



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

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

$$\sum_{EELAZEZyEY} \sum_{EHLIzEZ} varom_i(t) \cdot P_{i,y}$$

$$\sum_{EENCs} \sum_{s} cos_{ks}(t) \cdot IMP_{ks}(t)$$

$$\sum_{s} \sum_{zEZyEY} cos_{ms}(t) \cdot IMP_{ms}(t)$$

$$\sum_{s} \sum_{zEZyEY} price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{EL,y}(t)$$

Potentiels globaux et régionaux de la bioélectricité avec stockage du carbone

Sandrine SELOSSE (MINES ParisTech/CMA - Chaire MPDD)

&

Olivia RICCI (LEO/Université d'Orléans)

Objet de l'étude

Objectif de 2°C (UNFCCC)

→ Politiques de réduction des émissions de CO₂



Evolution du système électrique mondial

- ▣ Quel futur mix électrique?
- ▣ Quels choix technologiques?

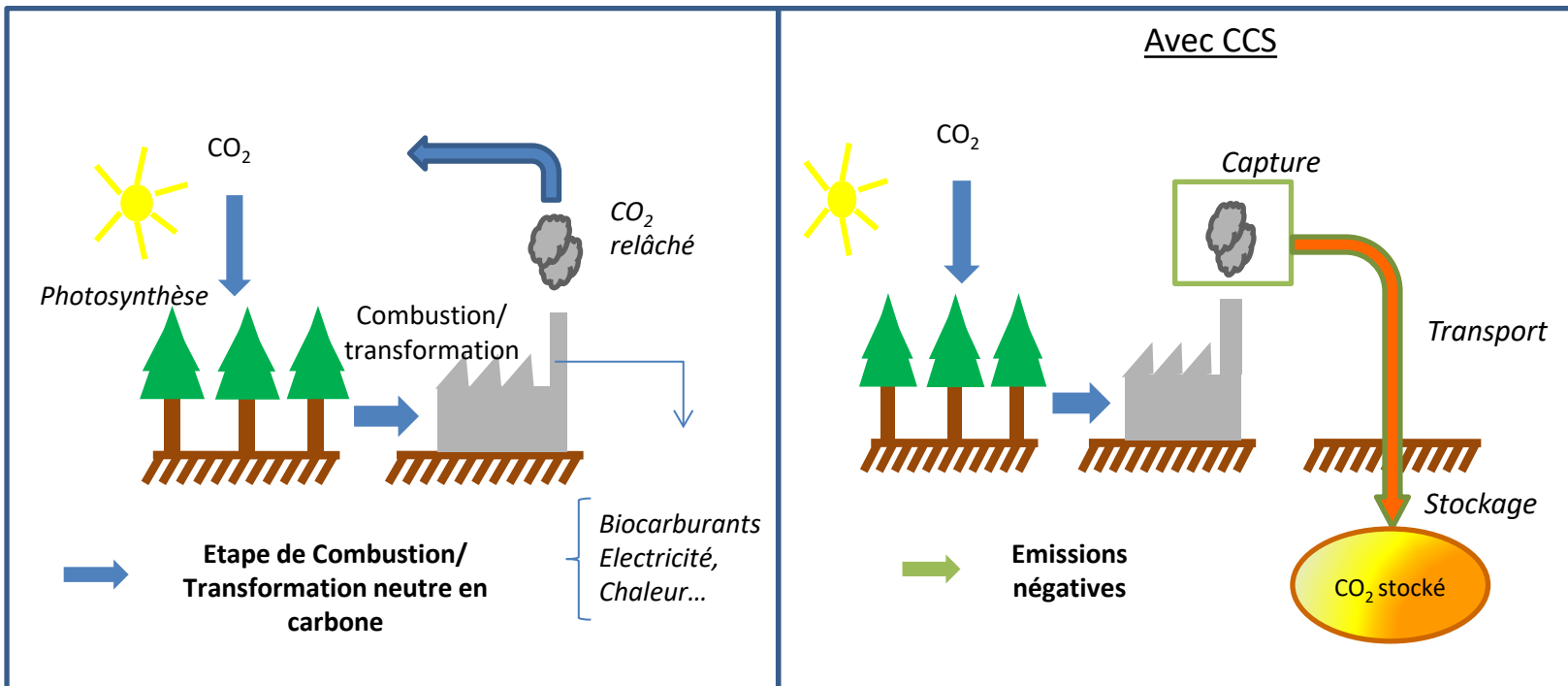
Capture et stockage du CO₂

- ▣ Quelle place du CCS dans la production d'électricité?
- ▣ Quelle place de la BECCS dans la production d'électricité?


Perspective régionale

- ▣ Quel potentiel de développement du CCS et de la BECCS
 - ▣ Pour les pays développés?
 - ▣ Pour les pays en développement?

Biomasse et capture du CO₂



Outil: Modèle TIAM-FR


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

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

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

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

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

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

- **T**IMES **I**ntegrated **A**ssessment **M**odel
 - ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program) de l'AIE
- Modèle bottom-up d'optimisation
 - Minimisation du coût total actualisé du système
- Construit sur le concept de Système Energétique de Référence (RES)
 - Description détaillée des technologies existantes et futures
 - De l'extraction aux demandes de services énergétiques

RES simplifié

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

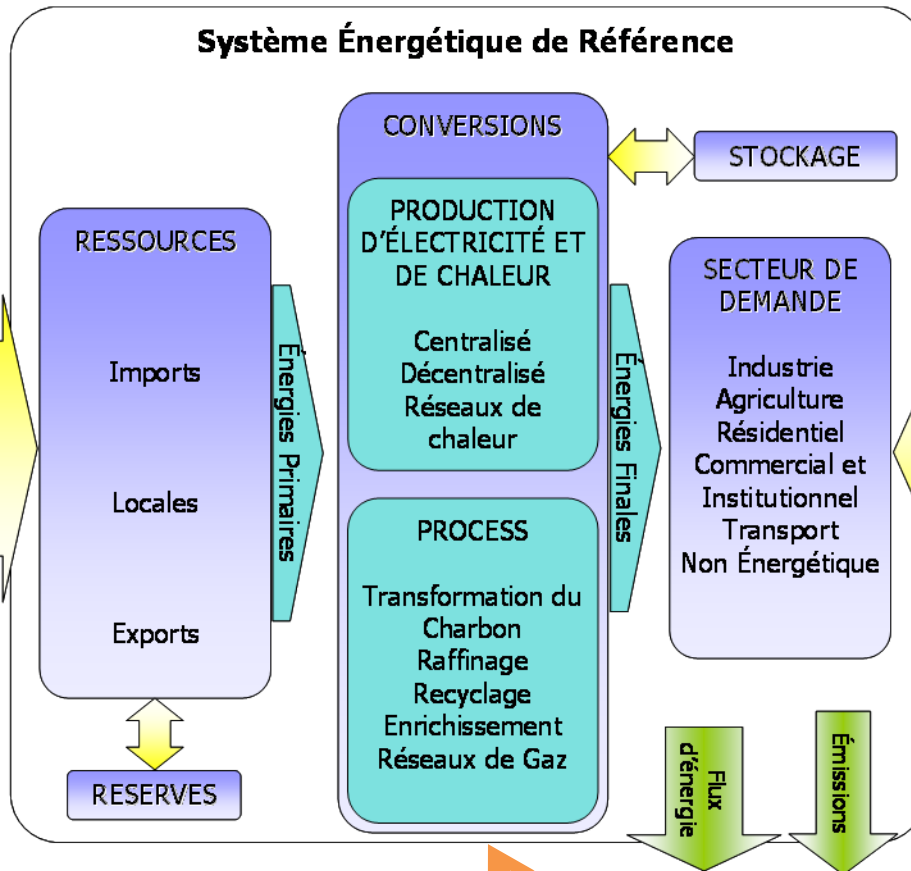
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in EELA} \sum_{z \in EZ} \sum_{y \in Y} var$$

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

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

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



Inputs, exogènes
 -Coûts d'extraction
 -Réserves fossiles
 -Potentiel biomasse

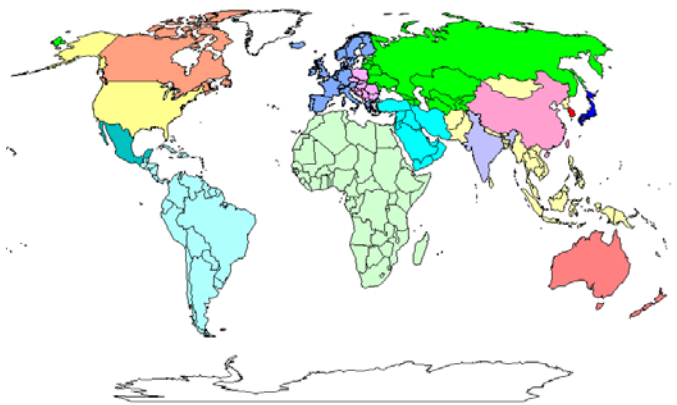
Des milliers de technologies pour chaque région

- Agriculture**
- Besoins énergétiques
- Tertiaire**
- Froid
- Réfrigération
- Cuisson
- Chauffage
- Eau chaude
- Lumière
- Équipement de bureau
- Autres besoins
- Industrie**
- Chimie
- Fer et acier
- Papeterie
- Métaux non-ferreux
- Non-métaux
- Autres besoins
- Résidentiel**
- Froid
- Séchage (Vêtements)
- Lavage (Vêtements)
- Vaisselle
- Chauffage
- Eau chaude
- Cuisson
- Lumière
- Réfrigération
- Autres besoins
- Transport**
- Aviation domestique
- Aviation internationale
- Route: Bus
- Route: Camions
- Route: 3roues
- Route: Poids lourd
- Route: Utilitaires
- Route: Particuliers
- Route: 2roues
- Rail: Fret
- Rail: Passagers
- Navigation intérieure
- Navigation internationale

Demande de services énergétiques

Outil: Modèle TIAM-FR (suite)

- Modèle géographiquement intégré du monde en 15 régions



- Horizon temporel: 2005-2100
- Emissions de GES et module climatique intégré
 - CO₂, CH₄ et N₂O
 - Concentration atmosphérique, changement de température, forçage radiatif
- Technologies de capture et séquestration du carbone
 - Fossiles et Bio-énergies

Hypothèses sous jacentes à l'étude

- Politiques climatiques

- Scénario + : Forçage radiatif de 2,6 W/m² (RF_2p6)

- Scénario - : Forçage radiatif de 3,7 W/m² (RF_3p7)

- Disponibilité technologique

- Scénario sans BECCS (sauf centrales charbon/biomasse)

- Scénario sans BECCS ni centrales charbon/biomasse

- Disponibilité des ressources

- Potentiel de biomasse: 234 EJ/an en 2050

- Potentiel de séquestration du carbone : 9 392 Gt CO₂

- Régionalisation des potentiels



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

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

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

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

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

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

Résultats

Production mondiale d'électricité (TWh)

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

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

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

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

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

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

$$price$$

$$price$$

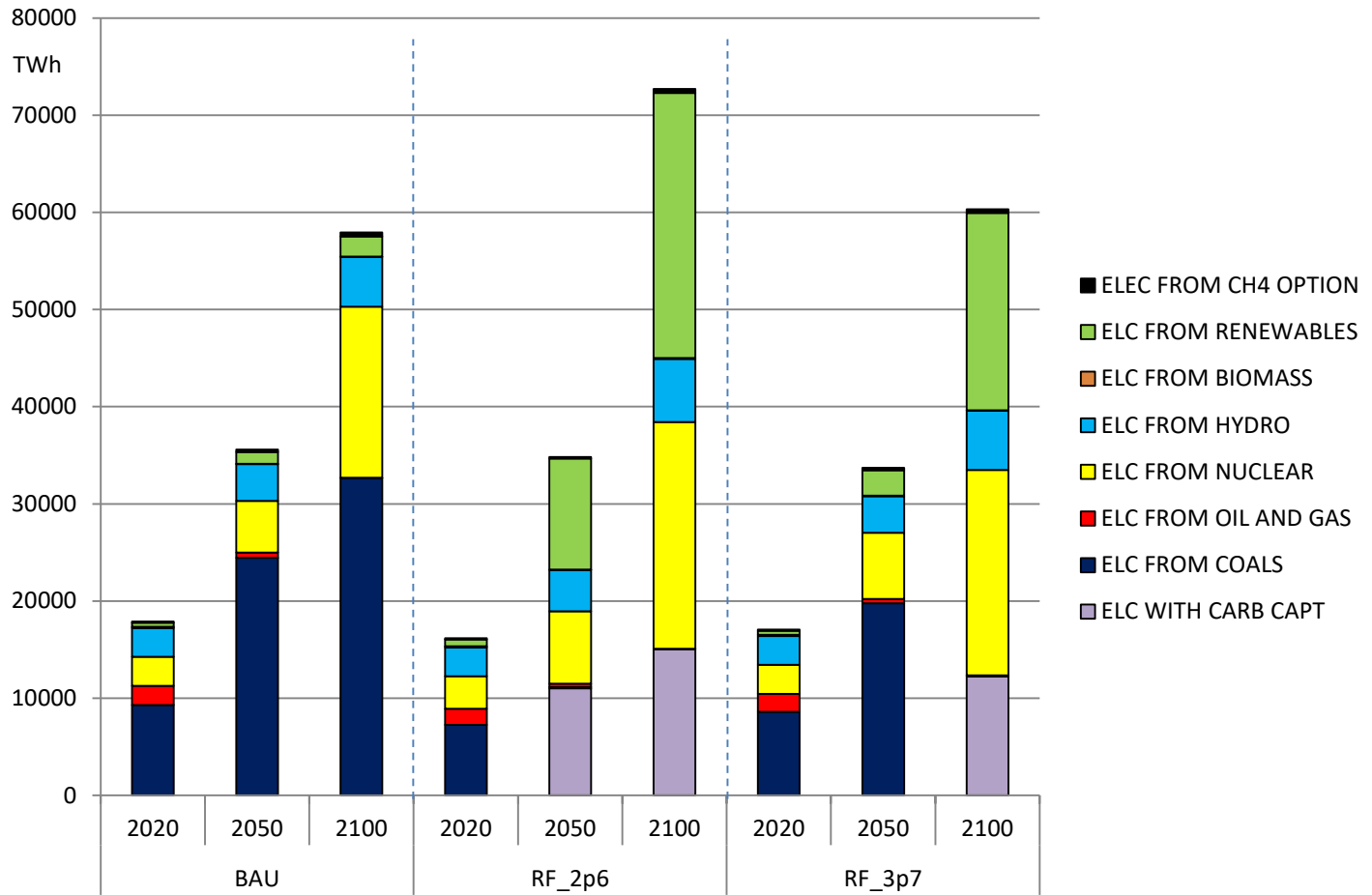
$$price$$

$$price$$

$$price$$

$$price$$

$$price$$





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

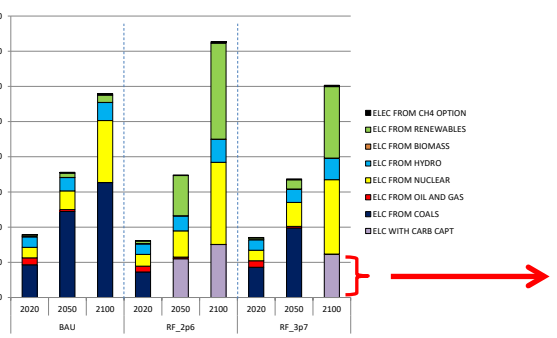
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

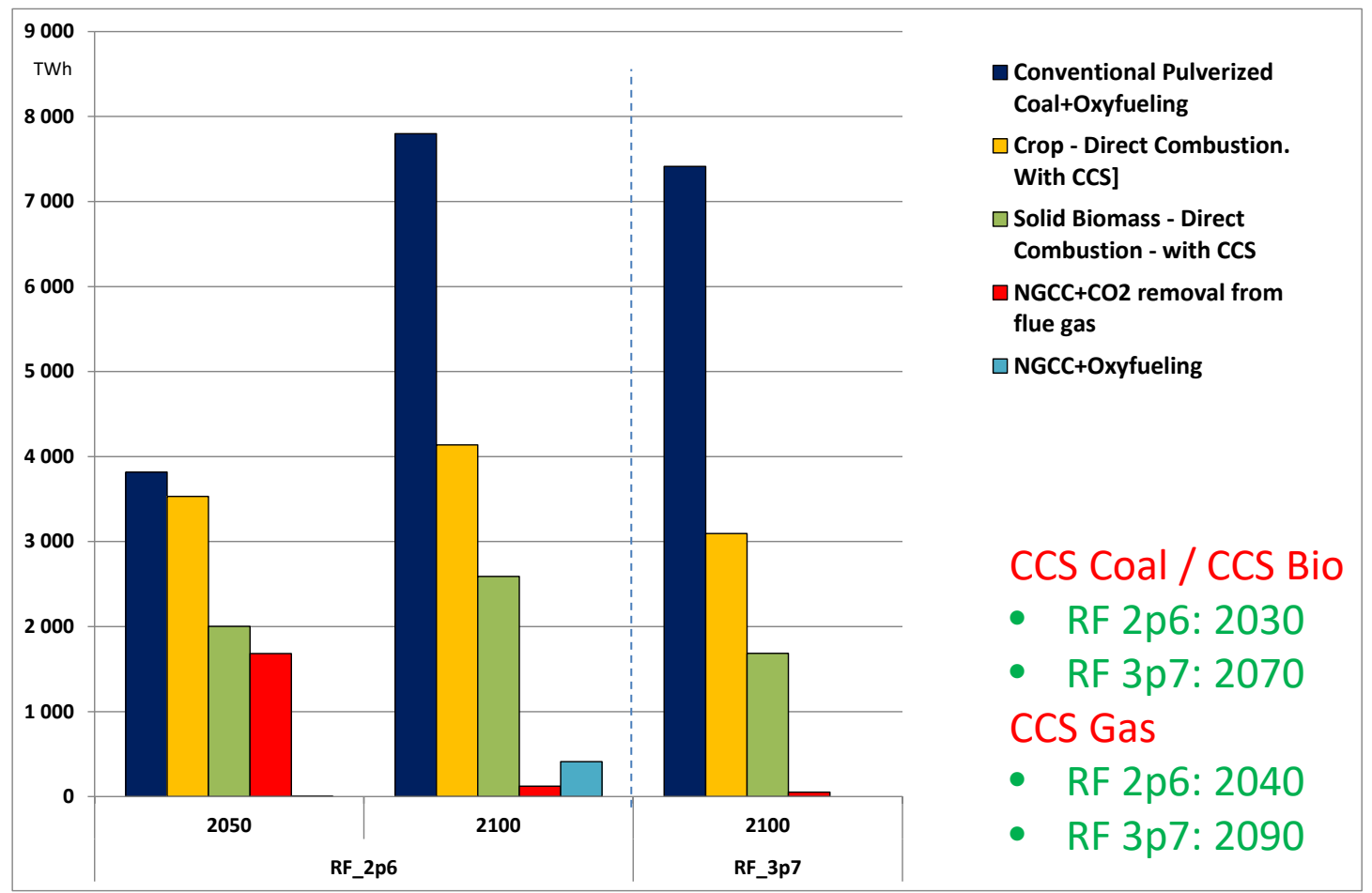
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com$$

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

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



Production mondiale d'électricité des centrales équipées de capture de CO₂ (TWh)





Sensibilité technologique

Disponibilité des technologies de capture – Pas de BECCS

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

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

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

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

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

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

Mix électrique mondial (%)

2050	RF_2p6	RF_2p6_NoBECCS	RF_3p7	RF_3p7_NoBECCS
ELC FROM COALS	0,3	0,1	59	57
ELC FROM NUCLEAR	21	22	20	21
ELC FROM HYDRO	12	11	11	11
ELC FROM RENEWABLES	33	35	8	8
ELC WITH CARB CAPT	32	31	0	0

2100	RF_2p6	RF_2p6_NoBECCS	RF_3p7	RF_3p7_NoBECCS
ELC FROM COALS	0,04	0,1	0,2	0,2
ELC FROM NUCLEAR	32	29	35	37
ELC FROM HYDRO	9	8	10	10
ELC FROM RENEWABLES	38	35	34	34
ELC WITH CARB CAPT	21	27	20	18

Substitution technologique

Pas de BECCS

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

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

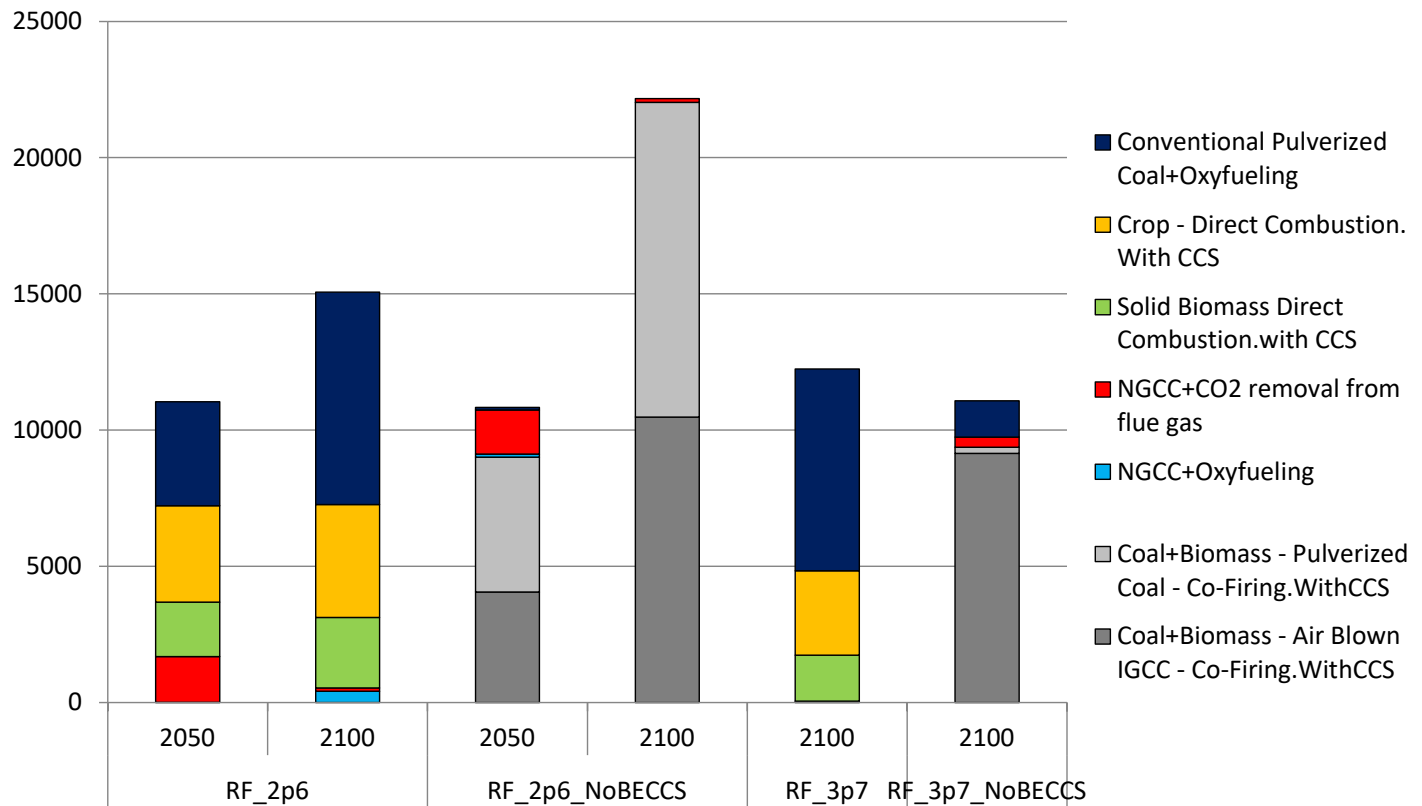
$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varc$$

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

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

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

Production électrique des centrales équipées de capture de carbone (TWh)



Substitution technologique

Pas de BECCS – Pas de Co-firing

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

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

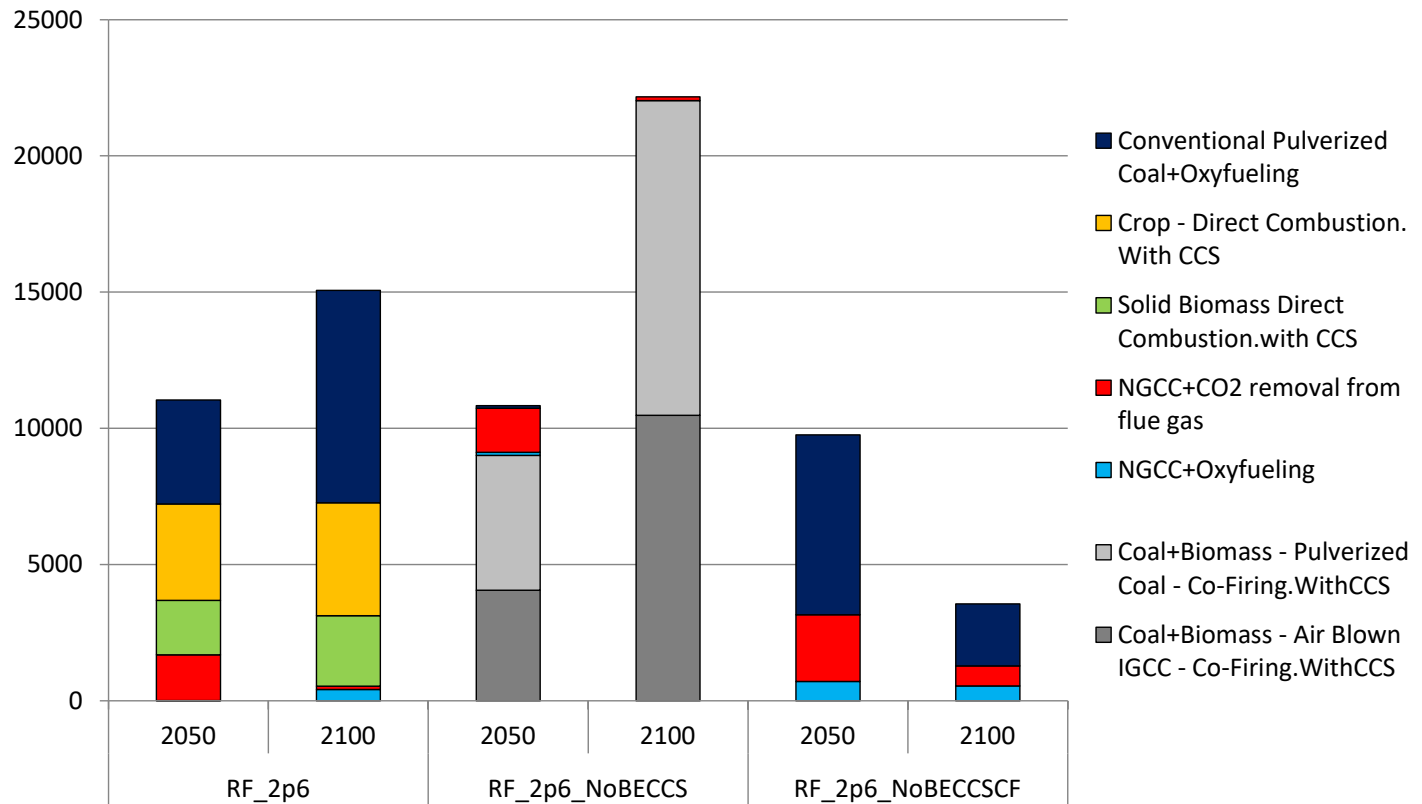
$$+ \sum_{i \in EELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} varc$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com_s(t)$$

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

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

Production électrique des centrales équipées de capture de carbone (TWh)





Sensibilité régionale

Mix électrique (TWh)

Pas de BECCS – Pas de Co-firing

Monde

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

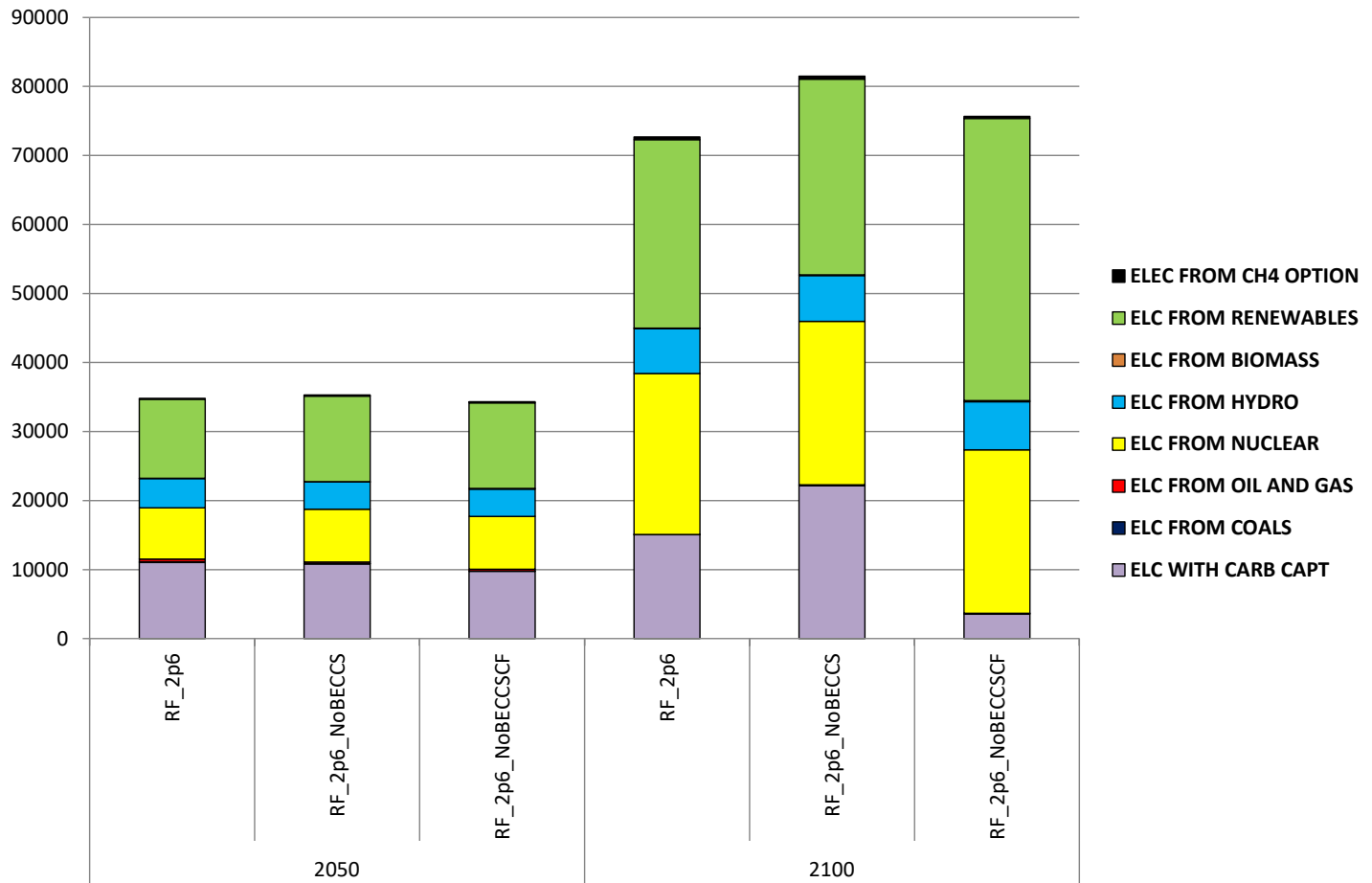
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

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

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



Mix électrique (TWh)

Pas de BECCS – Pas de Co-firing

Pays industrialisés

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

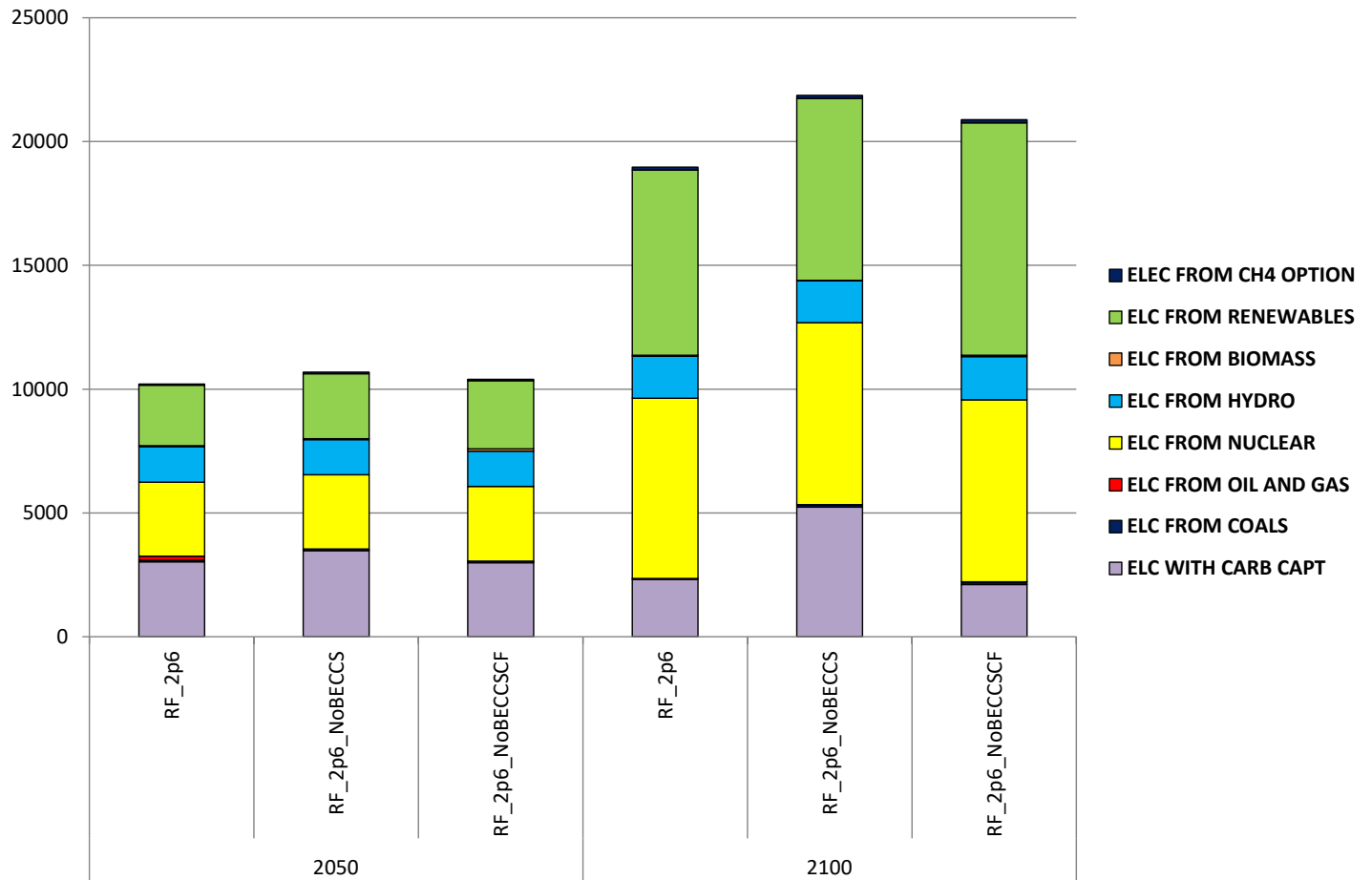
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

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

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



Mix électrique (TWh)

Pas de BECCS – Pas de Co-firing

Pays à croissance rapide

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

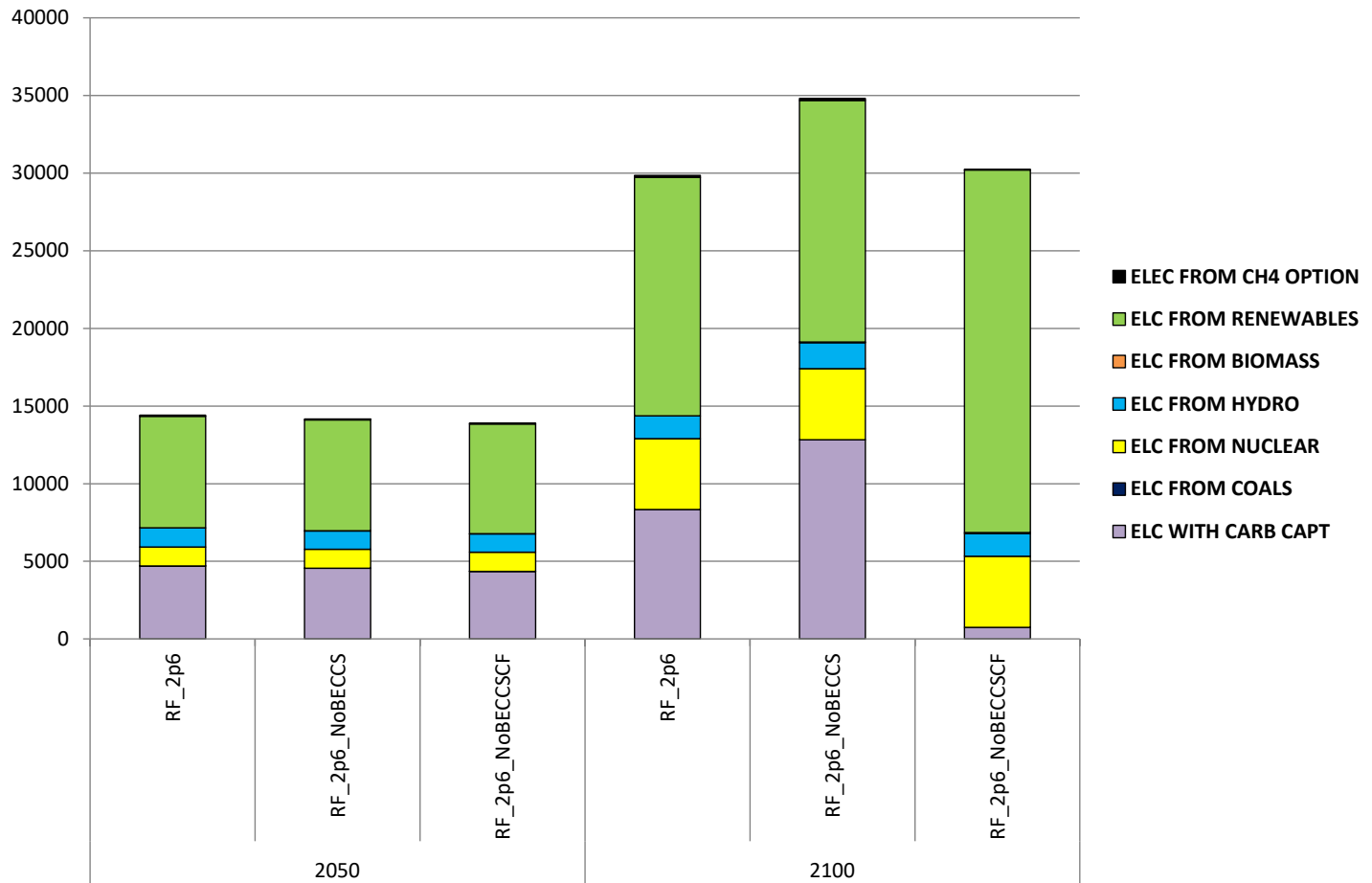
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

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

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



Mix électrique (TWh)

Pas de BECCS – Pas de Co-firing

Pays en développement

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

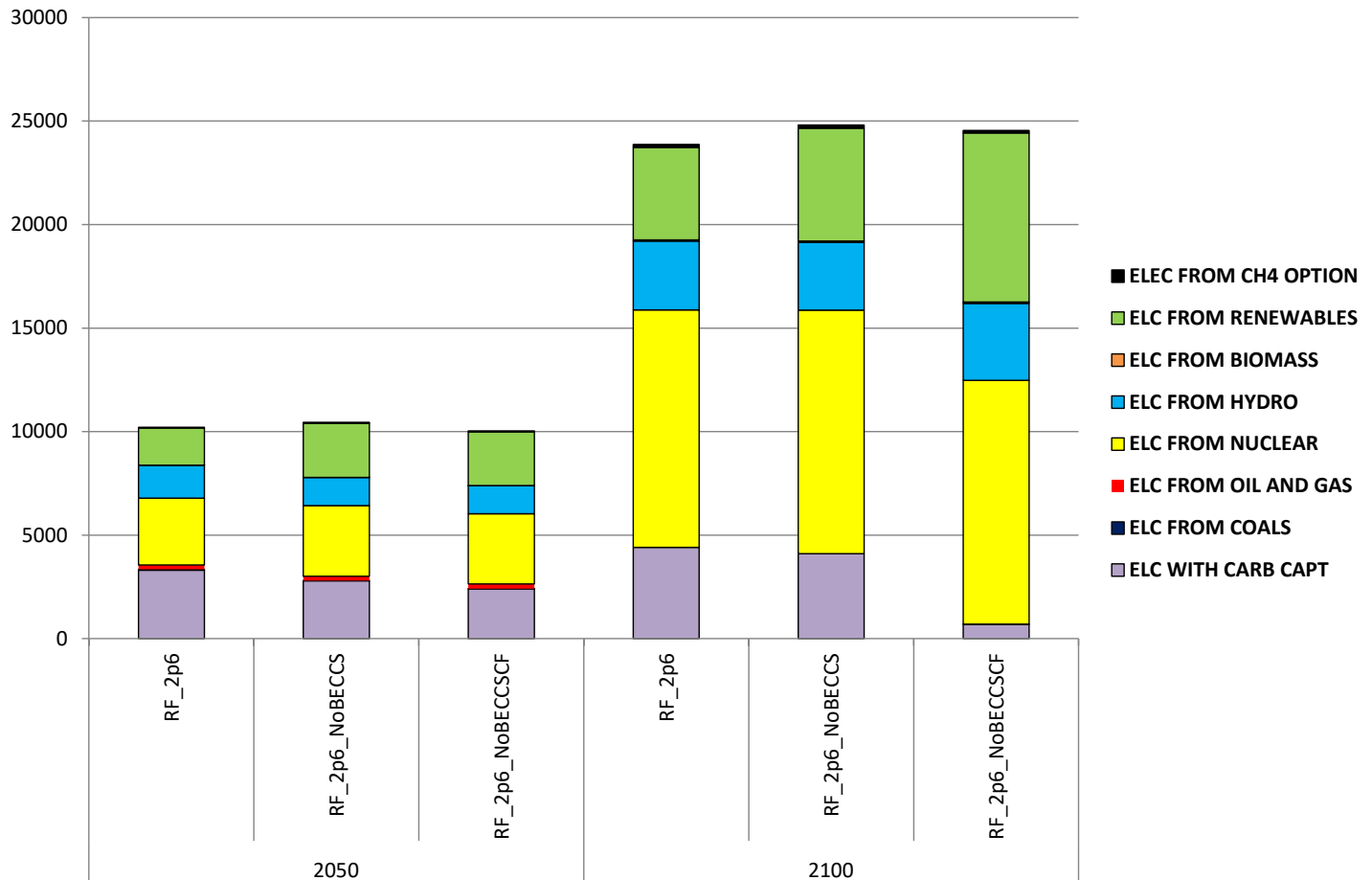
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

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

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





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

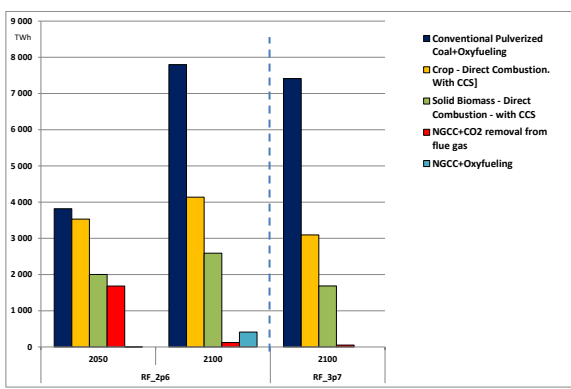
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

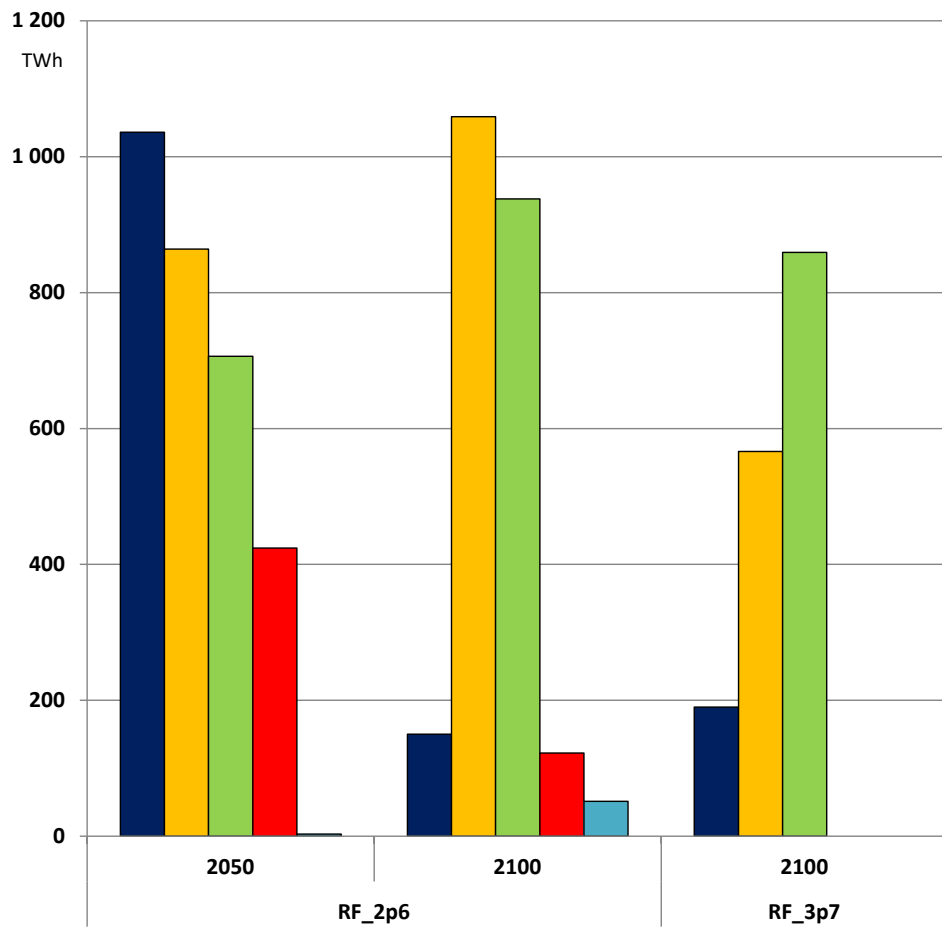
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

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



Production d'électricité des centrales équipées de capture de CO₂ (TWh)

Pays industrialisés



- Conventional Pulverized Coal+Oxyfueling
- Crop - Direct Combustion. With CCS
- Solid Biomass - Direct Combustion - with CCS
- NGCC+CO2 removal from flue gas
- NGCC+Oxyfueling



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

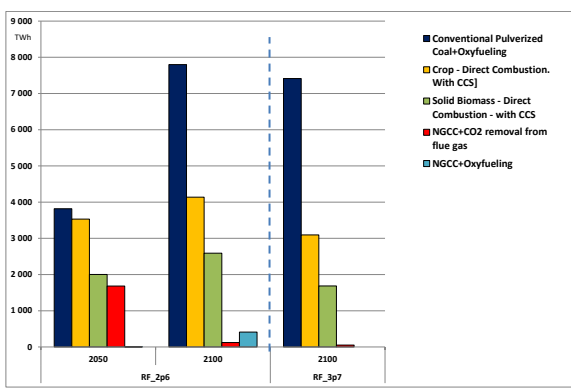
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

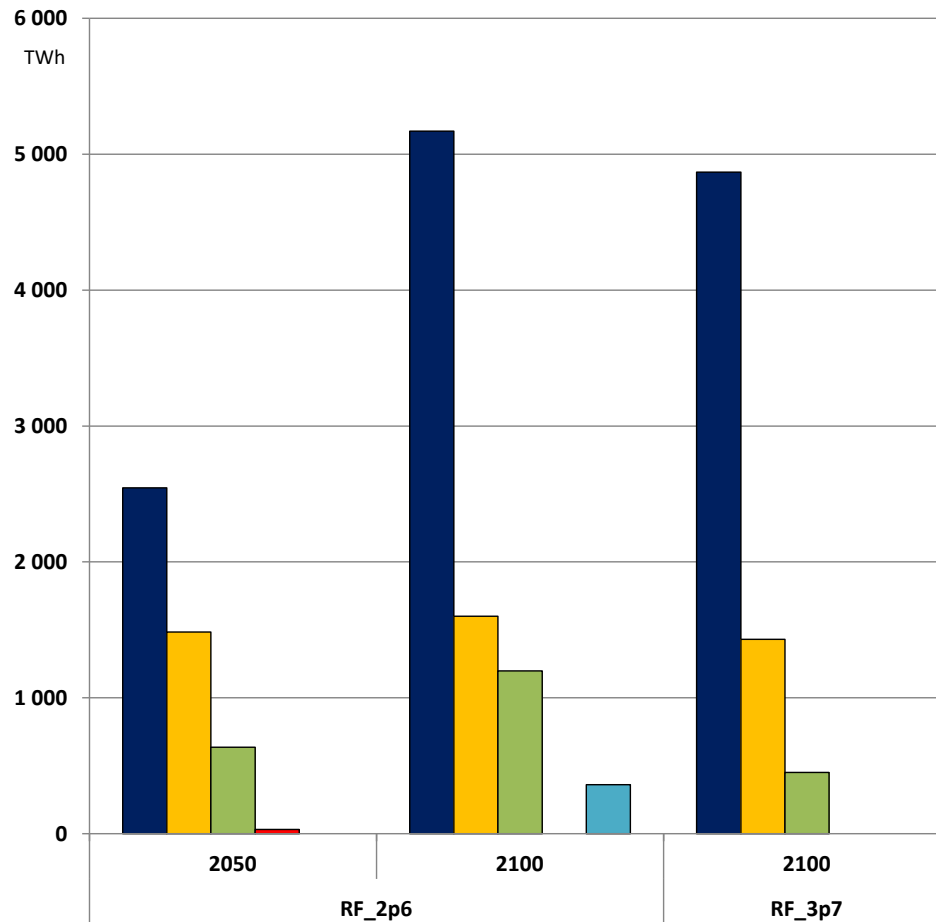
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

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



Production d'électricité des centrales équipées de capture de CO₂ (TWh)

Pays à croissance rapide

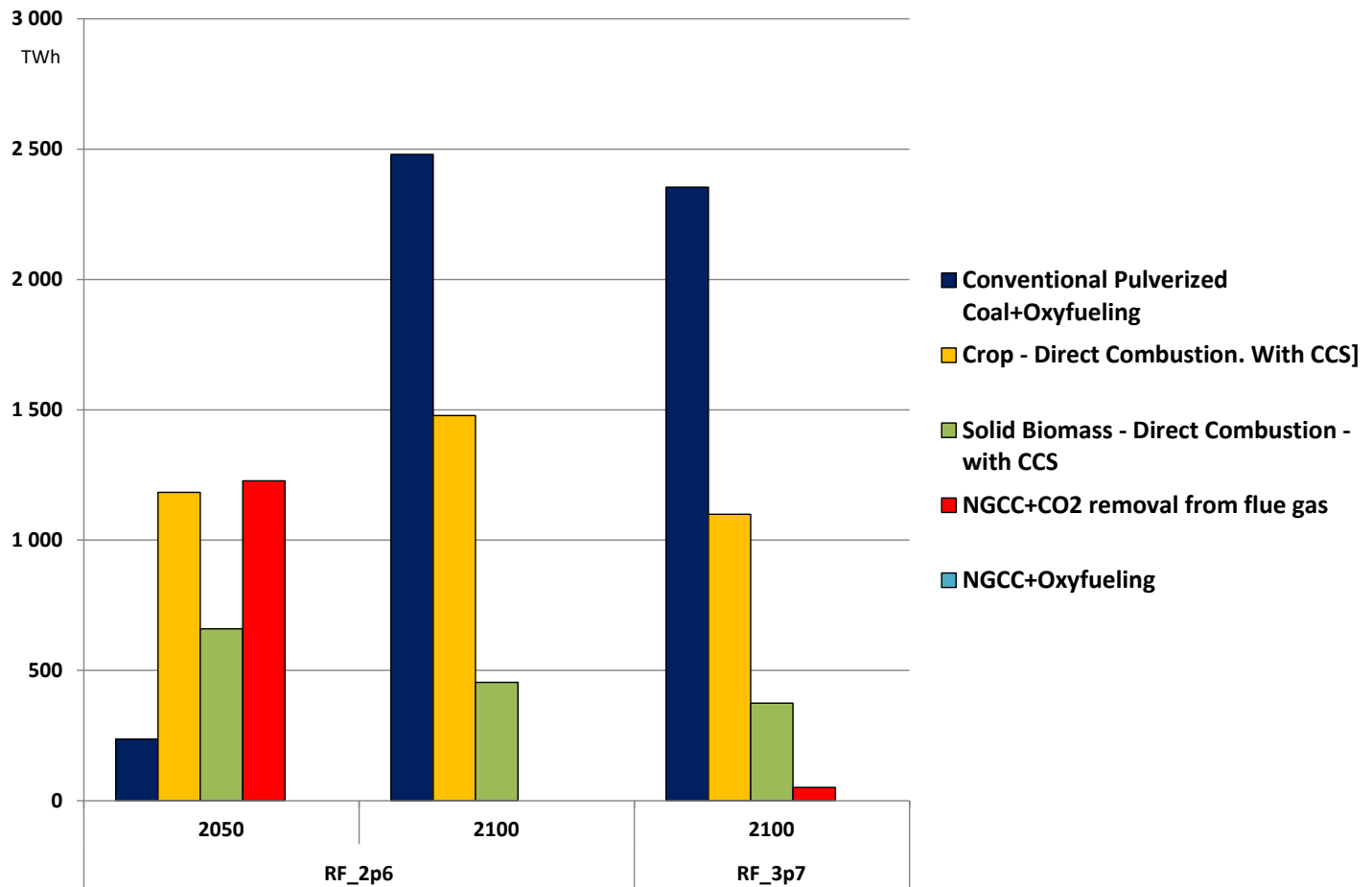
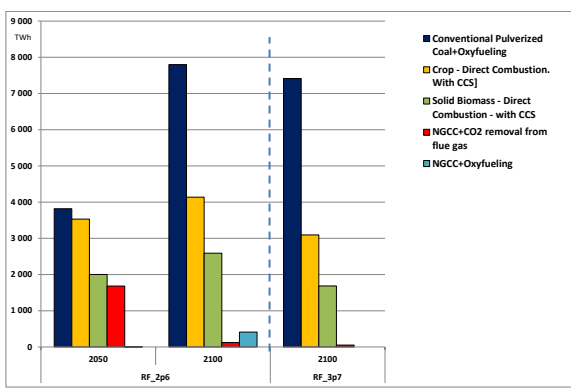


- Conventional Pulverized Coal+Oxyfueling
- Crop - Direct Combustion. With CCS
- Solid Biomass - Direct Combustion - with CCS
- NGCC+CO2 removal from flue gas
- NGCC+Oxyfueling



Production d'électricité des centrales équipées de capture de CO₂ (TWh)

Pays en développement





Conclusion

Contribution des technologies de CCS/BECCS à la réduction des émissions de CO₂ (*globalement et régionalement*)

- Objectifs de lutte contre le changement climatique
 - Force des objectifs (2,6 W/m²; 3,7 W/m²)
 - Objectifs régionaux (Pays développés avec les objectifs 2050)
- Développement à grande échelle des technologies de CCS
- Coût/bénéfice relatif des alternatives de réduction (renouvelables, choix technologiques)
- Choix politiques
 - Mécanismes d'incitation du CCS/BECCS
 - Arbitrage entre enjeu de changement climatique et objectifs sociétaux
- Futur à long terme des énergies fossiles (étroitement lié au développement du CCS)
- Centrales fossile/biomasse : une alternative croissante
- Une des limites: disponibilité des sites de stockage
 - Analyse de sensibilité sur le potentiel de séquestration



Merci pour votre attention !



Annexes

Système énergétique de référence

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

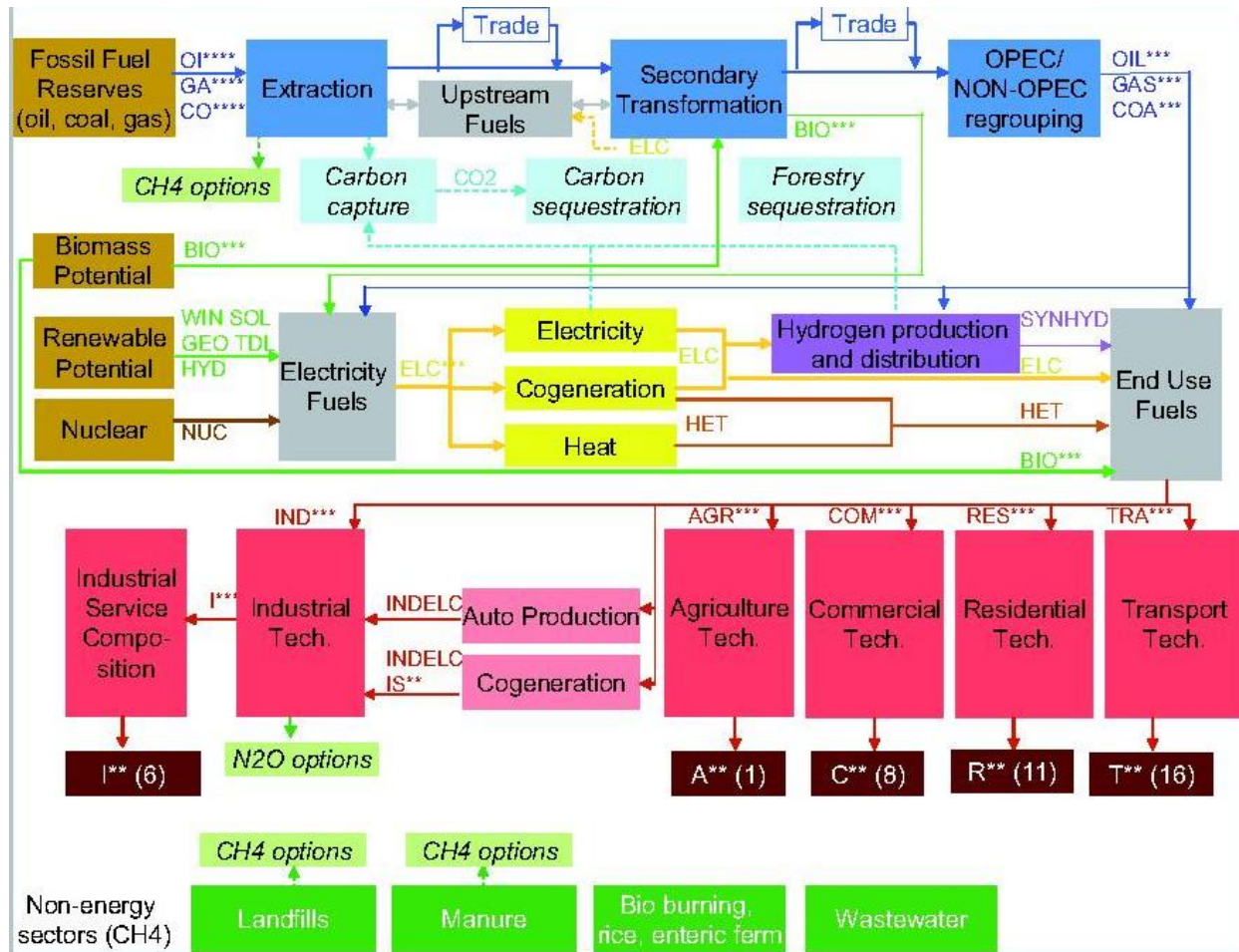
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

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

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

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

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



Potentiels de production de biomasse par région

2050/EJ	AFR	AUS	CAN	CHI	CSA	EEU	FSU	IND	JPN	MEA	MEX	ODA	SKO	USA	WEU	WORLD
Industrial wastes	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	8
Municipal wastes	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	75
Crops	13 700	1 317	2 060	11 219	9 200	1 424	2 000	8 241	774	1 064	1 752	8 612	599	6 000	3 542	72
Biogas	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	8
Liquid biomass	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	1
Solid biomass (1)	6 610	585	560	6 794	3 000	523	500	6 259	162	393	582	5 368	68	2 000	1 000	34
Solid biomass (2)	5 288	232	500	3 042	1 200	401	500	982	112	171	170	2 243	31	2 000	1 542	18
Solid biomass (3)	1 803	500	1 000	1 383	5 000	500	1 000	1 000	500	500	1 000	1 000	500	2 000	1 000	19
TOTAL BIOMASS	33 451	8 684	10 171	28 489	24 450	8 898	10 050	22 532	7 598	8 178	9 554	23 274	7 248	18 050	13 134	234

Potentiels de séquestration du carbone par région

Gt CO2	AFR	AUS	CAN	CHI	CSA	EEU	FSU	IND	JPN	MEA	MEX	ODA	SKO	USA	WEU	WORLD
Enhanced Oil Recovery	3	-	3	1	8	2	15	-	-	38	0	1	-	8	0	77
Depleted oil fields (onshore)	3	-	3	1	8	2	23	-	-	56	4	8	-	8	0	113
Depleted gas fields (onshore)	11	1	10	-	23	-	168	-	-	150	8	23	-	8	11	411
Depleted oil fields (offshore)	2	1	1	0	2	-	-	-	-	8	2	1	-	8	3	26
Depleted gas fields (offshore)	4	6	5	-	-	-	-	-	-	38	8	15	-	8	23	105
Enhanced Coalbed Methane recovery <1000 m	4	15	8	8	-	1	13	4	-	-	-	12	-	45	6	115
Enhanced Coalbed Meth recov >1000 m	4	15	8	8	-	1	13	4	-	-	-	12	-	45	6	115
Deep saline aquifers	1 000	500	667	500	1000	250	1 000	500	5	500	250	1 000	10	1 000	250	8 432
Deep ocean	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL BIOMASS	1 029	538	702	518	1 039	256	1 231	508	5	789	271	1 071	10	1 128	300	9 392

Mix électrique mondial et régional

Scénario RF_2p6

Pas de BECCS – Pas de Co-firing

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

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

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

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

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

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

Monde			
2050	RF_2p6	RF_2p6_NoBECCS	RF_2p6_NoBECCSCF
ELC FROM COALS	0,29	0,10	0,09
ELC FROM NUCLEAR	21	22	22
ELC FROM HYDRO	12	11	12
ELC FROM RENEWABLES	33	35	36
ELC WITH CARB CAPT	32	31	28
2100	RF_2p6	RF_2p6_NoBECCS	RF_2p6_NoBECCSCF
ELC FROM COALS	0,04	0,12	0,15
ELC FROM NUCLEAR	32	29	31
ELC FROM HYDRO	9	8	9
ELC FROM RENEWABLES	38	35	54
ELC WITH CARB CAPT	21	27	5

Pays industrialisé			
2050	RF_2p6	RF_2p6_NoBECCS	RF_2p6_NoBECCSCF
ELC FROM COALS	0,59	0,22	0,22
ELC FROM NUCLEAR	29	28	29
ELC FROM HYDRO	14	13	14
ELC FROM RENEWABLES	24	25	26
ELC WITH CARB CAPT	30	33	29
2100	RF_2p6	RF_2p6_NoBECCS	RF_2p6_NoBECCSCF
ELC FROM COALS	0,14	0,45	0,45
ELC FROM NUCLEAR	38	34	35
ELC FROM HYDRO	9	8	8
ELC FROM RENEWABLES	39	34	45
ELC WITH CARB CAPT	12	24	10

Pays à croissance rapide			
2050	RF_2p6	RF_2p6_NoBECCS	RF_2p6_NoBECCSCF
ELC FROM COALS	0,002	0,002	0,002
ELC FROM NUCLEAR	9	9	9
ELC FROM HYDRO	8	8	8
ELC FROM RENEWABLES	50	50	51
ELC WITH CARB CAPT	33	32	31
2100	RF_2p6	RF_2p6_NoBECCS	RF_2p6_NoBECCSCF
ELC FROM COALS	0	0	0
ELC FROM NUCLEAR	15	13	15
ELC FROM HYDRO	5	5	5
ELC FROM RENEWABLES	51	45	77
ELC WITH CARB CAPT	28	37	2

Pays en développement			
2050	RF_2p6	RF_2p6_NoBECCS	RF_2p6_NoBECCSCF
ELC FROM COALS	0,41	0,12	0,09
ELC FROM NUCLEAR	32	33	34
ELC FROM HYDRO	16	13	14
ELC FROM RENEWABLES	18	25	26
ELC WITH CARB CAPT	32	27	24
2100	RF_2p6	RF_2p6_NoBECCS	RF_2p6_NoBECCSCF
ELC FROM COALS	0	0	0,08
ELC FROM NUCLEAR	48	47	48
ELC FROM HYDRO	14	13	15
ELC FROM RENEWABLES	19	22	33
ELC WITH CARB CAPT	18	17	3