
L'ÉMERGENCE DES TECHNIQUES DE CAPTAGE, TRANSPORT ET STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CARBONE DANS LE SECTEUR ÉLECTRIQUE

Soutenance – Marie Renner

Thèse CIFRE sous la direction de Pierre-André Juvet

Encadrants EDF R&D : Benoit Peluchon et Florent Le Strat

PROBLÉMATIQUE

- ▶ L'ensemble des scénarii climatiques ambitieux (IPCC, 2014; AIE, 2014) recourt au CSC.

- ▶ Mais rôle du CSC très variable.

- ▶ Contraste avec le niveau de déploiement commercial actuel du CSC.

PROBLÉMATIQUE

La problématique porte sur les conditions technico-économiques et sociales nécessaires à l'émergence du CSC dans le secteur électrique, en adéquation avec les projections de long terme des scénarii climatiques ambitieux.

- ▶ I. Quel est prix du CO₂ nécessaire à l'émergence du CSC dans le secteur électrique ? Comment minimiser le coût de son déploiement commercial ?

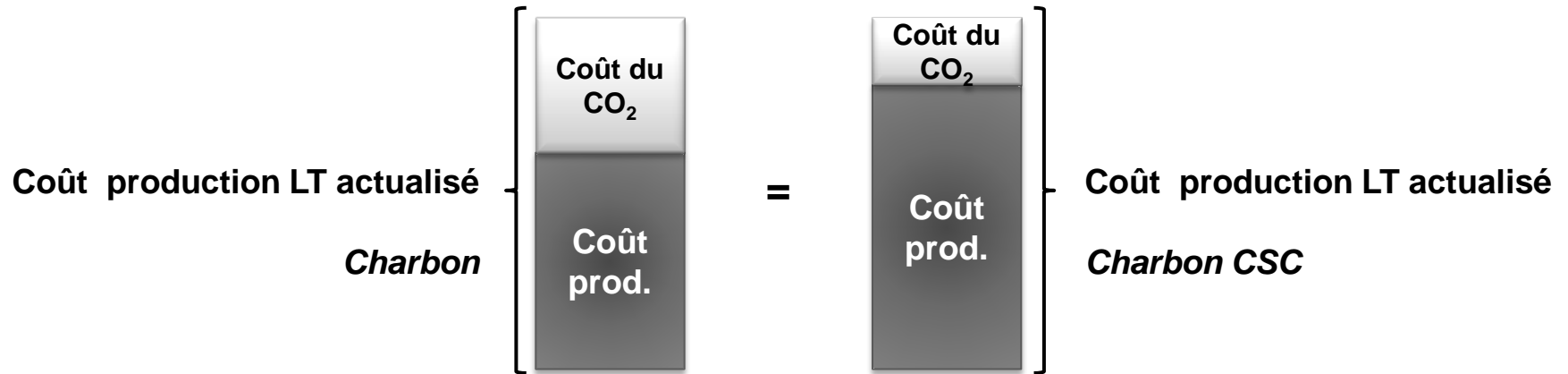
- ▶ II. Quand le CSC est-il socialement acceptable ?

- ▶ III. Comment décider de la part du CSC dans le mix électrique de 2050 lorsqu'il y a conflit d'experts ?

I. ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE : PRIX DU CO₂ POUR L'ÉMERGENCE DU CSC DANS LE SECTEUR ÉLECTRIQUE

◆ Méthodologie :

- **Comparaison objective** des données publiques.
- **Distinction des prix CO₂ de switch intra et inter-technique** [absents de la littérature].

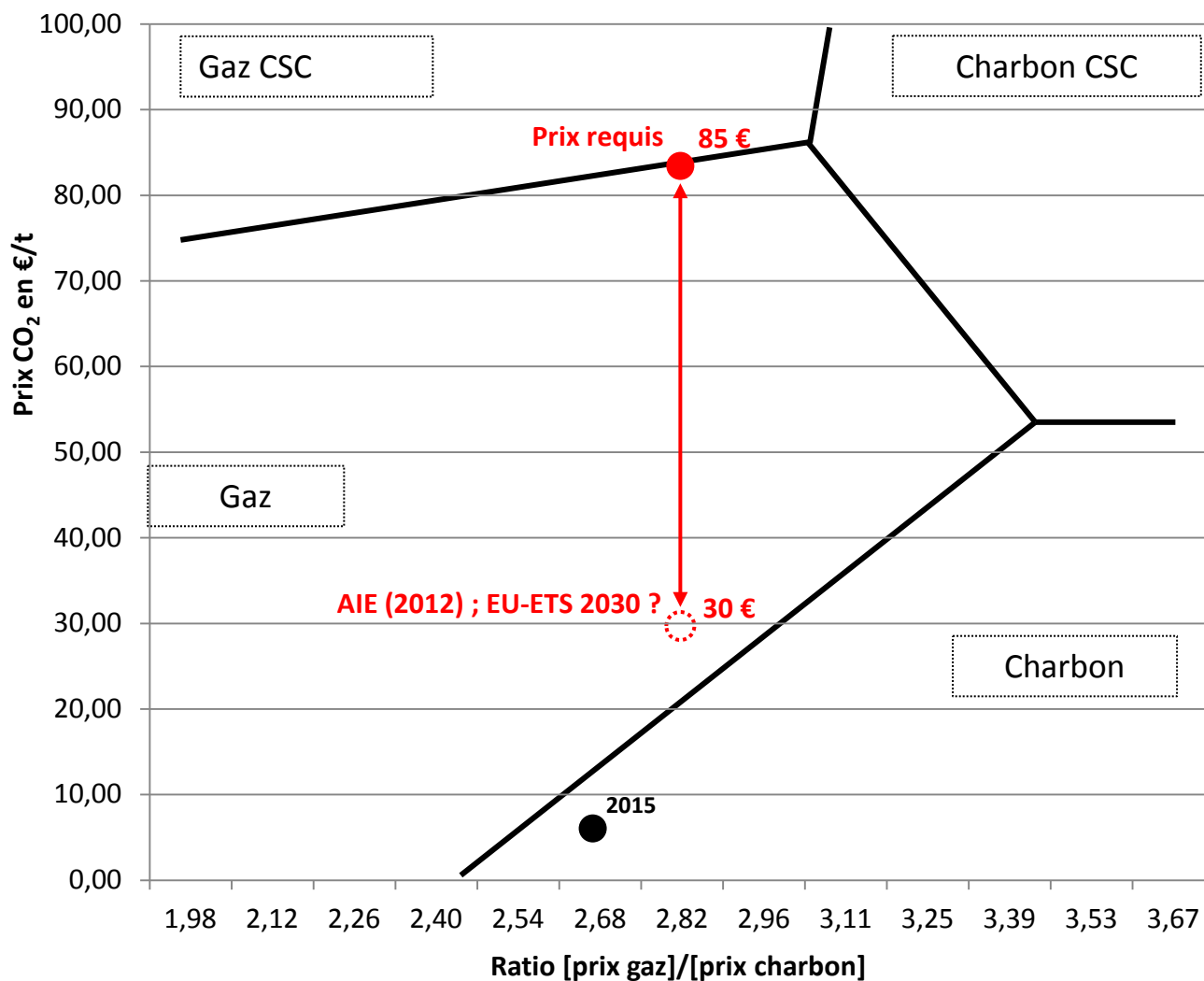


◆ Principaux résultats (Union Européenne – 2015-2020) :

- Contrairement à ce que dit la littérature, à **65 €/tCO₂**, le **charbon CSC** n'est **pas compétitif**.
- Il faut un prix de **115 €/tCO₂** pour que les centrales **CSC** deviennent **compétitives**.
- Le **gaz CSC** serat **plus compétitif** que le charbon **CSC**.

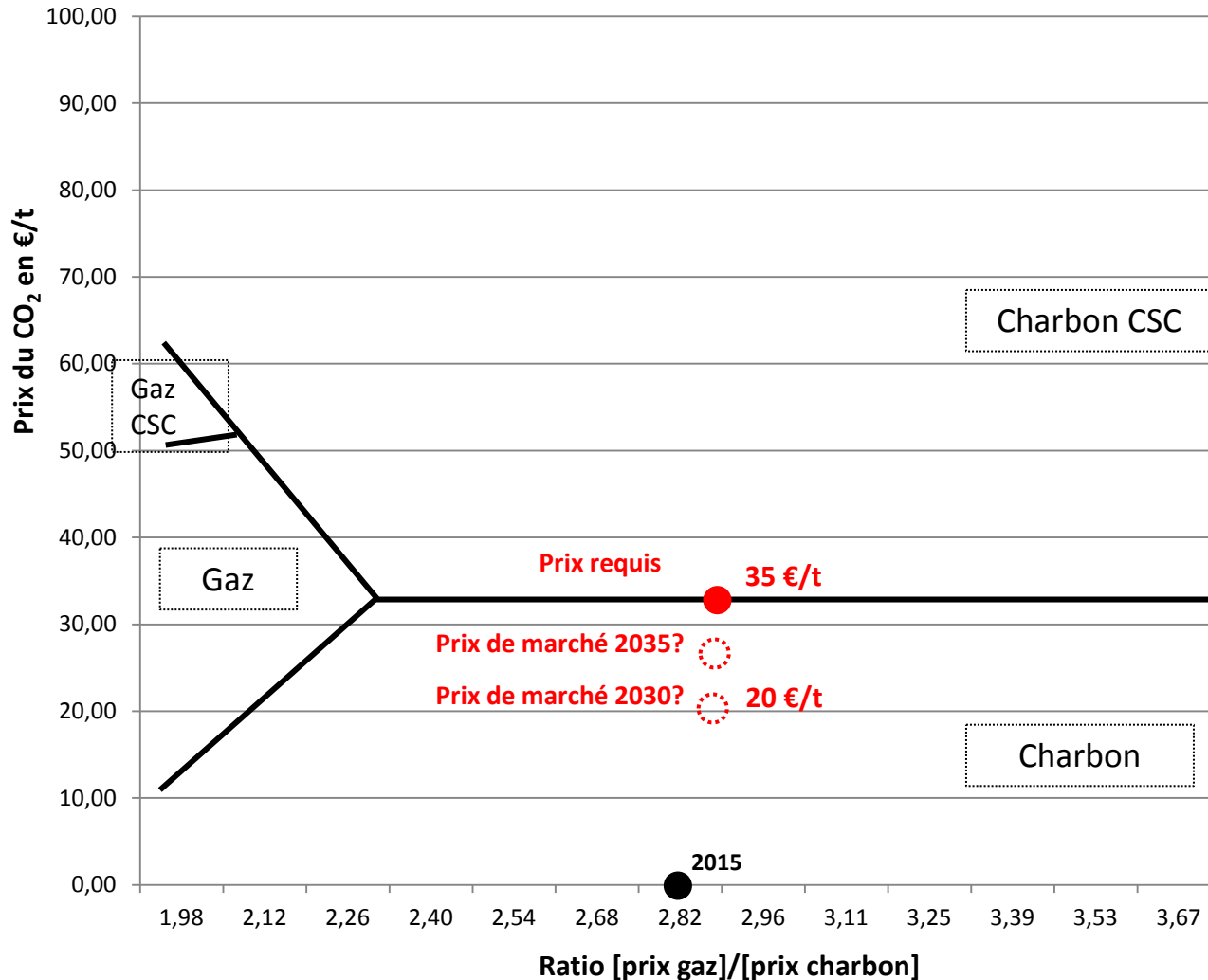
NÉCESSITÉ DE SOUTENIR LE CSC DANS L'UE EN 2030

Aires de rentabilité des types de centrale en fonction du ratio des prix de combustibles et du prix du CO₂ - UE 2030



CONTRAIREMENT À LA CHINE : CSC QUASI RENTABLE EN 2030

Aires de rentabilité des types de centrale en fonction du ratio des prix de combustibles et du prix du CO₂ - Chine 2030



I. MINIMISER LE COÛT DU DÉPLOIEMENT DU CSC

- Large écart entre le prix CO₂ requis pour l'émergence du CSC et le prix CO₂ de marché en UE ≠ Chine.

Tirer parti de la différenciation géographique des coûts pour réduire le coût du soutien au CSC.

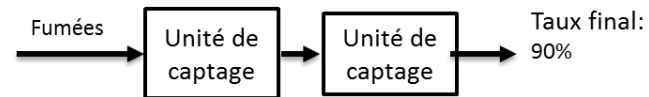
- Une autre possibilité : le captage partiel.**

Option 1 : Variation du taux de captage

Phase 1 : 100% des fumées traitées avec un taux de captage inférieur

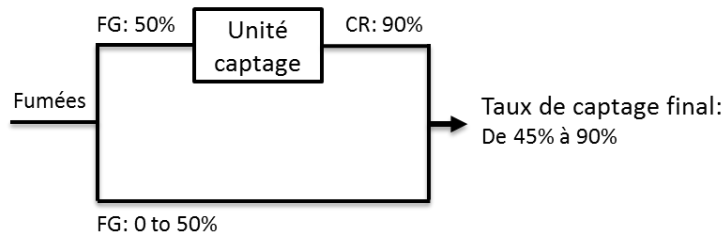


Phase 2 : 100% des fumées avec un taux de captage de 90%

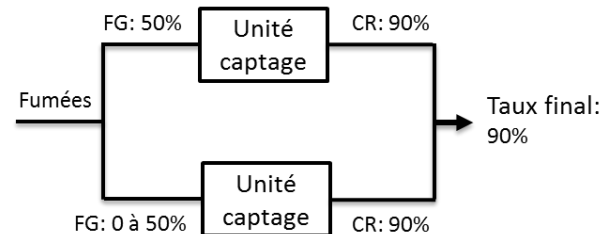


Option 2 : Variation du volume de fumées traitées

Phase 1 : 50% des fumées traitées à 90%



Phase 2 : 100% des fumées traitées à 90%



PROBLÉMATIQUE

La problématique porte sur les conditions technico-économiques et sociales nécessaires à l'émergence du CSC dans le secteur électrique, en adéquation avec les projections de long terme des scénarii climatiques ambitieux?

▶ I. Quel est prix du CO₂ nécessaire à l'émergence du CSC dans le secteur électrique ? Comment minimiser le coût de son déploiement commercial ?

▶ II. Quand le CSC est-il socialement acceptable ?

▶ III. Comment décider de la part du CSC dans le mix électrique de 2050 lorsqu'il y a conflit d'experts ?

II. ACCEPTABILITÉ SOCIALE DU CSC

◆ Constat :

- Acceptabilité sociale devenue cruciale pour développement ENR+CSC (IPCC, 2014).
- Absence de modèles combinant déploiement optimal du CSC et acceptabilité sociale.

◆ Méthodologie :

- Classiquement, approche dichotomique (Moslener et Requate, 2007).
- **Approche globale : 3^{ème} source de désutilité due à la pollution simultanée atmosphère/sol** (Crettez et Jouvét, 2010).
- **Développement d'un modèle déterminant simultanément :**
 - Le niveau optimal de production d'électricité,
 - L'allocation optimale du CO₂ entre l'atmosphère et le sous-sol.

$$U(E, Z) = F(E) - qE - \phi(Z) - \underbrace{\theta_1 A(E, Z)}_{\text{CO}_2 \text{ atmosphère}} - \underbrace{\theta_2 S(Z)}_{\text{CO}_2 \text{ sous-sol}} - \underbrace{G(A(E, Z), S(Z))}_{\text{Effet croisé}}$$

En distinguant deux cas :

- Pays isolé.
 - Deux pays, un avec CSC, l'autre sans.
-
- Spécification du modèle et simulations numériques.

II. ACCEPTABILITÉ SOCIALE DU CSC

◆ Principaux résultats :

- Pays isolé : Configurations de préférences sociales pour lesquelles le CSC est socialement optimal.
- Deux pays, un avec CSC, l'autre sans : jeu non coopératif.
Permet d'évaluer les transferts à réaliser du pays sans CSC vers le pays CSC pour l'inciter à faire du CSC.
- Quand utilisation du CSC et qu'on taxe sur combustibles fossiles, il est socialement optimal de subventionner le stockage de CO₂ dans le sous-sol.

PROBLÉMATIQUE

La problématique porte sur les conditions technico-économiques et sociales nécessaires à l'émergence du CSC dans le secteur électrique, en adéquation avec les projections de long terme des scénarii climatiques ambitieux?

- ▶ I. Quel est prix du CO₂ nécessaire à l'émergence du CSC dans le secteur électrique ? Comment minimiser le coût de son déploiement commercial ?

- ▶ II. Quand le CSC est-il socialement acceptable ?

- ▶ III. Comment décider de la part du CSC dans le mix électrique de 2050 lorsqu'il y a conflit d'experts ?

III. CONFLIT D'EXPERTS ET INVESTISSEMENT CSC

► Problématique :

- Comment le décideur public fait-il pour déterminer son investissement dans le CSC quand conflit entre experts ?

► Méthodologie :

- Ambiguïté : situation d'incertitude radicale (Knight, 1921).
- Pour donner un critère de décision au décideur confronté à un conflit d'experts, on adapte le modèle développé par KMM (2005) :
 - Le décideur donne une distribution subjective (poids) à l'ensemble des distributions de probabilité fournies par les experts.
 - Décideur averse à l'ambiguïté : préfère des décisions dont les conséquences ont des probabilités connues.
- Simulations numériques ; Roadmap 2050 de l'UE.

III. CONFLIT D'EXPERTS ET INVESTISSEMENT CSC

► Principaux résultats :

Pour un niveau donné d'aversion à l'ambiguïté :

- Effets de l'ambiguïté sur l'investissement dans le CSC dépendent de la forme de la distribution de probabilité des scénarii $G(., \theta)$.
 - $G(., \theta)$ est linéaire par rapport à θ ; si dans le risque, investissement CSC relativement élevé (faible), avec ambiguïté diminution (augmentation) de l'investissement CSC.
 - $G(., \theta)$ est convexe par rapport à θ ; si dans le risque, investissement CSC relativement faible, avec ambiguïté accroissement de l'investissement CSC. Sinon effets indéterminés.
 - $G(., \theta)$ est concave par rapport à θ : si dans le risque, investissement CSC relativement élevé, avec ambiguïté diminution de l'investissement CSC. Sinon effets indéterminés.
- Simulations numériques ; le conflit d'expert est un frein à l'investissement CSC.

Pour un niveau donné d'ambiguïté :

- Si l'aversion à l'ambiguïté du décideur augmente, l'investissement dans le CSC ne diminue pas forcément.
 - Effets d'une variation de l'ambiguïté \neq des effets d'une variation de l'aversion au risque.

CONCLUSION

► Conditions d'émergence du CSC :

- Prix CO₂ de switch intra- et inter-techniques.
- Configurations de préférences sociales.
- Outil d'aide à la décision pour le décideur public face à un conflit d'experts.

► Du CSC au CSVC.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

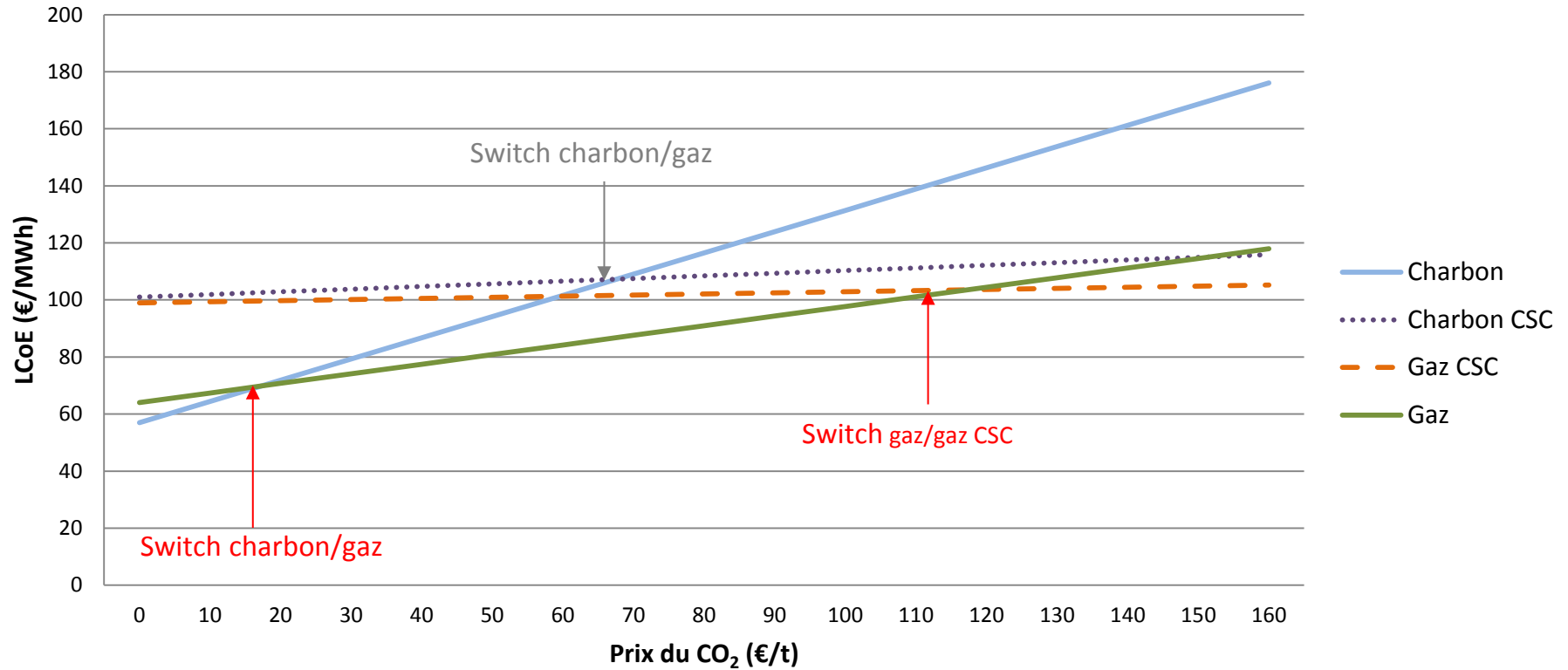
- ▶ **Thèse CIFRE** (2 mai 2012) : EDF R&D, EconomiX (Paris Ouest Nanterre La Défense) et la Chaire Economie du Climat
Directeur de thèse : Pierre-André Jouvét
Encadrants EDF R&D : Benoit Peluchon & Florent Le Strat

- ▶ **Publications dans des revues à comités de lecture** :
 - M.Renner. Carbon Prices and CCS Investment: a Comparative Study between the European Union and China. *Energy Policy* (75), pp327-340, 2014.
 - P.-A.Jouvét, M.Renner. Social Acceptance and Optimal Pollution: CCS or Tax? *Environmental Modeling & Assessment*, 2014.

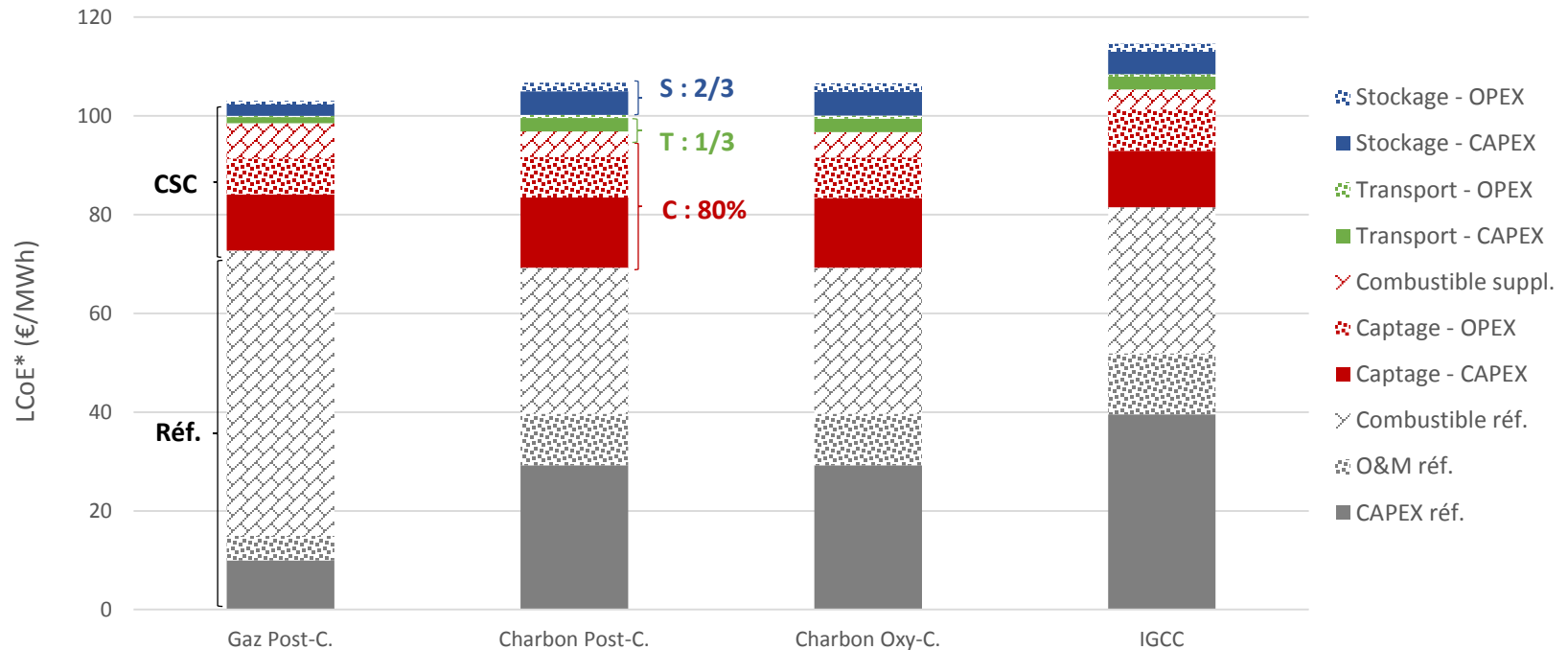
- ▶ **Soumission dans des revues à comités de lecture** :
 - J.Etner, M.Renner, Optimal Electricity Mix and CCS Investment under Ambiguity, *The Energy Journal*, 2015.

ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE : PRIX DU CO₂ POUR L'ÉMERGENCE DU CSC DANS LE SECTEUR ÉLECTRIQUE ?

► Prix CO₂ de switch intra et inter-techniques :



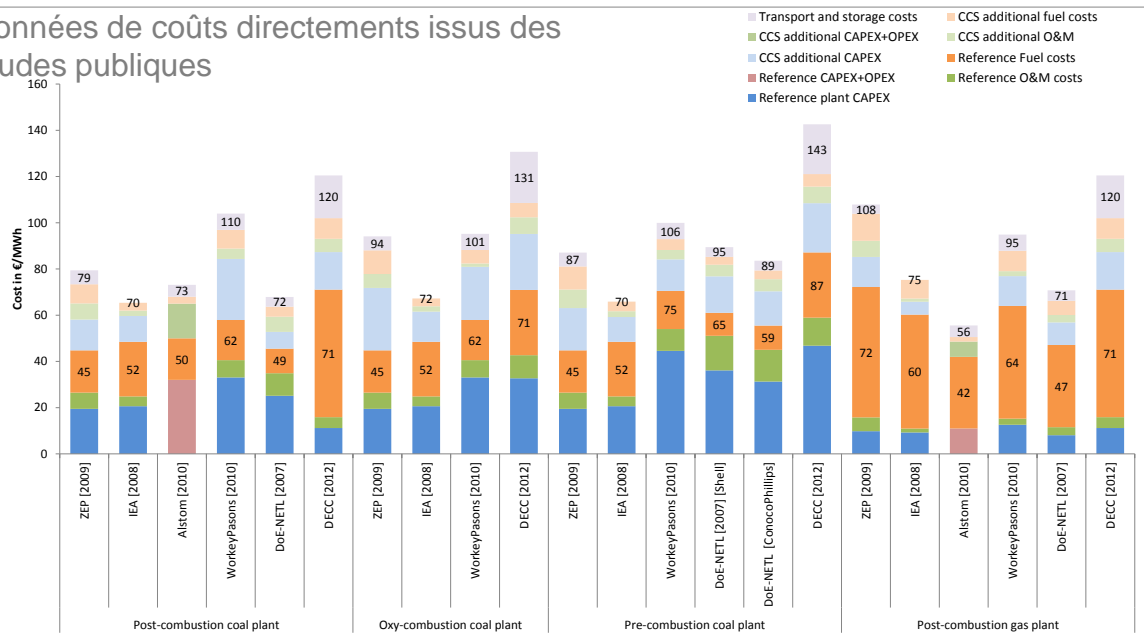
SURCOÛTS DU CSC



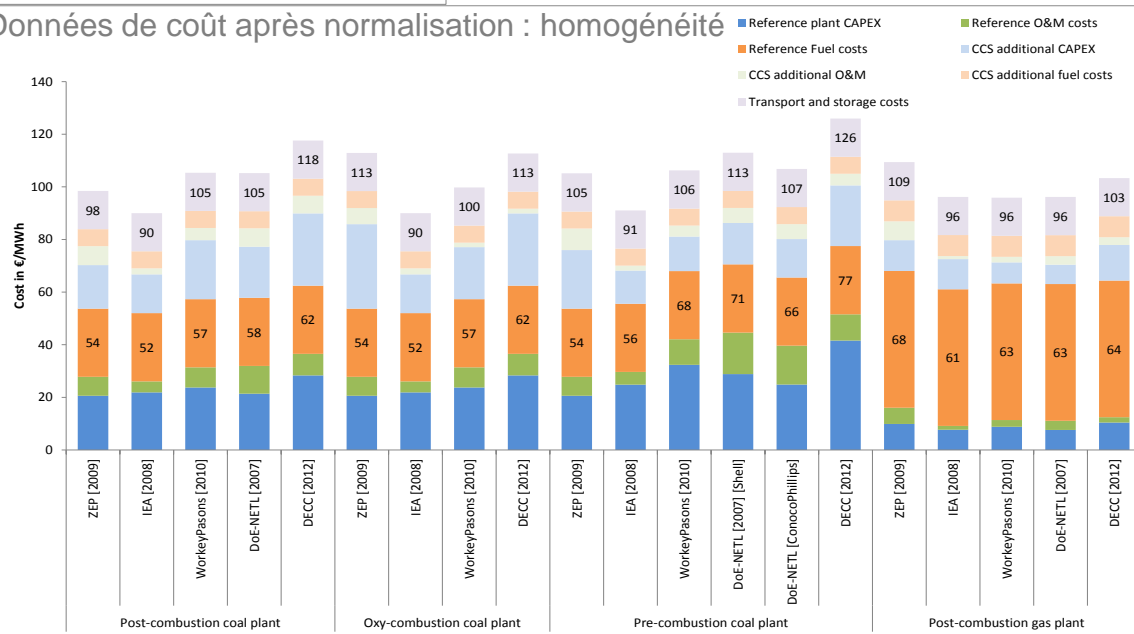
Coûts du CSC en 2030. Source : DECC, 2013.

DONNÉES DE COÛTS AVANT ET APRÈS NORMALISATION

Données de coûts directement issus des études publiques



Données de coût après normalisation : homogénéité



PARAMÈTRES TECHNICO-ÉCONOMIQUES INCHANGÉS

PARAMÈTRES TECHNICO-ÉCONOMIQUES INCHANGÉS	UNITÉ	VALEURS EUROPÉENNES [MIN; MAX]	VALEURS CHINOISES [MIN; MAX]
OVERNIGHT COST	€ ₂₀₁₁ /kW		
Charbon supercritique		[1283; 1765] [ZEP ; DECC]	[549; 851] [IEA ; Wu et al.]
Charbon IGCC		[1546; 2588] [DOE ; DECC]	1961 [Wu et al.]
Charbon CSC			
<i>Post-combustion</i>		[2116; 3225] [IEA ; DECC]	[1023; 1370] [IEA ; Wu et al.]
<i>Oxy-combustion</i>		[2513; 3229] [WP ; DECC]	
<i>Pre-combustion</i>		[2475; 3734] [ZEP ; DECC]	2942 [Wu et al.]
Cycle combiné gaz		[473; 647] [DoE ; DECC]	407 [IEA]
Cycle combiné CSC		[854; 1589] [IEA ; DECC]	733 [IEA]
COÛTS D'EXPLOITATION ET MAINTENANCE	€ ₂₀₁₁ /MWh		
Charbon supercritique		[4; 12] [IEA; Alstom]	[1.6; 2.8] [IEA ; NZEC]
Charbon IGCC		[5; 22] [IEA; DOE NETL]	9 [Wu et al.]
Charbon CSC		[6; 22] [IEA; DOE NETL]	[3.3; 17.7] [IEA ; NZEC]
Cycle combiné gaz		[1; 6] [IEA; ZEP]	1.3 [IEA]
Cycle combiné CSC		[3; 13] [IEA; ZEP]	2.3 [IEA]
PUISSANCE NETTE	MW	[400; 800]	[600; 800]

NORMALISATION DES MÉTHODES DE CALCUL

MÉTHODE DE CALCUL	Appliquée aux études dès le départ	Appliquée au moment de la normalisation
Facteur d'émission de la centrale	X	X
Annuité constante d'investissement	X	X
LCoE	X	X
Prix CO ₂ de switch	X	X
Coût du CO ₂		X
Coût des combustibles		X

PARAMÈTRES TECHNICO-ÉCONOMIQUES STANDARDISÉS

PARAMÈTRES TECHNICO-ÉCONOMIQUES STANDARDISÉS	Unité	Valeurs européennes	Valeurs chinoises
Monnaie		€ ₂₀₁₁	
Facteur de charge	%	85 [7 446 hours/yr] = BASE-LOAD	
Taux de captage	%	90	
Rendement (PCI)			
Charbon	%	45% (2015)	
Charbon CSC	%	36% (2015)	
Gaz	%	60% (2015)	
Gaz CSC	%	52% (2015)	
Durée de construction			
Charbon	Année	4	
Charbon CSC	Année	5	
Gaz	Année	2	
Gaz CSC	Année	3	
Durée de vie			
Coal plant	Année	40	
Gas plant	Année	25	
Prix des combustibles			
Black coal (Illinois 6)	\$ ₂₀₁₁ /GJ	2015: 4.34 (108.5 \$/t)	2015: 3.8 (95 \$/t)
Gaz naturel	\$ ₂₀₁₁ /GJ	2015: 11.61 (11 \$/MBtu)	2015: 10.55 (10 \$/MBtu)
Prix du CO₂ price	€/t	0	
Owner's cost	Overnight cost %	15	
Taux d'actualisation [réel et après taxe]	%	8	
Coûts de transport	€ ₂₀₁₁ /MWh	Off-shore: 5.8	On-shore: 1.35 Off-shore: 4.35
Coûts de stockage	€ ₂₀₁₁ /MWh	Off-shore : 8.7	On-shore: 3.45 (charbon)/1.8 (gaz) Off-shore: 6.5

PARAMÈTRES TECHNICO-ÉCONOMIQUES STANDARDISÉS

	Coûts du capital et d'exploitation et maintenance		
Région	Equipement	Matières premières/matériaux	Main d'oeuvre
Etats-Unis (USGC)	1	1	1
Europe (Zone Euro)	1.19	1.16	1.33
Chine	0.81	0.81	0.05

Source: WorleyParsons (2011).

HYPOTHÈSES DE PRIX DE COMBUSTIBLES 2030

	Scénario 1: Prix constants		Scénario 2: Prix issus de l'IEA (2012c)		
	<i>UE</i>	<i>Chine</i>	<i>UE</i>	<i>Chine – Prix Européens</i>	<i>Chine - Prix japonais</i>
Gaz naturel importé en 2030 (\$₂₀₁₁/MBtu)	11	10	12.2	12.2	14.7
Steam coal importé en 2030 (\$₂₀₁₁/t)	108.5	95	114	114	

ÉTUDES DE SENSIBILITÉ - LCoEs

LCoEs UE	BAU [cas réf.]	Taux d'actualisation: 4%	Taux d'actualisation: 12%	Prix charbon : +/-20%	Prix gaz : +/-20%	Semi-base
Charbon	60 €/MWh	-24%	25%	+/-9%	-	48%
Charbon CSC	106 €/MWh	-27%	29%	+/-7%	-	49%
Gaz	68 €/MWh	-6%	7%	-	+/-18%	16%
Gaz CSC	104 €/MWh	-7%	8%	-	+/-13%	22%

CHINESE LCoEs	BAU [cas réf.]	Taux d'actualisation: 4%	Taux d'actualisation: 12%	Prix charbon : +/-20%	Prix gaz : +/-20%	Semi-base
Charbon	40 €/MWh	-17%	16%	+/-12%	-	35%
Charbon CSC T&S onshore	63 €/MWh	-19%	18%	+/-10%	-	38%
Charbon CSC T&S offshore	70 €/MWh	-17%	16%	+/-10%	-	38%
Gaz	54 €/MWh	-4%	5%	-	+/-20%	12%
Gaz CSC T&S offshore	70 €/MWh	-6%	6%	-	+/-17%	16%
Gaz CSC T&S offshore	80 €/MWh	4%	6%	-	+/-18%	16%

ÉTUDES DE SENSIBILITÉ – PRIX CO₂ DE SWITCH 2015

UE - 2015		BAU [cas réf.]	Taux d'actu : 4%	Taux actu: 12%	Prix charb: -20%	Prix charb: +20%	Prix gaz: -20%	Prix gaz: +20%	Semi-base
Intra-technique	Charbon/ Charbon CSC	67	-22%	35%	-3%	3%	-	-	46%
	Gaz/ Gaz CSC	117	-9%	11%	-	-	-4%	4%	30%
Inter-technique	Charbon/ Gaz	18	104%	-100%	71%	-71%	-100%	142%	-100%
	Charbon/ Gaz CSC	60	11%	-17%	12%	-12%	-28%	28%	-15%
	Gaz/ Charbon CSC	153	-48%	68%	-18%	17%	-31%	-28%	100%

CHINE - 2015 ONSHORE		BAU [cas réf.]	Taux d'actu : 4%	Taux actu: 12%	Prix charb: -20%	Prix charb: +20%	Prix gaz: -20%	Prix gaz: +20%	Semi-base
Intra-technique	Charbon/ Charbon CSC	35	-23%	33%	-5%	5%	-	-	-34%
	Gaz/ Gaz CSC	56	-11%	12%	-	-	-9%	9%	38%
Inter-technique	Charbon/ Gaz	42	19%	-26%	27%	-27%	-56%	56%	-43%
	Charbon/ Gaz CSC	48	4%	-7%	14%	-14%	-32%	32%	-3%
	Gaz/ Charbon CSC	19	-178%	252%	-123%	123%	205%	-205%	394%

ÉTUDES DE SENSIBILITÉ – PRIX CO₂ DE SWITCH 2030

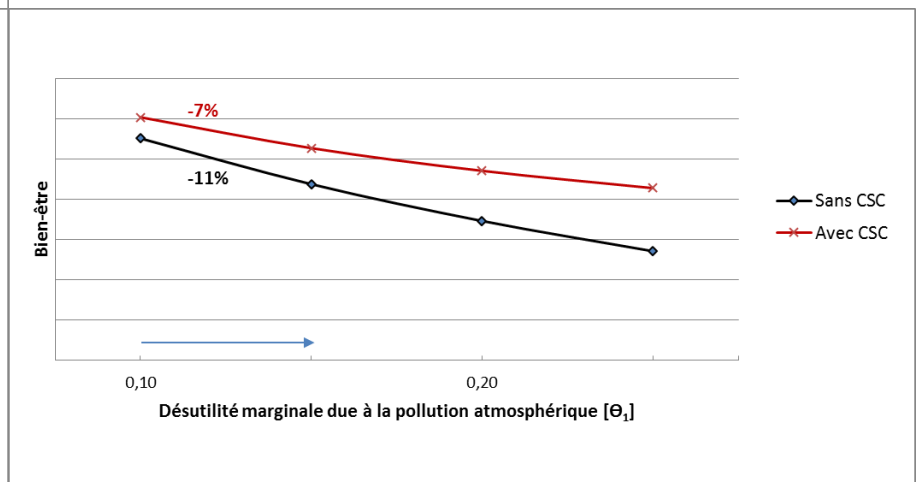
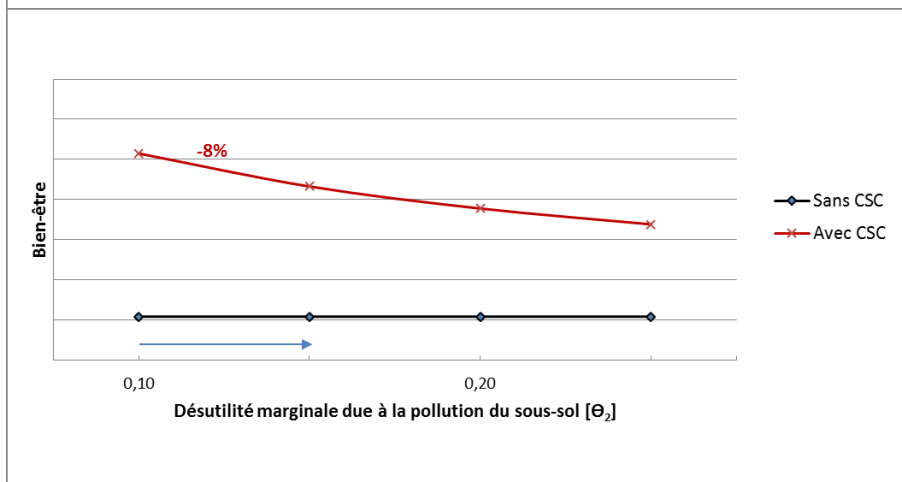
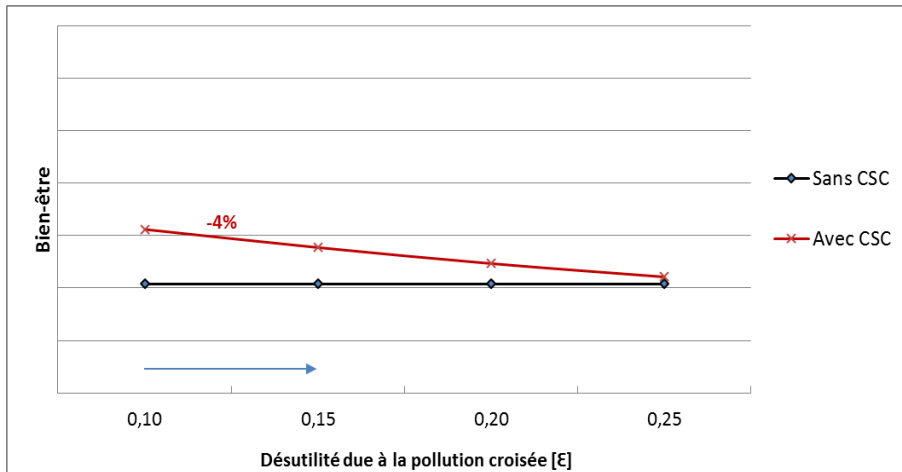
EU		2015	2030 - Scénario 1	2030 - Scénario 2	2030 – Scénario 2 semi-base
Intra-technique	Charbon/ Charbon CSC	77	63	65	109
	Gaz/ Gaz CSC	131	81	84	130
Inter-technique	Charbon/ Gaz	5	8	20	X
	Charbon/ Gaz CSC	58	40	48	32
	Gaz/ Charbon CSC	198.5	149	133	344

Chine		2015	2030 - Scénario 1	2030 - Scénario 2 Prix UE	2030 - Scénario 2 Prix Japonais	2030 – Sc.2 Prix UE semi-base
Intra-technique	Charbon/ Charbon CSC	50	31	33	33	48
	Gaz/ Gaz CSC	91	55	61	67	84
Inter-technique	Charbon/ Gaz	34	47	65	99	36
	Charbon/ Gaz CSC	58	51	69	84	58
	Gaz/ Charbon CSC	65	9	X	X	64

ACCEPTABILITÉ SOCIALE DU CSC

► Simulations numériques :

■ 1- Pays isolé :



ACCEPTABILITÉ SOCIALE DU CSC

► Simulations numériques :

- 2 – Deux pays : illustration de situation de free-riding

