



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

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

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

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

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

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



## Analyse prospective des politiques climatiques internationales : Les émissions négatives et les pays en développement au secours du climat

Sandrine SELOSSE

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

---

Habilitation à Diriger des Recherches • 2 juin 2017  
Université de Montpellier • Ecole doctorale d'Economie et Gestion

---

# La chaire Modélisation prospective au service du développement durable



- Créée en 2008 et renouvelée en 2014 par Nadia Maïzi (CMA) et Jean Charles Hourcade (CIRED)
- Consolider des outils et du dialogue entre Economistes et Ingénieurs
  - Ambition commune de pérenniser des outils de modélisation prospective sur les enjeux du développement durable et de la double contrainte énergie-climat
  - Aborder de manière complémentaires ces enjeux scientifiques en liant des compétences en mathématiques appliquées et en sciences économiques
  - Favoriser le dialogue entre la prospective technologique (modèles technico-économiques dits *bottom-up*) et la prospective économique (modèles macro-économiques dits *top-down*)
- Développer la culture de la modélisation prospective dans le monde de l'entreprise et dans les divers lieux de la délibération publique
- Construire en France un pôle de modélisation prospective reconnu à l'international et porteur d'outils innovants pour une meilleure maîtrise des dossiers Energie-Climat
  - Permettre les échanges et la confrontation entre équipes de modélisation, administration et partenaires de la Chaire autour d'éclairages sur les politiques publiques liées à la transition énergétique



Phase 1

Phase 2

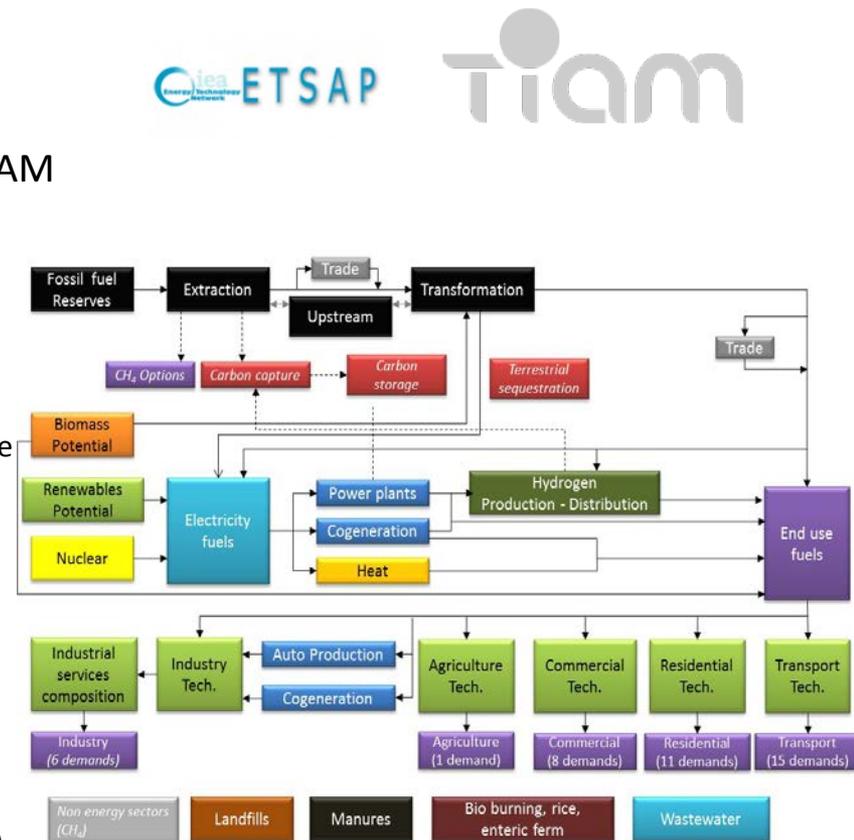


# Mes travaux de recherche

## La modélisation prospective des systèmes énergétiques

### Développement des outils de modélisation prospective

- Modèle d'évaluation intégrée (IAM)
- Famille TIMES de IEA/ETSAP
- TIAM-FR : version française de ETSAP-TIAM (*TIMES Integrated Assessment Model*)
- Module climatique
- Problème d'optimisation linéaire
  - Minimisation du coût total actualisé du système
- Modèle bottom-up
  - Long terme : 2010-2100
  - 15 régions, 6 secteurs, 42 demandes
  - 585 729 données
    - 11 646 commodités (env. 770/régions)
    - 39 817 technologies (env. 2 500/régions)



# Développement et implémentation de scénarios des futurs énergétiques possibles à long terme

## 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)
- 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 (environnementales, technologiques, ressources)

# Développement et implémentation de scénarios des futurs énergétiques possibles à long terme

## 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)
- 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 (environnementales, technologiques, ressources)

Révision régulière et améliorations continues au niveau des ensembles de données et des structures technologiques du modèle

# Développement et implémentation de scénarios des futurs énergétiques possibles à long terme

## 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)
- 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 (environnementales, technologiques, ressources)

Révision régulière et améliorations continues au niveau des ensembles de données et des structures technologiques du modèle

Recalibrage de l'année de référence

Calibrage des potentiels de stockage du carbone

Calibrage des potentiels des ressources biomasses

Implémentation des besoin en eau

Sous-régionalisation du secteur énergétique africain

Modélisation du système énergétique sud-américain

Implémentation des technologies de co-combustion charbon-biomasse

Implémentation des échanges de ressources biomasses

# Développement et implémentation de scénarios des futurs énergétiques possibles à long terme

## 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)
- 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 (environnementales, technologiques, ressources)

Révision régulière et améliorations continues au niveau des ensembles de données et des structures technologiques du modèle

Recalibrage de l'année de référence

Calibrage des potentiels de stockage du carbone

Calibrage des potentiels des ressources biomasses

Approche combinée bottom-up/top-down

Implémentation des besoin en eau

Sous-régionalisation du secteur énergétique africain

Modélisation du système énergétique sud-américain

Implémentation des technologies de co-combustion charbon-biomasse

Implémentation des échanges de ressources biomasses

# Développement et implémentation de scénarios des futurs énergétiques possibles à long terme

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

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

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

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

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

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

## 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)
- 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 (environnementales, technologiques, ressources)

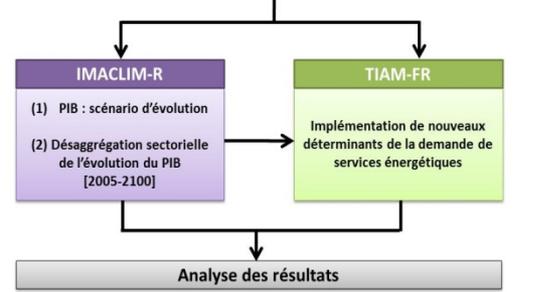
Révision régulière et améliorations continues au niveau des ensembles de données et des structures technologiques du modèle

Recalibrage de l'année de référence

Calibrage des potentiels de stockage du carbone

Calibrage des potentiels des ressources biomasses

Première étape de l'harmonisation : une base commune  
POP : Evolution démographique jusque 2100 (données Nations Unies)



Implémentation des besoin en eau

Sous-régionalisation du secteur énergétique africain

Modélisation du système énergétique sud-américain

Implémentation des technologies de co-combustion charbon-biomasse

Implémentation des échanges de ressources biomasses

# Implémentation de scénarios des futurs énergétiques possibles à long terme

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

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

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

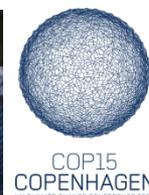
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com$$

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

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

- Contraintes climatiques

- Objectif de 2°C (cibles d'émissions [Gt CO<sub>2</sub>], de forçage radiatif [W/m<sup>2</sup>], de concentration atmosphérique [ppm])
- Accord de Copenhague
- Accord de Paris



- Contraintes technologiques et de ressources

- Disponibilité des technologies
  - Capture et séquestration du carbone (CSC)
  - Disponibilité de stockage *onshore*
- Potentiel de ressources
  - Stockage du carbone
  - Ressources biomasses
- Politique d'accès à l'énergie
- Politique de sortie du nucléaire
- Taxe carbone

# Analyse prospective des politiques climatiques internationales

## Exploration des futurs énergétiques possibles

- 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 de GES par technologie, par secteur, par région

- La solution duale

- La « valeur fictive » (*shadow price*) de chaque commodité

# Analyse prospective des politiques climatiques internationales

## Exploration des futurs énergétiques possibles

### • 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 de GES par technologie, par secteur, par région

### • La solution duale

- La « valeur fictive » (*shadow price*) de chaque commodité

Décryptage des engagements climatiques post-Kyoto

Poids régional de la contrainte et de l'ambition climatique

Mise en perspective avec l'objectif global

# Analyse prospective des politiques climatiques internationales

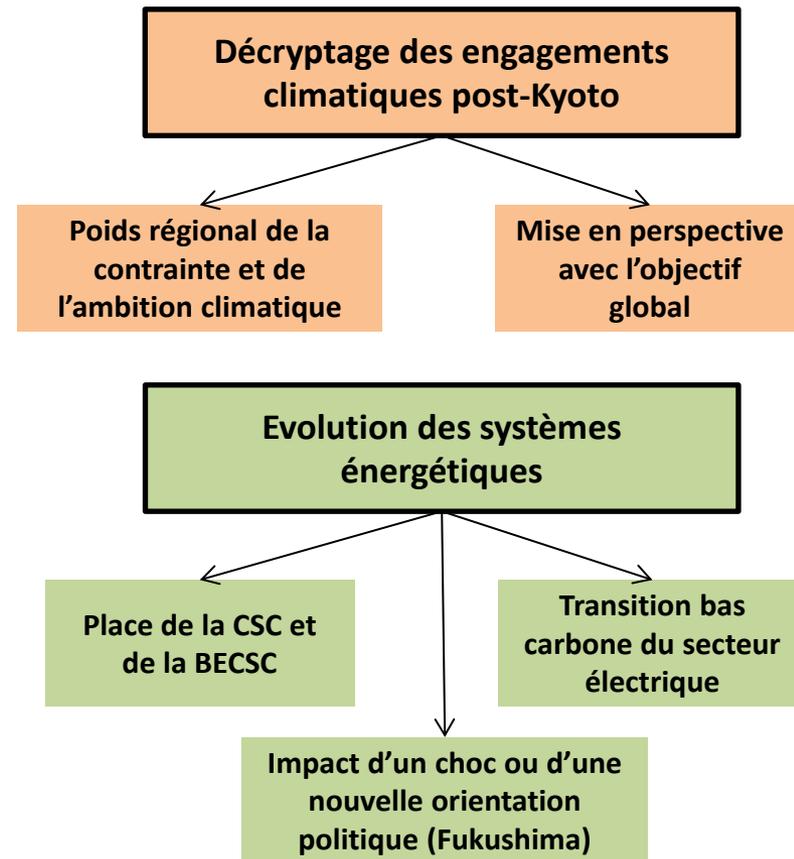
## Exploration des futurs énergétiques possibles

### • 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 de GES par technologie, par secteur, par région

### • La solution duale

- La « valeur fictive » (*shadow price*) de chaque commodité



# Analyse prospective des politiques climatiques internationales

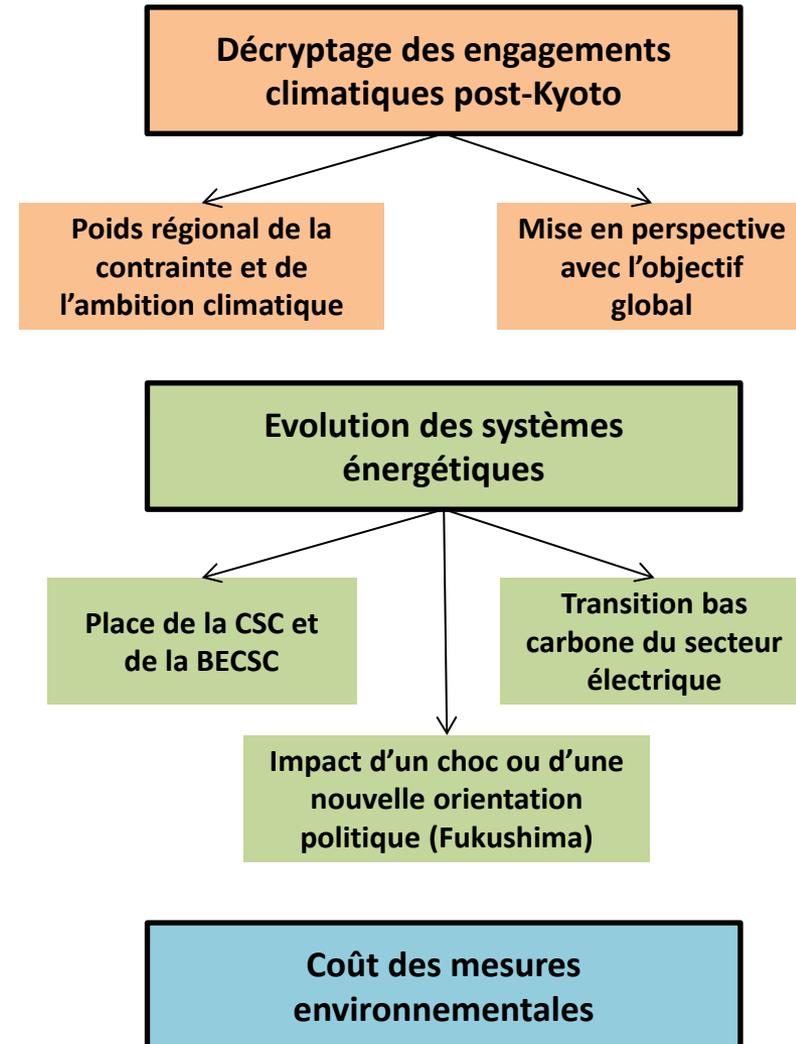
## Exploration des futurs énergétiques possibles

### • 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 de GES par technologie, par secteur, par région

### • La solution duale

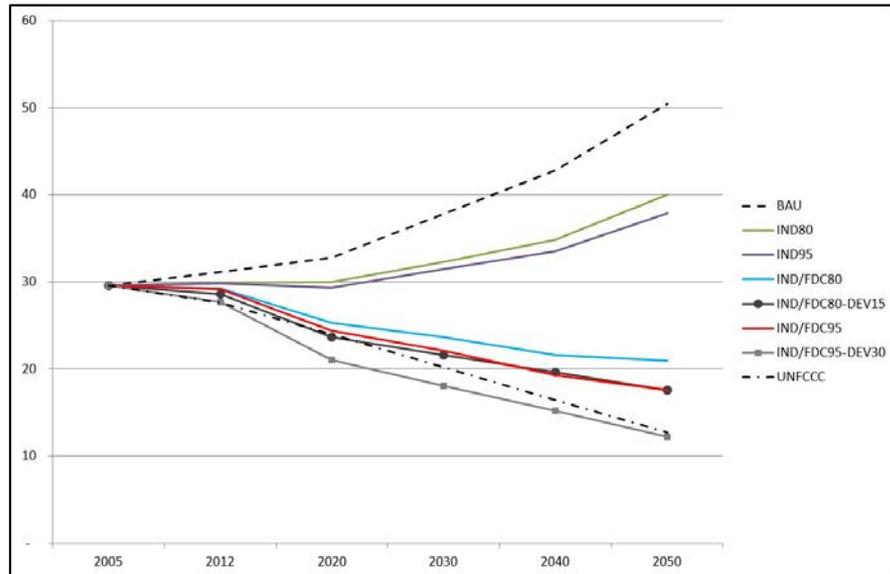
- La « valeur fictive » (*shadow price*) de chaque commodité



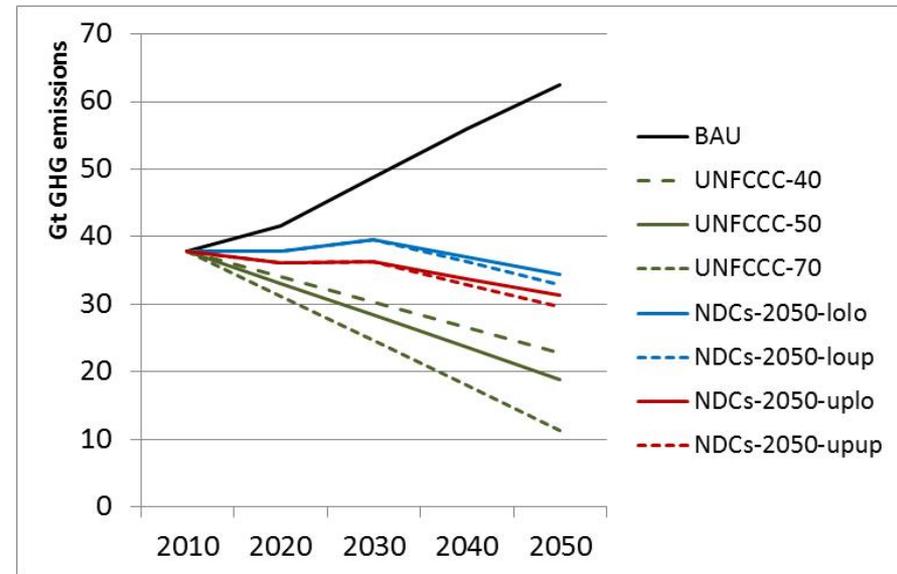
# Spécification des scénarios de trajectoires décarbonées



Emissions de CO<sub>2</sub> dans les scénarios régionaux de long terme (Gt CO<sub>2</sub>)



Emissions mondiales de GHG (Gt CO<sub>2</sub>eq)

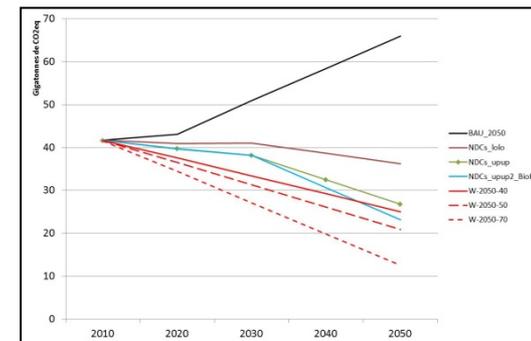


**En attendant Paris...**

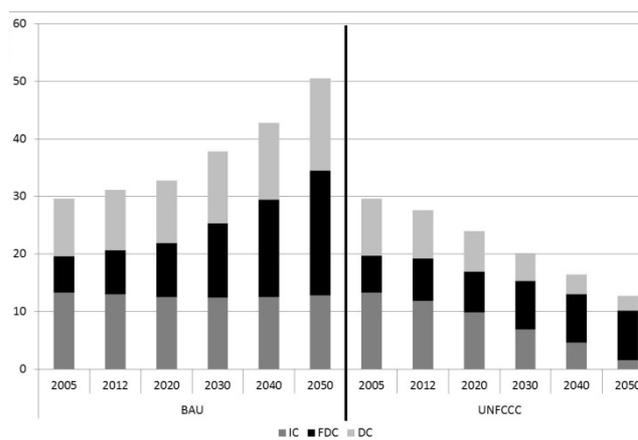
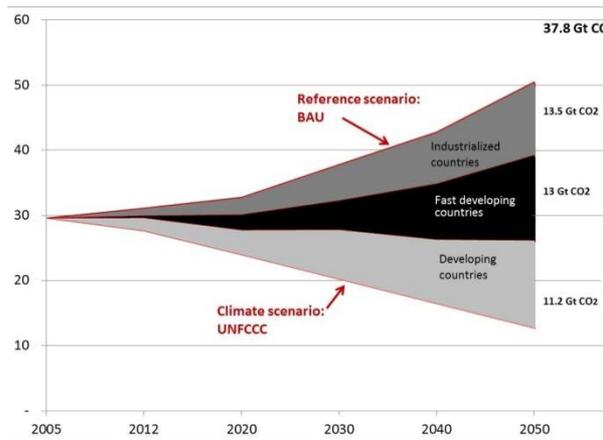
Quelles contributions attendre des pays en développement ?

Le principe de responsabilités communes et différenciées

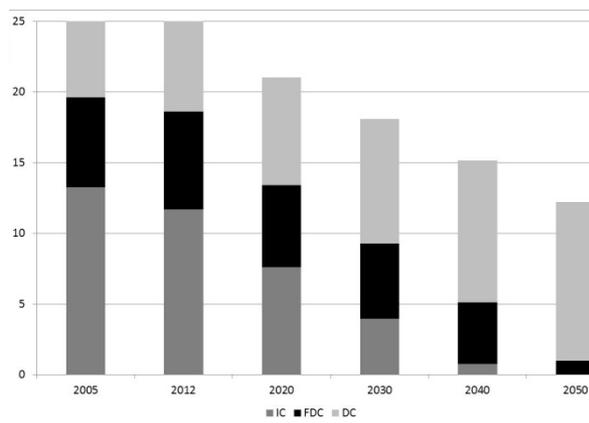
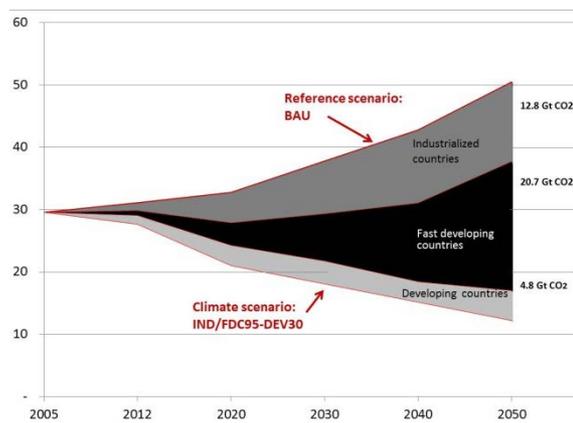
**Ere post-Accord de Paris**



# La question de l'équité dans la contribution à la lutte contre le réchauffement climatique



*Contribution par groupe de pays à l'effort d'atténuation de CO<sub>2</sub> dans les scénarios BAU et UNFCCC (Gt CO<sub>2</sub>)*



*Contribution par groupe de pays à l'effort de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans les scénarios BAU et IND/FDC95-DEV30 (Gt CO<sub>2</sub>)*

# Production électrique mondiale (PJ)

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

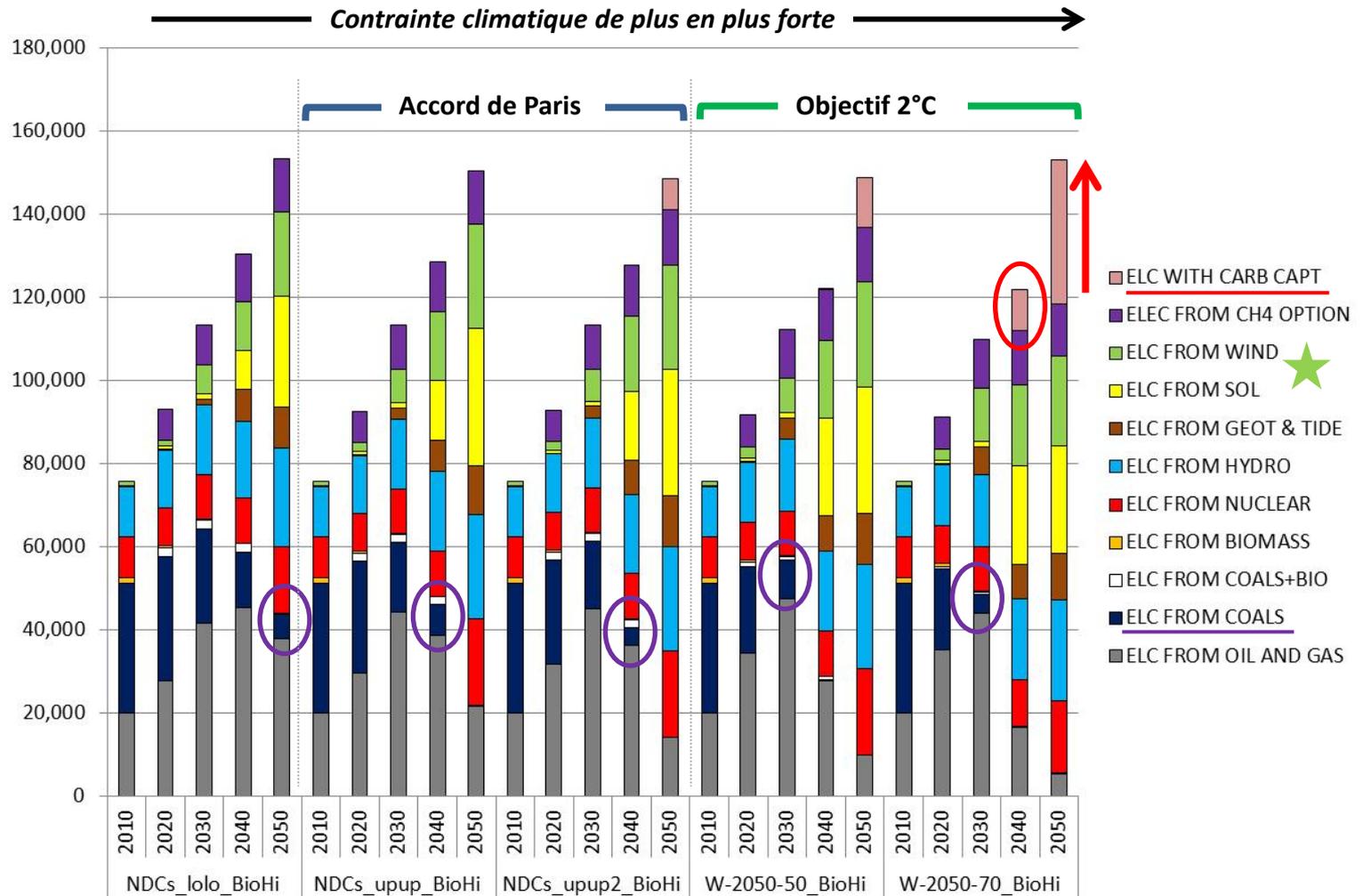
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

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

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



# Le stockage du carbone en question... (Gt)

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

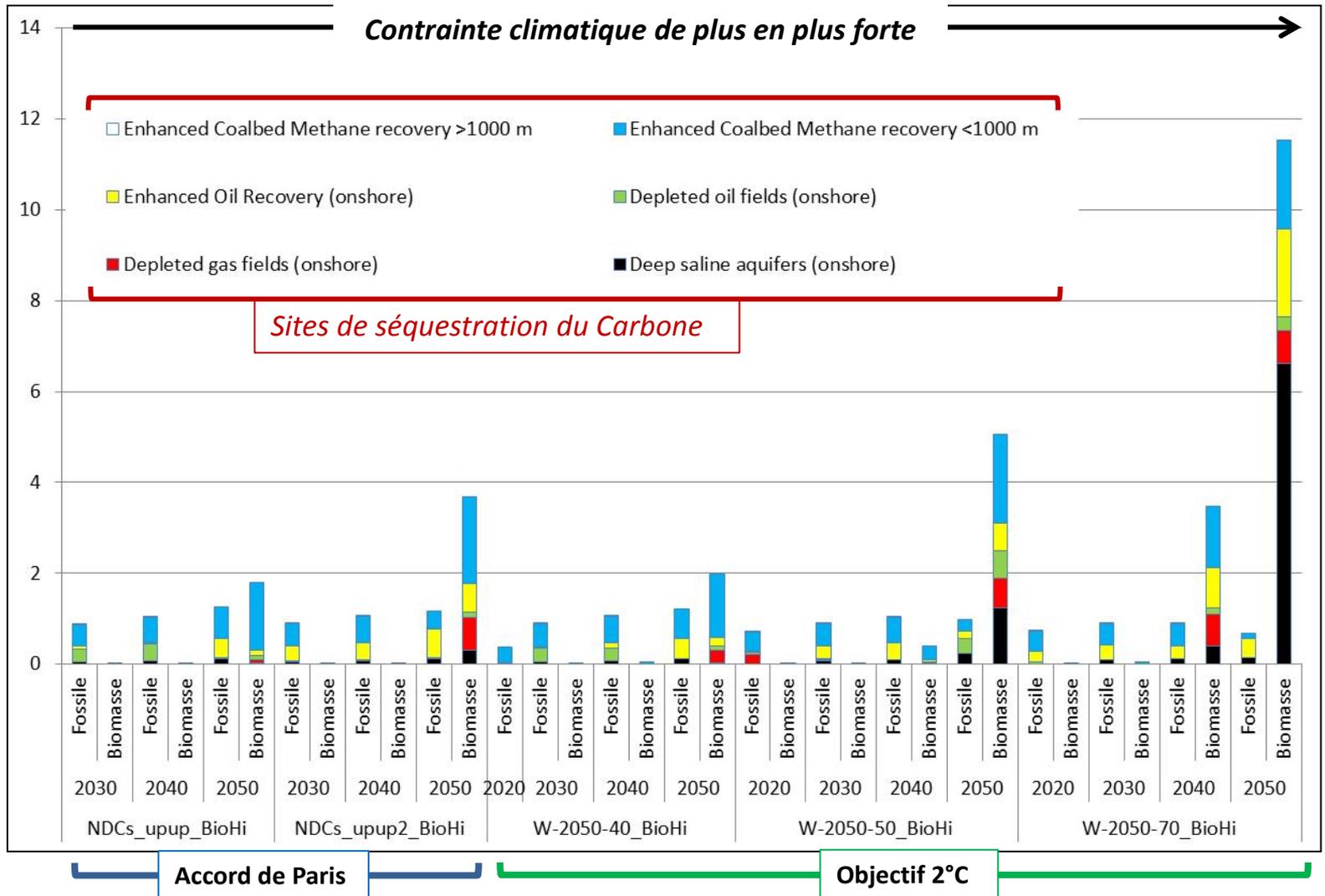
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

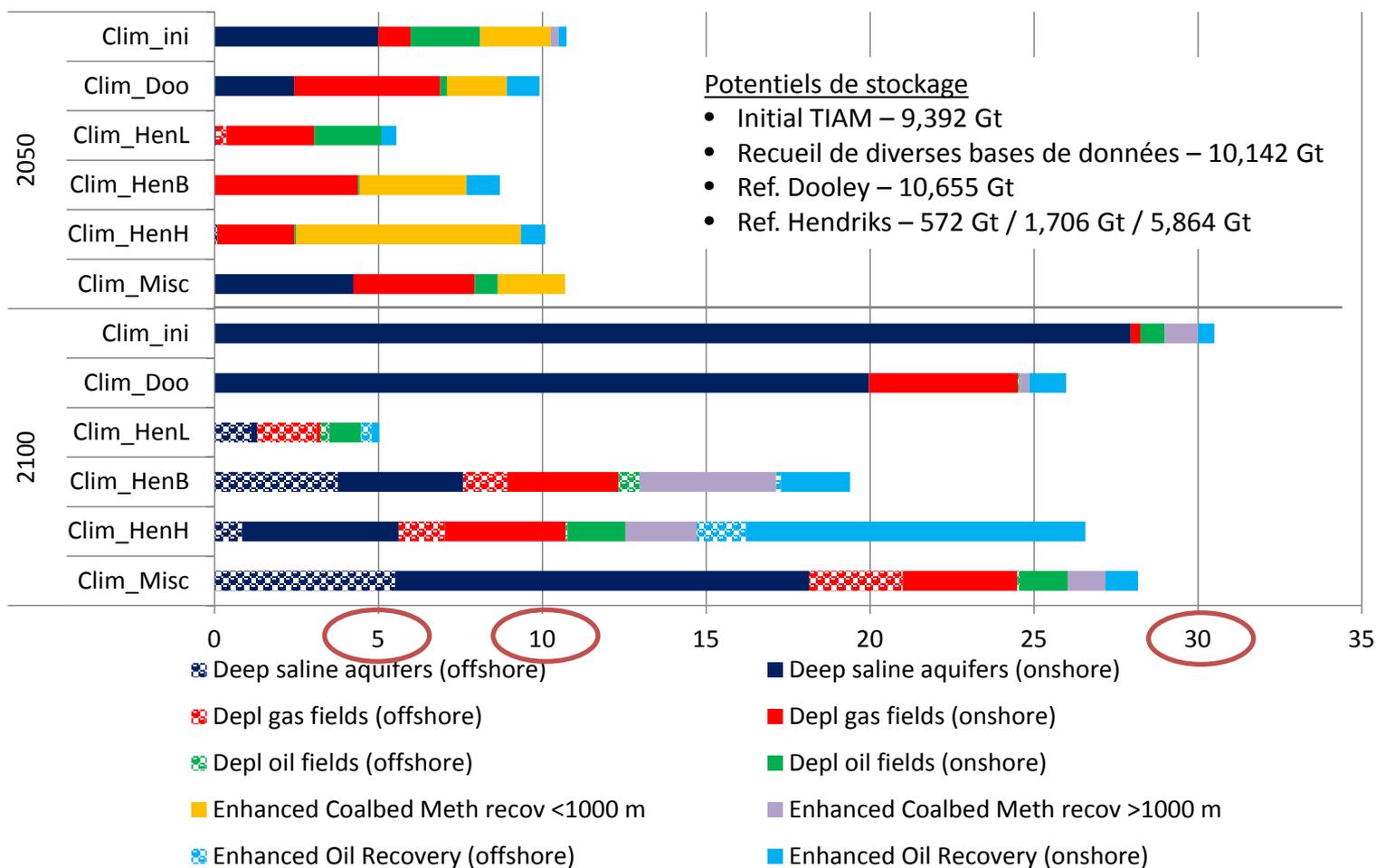
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} ...$$

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



# 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)

## 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

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

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

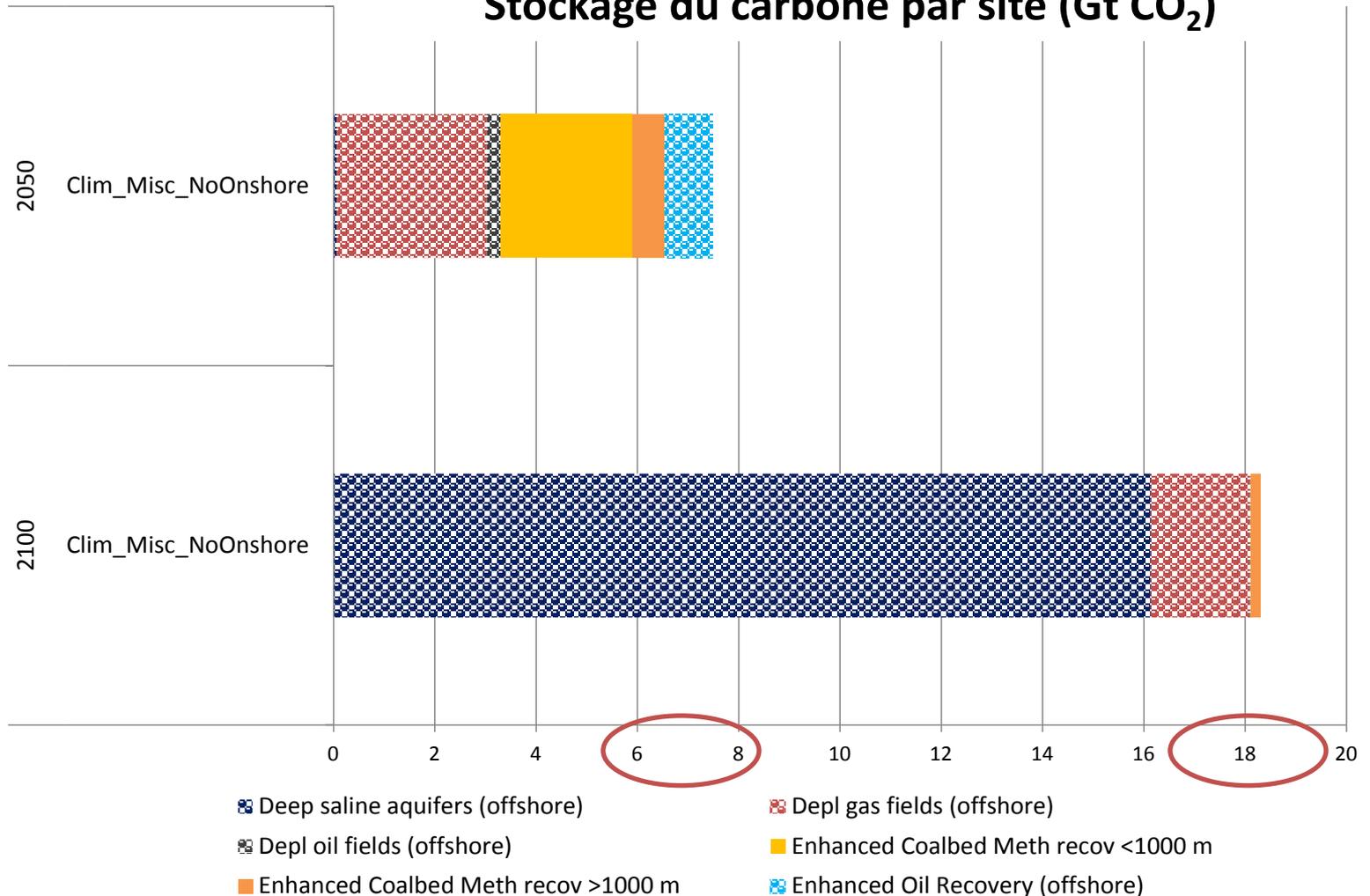
$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

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

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

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

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



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

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

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

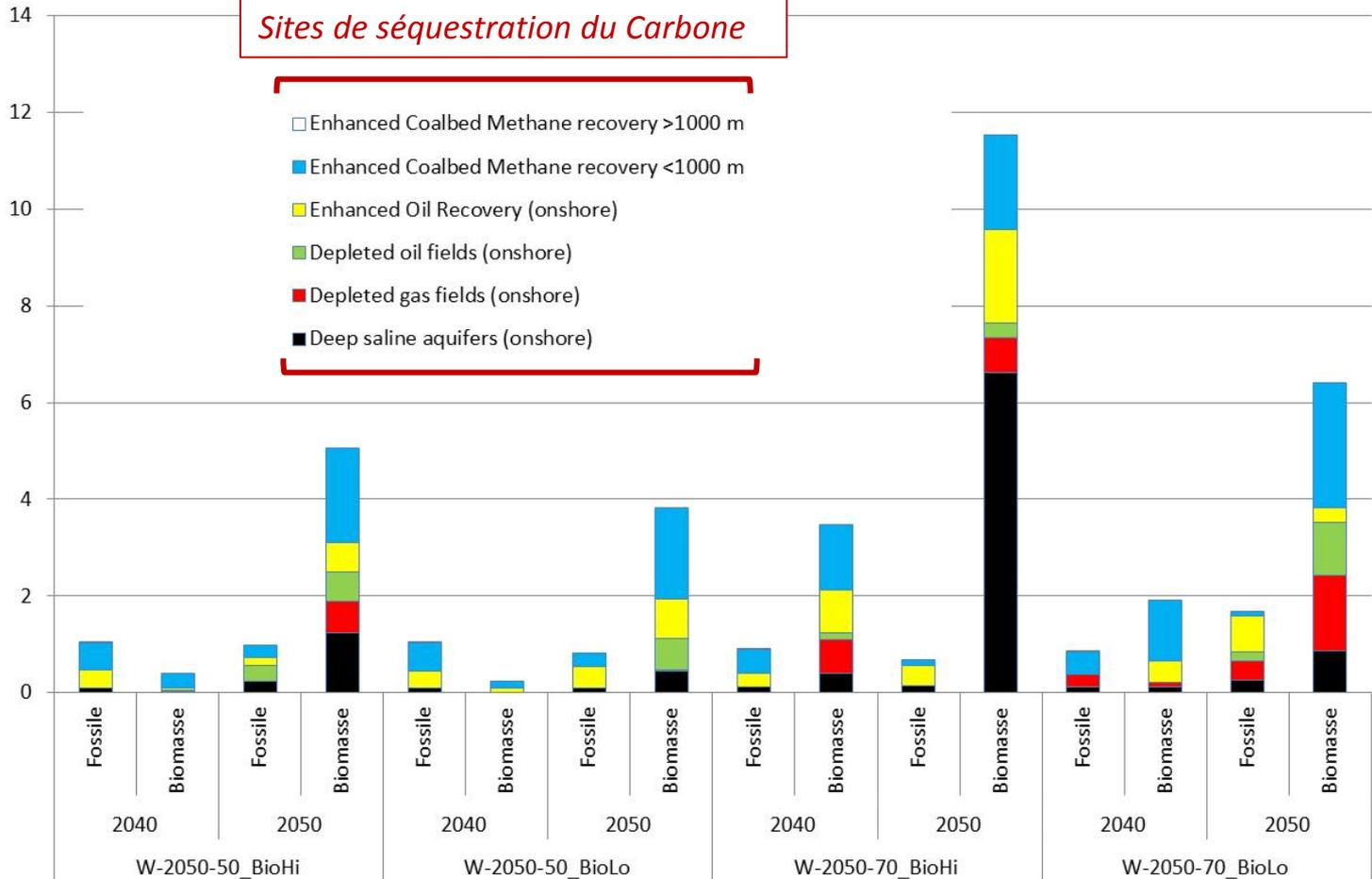
$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varu$$

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

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

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

## Sites de séquestration du Carbone



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

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

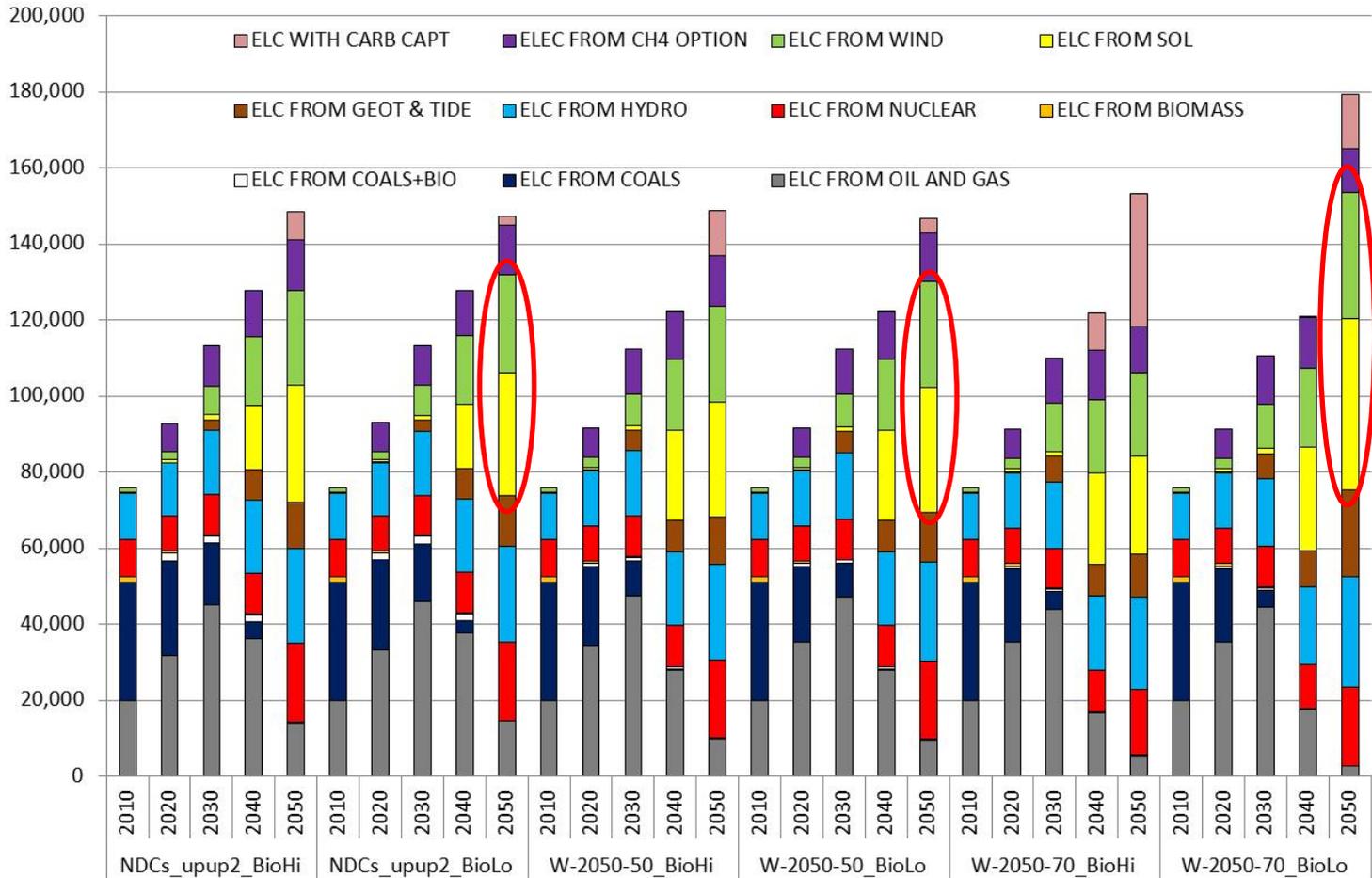
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

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

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



# Coût d'abattement régional du système et coût marginal du carbone

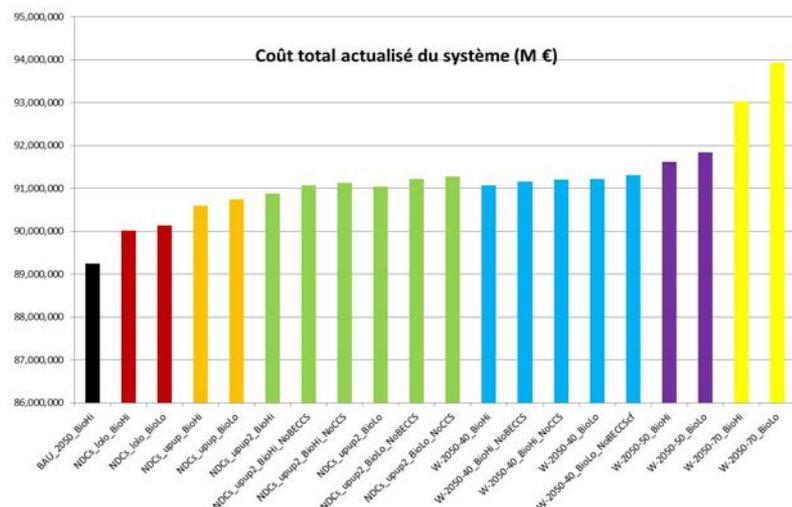
$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

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

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

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

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



Comparaison des coûts totaux actualisés du système en fonction des contraintes

Comparaison des coûts par régions en fonction des contraintes

Comparaison des coûts marginaux des contraintes par régions

Régions	Coûts de réduction régionaux (M US\$)				Coût marginal du carbone pour les objectifs COP 15 (USD/tCO <sub>2</sub> )	
	Contraintes globales		Objectifs COP 15		2020	2050
	2020	2050	2020	2050		
AFR	3 542	40 412	259	13 585	-	-
AUS	3 700	6 114	2 877	660	34	41
CAN	-886	6 784	727	4 443	12	16
CHI	24 676	639 203	2 353	493 888	-	86
CSA	5 203	39 885	3 523	6 533	-	-
EEU	1 345	35 195	18 616	49 629	58	245
FSU	1 897	75 136	-1 553	4 608	-	-
IND	6 207	147 698	-97	81 294	-	70
JPN	31	24 424	17 842	88 034	92	447
MEA	-462	36 374	3 879	-9 427	-	-
MEX	847	12 518	1 014	2 103	-	-
ODA	657	87 752	-4 112	2 599	-	-
SKO	2 834	30 722	-503	-1 453	-	-
USA	-1 658	181 594	75	251 722	-	183
WEU	3 521	87 561	16 575	226 091	58	245

# La recherche : un travail qui se communique

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

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

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

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

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

$$- \sum_{y \in Y} price$$

Publications / Communications	Nombre
Articles dans des revues à comité de lecture répertoriés à HCERES	4
Articles dans des revues à comité de lecture non répertoriés à l'HCERES	8
Ouvrages et chapitres d'ouvrages	4
Conférences internationales avec comité de sélection et Actes	27
Conférences nationales avec comité de sélection et Actes (synthèse publiée)	1
Conférences invitées	5
Conférences internationales avec comité de sélection	17
Conférences internationales sans comité de sélection	21
Conférences nationales sans comité de sélection	9
Working Papers	12
Rapports de projet	7
Autres publications : Traductions publiées dans des revues	3
Autres publications : Posters	4
Autres publications : Newsletters	14
Autres publications : Articles soumis en cours d'évaluation	2
Séminaires internes	5



Chaire Modélisation prospective  
au service du développement durable



Economics Bulletin

Volume 33, Issue 1

A cost analysis of the Copenhagen emission reduction pledges



# La recherche : un travail collectif

## • Des collaborations de recherche

- Consortium ETSAP-TIAM (2011-...)
- Le Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement de l'Ecole des Ponts ParisTech (2008-...)
- Le Groupe de Recherche en Droit, Economie et Gestion de l'Université Nice Côte d'Azur (2012-...)
- Le Centre d'Economie et de Management de l'Océan Indien de l'Université de la Réunion (2009-...)
- Le Laboratoire d'Economie d'Orléans de l'Université d'Orléans (2010-2012)

## • Des projets de recherche

- La Chaire MPDD (2008-...)
- Projet ETSAP : E-TechDS database : les technologies de refroidissement des centrales électriques (2016-2017)
- Projet MUFFINS : Impact de *nudges* sur la consommation énergétique dans des bâtiments tertiaires (2016-2017)
- Projet ECOTYPE « Prospective, aménagement du territoire, développement durable et vision artistique (2011-2013)
- Mais aussi 8 projets (H2020, ANR, Ministère des Outre-Mer, GECP/Stanford, ENRS, COST Action) soumis mais ... rejetés



Chaire Modélisation prospective  
au service du développement durable



MUFFINS.  
Project



# La recherche : un travail qui se partage

## • Organisation de conférences et manifestations

- Chaire Modélisation prospective au service du développement durable [21]
- Conférences sur les Changements Climatiques des Nations Unies (UNFCCC) [depuis COP 15 2009]
- European Conference on Operational Research (EURO) [6]
- Les Workshops de l'ETSAP [2]



United Nations  
Framework  
Convention on  
Climate Change

## • Encadrement d'étudiants et supervision de jeunes chercheurs

- 2 doctorants (Sébastien Postic 2012-2015 et Seungwoo Kang 2014-2017)  
*Et 1 à venir 2017-2020*
- 2 post-doctorants (Olivia Ricci 2012-2013 et Ankinée Kirakosian 2016-2017)
- 1 stagiaire (Govind Malhotra 2013) *et 1 à venir (Alex Mieuguem 2017)*
- Mastère spécialisé Optimisation des Systèmes Energétiques
  - Tutorat académique : 14 élèves suivis pendant leur mission industrielle
  - Encadrement de stagiaires : 7 élèves (dont 3 en co-direction)



## • Des actions de vulgarisation scientifique

- Le programme MEDITES (depuis 2016)
- La Fête de la Science
  - Comité d'organisation 06 (depuis 2015)
  - Week-end des sciences (depuis 2011)
  - Interventions dans les classes (depuis 2015)



# Mes perspective de recherche

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

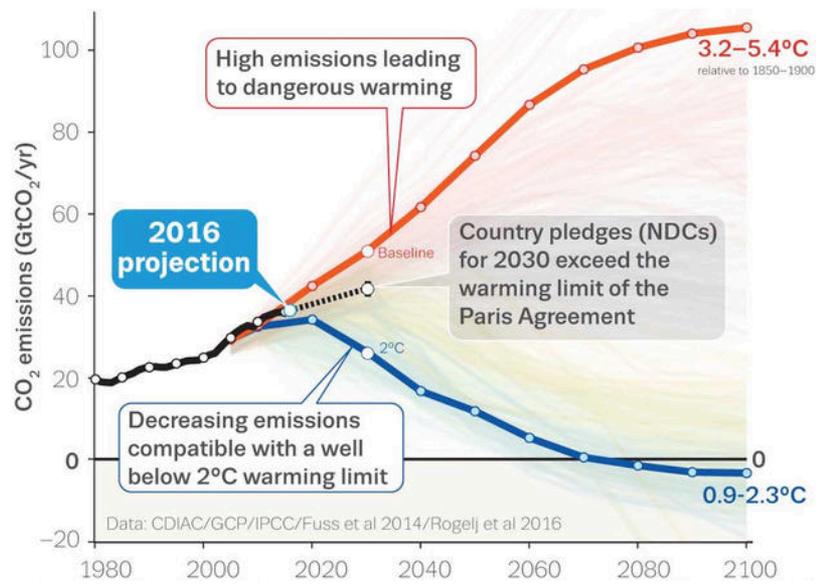
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s CO_2$$

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

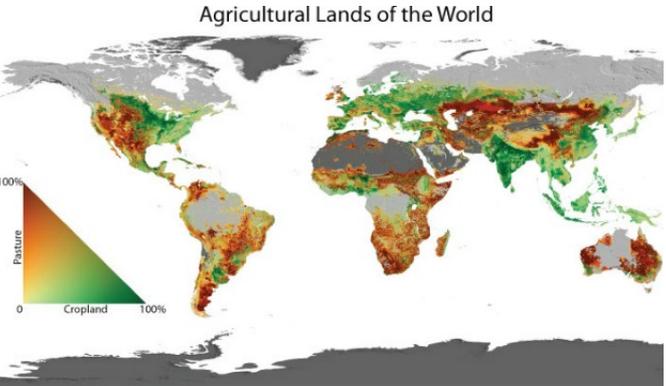
$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$



**NDC PARTNERSHIP**  
ACCELERATING CLIMATE AND DEVELOPMENT ACTION



CLIMATE CHANGE ACTION SURVEY





**Merci pour votre attention!**

# Mon parcours en Economie

Filière en Economie de L1 à M2  
Université des Sciences et  
Technologies de Lille 1



Les fusions et acquisitions (NTIC)  
Réseaux locaux d'entreprises  
(transport)  
*Entretiens semi-directifs*

Thèse de doctorat en Economie  
GREDEG de l'Université de Nice  
Sophia Antipolis et CNRS



Relations Science Industrie (sciences  
du vivant)  
Brevets et Génopoles  
*Analyses statistique et textuelle des  
données bibliographiques et  
entretiens semi-directifs*

Post-doctorat au Centre de  
Mathématiques Appliquées de  
MINES ParisTech



Systèmes énergétiques (énergie)  
Politiques climatiques internationales  
Choix technologiques  
*Modélisation prospective*

Et enfin, chercheure

Etudier le passé pour comprendre l'évolution des systèmes

Explorer des futurs possibles pour discuter les décisions qui doivent être  
prises dans le présent

**Interroger l'évolution des systèmes**

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

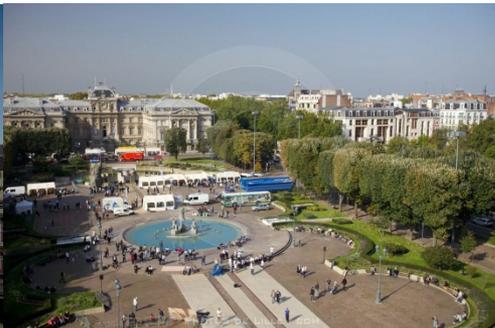
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

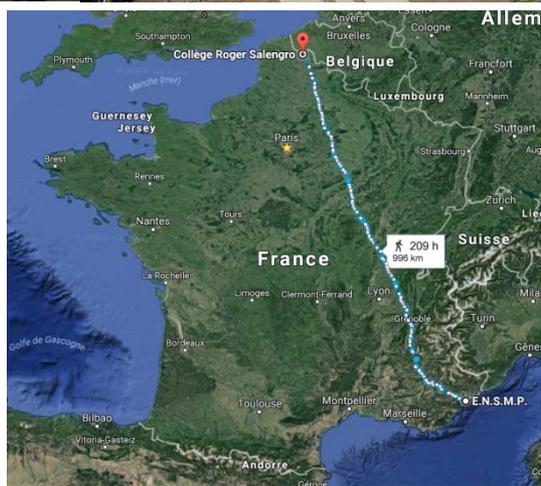
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s cost_{k,s}$$

$$+ \sum_{s \in Z} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{s,z,y}$$

$$- \sum_{s \in Z} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{s,z,y}$$



**LILLE**



**VALBONNE**



# Les modèles de prospectives énergétiques

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

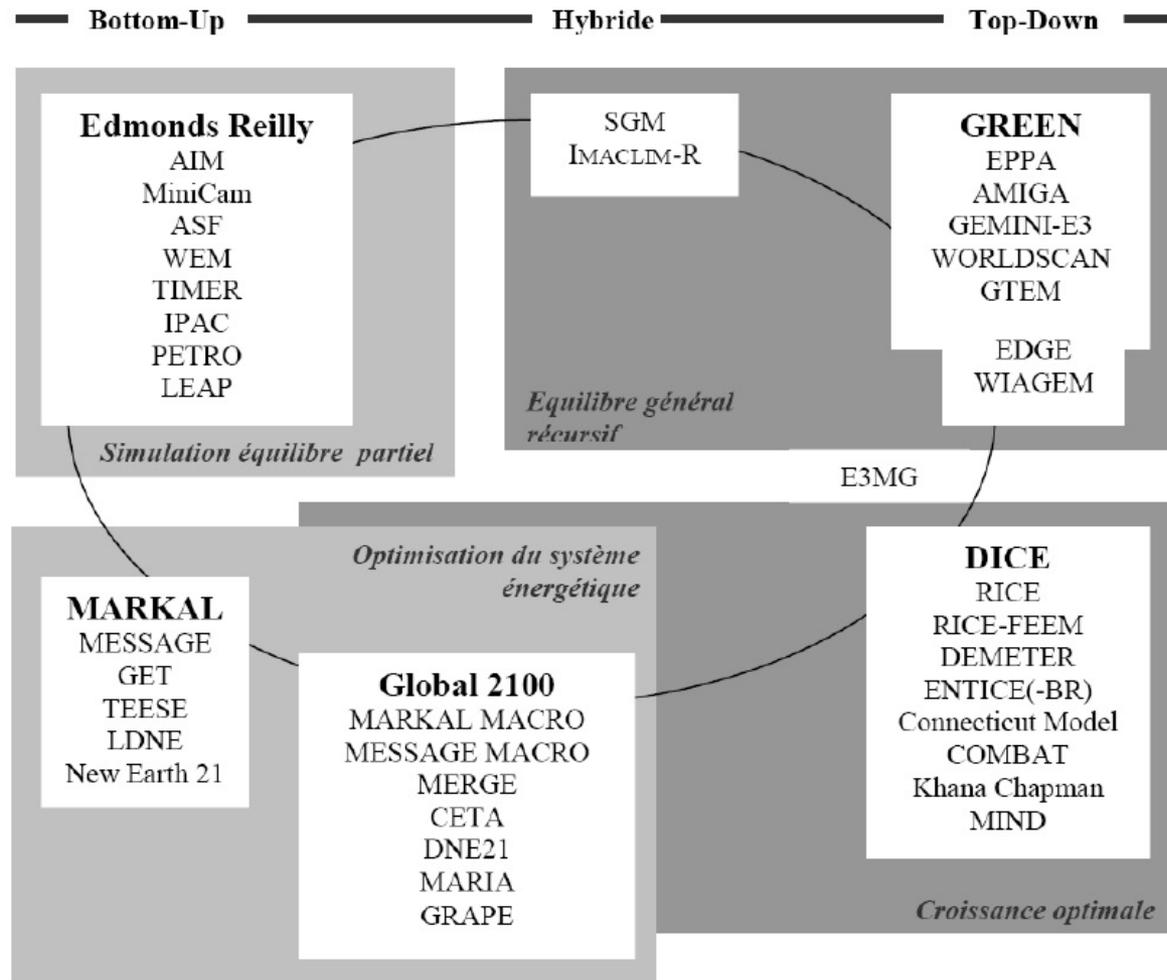
$$\times \left( \sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

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

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



Renaud Crassous, *Modéliser le long terme dans un monde de second rang : application aux politiques climatiques*. Thèse de doctorat, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), Novembre 2008

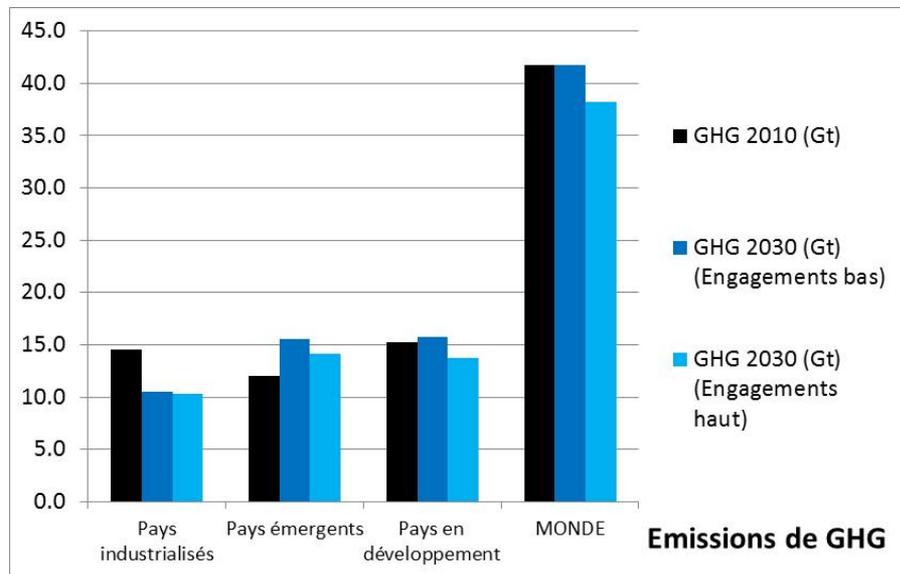
# Accord de Copenhague

Région	% de réduction d'ici 2020	Année de référence	Type de réduction	Gt CO <sub>2</sub> eq 2005	Gt CO <sub>2</sub> eq 2020	Evolution 2005-2020
<b>Groupe 1 : Cibles absolues</b>						
<b>AUS</b>	5 %	2000	Réduction du niveau des émissions	0,742	0,657	-11,4 %
<b>CAN</b>	17 %	2005		1,142	0,947	-17 %
<b>JPN</b>	25 %	1990		1,345	0,945	-29,71 %
<b>FSU</b>	15 %	1990		3,305	4,762	+44 %
<b>USA</b>	17 %	2005		7,072	5,869	-17 %
<b>Europe</b>	20 %	1990	5,65	4,891	-13,42 %	
<b>Groupe 2 : Cibles relatives</b>						
<b>CHI</b>	40 %	PIB 2020	Intensité	6,917	8,965	+29,6 %
<b>IND</b>	20 %	PIB 2020	carbone	1,926	3,320	+72,32 %
<b>MEX</b>	30 %	2020	Scénario de	0,606	0,423	-30,15 %
<b>SKO</b>	30 %	2020	référence	0,556	0,427	-23,55 %



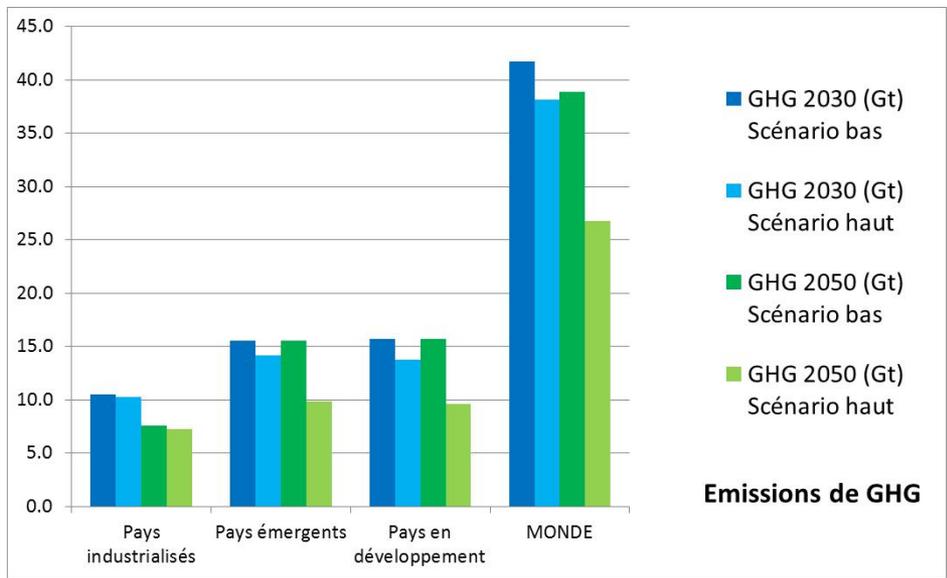
**C  
I  
B  
L  
E  
S**  
**2  
0  
3  
0**

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>			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 )

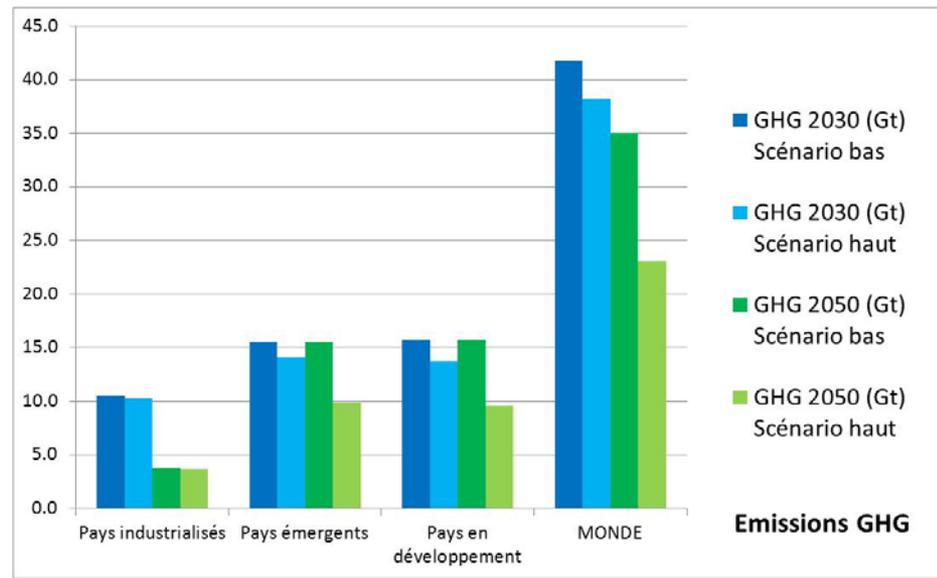
Regions	Année de référence	Année cible	Niveau de réduction	Type de réduction	Réduction 2030-2050 (LowLow)	Réduction 2030-2050 (UpUp)
<b>Pays industrialisés</b>						
Europe (WEU-EEU)	2030	2050	Effort 2030-2050 similaire à 2010-2030	Réduction des émissions	-29%	
USA (USA)					-28%	-30%
Australie et Nouvelle-Zélande					-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)						



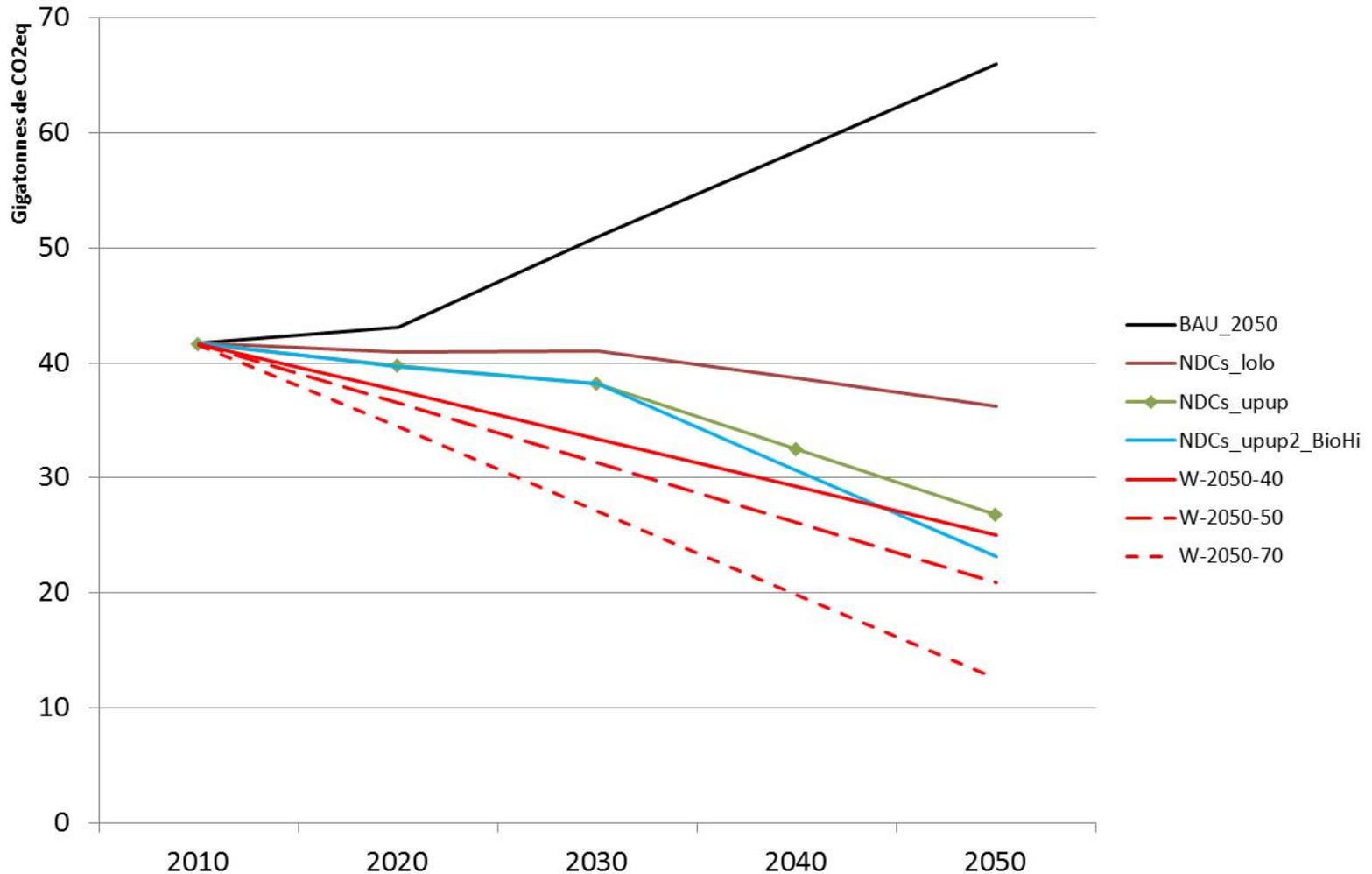


C I B L E S 2 0 5 0 ( 2 )

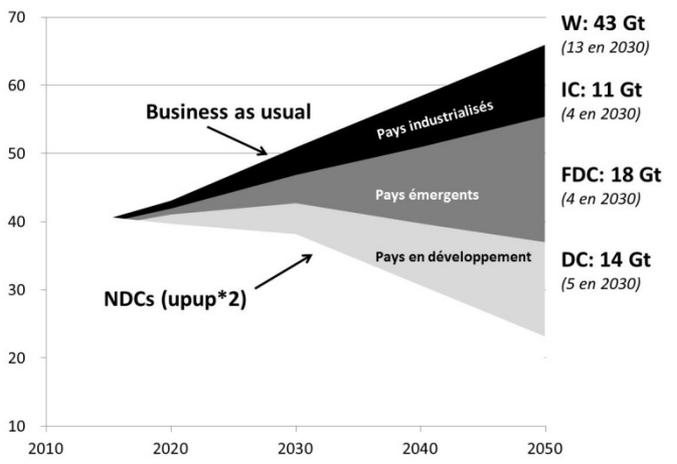
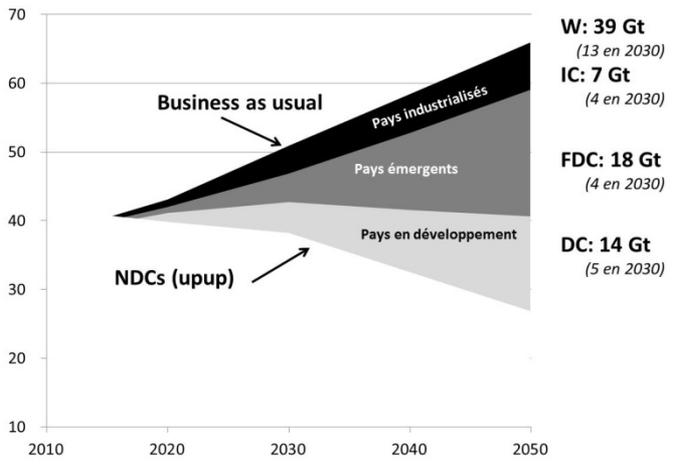
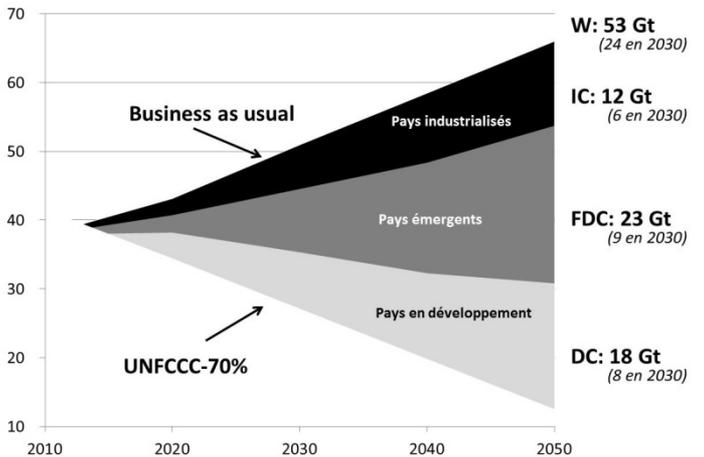
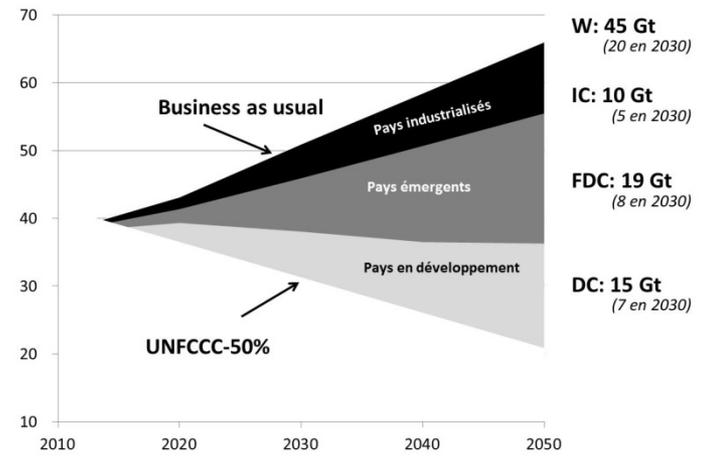
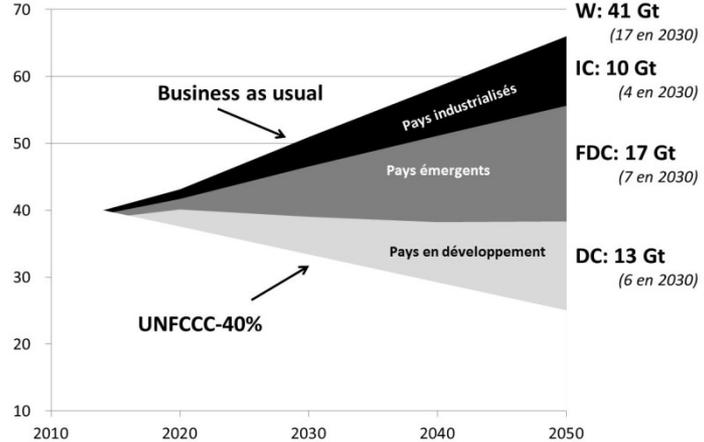
Regions	Année de référence	Année cible	Niveau de réduction	Type de réduction	Réduction 2030-2050 (LowLow)	Réduction 2030-2050 (UpUp)
<b>Pays industrialisés</b>						
Europe (WEU-EEU)	2030	2050	Effort 2030-2050 double de celui en 2010-2030	Réduction des émissions	-65%	
USA (USA)					-64%	-65%
Australie 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)	Réduction des émissions	0%	30%
Inde (IND)					0%	30%
<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)	Réduction des émissions	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



# Contribution régionale à l'effort d'atténuation



# Contribution régionale à l'effort d'atténuation

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

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

$$+ \sum_{i \in EELA} \sum_{z \in EZ} \sum_{y \in EY} varu$$

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

$$+ \sum_s \sum_{z \in EZ} \sum_{y \in EY} price$$

$$- \sum_s \sum_{z \in EZ} \sum_{y \in EY} price$$

