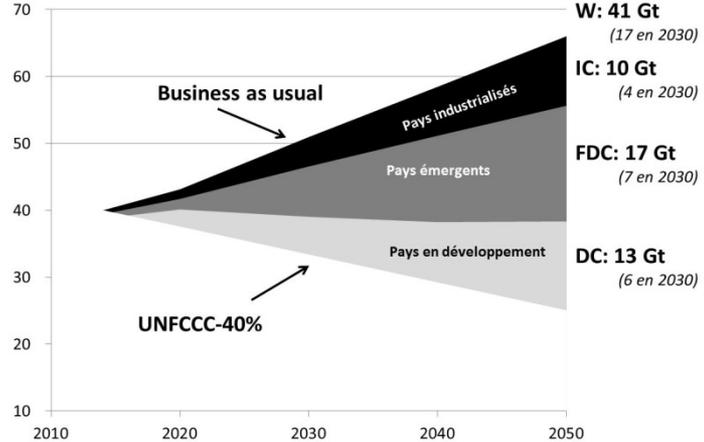
10/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017



# Contribution régionale à l'effort d'atténuation

Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017



# Contribution régionale à l'effort d'atténuation

12/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

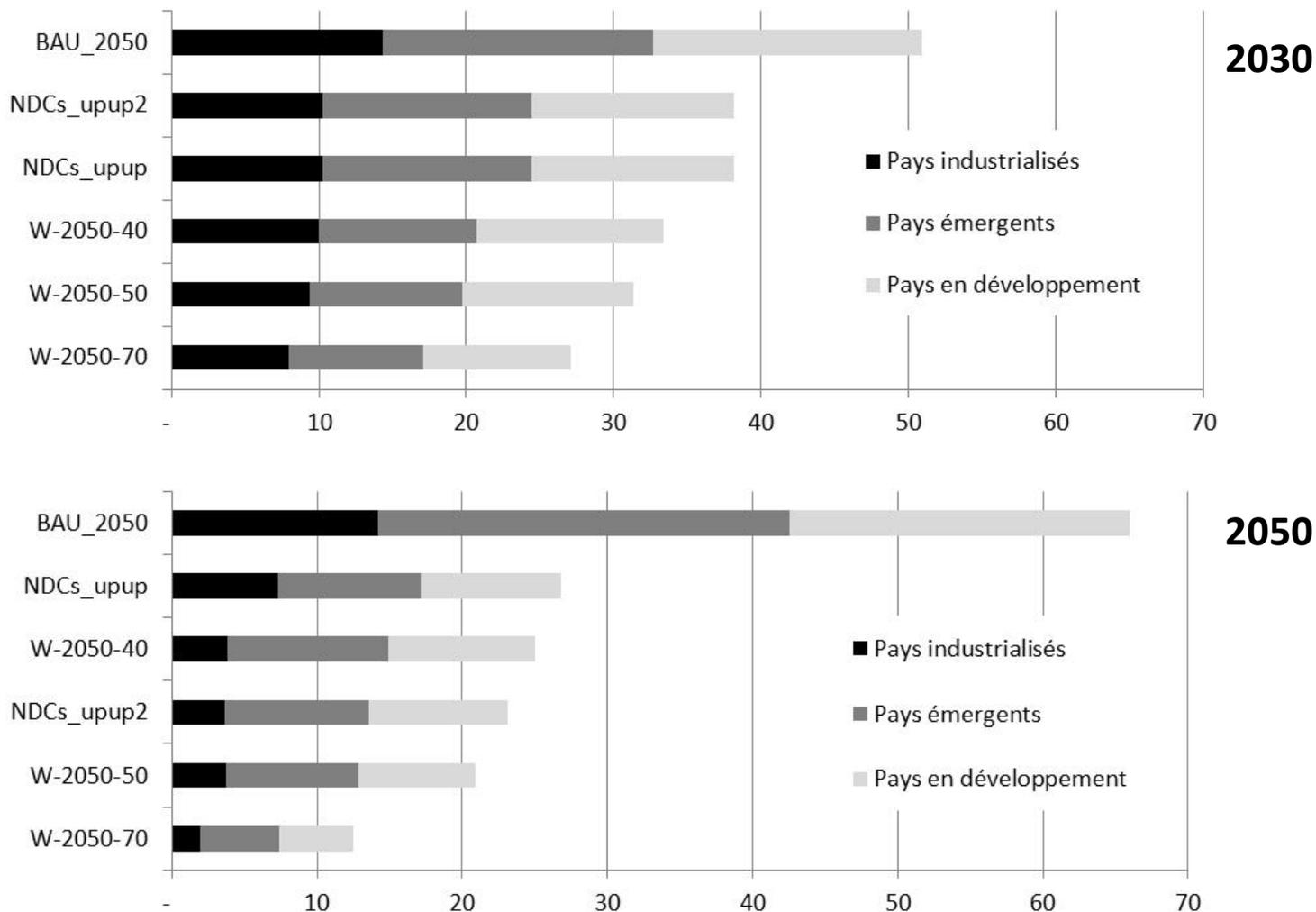
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in EELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com_s$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$



# Qu'apportent les modèles par rapport aux enjeux de décarbonation ?

13/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

$$\frac{1}{(1+\alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$
$$+ \sum_{i \in EELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var$$
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com$$
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$
$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

- 2 -

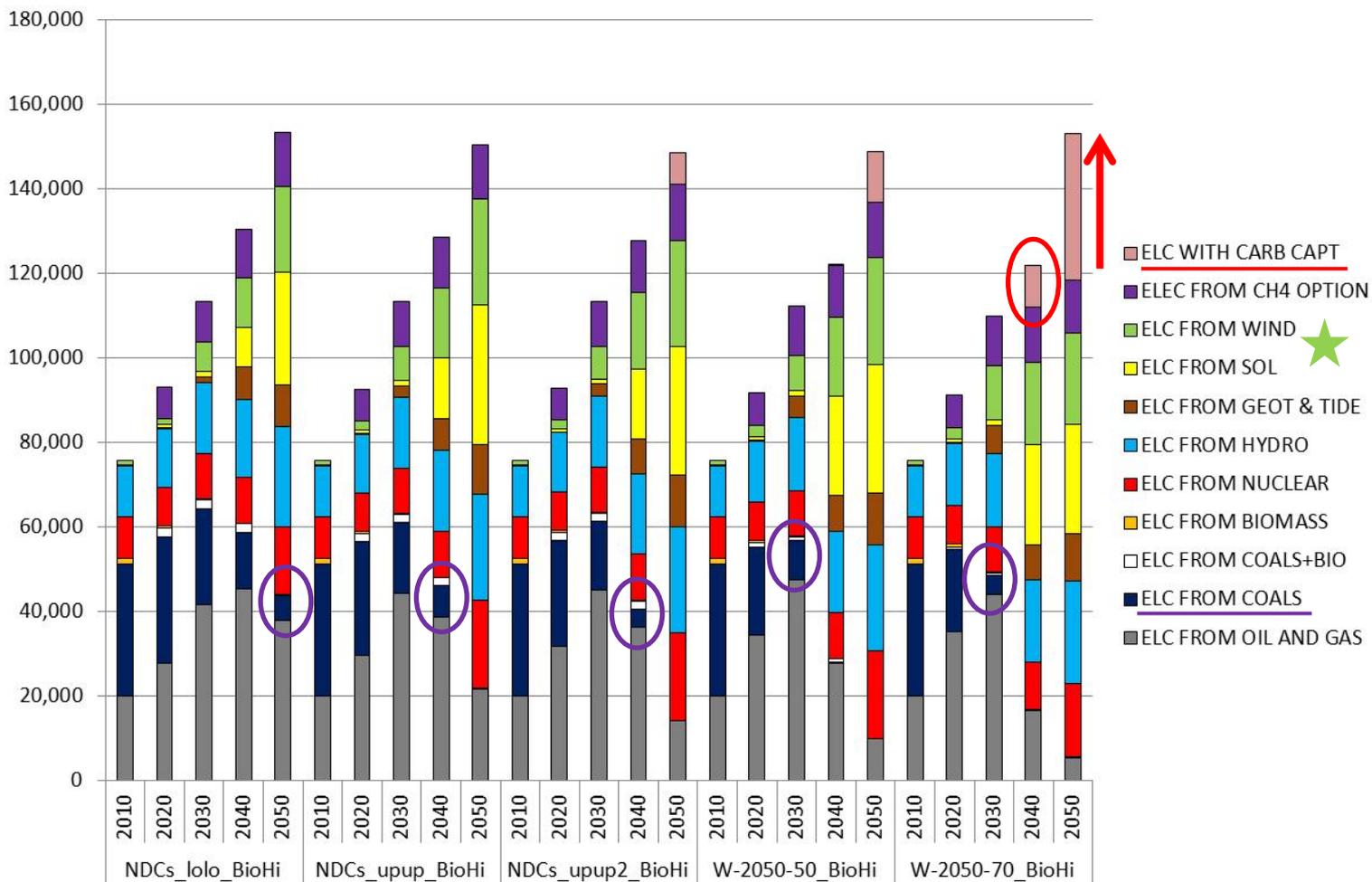
**Une réflexion sur les solutions à développer**

***Quels choix technologiques à l'effort d'atténuation ?***

# Production électrique mondiale (PJ)

14/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017



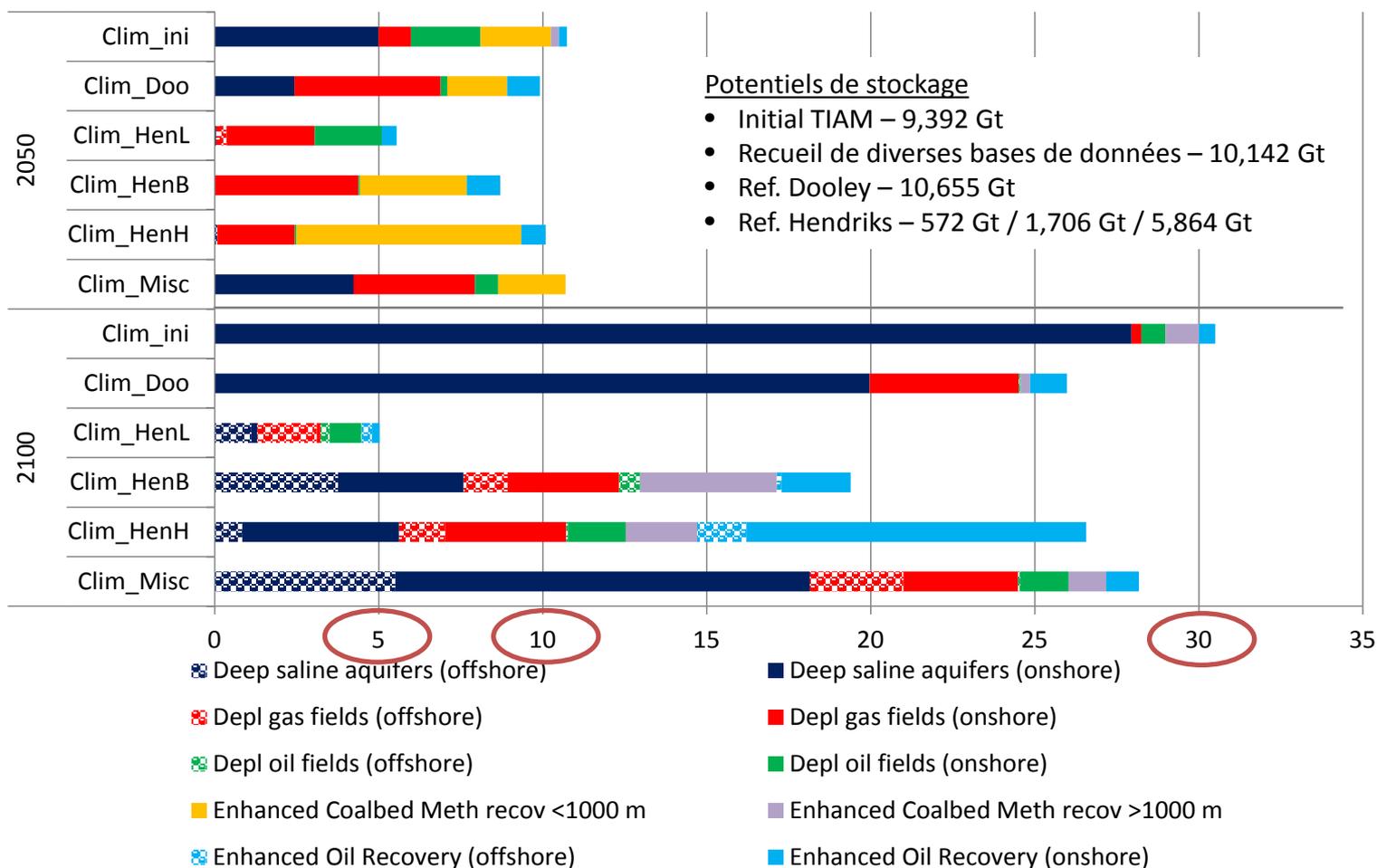


# Carbone à stocker par an pour atteindre une contrainte climatique en ligne avec l'objectif de 2°C (forçage radiatif à 2,6 W/m<sup>2</sup> en 2100)

16/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

## Variation de la possibilité de stockage du carbone par site et par scénario (Gt CO<sub>2</sub>)



# Impact d'une interdiction de stockage onshore sur le potentiel de stockage du carbone

17/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

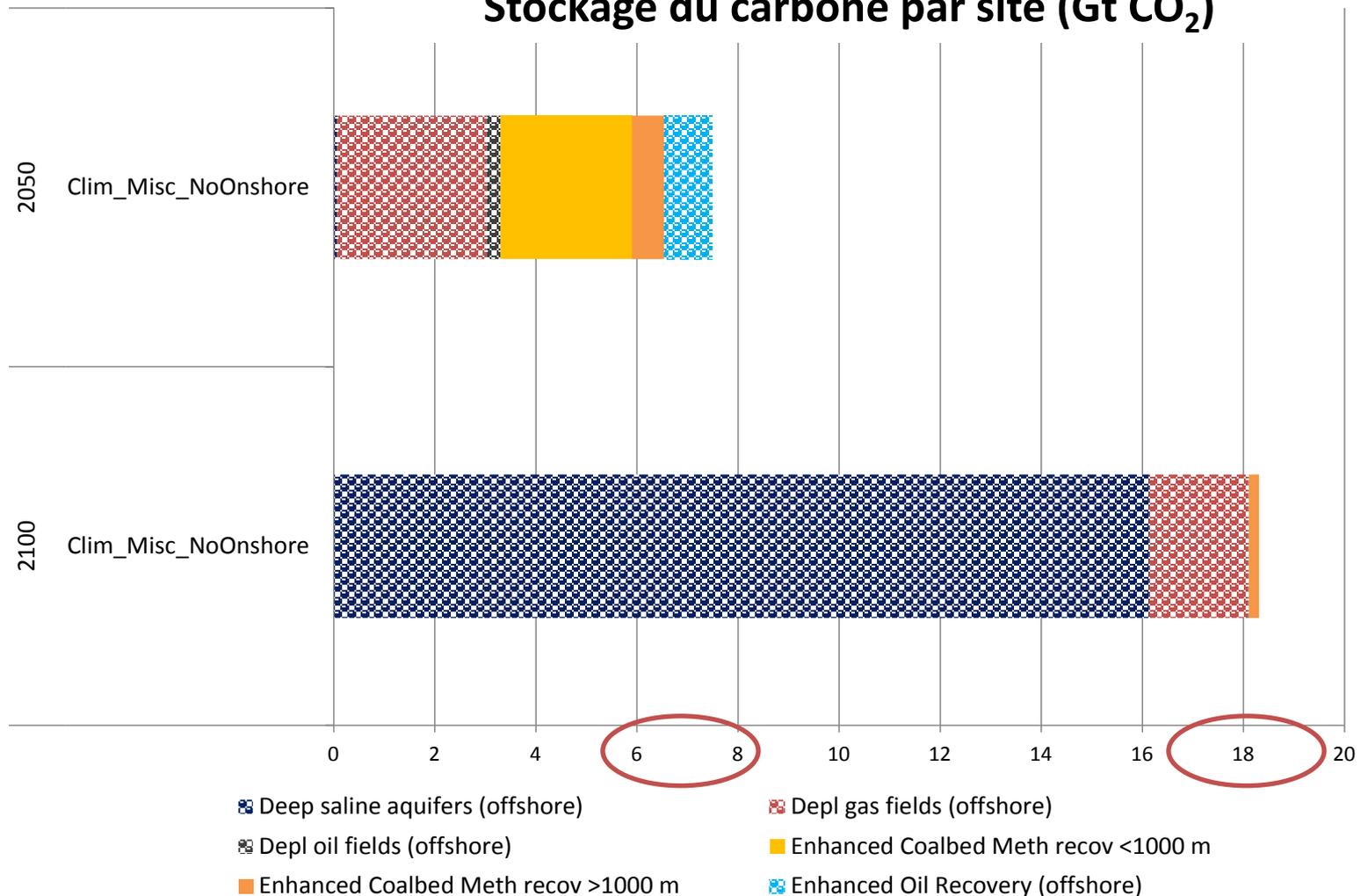
$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com_k(s)$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$

## Stockage du carbone par site (Gt CO<sub>2</sub>)



# Impact d'un potentiel de biomasse contrasté sur la quantité de carbone séquestré

18/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

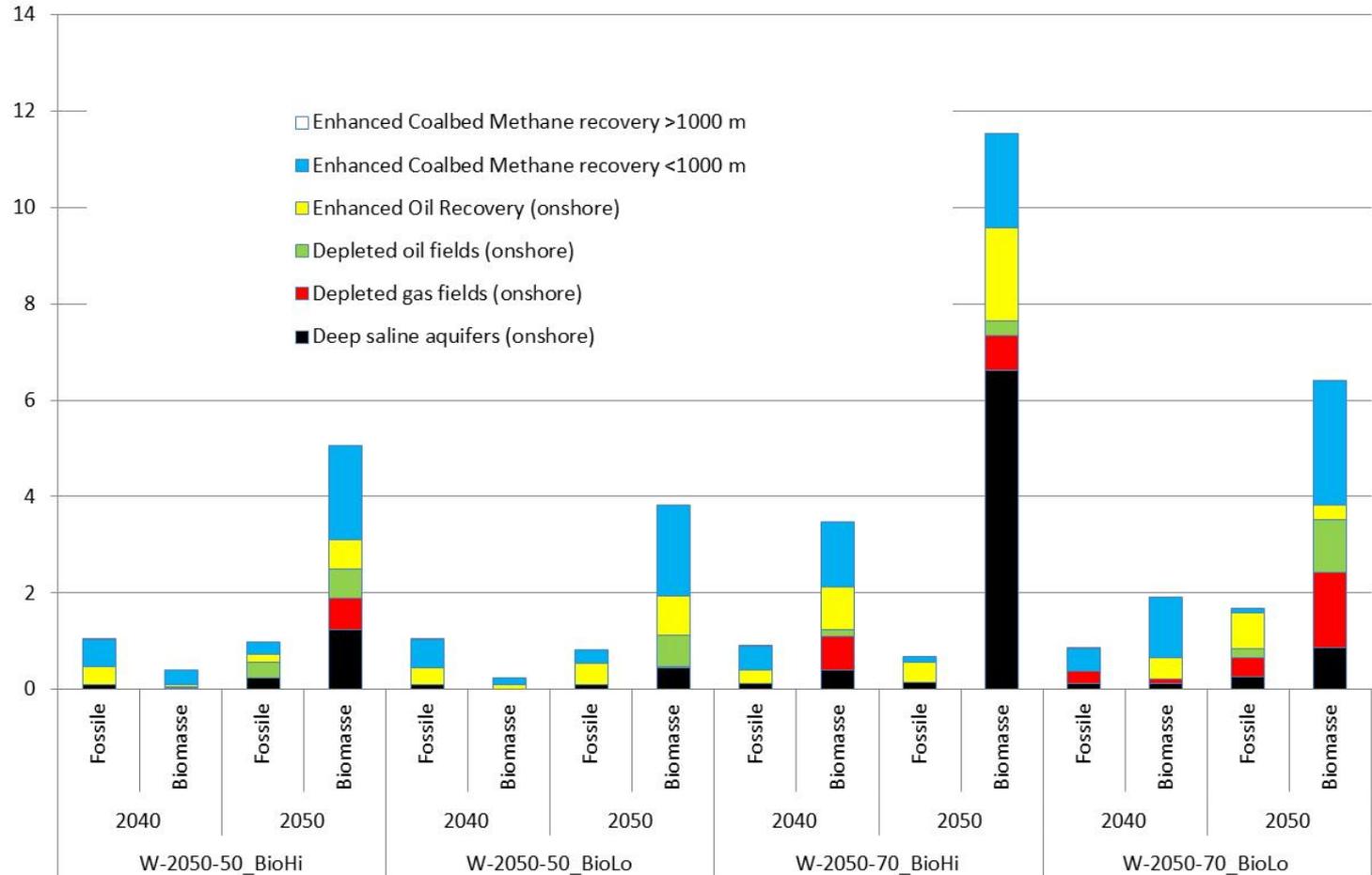
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com_s$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} \dots$$

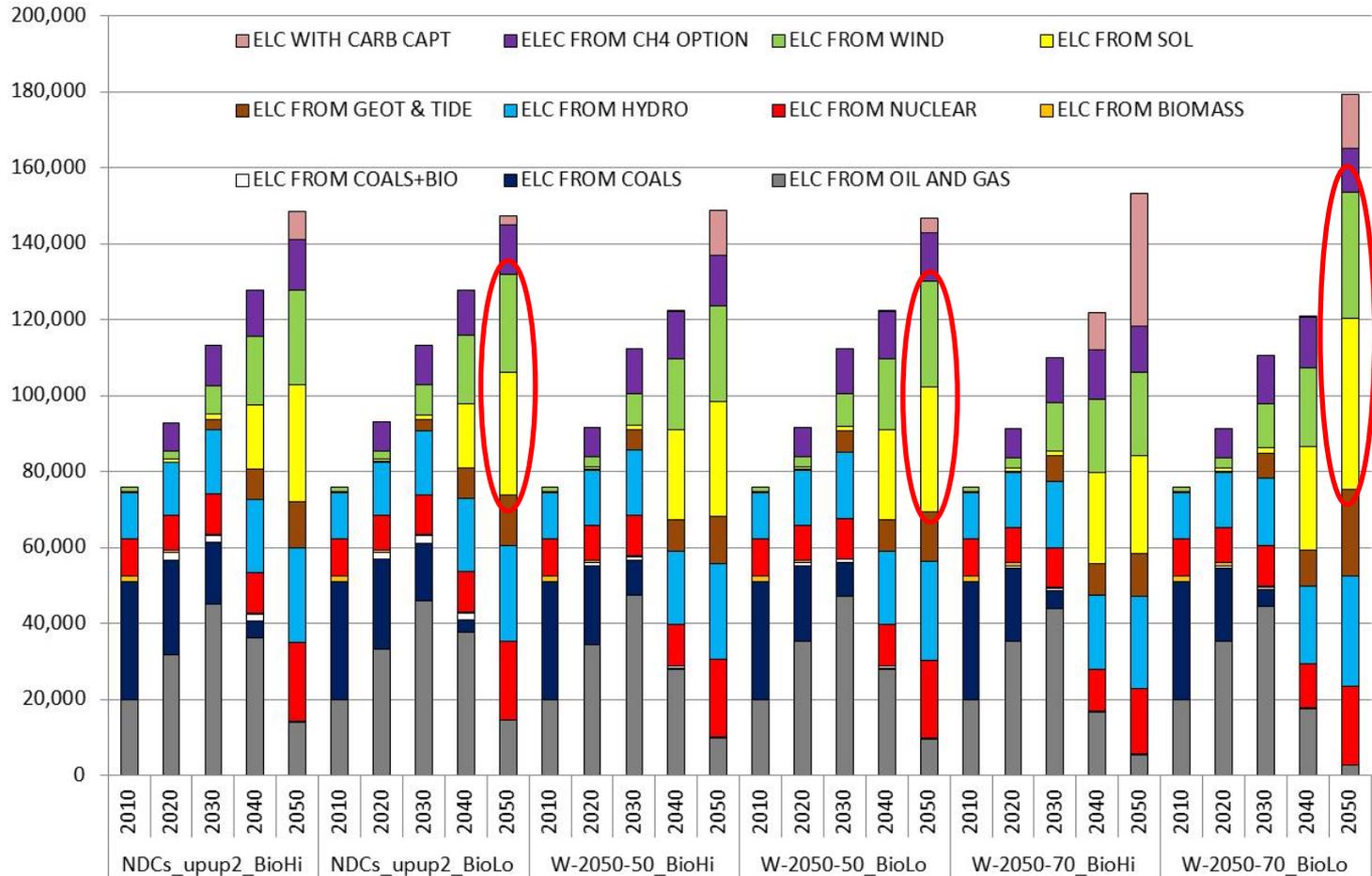
$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} \dots$$



# Potentiel de biomasse contrasté – Production d'électricité mondiale (PJ)

19/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

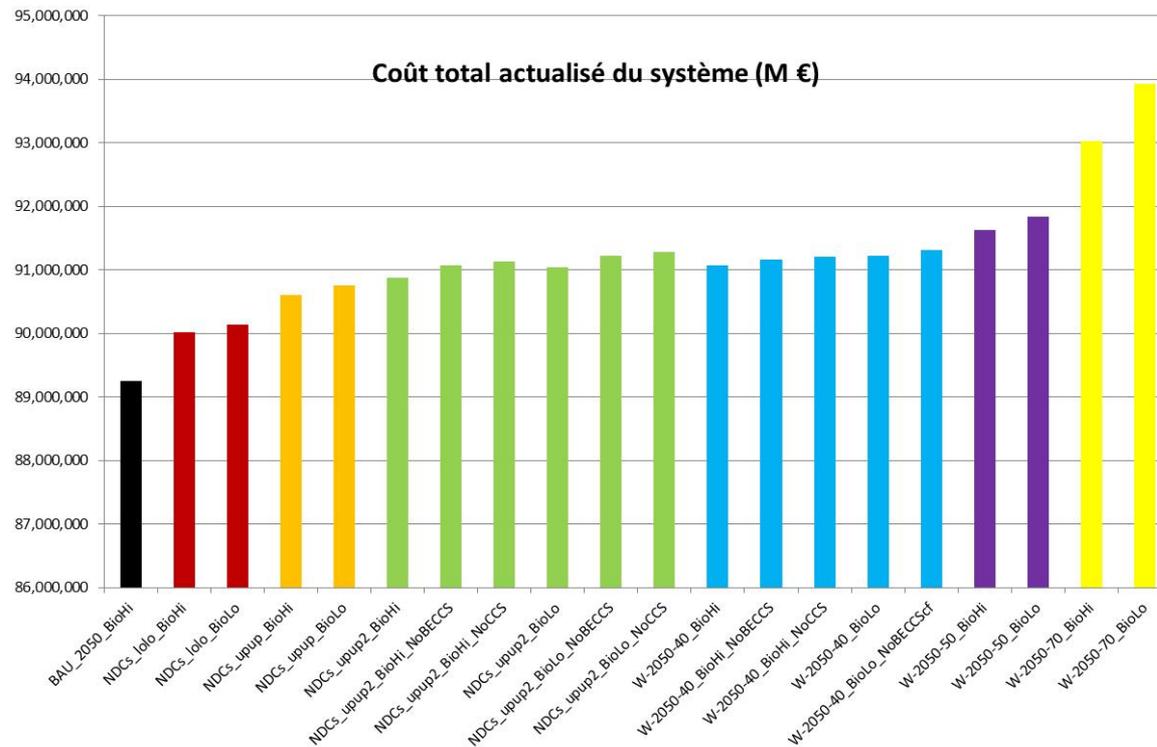


# Analyse des coûts des contraintes

20/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

$$\frac{1}{(1+\alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$
$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var_i$$
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s cost_k$$
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$
$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$



# Coût marginal du carbone (\$/tCO2)

21/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

Scenario	Période	Coût marginal du carbone
NDCs_lolo_BioHi	2030	20
NDCs_lolo_BioLo		
NDCs_upup2_BioHi	2030	25
NDCs_upup2_BioLo		
NDCs_upup_BioHi		
NDCs_upup_BioLo	2030	30
W-2050-40_BioHi		
W-2050-40_BioLo	2050	35
NDCs_lolo_BioHi		
NDCs_lolo_BioLo		
W-2050-50_BioHi	2030	40
W-2050-50_BioLo		
W-2050-70_BioLo	2030	40
W-2050-70_BioHi	2030	50
NDCs_upup_BioHi	2050	75
NDCs_upup_BioLo		
W-2050-40_BioHi	2050	90
W-2050-40_BioLo		
NDCs_upup2_BioHi	2050	95
W-2050-50_BioHi	2050	100
NDCs_upup2_BioLo	2050	120
W-2050-70_BioHi		
W-2050-50_BioLo	2050	150
W-2050-70_BioLo	2050	420

# Conclusion

22/19

Séminaire de la Chaire MPDD sur les Enjeux clés pour la modélisation de la transition bas carbone – 10 mai 2017

- Des contributions différenciées par région d'ici 2030 conduisant à une stabilisation des émissions de GHG au niveau de 2010
- 2050 : des trajectoires proches des cibles basses de l'objectif de 2°C
- Contribution des pays industrialisés proche de celle des scénarios globaux et conduisant à une importante décarbonation
- Pour les pays en développement et émergents, une décarbonation à amorcer dès 2030
- Place importante du CCS pour parvenir à des cibles hautes et notamment de la BECCS
  - Potentiel de stockage du carbone
  - Potentiel de biomasse
- Une diminution du potentiel de déploiement de la BECCS non compensée par des investissements dans le CCS mais dans les EnR

$$\frac{1}{\alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} invcost_i(t) \cdot I_i(t) + \sum_{t \in T} \frac{1}{(1 +$$

$$\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \cdot C_i(t) + \sum_{i \in PRG} varom_i(t).$$

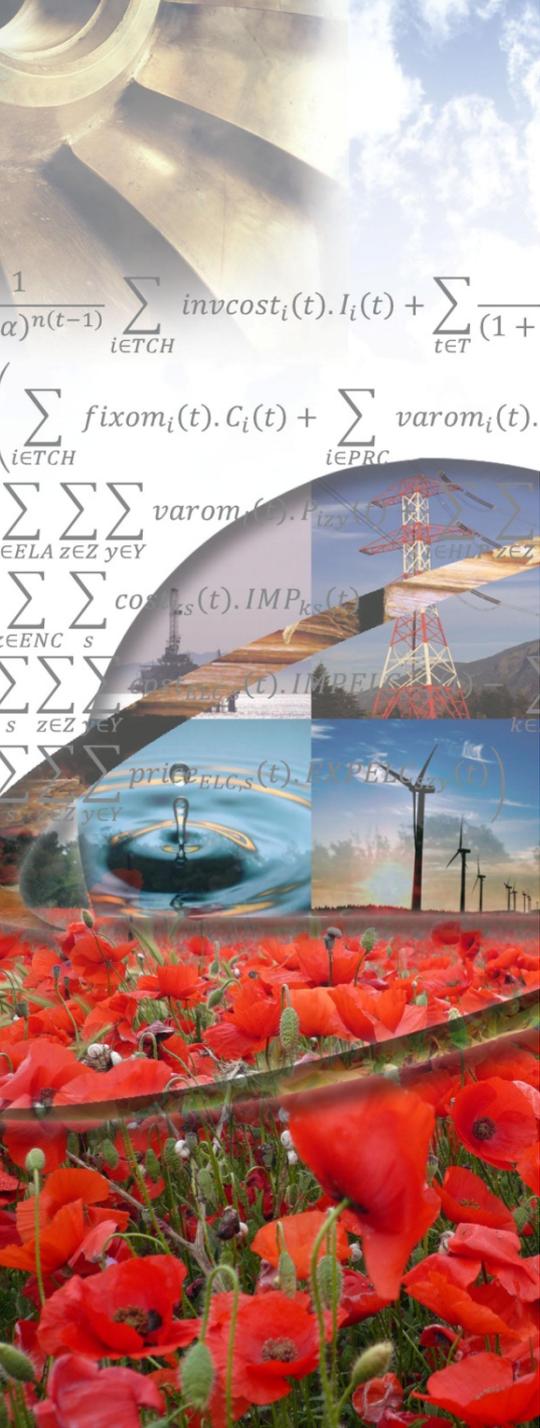
$$\sum_{EELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varom_i(t) \cdot P_{lzy}$$

$$\sum_{EENC} \sum_s cos_{ks}(t) \cdot IMP_{ks}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} cos_{ks}(t) \cdot IMP_{ks}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$

$$\sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$



**Merci pour votre attention!**

Contact : [sandrine.selosse@mines-paristech.fr](mailto:sandrine.selosse@mines-paristech.fr)