



## Working Paper

Quels sont les enjeux concurrentiels associés à la  
décarbonation des sites industriels ?

Réflexions à partir du cas du captage et stockage du  
carbone dans l'industrie cimentière

Christophe Caron <sup>1</sup>, Jean-Pierre Ponsard <sup>2</sup>,

Juin 2026

**Contact** : Nom du contact – email – tel – etc (facultatif)

---

<sup>1</sup> SIRAH-Consulting Ex.

<sup>2</sup> CNRS-Ecole Polytechnique ; Chaire Energie et Prospérité.

## **La Chaire Energie et Prospérité**

La chaire Energie et Prospérité a été créée en 2015 pour éclairer les décisions des acteurs publics et privés dans le pilotage de la transition énergétique. Les travaux de recherche conduits s'attachent aux impacts de la transition énergétique sur les économies (croissance, emploi, dette), sur les secteurs d'activité (transport, construction, production d'énergie, finance), aux modes de financement associés ainsi qu'aux problématiques d'accès à l'énergie. Hébergée par la Fondation du Risque, la chaire bénéficie du soutien de l'ADEME, de la Caisse des Dépôts, d'Engie et du groupe Renault.

*Les opinions exprimées dans ce papier sont celles de son (ses) auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement celles de la Chaire Energie et Prospérité. Ce document est publié sous l'entière responsabilité de son (ses) auteur(s).*

Les Working paper de la Chaire Energie et Prospérité sont téléchargeables ici :

<http://www.chair-energy-prosperity.org/category/publications/>

## **Chair Energy and Prosperity**

The Energy and Prosperity Chair was created in 2015 to inform decisions of public and private actors in managing the energy transition. The Chair research deals with the impacts of energy transition on national economies (growth, employment, debt...), on specific sectors (transportation, construction, energy , finance), on acces to energy and with the associated financing issues. Hosted by the Fondation du Risque, the chair has the support of ADEME, the Caisse des Dépôts, Engie and the Groupe Renault.

*The opinions expressed in this paper are those of the author(s) and do not necessarily reflect the position of Chair Energy and Prosperity. It is therefore published under the sole responsibility of its author(s).*

Chair energy and Prosperity working paper can be downloaded here:

<http://www.chair-energy-prosperity.org/en/category/publications-2/>

# Quels sont les enjeux concurrentiels associés à la décarbonation des sites industriels ? Réflexions à partir du cas du captage et stockage du carbone dans l'industrie cimentière<sup>i</sup>

Christophe Caron (SIRAH-Consulting) et Jean-Pierre Ponsard (CNRS-Ecole Polytechnique)

Juin 2026

**Mots Clés :** *Analyse coût bénéfice, investissement de rupture, secteur cimentier, aspects concurrentiels stratégiques dans les décisions privées*

## **Résumé**

Cette note s'intéresse à l'articulation des méthodologies d'évaluation de projets lorsqu'on passe du point de vue public au point de vue privé. Il s'agit plus particulièrement d'analyser comment les enjeux concurrentiels dans les décisions d'investissement de rupture pour la décarbonation des sites industriels influent sur cette articulation. Le secteur cimentier est emblématique à cet égard : d'une part, la concurrence qui y est notoirement imparfaite, et d'autre part, l'adoption des technologies de capture et de séquestration du carbone (CSC) constitue une étape indispensable pour éliminer les émissions incompressibles liées au processus de production. L'analyse portera sur : (i) La résolution d'un modèle stylisé par la théorie des jeux mettant en évidence deux types de comportements rationnellement envisageables, un comportement d'escalade dans lequel l'investissement est avancé en vue d'acquiescer un avantage concurrentiel ou un comportement de procrastination dans lequel il est retardé pour maximiser les profits de l'industrie ; dans un secteur concentré c'est ce deuxième type de comportement qui est vraisemblable, ce qui justifie la mise en place de subvention pour combler ce décalage ; (ii) la pertinence de ce résultat pour caractériser le niveau des subventions nécessaire au lancement d'une vague de projets CSC envisageables en Europe à l'horizon 2035 ; on montre notamment que les niveaux de subvention sont du même ordre de grandeur que ceux constatés lors de la première vague de financement, et donc compatibles avec les contraintes réglementaires en vigueur, alors que ceux qui résulteraient d'une analyse coût bénéfice traditionnelle basée sur le coût d'abattement conduiraient à ne financer qu'un tiers des projets. On montre ainsi que le taux de subvention optimal doit être différencié selon la structure concurrentielle locale, et non uniformément fixé comme le suggère l'analyse coût-bénéfice traditionnelle.

## **1. Introduction**

Un rapport de janvier 2026 de la Cour des Comptes<sup>ii</sup> analyse les grands enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone pour l'économie française, en croisant les dimensions macroéconomique et sectorielle, et en intégrant les enjeux pour les entreprises, le marché du travail, le commerce extérieur, les ménages et les finances publiques. En ce qui concerne les secteurs industriels fortement émetteurs (acier, aluminium, ammoniac, ciment, chaux...) cette transition implique d'importants investissements.

Notre réflexion s'appuie sur un cas emblématique, celui du **captage et stockage du carbone (CSC) dans l'industrie cimentière**. Le secteur du ciment est en effet largement reconnu comme difficile à décarboner et l'un des plus émetteurs de CO<sub>2</sub>. Selon le Net Industry Tracker (Forum économique mondial, 2023), la production mondiale de ciment a généré 2,6 gigatonnes (Gt) d'émissions de CO<sub>2</sub>, soit 6 % des émissions totales de gaz à effet de serre. Sur ce total, 1,3 Gt proviennent des émissions incompressibles liées au processus de production (décarbonation du calcaire par voie chimique).

L'ADEME a publié en 2021 un plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière en France (ADEME, 2021). Ce plan met en évidence :

- La nécessité de mettre en place des politiques incrémentales de décarbonation (combustibles alternatifs, ratio clinker/ciment, ciments verts...) ;
- La possibilité de recourir à une innovation de rupture (CSC) pour éliminer les émissions fatales issues du procédé chimique de décarbonation du clinker qui représente de l'ordre 60% des émissions.

En 2023, France Stratégie a mené plusieurs études sectorielles notamment pour l'industrie cimentière (France Stratégie, 2023):

- Le coût d'abattement du CSC est de l'ordre de 100 à 150 €/tciment, ce qui devrait conduire à un lancement dans les toutes prochaines années compte tenu de la valeur sociale du coût du carbone (Quinet, 2023).

Deux éléments amènent à penser qu'une réflexion serait la bienvenue pour articuler les analyses publiques et privées pour justifier l'adoption de la CSC. On entre en effet dans une phase opérationnelle :

- Des appels à projets ont de fait été lancés tant au niveau national (France 2030) qu'au niveau européen (European Innovation Fund) pour financer la décarbonation des grands sites industriels ;
- Après une période d'attente liée aux incertitudes sur l'évolution de l'EU-ETS et suite à la disparition progressive des quotas gratuits annoncée pour 2034, les états-majors des entreprises cimentières se mobilisent désormais pour lancer des projets de CSC ;

Or, l'analyse coût bénéfice publique apparait clairement insuffisante pour appréhender les décisions d'investissement dans des industries réputées pour adopter des comportements stratégiques.

Le secteur cimentier est emblématique à cet égard. Les sites de production sont répartis sur l'ensemble du territoire (on en dénombre plus de 300 en Europe). Cette répartition s'explique par des facteurs structurels propres à cette industrie (secteur fortement capitalistique associé à un coût de transport élevé). La concurrence est à la fois régionale, limitée aux quelques acteurs disposant des usines proches d'un lieu de consommation donné, et globale, certains acteurs éloignés pouvant bénéficier de transport maritime à faible coût ou bien prêts à vendre des tonnes excédentaires au coût marginal. Ce secteur offre donc des configurations contrastées allant d'une concurrence oligopolistique à une concurrence très agressive en prix.

L'objectif de cet article est d'engager cette réflexion en se plaçant du point de vue des entreprises concernées et de montrer comment on peut enrichir l'analyse coût bénéfice traditionnelle en prenant en compte la stratégie des acteurs.

Notre analyse adoptera la démarche suivante<sup>iii</sup> :

- L'analyse coût bénéfice traditionnelle est tout d'abord déclinée du point de vue de l'Etat et du point de vue de l'entreprise sur la base de l'augmentation des coûts induit par l'adoption de la technologie de rupture rapportée aux émissions évitées. Nous supposons que la valeur carbone reste la même dans les deux cas. Cependant, deux différences sont introduites, d'une part, le taux d'intérêt privé est en général plus élevé que le taux public reflétant des évaluations différenciées des niveaux de risques, et d'autre part, la prise en compte de l'impôt sur les sociétés pour l'entreprise. Le coût d'abattement privé est alors plus élevé que le taux d'abattement public ce qui se traduit par des dates d'adoption optimales différentes. Il s'agit là d'une première différence entre analyse publique et privée. Le rôle d'une subvention est alors de ramener la date privée à la date publique.
- Cette analyse coût bénéfice est alors enrichie en intégrant les impacts de l'adoption sur les quantités et les prix. D'un point de vue public il conviendrait de choisir la date d'adoption pour maximiser le bien-être (somme du surplus du consommateur et du profit des entreprises). Comme on raisonne sur des trajectoires sectorielles, cette intégration est relativement aisée (cf. par exemple le plan sectoriel ciment de l'ADEME). Du point de vue des entreprises l'exercice est plus difficile, les prix et volumes de chaque firme dépendent de la stratégie d'adoption des autres firmes. Mais comment déterminer ces impacts prix et volumes ? On peut par exemple s'attendre à une course à l'innovation pour bénéficier de l'avantage concurrentiel associé. Un tel équilibre existe bien. Mais nous montrons que dans un cadre d'une concurrence imparfaite, il existe une autre solution dans laquelle toutes les firmes adoptent simultanément. Nulle entente n'est requise pour soutenir cet équilibre non coopératif, il suffit que les entreprises puissent clairement observer le comportement de leurs concurrents et soient prêtes à réagir immédiatement en cas d'adoption par l'un d'eux. Cet équilibre alternatif neutralise la recherche d'un avantage concurrentiel et génère un profit plus élevé pour l'industrie mais au prix d'un décalage accru par rapport à la date socialement optimale. Dans ce contexte, une subvention apparait d'autant plus nécessaire pour combler cet écart.
- La mise en évidence de ce phénomène s'appuie sur la résolution d'un modèle stylisé sur un cas d'école en mobilisant la théorie des jeux<sup>iv</sup>. L'existence de deux classes d'équilibre provient des caractéristiques de l'investissement de rupture : un coût fixe capitalistique élevé.
- Il en résulte que la politique publique dépend de manière critique de l'intensité concurrentielle dans le secteur concerné : si elle est nécessaire quand ce niveau est faible, elle est injustifiée lorsque ce niveau

est élevé. La prise en compte des aspects stratégiques a donc un effet très structurant sur l'analyse coût bénéfice, alors que cet aspect est négligé dans l'approche traditionnelle.

- Nous proposons ensuite une mise en œuvre opérationnelle de cette analyse théorique dans le cadre du secteur cimentier en Europe : nous introduisons deux facteurs importants en pratique et négligés dans le cas d'école : l'hétérogénéité des entreprises en termes de coûts et de performance énergétique, et la différenciation spatiale.
- En faisant l'hypothèse d'un niveau de concurrence globalement faible, nous déterminons les taux de subvention pour trois classes d'usines susceptibles d'adopter la CSC à l'horizon 2035. Ces trois classes sont construites sur la base de coûts relatifs croissants d'adoption de la CSC (OPEX et CAPEX). Nous montrons alors les intensités concurrentielles relatives rencontrées par chaque classe sont également croissantes, ce qui se traduit par des taux de subvention d'autant plus élevés (29, 50, 65% respectivement) alors que l'analyse traditionnelle aboutit à des taux beaucoup plus contrastés (39, 95, 96% respectivement) ; la prise en compte des aspects stratégiques justifie la mise en place de subventions de toutes usines alors que l'analyse traditionnelle ne justifierait cette mise en place que pour un tiers d'entre elles.

La note se conclut par une réflexion sur d'autres facteurs susceptibles d'influer sur la mise en place de la CSC :

- L'incertitude technologique de la CSC et son coût capitalistique ;
- La possibilité d'une différenciation marketing entre ciment carbonée et ciment décarbonée ;
- L'incertitude sur l'évolution du prix du carbone sur l'EU-ETS et sa réglementation (BAM, quotas gratuits...);
- La disponibilité des sites de séquestration et de l'infrastructure de transport ;
- L'acceptabilité sociale de cette technologie.

## **2. Un cas d'école et l'analyse coût bénéfice traditionnelle**

Pour fixer les idées considérons un cas d'école correspondant à l'adoption de la technologie CSC par une usine carbonée. Par convention on appellera usine *dirty* (sale) l'usine carbonée et *clean* (propre) l'usine ayant adopté la technologie CSC. Les coûts (OPEX en €/tciment) des deux usines, hors coût des émissions, sont notés  $d_0$  et  $c$  respectivement. Ces coûts sont estimés en 2024 et sont supposés constants pour les années à venir (on raisonne hors inflation). L'adoption de la technologie CSC implique un coût fixe (CAPEX M€ pour une capacité 1 Mt ciment). La technologie CSC est supposée éliminer une grande partie des émissions de CO<sub>2</sub> de l'usine carbonée, on note  $d_1$  la réduction des émissions en tCO<sub>2</sub>/tciment. La valeur carbone des émissions de CO<sub>2</sub> est notée  $SCC(t)$  pour *social cost of carbon*. En 2024 on prend pour hypothèse  $SCC(2024) = 110$  €/tCO<sub>2</sub><sup>v</sup>, avec  $SCC(t)$  qui augmente dans le temps. Nous adoptons l'hypothèse d'Hotelling, soit une croissance au taux d'intérêt social retenu par la Commission Quinet<sup>vi</sup>, on note  $i$  ce taux avec  $i = 3.92\%$  ; on peut donc écrire  $SCC(t) = SCC(2024)e^{i(t-2024)}$ . Le taux d'intérêt privé noté  $r$  est pris égal à 9%. La Table 1 résume les valeurs retenues pour le cas d'école. Ces valeurs seront reprises dans la section 4.

Table 1 Le cas d'école

(Source: SIRAH, estimation moyenne classe 1 cf. section 4.2)

paramètre	unité	Valeur
t=0	année	2024
d <sub>0</sub> coût usine dirty hors CO2	€/t	44
d <sub>1</sub> émission évitées	€/t	0,419
c coût usine clean	€/t	104
F Capex CCS pour 1 Mt	M€	236
T Durée de vie du projet	nbre années	15
Taux d'intérêt privé	%	9%
Taux IS	%	25%
SCC(2024)	€/tCO2	110
Taux intérêt public	%	3,92%

Dans l'analyse coût bénéfice traditionnelle le régulateur ne s'intéresse qu'à l'impact de l'investissement CSC sur les coûts et les émissions sur la durée de vie du projet  $T$ . Le coût d'abattement en valeur carbone, noté  $CA_i$ , s'écrit de la manière suivante (Criqui, 2023) :

$$CA_i = [(c - d_0)(1 - e^{-Ti})/i + F]/(T d_1)$$

La date  $t^i$  (avec  $i$  pour *taux d'intérêt public*) pour laquelle  $SCC(t^i) = CA_i$  est celle pour laquelle le projet devient socialement rentable, compte tenu de l'augmentation du coût du carbone au taux d'intérêt social.

Dans l'analyse traditionnelle, seuls sont éligibles les projets pour lesquels  $CA_i < SCC(t^o)$ , où  $t^o$  représente la date retenue pour lancer l'adoption par le régulateur, ces projets sont classés par valeurs croissantes de  $CA_i$  et le nombre de projets financés dépend du budget alloué.

Plaçons-nous du point de vue privé et introduisons deux facteurs : le taux d'intérêt privé  $r$  et l'impact fiscal  $\tau$  compte tenu de l'amortissement  $F/T$ . La valeur nette actualisée de l'investissement s'écrit :

$$\begin{aligned} VAN(t) &= -F e^{-tr} + \int_t^{t+T} [(d_0 + d_1 SCC(u) - c)(1 - \tau) + \tau F/T + ] e^{-ru} du \\ &= -F e^{-tr} + [(d_0 - c)(1 - \tau) + \tau F/T] e^{-tr} (1 - e^{-Tr})/r + d_1 SCC(0)(1 - \tau) e^{-t(r-i)} (1 - e^{-T(r-i)})/(r-i) \\ &= e^{-tr} [-F + [(d_0 - c)(1 - \tau) + \tau F/T] (1 - e^{-Tr})/r + d_1 SCC(t) (1 - \tau) (1 - e^{-T(r-i)})/(r-i)] \end{aligned}$$

La valeur  $SCC(t)$  qui annule cette expression correspond au *coût d'abattement privé en valeur carbone*, elle sera notée  $CA_r$ . La date  $t^r$  (avec  $r$  pour *taux d'intérêt privé*) pour laquelle  $SCC(t^r) = CA_r$  est celle pour laquelle le projet devient rentable pour l'entreprise, compte tenu de l'augmentation du coût du carbone au taux d'intérêt social<sup>vii</sup>.

Avec les valeurs retenues Table 1, on obtient pour le projet considéré respectivement  $CA_r = 174 \text{ €/tCO}_2$  et  $CA_i = 149 \text{ €/tCO}_2$ , soit  $t^r = 2036$  et  $t^o = t^i = 2031$ . L'entreprise a intérêt à lancer l'investissement avec un délai de 5 ans par rapport à la date socialement optimale. Il est possible de combler ce retard en subventionnant l'investissement, la subvention s'élève à 39 % du CAPEX, soit  $236 * 39\% = 93 \text{ €/t}$ . Les émissions évitées (A pour abattement) sur la durée de vie du projet s'élèvent à  $A = d_1 T = 1.9 \text{ tCO}_2/\text{t}$ , le ratio efficacité de la subvention est donc de  $93/1.9 = 49 \text{ €/tCO}_2$ .

Cette première analyse met déjà en évidence une première différence entre les points de vue public et privé. Mais elle ne tient pas compte de l'impact de l'adoption de la technologie clean par une firme sur le comportement des autres firmes et donc de l'évolution ni de son prix de vente ni de sa part de marché. Comment ces éléments devraient-ils être intégrés dans l'analyse coût bénéfice ?

### 3. Le modèle stylisé

Les questions posées sont plus précisément les suivantes. A quelle date une firme donnée a-t-elle intérêt à adopter la technologie décarbonée en fonction: des coûts de production (de la technologie carbonée vs décarbonée), du coût fixe d'investissement de la technologie décarbonée, du taux d'intérêt, du taux d'émissions, de l'évolution retenue pour le prix du carbone ? Cette date dépend-elle de la stratégie du concurrent ? Quel est l'impact d'une subvention à l'investissement ?

Pour répondre à ces questions nous analysons la situation en ayant recours à la théorie des jeux en déterminant les *équilibres de Nash*. Rappelons qu'un équilibre de Nash est un ensemble de stratégies telles qu'aucun des joueurs n'ait d'intérêt à changer sa stratégie si les autres joueurs ne changent pas la leur. Cette notion correspond à celle habituellement retenue en économie industrielle pour formaliser la concurrence.

Intuitivement on peut penser qu'une firme a intérêt à adopter avant les autres pour bénéficier d'un avantage concurrentiel sur les coûts variables, mais elle doit s'attendre à une réaction des concurrents pour limiter la durée de cet avantage. Cette idée conduit à un processus d'escalade qui aboutit à une adoption prématurée, le coût variable de l'usine décarbonée étant plus élevé que la valeur du coût variable à la date d'adoption. Ce phénomène d'escalade réduit l'intérêt de cette stratégie. Il existe une autre stratégie dans laquelle toutes les firmes adoptent à la même date, ce qui neutralise le phénomène d'escalade. Cette stratégie conduit à une adoption tardive, elle se traduit par un phénomène de procrastination.

On peut démontrer l'existence éventuelle de deux classes d'équilibres de Nash : la première d'entre elles sera qualifiée d'équilibre avec *escalade* et la seconde d'équilibre avec *procrastination*. Il y a donc un problème de sélection d'équilibres. Il se trouve que pour ce jeu il existe un critère simple et intuitif qui permet d'opérer la sélection, le recours à la notion de point focal introduite par Schelling (1960).

La structure de marché initiale joue en effet le rôle déterminant pour caractériser les comportements concurrentiels. En effet, de deux choses l'une :

- Soit la structure de marché initiale permettra à terme d'adopter la technologie de rupture de manière profitable pour toutes les firmes présentes, alors la trajectoire concurrentielle consiste à retenir l'équilibre de procrastination, la simple menace d'adopter en même temps que les concurrents suffit pour assurer la stabilité d'une adoption tardive, et le profit actualisé correspondant sera supérieur à celui de l'équilibre d'escalade, d'où la sélection.
- Soit au contraire cette structure de marché ne permettra pas à toutes les firmes présentes d'adopter la technologie de rupture car le coût fixe est trop élevé, et alors la menace d'escalade de la part des firmes exclues conduira les firmes qui adoptent à le faire de manière trop anticipée ce qui réduira fortement l'avantage concurrentiel attendu<sup>viii</sup>.

#### 3.1. Analyse coût bénéfice stratégique du cas d'école

Nous repartons de l'analyse coût bénéfice traditionnelle et proposons de prendre en compte les comportements concurrentiels des firmes. Nous avons besoin de données complémentaires : la structure de marché (le nombre  $n$  de concurrents) et la fonction de demande que nous supposons linéaire et peu élastique sur ce marché, soient l'ordonnée et la pente de cette fonction (voir Table 2). Nous supposons que toutes les 2 firmes sont semblables et que leurs caractéristiques sont celles de la Table 1. Pour le CAPEX, nous tenons compte de la durée de vie infinie supposée dans le modèle théorique (ce qui revient à augmenter le CAPEX), et nous introduisons l'impact fiscal sur le cash-flow hors investissement (ce qui revient à diminuer ce cash-flow en le prenant après impôt), d'où la nouvelle valeur du coût fixe d'investissement  $F' = [1/(1-(1+r)-T)][1/(1-\tau)]F = 1.84*236 = 434 \text{ M€}$

Table 2 La fonction de demande pour le cas d'école

	parametre	unité	Valeur
t=0		année	2024
ordonnée fonction demande		€/t	250
pente fonction de demande		€/t <sup>2</sup>	0,00002

Au départ chaque firme utilise une technologie carbonée dont le coût unitaire augmente avec le temps en fonction des émissions émises, ces émissions étant supposées proportionnelles à la quantité produite, et de l'augmentation du prix du carbone. A tout instant  $t$  chaque firme peut investir dans la technologie totalement décarbonée, son coût de production restant alors constant dans le temps. Nous supposons que l'adoption de la technologie décarbonée implique un coût fixe d'investissement et que la durée de vie des équipements correspondant est infinie. A la date  $t$  la concurrence se fait en quantité (« à la Cournot ») avec les coûts correspondant aux technologies en place à cette date.

Avec l'hypothèse d'une concurrence à la Cournot entre  $n$  firmes, les coûts usines de la Table 1 et la fonction de demande ci-dessus on obtient les résultats en termes de concurrence statique reproduits en Table 3. Le coût des usines dirty augmente dans le temps ce qui se traduit par une augmentation des prix et une baisse des volumes. Le coût des usines clean est indépendant du temps, si l'adoption a lieu en 2035, le prix baisse et les volumes augmentent.

Table 3 L'équilibre de Cournot pour  $n=3$

Usine	Dirty		Clean
Année	2024	2035	Indéterminée
Prix €/t	130	148	140
Volume total Mt	6,0	5,1	5,5

Le coût fixe d'investissement pour l'adoption de la technologie clean  $F'$  détermine le nombre maximal de firmes  $n^{max}$  pour lequel cet investissement est rentable. Le cash-flow net de coût d'investissement pour une concurrence entre  $n$  firmes clean s'écrit :

$$\pi_c(n; t) - f = (a-c)^2 / b(n+1)^2 - iF'$$

D'où on tire

$$n^{max} = \text{partie entière de } \{ [(a-c)^2 / biF']^{0.5} - 1 = 4.24 \} = 4$$

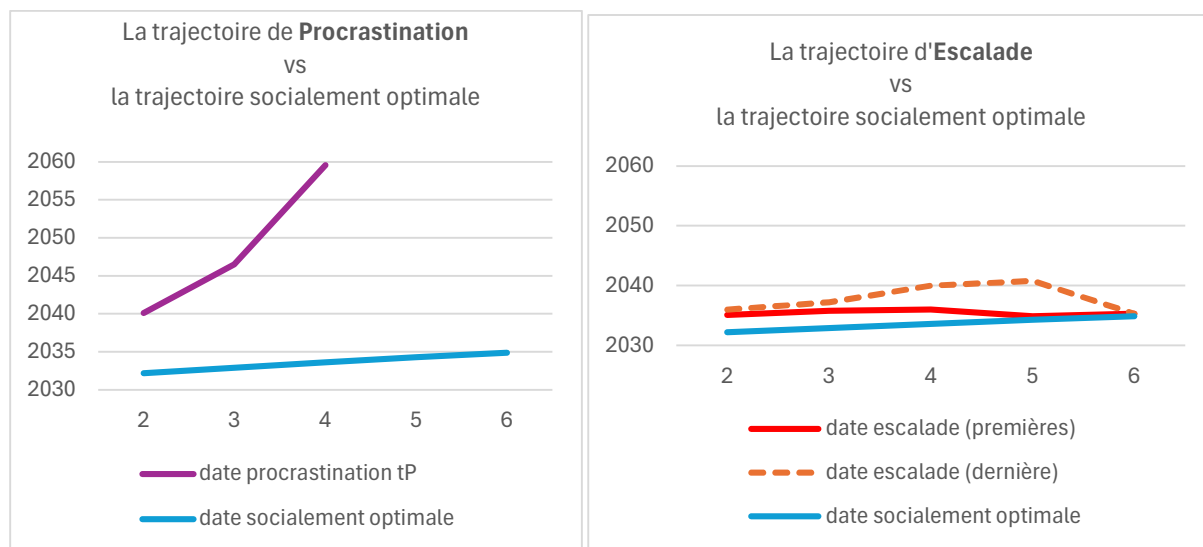
Compte tenu de la taille du marché considéré dans cet exemple, telle que définie par la fonction de demande, et des coûts (OPEX et CAPEX), **seules 4 firmes pourront à terme adopter de manière profitable la technologie clean**. Cette valeur constitue le critère déterminant pour la sélection de l'équilibre concurrentiel en fonction de la structure de marché initial au démarrage du jeu.

La Figure 2 donne une représentation graphique des trajectoires de procrastination et d'escalade. La trajectoire socialement optimale apparaît également sur cette Figure, elle est choisie par un régulateur maximisant le bien-être, somme du surplus du consommateur et du profit de l'industrie, somme actualisée au taux d'intérêt public.

La date de procrastination augmente très rapidement lorsque la concurrence augmente pour atteindre 2060 lorsque  $n=4$ . Une concurrence plus forte diminue les gains futurs associés à l'adoption et donc la retarde. L'écart entre les dates optimales publique et privée passe de 5 ans pour l'analyse traditionnelle à 26 ans ! Mais il n'est que de 8 ans pour  $n=2$ . La trajectoire de procrastination n'existe plus pour  $n > 4$ .

La trajectoire d'escalade mérite une explication. Pour  $n \leq 4$ , une seule firme menace d'escalade les autres firmes, elle adopte plus tard (date escalade dernière) que celles-ci qui adoptent en même temps (date escalade premières). Pour  $n \geq 5$ , quatre firmes adoptent en même temps (premières dates) ; ce sont les firmes qui sortent du marché qui jouent le rôle de menace. Par construction de cette trajectoire, les profits actualisés de toutes les firmes sont strictement identiques, c'est cette égalité qui assure la stabilité de la trajectoire. On constate que pour  $n \leq 4$ , la trajectoire d'escalade se situe plus tard que la trajectoire socialement optimale ; mais ce décalage est réduit fortement pour  $n \geq 5$ .

Figure 2 Les dates d'adoption selon les trajectoires et la structure de marché



Considérons maintenant les profits actualisés correspondant à ces trajectoires (voir Table 4). Pour  $n \leq 4$ , on constate que les profits actualisés de procrastination sont supérieurs aux profits actualisés d'escalade<sup>ix</sup>. Cette trajectoire est sélectionnée sur la base d'un argument de point focal, toutes les firmes ont la même préférence entre ces deux trajectoires. Pour  $n \geq 5$ , seule persiste la trajectoire d'escalade.

Le régulateur peut maintenant décider de fixer le montant de la subvention qui induit les firmes à avancer la date d'adoption privée à la date socialement optimale. Ce montant figure en dernière ligne dans le Table 4, en % du CAPEX. L'augmentation de la subvention pour  $n \leq 4$  vient de l'intérêt moindre de l'adoption lorsque la concurrence augmente, ce qui éloigne la date privée optimale sans beaucoup augmenter la date socialement optimale. Mais, pour  $n \geq 5$ , comme nous l'avons vu sur la Figure 2, le comportement concurrentiel d'escalade conduit à une date optimale privée qui n'est que très légèrement postérieure à la date socialement optimale, aucune subvention n'est presque nécessaire.

Table 4 Les profits actualisés des firmes et la subvention optimale en fonction de la structure de marché initiale

structure concurrentielle initiale	2	3	4	5	6
trajectoire de procrastination	1228	663	414	NA	NA
trajectoire d'escalade (premières)	1219	637	373	251	186
trajectoire d'escalade (dernière)	1219	637	373	251	186
subvention du capex CCS en % CAPEX	31%	40%	52%	3%	1%

Détaillons l'impact de la politique publique pour une structure de marché initiale  $n = 3$ . La Table 5 donne l'évolution des valeurs actualisées du bien-être, du surplus du consommateur et du profit des entreprises en pourcentage par rapport aux valeurs pour la trajectoire correspondant à la date socialement optimale.

Table 5 Analyse des trajectoires en % par rapport à la trajectoire socialement optimale

Indicateurs	n = 3				
	date d'adoption	Bien-être	Surplus du consommateur	Profit de l'industrie	Emissions totales (MtCO2)
trajectoire socialement optimale tW	2033	11 597	7 357	1 799	19
trajectoire concurrentielle t	2047	-7,5%	-9,5%	10,5%	44
après subvention	2033	0,0%	0,0%	10,5%	19
Emissions évitées MtCO2					25
Subvention totale M€ 2033 (40% CAPEX)					515
Efficacité de la subvention €/tCO2					20

La trajectoire de procrastination permet aux firmes de gagner 10,5 % de plus mais le surplus des consommateurs baisse de 9,5 % ; en tout, le bien-être baisse de 7,5 %. La subvention permet d'avancer la date d'adoption de 2047 à 2033, ce qui bénéficie au consommateur à la suite d'une baisse de prix et d'une augmentation de volume ; le cash-flow actualisé de l'industrie revient à son niveau de procrastination grâce à la subvention. La subvention de 40 % du CAPEX est particulièrement efficace, le ratio €/tCO<sub>2</sub> est égal à 20 €/tCO<sub>2</sub>, il suffit de dépenser 20 € pour éviter 1 tCO<sub>2</sub> alors qu'il faudrait dépenser 49 € dans l'analyse traditionnelle.

En résumé l'analyse stratégique se distingue de l'analyse traditionnelle sur plusieurs points :

- Si on admet que les prix et volumes sont définis de manière cohérente par un modèle stylisé de concurrence imparfaite, deux classes d'équilibre peuvent co-exister en fonction de l'intensité de la concurrence ; si celle-ci est modérée alors l'équilibre de procrastination dans lequel les firmes adoptent en même temps leur donne un profit actualisé supérieur à l'équilibre d'escalade dans lequel chaque firme cherche à bénéficier d'un avantage concurrentiel ; si l'intensité de la concurrence est élevée, seule l'équilibre d'escalade existe ;
- L'équilibre de procrastination se traduit par un écart accru entre les dates optimales privée et publique par rapport à l'analyse traditionnelle ; ce qui justifie la mise en place d'une subvention pour combler cet égard, le taux de subvention est d'autant plus élevée que la concurrence s'accroît (allant de 31 à 52 % dans notre exemple), alors que dans l'analyse traditionnelle ce taux est invariant (39%);
- Dans l'équilibre d'escalade, l'écart entre les dates optimales est faible et la nécessité d'une subvention disparaît ;
- La caractérisation du contexte concurrentiel apparaît donc comme un élément déterminant de la politique publique.

L'analyse de ce cas d'école porte essentiellement sur le rôle de la structure concurrentielle, il ne tient pas compte d'autres facteurs tels que l'hétérogénéité des firmes en termes de coûts et de taux d'émissions, et de la dimension spatiale de la concurrence dans le secteur cimentier. Ces facteurs vont être introduits dans l'analyse opérationnelle qui suit.

#### **4. Analyse coût bénéfice opérationnelle du secteur cimentier sur le marché européen**

##### **4.1. La méthode d'analyse concurrentielle de SVA<sup>x</sup>**

###### **• Objectif**

Le logiciel SVA est développé et utilisé depuis plus de 25 ans pour modéliser les dynamiques concurrentielles dans les industries de commodités. L'objectif du modèle est de proposer une simulation de concurrence réaliste et quantifiée, permettant d'analyser de manière objective les comportements stratégiques des firmes et en

particulier de détecter des risques d'instabilité de prix et de parts de marché, d'anticiper l'impact de modifications des équilibres offre/demande, d'évolution de coûts de production et de contraintes environnementales...

- **Caractéristiques spécifiques rencontrées dans les industries de commodités (ciment en particulier)**

L'intensité capitalistique y est très forte, la localisation des outils de production est contrainte par la géologie, les actifs ne sont pas redéployables et ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. La production est limitée par des contraintes de capacités rigides à l'investissement et soumises à des coûts fixes importants. Le produit est pondéreux et les coûts de transport représentent une proportion importante des coûts rendus sur les différents marchés géographiques.

La demande concerne des produits peu différenciés en qualité (même s'il existe des segments) dont le prix est le principal critère d'arbitrage pour les clients. L'élasticité de la demande au prix est très faible pour ce produit intermédiaire de base et qui représente une faible part du produit final au sein du marché de la construction.

Il en résulte généralement une dynamique d'oligopoles naturels dans un contexte de concurrence imparfaite entre acteurs rationnels conduisant à des équilibres locaux fondés sur les écarts de coûts rendus entre concurrents.

Les principales caractéristiques techniques des outils industriels et la logistique étant des informations publiques, elles permettent à des experts d'estimer les coûts rendus des usines aux marchés de manière assez précise. Cela conduit naturellement à considérer des dynamiques de concurrence en prix d'exclusion 'à la Bertrand'. Néanmoins les comportements stratégiques intégrant des arbitrages prix/volume conduisent généralement à la présence simultanée de plusieurs acteurs sur un même marché. Par ailleurs au sein d'un marché donné, les parts de marché d'équilibre semblent être à rapprocher d'une concurrence en quantité 'à la Cournot'.

- **Présentation simplifiée de l'algorithme SVA permettant de modéliser ces spécificités**

Pour un scénario donné (en ayant identifié les marchés et les usines retenues) la démarche est la suivante :

1. Estimation des coûts rendus : Sur la base d'estimation de coûts (fixes et variables), de capacité et de localisation d'usines, d'estimation de demande annuelle par marchés localisés ainsi que de coûts de transport, les coûts rendus de chaque usine sur chaque marché sont calculés.
2. Calcul de l'équilibre concurrentiel pour une année donnée<sup>xi</sup> : Sur chaque marché on détermine le nombre d'acteurs, le prix d'équilibre et les parts de marché en fonction des arbitrages prix/volume des concurrents (sélection d'un équilibre de marché en comparant différents équilibres dans différentes configurations de prix d'exclusion/ nombre d'acteurs)
3. Intégration des contraintes de capacité des usines : Un algorithme conduit ensuite une déformation proportionnelle et itérative des parts de marché d'équilibre permettant d'intégrer les contraintes de capacité de l'ensemble des usines en augmentant si nécessaire le niveau de prix afin de permettre l'alimentation de chaque marché.
4. Intégration d'autres aspects : Des ajustements complémentaires peuvent être introduits tel que la prise en compte d'effet de réseau, de comportements d'acteurs spécifiques (prise en compte des coûts fixe, préférence pour les ventes locales, arbitrages prix/volumes, ...), intégrations verticales, prise en compte de segments avec accès restreint à certaines usines (usines CSC ayant un accès exclusif au segment vert, tout en pouvant atteindre le segment gris)

#### **4.2. Les données mobilisées (dans le cadre d'une étude CSC en Europe)**

Une étape préliminaire consiste à collecter les principales données publiques recueillies avec l'appui d'une IA spécifiquement entraînée.

- Concernant les 300 sites de production actuels (usines intégrées, stations de broyage et terminaux cimentiers) inclus dans le modèle).

- Données au niveau des usines : capacité de clinker, capacité de broyage ciment, capacité des terminaux, âge de l'usine, utilisation de combustibles alternatifs, nombre de fours, nombre d'ETP (équivalents temps plein), technologie des fours).
- Données au niveau des pays : coût moyen de l'électricité, coût moyen des ETP, facteur clinker moyen, taux moyen d'utilisation.

Ces données alimentent un modèle d'estimation des coûts qui produit, pour chaque usine, une estimation comprenant les coûts variables et fixes du clinker, les coûts variables et fixes du broyage, les émissions brutes spécifiques de CO<sub>2</sub>.

- Concernant la logistique

Les distances routières et maritimes sont obtenues à partir de sources publiques sur la base des coordonnées des sites industriels et des marchés. Un modèle de coûts logistiques est élaboré afin d'estimer les coûts logistiques routiers pour le transport du clinker et du ciment, au niveau national ainsi que les coûts de manutention portuaire et de barge pour le transport maritime du ciment et du clinker sur la base d'hypothèses raisonnables.

- Concernant la demande

La demande totale de ciment par pays est obtenue à partir d'informations publiques disponibles. La répartition de la demande de ciment du niveau national vers le niveau de 900 marchés géographiques est fondée pour une première approximation sur la distribution de la population. Des hypothèses simplifiées ont été considérées concernant variables suivantes : La croissance de la demande de ciment jusqu'en 2035 (1%/an), l'évolution du taux de clinker dans le ciment (-1%/an), la part de ciment green dans la demande totale accessibles aux seuls usines CSC (10%), l'absence d'importation de ciment décarboné depuis l'extérieur de l'Europe.

- Concernant les projets CSC

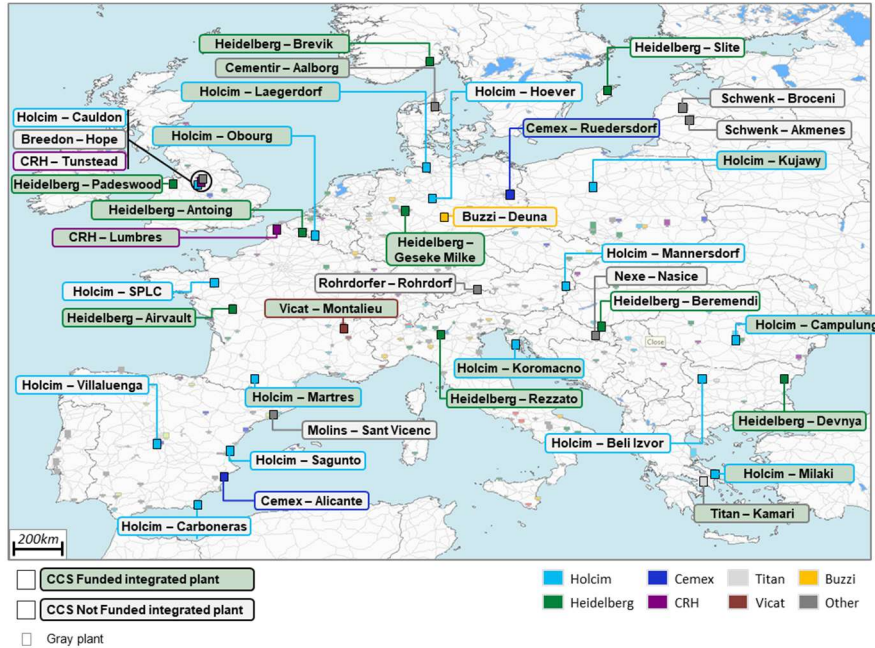
Le coût du CSC (captage et stockage du carbone) par projet est estimé à partir d'informations publiques propres à chaque usine (capacité de captage, technologie de captage, chaîne carbone, distance entre l'usine et le terminal de transport du CO<sub>2</sub>, localisation du site de stockage, type de transport du CO<sub>2</sub> — pipeline ou navire) ainsi que d'estimations fondées sur l'IA pour chaque composante du CSC.

A la date de 2026, 19 projets ont un financement et bénéficient de subvention alors que 19 autres sont identifiés (sans avoir reçu à ce jour de financement). Cependant le déclenchement des investissements reste lent avec un seul site réellement entré en exploitation à grande échelle à Brevik en Norvège bénéficiant d'un niveau de subvention très élevé.

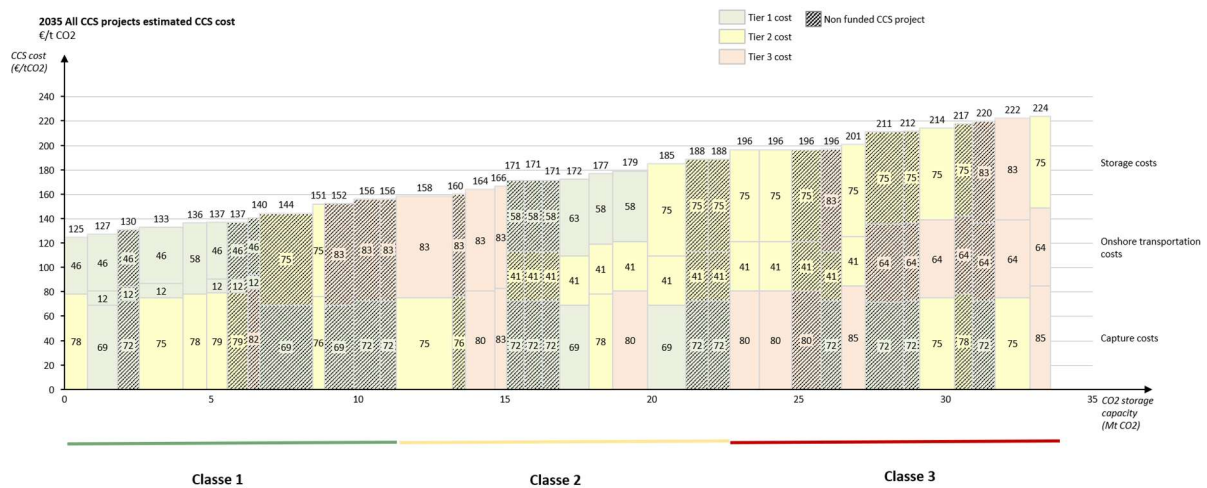
La Carte 1 présente l'ensemble des sites CSC retenus dans cette étude, les sites déjà financés et les sites seulement identifiés. Le tableau qui suit précise les capacités de chaque site, le Capex d'une adoption CSC pour chacun d'entre eux, les subventions accordées jusqu'à présent. On en déduit le Capex moyen (236 €/t capacité) et le taux de subvention moyen (42 %). A noter que sont également intégrées les usines (~200) pour lesquelles nous considérons que l'adoption de la CSC n'est pas envisagée à ce stade (elles l'adopteront au-delà de cet horizon, ou bien seront fermées). Ne sont pas intégrés les projets CSC qui pourrait être construits mais qui ne sont non encore identifiés à ce jour. Le dernier graphe illustre l'hétérogénéité des coûts CO<sub>2</sub> des projets qui se trouvera accentuée lors de la prise en compte des coût logistiques ciments vers les 400 marchés considérés.

Carte 1 : Usines et projets CCS (financés et non financés en 2026) en Europe.

(Source: SIRAH, Public information (Global Cement Report, climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/innovation-fund-projects\_en, web search). Cement capacity = Cement equivalent clinker capacity without grinding restrictions.



Plant	Type	Capacity (Mt cement, clinker based)	CAPEX (M€)	CAPEX/t (€/t)	Subvention (M€)	Subvention/t (€/t)	Subvention %	
1	Cementir – Aalborg	Funded	2.3	NA	NA	220	96	NA
2	Cemex – Ruedersdorf	Funded	2.8	NA	NA	157	56	NA
3	CRH – Lumbres	Funded	1.2	256	213	153	128	60%
4	Heidelberg – Airvault	Funded	1.9	400	211	145	76	36%
5	Heidelberg – Antoing	Funded	1.7	450	265	115	68	26%
6	Heidelberg – Brevik	Funded	1.6	400	250	267	167	67%
7	Heidelberg – Devnya	Funded	1.7	NA	NA	190	112	NA
8	Heidelberg – Geseke Milke	Funded	1.0	500	500	191	191	38%
9	Heidelberg – Padeswood	Funded	1.1	462	420	231	210	50%
10	Heidelberg – Rezzato	Funded	1.5	NA	NA	216	144	NA
11	Holcim – Campulung	Funded	3.9	NA	NA	146	38	NA
12	Holcim – Koromacno	Funded	1.0	NA	NA	117	117	NA
13	Holcim – Kujawy	Funded	2.6	265	102	228	88	86%
14	Holcim – Laegerdorf	Funded	1.8	410	228	110	61	27%
15	Holcim – Martres	Funded	1.3	NA	NA	120	92	NA
16	Holcim – Milaki	Funded	2.4	380	158	124	52	33%
17	Holcim – Obourg	Funded	2.1	385	183	230	110	60%
18	Titan – Kamari	Funded	3.2	584	183	234	73	40%
19	Vicat – Montalieu	Funded	2.6	700	269	150	58	21%
20	Breedon – Hope	Non Funded	1.7	NA	NA	NA	NA	NA
21	Buzzi Unicem – Deuna	Non Funded	2.0	350	175	NA	NA	NA
22	Cementos Molins - Sant Vicenc	Non Funded	1.9	590	311	NA	NA	NA
23	Cemex – Alicante	Non Funded	1.7	NA	NA	NA	NA	NA
24	CRH – Tunstead	Non Funded	1.2	NA	NA	NA	NA	NA
25	Heidelberg – Beremendi	Non Funded	1.6	NA	NA	NA	NA	NA
26	Heidelberg – Slite	Non Funded	3.2	900	281	NA	NA	NA
27	Holcim – Beli Izvor	Non Funded	1.7	NA	NA	NA	NA	NA
28	Holcim – Carboneras	Non Funded	1.9	NA	NA	NA	NA	NA
29	Holcim – Caudon	Non Funded	1.1	NA	NA	NA	NA	NA
30	Holcim – Hoever	Non Funded	1.1	NA	NA	NA	NA	NA
31	Holcim – Mannersdorf	Non Funded	1.5	NA	NA	NA	NA	NA
32	Holcim – Sagunto	Non Funded	2.2	NA	NA	NA	NA	NA
33	Holcim - St Pierre la Cour	Non Funded	1.8	NA	NA	NA	NA	NA
34	Holcim – Villaluenga	Non Funded	2.6	NA	NA	NA	NA	NA
35	Nexe – Nasice	Non Funded	1.2	400	333	NA	NA	NA
36	Rohrdorfer – Rohrdorf	Non Funded	1.2	NA	NA	NA	NA	NA
37	Schwenk – Akmenes	Non Funded	2.6	600	231	NA	NA	NA
38	Schwenk – Broceni	Non Funded	2.9	NA	NA	NA	NA	NA
Weighted average					236		98	42%



CCS cost per project is estimated based on public information per plant (capture capacity, capture technology, carbon pathway, distance from the plant to the CO<sub>2</sub> transport terminal, location of the storage site, type of CO<sub>2</sub> transport (pipeline or vessel)) and AI-based estimates of the CCS cost for each component.

### 4.3. Limite de l'analyse

L'ensemble de ces données étant fondé sur des estimations publiques approximatives et des hypothèses de travail simplificatrices, les résultats des simulations concurrentielles des différents scénarios modélisés par l'algorithme du modèle SVA doivent être examinés avec prudence. En particulier, nous supposons que l'ensemble des projets financés en 2026 seront opérationnels en 2035 et que l'ensemble des projets identifiés mais non financés en 2026 pourront être opérationnel en 2035 tout en négligeant ceux qui pourraient être déclenchés mais qui ne sont pas encore identifiés à ce jour. Par ailleurs, les modélisations des niveaux de prix considérés à ce stade résultent d'une analyse purement théorique et en particulier n'intègrent pas les dynamiques de la demande relatives à la propension des clients à payer pour un ciment décarboné. Ainsi ces résultats doivent être considérés comme simplement illustratifs.

### 4.4. Résultats concernant l'analyse stratégique des projet CSC potentiels non financés à horizon 2035

#### 4.4.1. Analyse traditionnelle cout bénéfice

Nous nous intéressons plus particulièrement à l'investissement des projets CSC pour les sites non encore financés, soit les 19 sites identifiés sur la carte, et au montant des subventions pour que cet investissement soit rentable. Nous commençons par mener une analyse traditionnelle sur chacun de ces sites sur la base de l'impact de l'investissement sur les coûts usines hors CO<sub>2</sub> (somme du coût variable et du coût fixe sur la base de la capacité) et du taux d'émissions. Nous obtenons des résultats très différenciés en termes de coût d'abattement en budget carbone. Pour simplifier l'analyse nous regroupons les usines par coût d'abattement croissant en trois classes 1/2/3 contenant respectivement 6/7/6. Les valeurs moyennes sont présentées dans la Table 6.

L'augmentation des coûts d'abattement et la baisse des émissions évitées lorsqu'on passe d'une classe à l'autre s'expliquent par les caractéristiques respectives de chaque classe alors que nous supposons des niveaux de CAPEX similaires. Nous pouvons noter que les dates d'investissement socialement optimales sont peu différenciées par classes. En revanche, les usines des classes 2 et 3 engendrent des dates d'investissements optimales privées beaucoup plus tardives que la classe 1 nécessitant de subventionner quasi intégralement les CAPEX.

Table 6 Caractéristiques des trois classes d'usines et les résultats de l'analyse traditionnelle  
(Source: SIRAH, SVA analysis)

	Paramètre	Unité	Classe 1	Classe 2	Classe 3
	t=0	Année	2024	2024	2024
	d <sub>0</sub> coût usine dirty hors CO2	€/t	44	55	60
	d <sub>1</sub> émission évitées	€/t	0,419	0,312	0,222
	c coût usine clean hors CO2	€/t	104	115	107
	F Capex CSC pour 1 Mt	M€	236	236	236
	Taux d'intérêt privé	%	9%	9%	9%
	SCC(2024)	€/tCO2	110	110	110
	Taux intérêt public	%	3,92%	3,92%	3,92%
	<b>Coût d'abattement en budget carbone (CA1)</b>	<b>€/tCO2</b>	<b>146</b>	<b>194</b>	<b>230</b>
	Date socialement optimale	Année	2031	2030	2032
	Date optimale privée	Année	2036	2043	2048
	<b>Taux de subvention du CAPEX</b>	<b>%</b>	<b>39%</b>	<b>95%</b>	<b>96%</b>

#### 4.4.2. Analyse stratégique

L'analyse stratégique nous invite à tenir compte du contexte concurrentiel ce qui va notamment remettre en cause les dates optimales privées et les dates socialement optimales.

Dans le contexte observé de la lente adoption des technologies CSC par l'industrie cimentière, nous faisons l'hypothèse d'un comportement de procrastination de l'ensemble de l'industrie, nous retenons 2050 pour la première date, date prévue pour l'atteinte de la neutralité carbone. Pour ce qui est de la date socialement optimale nous retenons 2035 comme date cible raisonnable pour une seconde phase de mise en œuvre de la CSC une fois lancés les projets déjà financés. Les hypothèses de prix CO<sub>2</sub> sont celles retenues dans la section 2, soit respectivement de 168€/t CO<sub>2</sub> en 2035 et de 300€/t CO<sub>2</sub> en 2050, en ligne avec une valeur retenue de 110€/t CO<sub>2</sub> en 2024 avec un taux de croissance de 3,92 % par an.

Nous construisons 2 scénarios ; dans le scénario 1 (procrastination) tous les projets identifiés mais non financés en 2026 adoptent la CSC en 2050 et dans le scénario 2 (socialement optimal) tous les projets identifiés mais non financés en 2026 adoptent la CSC en 2035. Le logiciel SVA nous permet d'obtenir les couts rendus, le nombre d'acteur, les prix et les parts de marché sur chacun des marché et donc les EBITDA pour chaque projet et pour les deux scénarios 2035 et 2050 considérés, comme relevant de la modélisation de la concurrence statique de la classe d'usines considérée dans son environnement concurrentiel propre ; dans cette mise en œuvre nous tenons compte de la totalité des autres usines, celles pour lesquelles la CSC est adoptée (19 projets) car déjà financée en 2035 et que nous considérons comme opérationnelles en 2035, et celles que nous avons identifiées comme non retenues pour cette adoption (~200 usines) mais qui participent néanmoins à la dynamique concurrentielle.

#### **Analyse des dynamiques concurrentielles locales de prix/volume en fonction des classes d'usines.**

L'analyse des résultats des deux scénarios donnés en Table 7 illustre l'importance de la prise en compte des dynamiques concurrentielles les calculs d'EBITDA.

Table 7 Les résultats SVA en 2035 et 2050 des deux scénarios

(Source: SIRAH, SVA analysis)

		Résultats pour les deux scénarios									
		EBITDA (€/t)	prix de vente rendu (€/t)	Taux utilisation (%)	coût variable (€/t)	coût variable hors CO2 (€/t)	coût fixed / ventes (€/t)	coût fixe / capacité (€/t)	coût de transport (€/t)	taux émissions (kgCO2/t)	
Scenario 1 19 projets financés	2035	Classe 1	45	199	70%	115	35	12	9	28	476
		Classe 2	37	188	70%	118	44	16	11	18	438
		Classe 3	45	201	80%	122	52	10	8	25	416
	2050	Classe 1	37	251	70%	177	98	12	9	26	474
		Classe 2	32	242	70%	175	101	15	11	19	441
		Classe 3	37	249	80%	176	107	11	8	23	415
Scenario 2 +19 projets non financés	2035	Classe 1	42	176	100%	105	96	8	8	20	57
		Classe 2	30	186	100%	123	102	13	13	20	126
		Classe 3	36	207	80%	130	98	11	9	28	194
	2050	Classe 1	76	213	100%	113	103	7	7	16	57
		Classe 2	59	226	100%	139	118	11	11	17	125
		Classe 3	51	235	100%	154	124	8	8	22	177

Si on raisonnait seulement en coûts, une baisse en 2035 à la suite de l'adoption de la CSC (par exemple pour la classe 1 le coût complet passe de  $156 = 115 + 12 + 28$  à  $134 = 105 + 8 + 20$ , soit une baisse de  $22\text{€}/\text{t}$ ) devrait se traduire par une augmentation correspondante de l'EBITDA, ce qui n'est pas le cas (l'EBITDA en fait baisse de  $45 - 42 = 3\text{€}/\text{t}$ ). Ainsi, le déclenchement des projets du scénario 2 fait baisser l'EBITDA/t pour l'ensemble des classes (investissement trop précoce par rapport à la date optimale privée et accentuation de la concurrence). La tendance s'inverse en 2050 avec l'augmentation des prix du CO2

Au-delà de l'analyse en coûts, les comportements concurrentiels sont donc essentiels pour comprendre les impacts financiers résultants de l'adoption de la CSC qui diffèrent fortement en fonction de la compétitivité relatives des usines. En effet, grâce à la baisse des coûts les projets déclenchent une baisse de leurs prix (des 2035 pour la classe 1) pour augmenter significativement leurs ventes en saturant leurs capacités tout en favorisant leur marché local au détriment des usines sans projet CSC

- Les usines des classe 1 apparaissent comme les projets CSC les plus efficaces en coût variable ( $105 - 123 = -18\text{€}/\text{t}$  vs. Classe 2 en 2035, et  $113 - 139 = -26\text{€}/\text{t}$  en 2050) ce qui leur permet de choisir de baisser leur prix ( $176 - 199 = -23\text{€}/\text{t}$  en 2035,  $213 - 251 = -38\text{€}/\text{t}$  en 2050) pour augmenter significativement leurs ventes en saturant leurs capacités (100% vs 70%) tout en favorisant leur marché local ( $20 - 28 = -8\text{€}/\text{t}$  de coûts de transport en 2035 et  $16 - 26 = -10\text{€}/\text{t}$  en 2050), au détriment des usines sans projet CSC, leur permettant l'obtention d'un EBITDA/t supérieur ( $42 - 30 = +12\text{€}/\text{t}$  vs. Classe 2 en 2035,  $76 - 59 = +17\text{€}/\text{t}$  en 2050).
- Les usines de classe 2 augmentent également leurs ventes néanmoins la baisse de prix nécessaire est plus faible et les marchés plus distants.
- Les usines de classe 3 ont des niveaux de coûts plus élevés qui ne leur permettent pas de prétendre à des ventes supplémentaires vis-à-vis des usines sans projet CSC, elles privilégient donc le niveau des prix en favorisant également des ventes distantes.

#### Analyse des taux de subvention en fonction de la démarche retenue sur les données SVA.

Pour calculer la subvention nécessaire pour avancer de 2050 à 2035 la date d'adoption nous faisons une hypothèse d'évolution linéaire des EBITDA sur la période 2035-2050 et en déduisons le taux de subvention du CAPEX pour annuler l'écart des valeurs actualisées entre les deux scénarios après prise en compte de l'investissement à la date correspondante. Les résultats sont regroupés dans la Table 8. Pour mettre en évidence

l'impact de la prise en compte du contexte concurrentiel nous faisons figurer sur cette table les taux de subvention de l'analyse traditionnelle de la Table 7 ainsi que l'analyse stylisée de la Table 4.

Table 8 Les taux de subvention en fonction de la démarche retenue

Subventions	Approche traditionnelle	Modèle stylisé			Modèle SVA	
		2	3	4	Taux de marge	Subvention
Nombre d'acteurs	Subvention	2	3	4	Taux de marge	Subvention
Projets classe 1	<b>39%</b>	<b>31%</b>	40%	52%	36%	<b>29%</b>
Projets classe 2	<b>95%</b>	25%	<b>41%</b>	NA	26%	<b>50%</b>
Projets classe 3	<b>96%</b>	29%	47%	<b>62%</b>	22%	<b>65%</b>

Même si la hiérarchie des taux reste qualitativement respectée, on peut noter des différences sensibles entre les valeurs des taux de subvention de chaque classe, qui sont dues à des différences de contexte concurrentiel et des choix des dates optimales d'un point de vue privée et publics. Bien entendu ces différences rendent ces taux délicats à comparer entre eux, nous pouvons néanmoins proposer l'interprétation suivante.

L'analyse traditionnelle conduit à un niveau de subvention de 39% pour les meilleurs projets qui est cohérent avec l'analyse stylisée en trio-pole et proche de la réalité des taux historiquement octroyées (42%). Néanmoins elle requerrait des niveaux de subventions proches de 100% concernant les projets moins efficaces ce qui les disqualifie sans doute.

A l'inverse la prise en compte des dynamiques concurrentielles locales via la modélisation SVA aboutit à des niveaux de subventions moins différenciés entre classes avec 29% pour les meilleurs projets et de 50-65% pour les moins efficaces plaidant pour des politiques de subventions plus équilibrées entre projets candidats.

## 5. Conclusion

Cette note met l'accent sur les aspects méthodologiques lorsqu'on introduit les enjeux concurrentiels dans l'analyse coût bénéfice, d'une part, en mobilisant la théorie de jeux sur un modèle stylisé pour définir l'impact sur les prix et volumes à la suite de l'adoption d'un investissement de rupture fortement capitalistique, et d'autre part, en en déclinant les conséquences concrètes à travers une modélisation opérationnelle de la concurrence cimentière en Europe.

On montre notamment que les niveaux de subvention sont du même ordre de grandeur que ceux constatés lors de la première vague de financement, et donc compatibles avec les contraintes réglementaires en vigueur, alors que ceux qui résulteraient d'une analyse coût bénéfice traditionnelle basée sur le coût d'abattement conduiraient à ne financer qu'un tiers des projets. On montre ainsi que le taux de subvention optimal doit être différencié selon la structure concurrentielle locale, et non uniformément fixé comme le suggère l'analyse coût-bénéfice traditionnelle

Il conviendrait de poursuivre l'analyse opérationnelle en introduisant plusieurs facteurs importants dans la stratégie des entreprises du secteur cimentier <sup>xii</sup>:

- L'incertitude sur le prix du carbone sur le marché ETS du CO<sub>2</sub> : Le déclenchement des décisions d'adoption des technologie CSC dépendent évidemment de l'anticipation des projections d'évolution du prix du CO<sub>2</sub>. ; Prix qui fluctuent en fonction du marché mais aussi en fonction des décisions européennes en termes de politiques environnementales ; La mise en place de contrat carbone par différence pourrait limiter cette incertitude.
- L'incertitude réglementaire sur l'EU-ETS : Malgré un durcissement réglementaire bien engagé (CBAM à partir de 2026, abaissement du niveau d'émission de référence, extinction graduelle des quotas gratuits

jusqu'en 2034) de récentes informations laissent penser que la fin des quotas gratuits pourrait être décalée.

- L'incertitude industrielle : Les projets cumulent des technologies récentes peu éprouvées : nouveau four oxyfuel, unité de séparation d'oxygène, purification cryogénique, forte demande électrique, récupération de chaleur...
- Les enjeux de logistique : La dépendance au réseau de transport de CO<sub>2</sub> hors site vers un hub ou un stockage offshore apparaît délicate à sécuriser (en termes industriels et contractuels) ; Quant aux capacités d'injection / séquestration, elles restent encore mal connues.
- La possibilité de bénéficier d'une prime pour la commercialisation du ciment décarboné ; Les propensions des clients à adopter le produit relativement aux réglementations / incitations associées demeurent des inconnues.
- L'acceptabilité sociale de la CSC au titre de la transition énergétique.

## Références

- ADEME, 2021. PLAN DE TRANSITION SECTORIEL DE L'INDUSTRIE CIMENTIÈRE EN France, <https://bibliothèque.ademe.fr/energies/5041-plan-de-transition-sectoriel-de-l-industrie-cimentiere-en-france-9791029718212.html>
- Caron, C., 2004. Contributions de l'économie industrielle à la stratégie d'entreprise : Le cas des industries de commodité, *thèse de doctorat, Ecole Polytechnique*. <https://theses.hal.science/pastel-00001198/>
- Criqui, P., 2021. Les coûts d'abattement. Partie 1 – Méthodologie *France Stratégie*
- France Stratégie. 2023. Les coûts d'abattement. Partie 6 – Ciment : Commission présidée par Patrick Criqui [Note de synthèse, 58 pages]. *France Stratégie*. Mai.
- Fudenberg, D., and Tirole, J., 1985. Preemption and Rent Equalization in the Adoption of New Technology. *The Review of Economic Studies* 52, 383. doi:10.2307/2297660.
- Hoarau, Q. and Ponssard, J.-P., 2025. Imperfect Competition and the Adoption of Clean Technology: The Case of CSC in Cement. *Working paper* [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=5506619](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5506619)
- Meunier, G., et Ponssard, J.-P., 2024. Du bon usage du coût d'abattement dans le contexte de la neutralité carbone en 2050 : principes et application à la mobilité, *Revue de l'Energie*, N° 670, Janvier-Février.
- Quinet, A., 2025. La valeur de l'action pour le climat Une référence pour évaluer et agir, *France Stratégie*.
- Reinganum, J.F., 1981. Market Structure and the Diffusion of New Technology. *The Bell Journal of Economics* 12, 618. URL: <https://www.jstor.org/stable/3003576?origin=crossref>, doi:10.2307/3003576.
- Schelling, Th., 1960, *The Strategy of Conflict*. Harvard University Press
- World Economic Forum, 2023. Net-zero industry tracker, insight report. URL: [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Net\\_Zero\\_Tracker\\_2023\\_REPORT.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Net_Zero_Tracker_2023_REPORT.pdf).

## ANNEXE

### Analyse théorique du modèle stylisé

Adoptons les notations suivantes, sachant que notre modèle est en temps continu, commence à la date 0 et se poursuit jusqu'à l'infini :

- Le coût fixe de l'investissement de rupture est noté  $F$  ;
- Le taux d'intérêt est noté  $r$ , l'équivalent annuel de l'investissement  $F$  est donc  $f=rF$  ;
- Le coût unitaire de la technologie carbonée (*dirty*) est linéaire de la forme  $d(t)=d_0+d_1SCC(t)$  où  $d_0$  est le coût hors émissions,  $d_1$  le taux d'émissions, et  $SCC(t)$  la valeur carbone supposée croissante avec la date  $t$ ,  $SCC(t) = SCC(0)e^{it}$  où  $i$  est le taux d'intérêt social ;
- Le coût unitaire de la technologie décarbonée (*clean*) est constant et noté  $c$  ;
- Notons  $k=0, 1, 2$  le nombre de firmes qui utilisent la technologie clean ;
- $\pi_c(k;t)$  correspond au cash-flow annuel pour une firme utilisant la technologie clean alors que  $2-k$  firme(s) utilise(nt) la technologie dirty (sans inclure l'équivalent annuel du coût d'investissement dès que la technologie de rupture est faite) ;
- $\pi_d(k;t)$  correspond au cash-flow annuel pour une firme utilisant la technologie dirty alors que  $2-k$  firme(s) utilise(nt) la technologie clean ;
- $t_1$  et  $t_2$ , avec  $t_1 \leq t_2$ , sont les dates d'adoption de la technologie clean pour chaque firme.
- $II_1(t_1, t_2)$  et  $II_2(t_1, t_2)$  correspondent aux valeurs actualisées des cash flows de la date 0 à l'infini respectivement pour chaque firme, en incluant cette fois le coût annualisé de l'investissement après adoption, soit

$$II_1(t_1, t_2) = \int_0^{t_1} \pi_d(0;t) e^{-rt} dt + \int_{t_1}^{t_2} (\pi_c(1;t) - f) e^{-rt} dt + \int_{t_2}^{\infty} (\pi_c(2;t) - f) e^{-rt} dt$$

$$II_2(t_1, t_2) = \int_0^{t_1} \pi_d(0;t) e^{-rt} dt + \int_{t_1}^{t_2} (\pi_d(1;t) - f) e^{-rt} dt + \int_{t_2}^{\infty} (\pi_c(2;t) - f) e^{-rt} dt$$

Notre hypothèse de concurrence à la Cournot permet d'écrire :

$$\pi_c(0;t) = 0 ; \pi_c(1;t) = (a+d(t)-2c)^2/9b ; \pi_c(2;t) = (a-c)^2/9b$$

$$\pi_d(0;t) = (a-d(t))^2/9b ; \pi_d(1;t) = (a+c-2d(t))^2/9b ; \pi_d(2;t) = 0$$

Une remarque très importante va nous permettre de caractériser les équilibres de Nash. Supposons que la trajectoire d'adoption  $(t_1, t_2)$  puisse être générée par des stratégies d'équilibre que nous préciserons plus tard : cela veut dire que si  $t_1$  est fixé alors la firme 2 va sélectionner une stratégie qui générera  $t_2$  pour sa date d'adoption. Mais si  $II_1(t_1, t_2)$  est supérieur à  $II_2(t_1, t_2)$  la firme 2 a tout intérêt à sélectionner une stratégie d'escalade en adoptant juste avant  $t_1$ , la firme 1 ayant alors intérêt à adopter en  $t_2$  !! La trajectoire  $(t_1, t_2)$  ne peut pas être obtenue par un équilibre de Nash.

**Résultat 1 :** Pour qu'une trajectoire de transition  $(t_1, t_2)$  soit générée par un équilibre de Nash il est nécessaire que les valeurs actualisées  $II_1(t_1, t_2)$  et  $II_2(t_1, t_2)$  soient égales.

Il existe deux manières d'obtenir une trajectoire d'équilibre : soit les deux firmes adoptent à la même date ( $t_1 = t_2 = t^P$  avec  $P$  pour *procrastination*), soit elles adoptent en séquence ( $t_1 = t^{E_1} < t_2 = t^{E_2}$  avec  $E$  pour *escalade*). Une autre trajectoire nous sera utile : elle correspond à un comportement non stratégique dans lequel la firme  $i$  fait un calcul d'optimisation myope non stratégique maximisant  $II_i(t_i, t_j)$  avec  $t_j$  fixé ; notons ( $t_1 = t^{M_1} > t_2 = t^{M_2}$  avec  $M$  pour *myope*) les deux dates ainsi obtenues.

Les dates ( $t^P$ ) et ( $t^{M_1}, t^{M_2}$ ) s'obtiennent facilement en annulant les dérivées des valeurs actualisées des cash flows correspondants, c'est-à-dire aux dates où le cash-flow marginal pour adopter devient nul. Par exemple :

$$\delta II_1(t_1, t_2) / \delta t_1 = \pi_d(0;t_1) e^{-rt_1} - (\pi_c(1;t_1) - f) e^{-rt_1}$$

Après simplification par  $e^{-rt_1}$ , on obtient :

**Résultat 2 :** Les dates d'adoption myope sont les solutions respectivement pour ( $t^{M_1}, t^{M_2}$ ) de

$$\pi_d(0;t) = \pi_c(1;t) - f$$

$$\pi_d(1;t) = \pi_c(2;t) - f$$

**Résultat 3 :** Par un raisonnement similaire, la date d'adoption de procrastination  $t^p$  est la solution de

$$\pi_d(0;t) = \pi_c(2;t) - f$$

Pour ce qui est des dates  $(t^{E_1}, t^{E_2})$  on peut déjà noter que  $(t^{E_2} = t^{M_2})$  puisque  $t^{M_2}$  est la date optimale lorsque la firme 1 a adopté avant la firme 2. Il est facile de voir que

$$II_1(t^{M_1}, t^{M_2}) > II_2(t^{M_1}, t^{M_2})$$

La trajectoire  $(t^{M_1}, t^{M_2})$  n'est pas une trajectoire d'équilibre. On a donc certainement  $t^{E_1} < t^{M_1}$ , la firme 1 doit avancer sa date d'adoption pour éviter l'escalade. Cette date s'obtient comme la solution de l'équation suivante

$$II_1(t, t^{E_2}) = II_2(t, t^{E_2})$$

En éliminant les valeurs communes dans les expressions des cash flows actualisés on a donc :

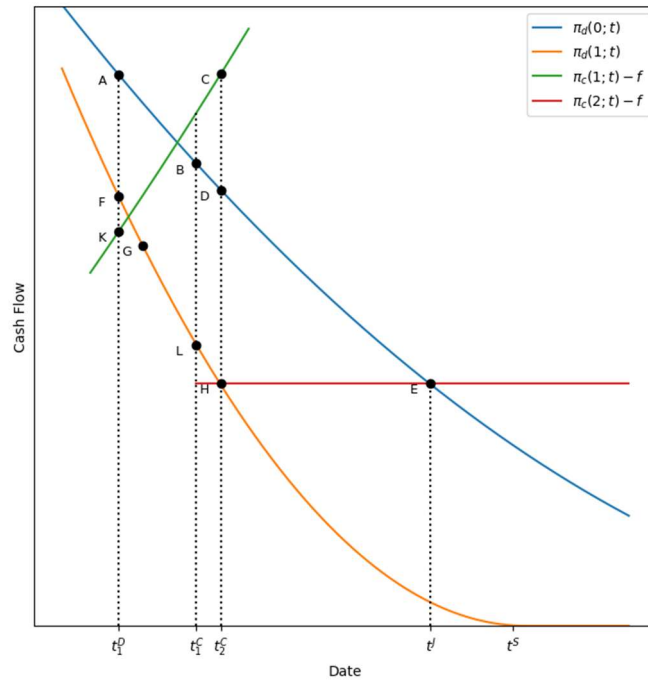
**Résultat 4 :** La date d'adoption  $t^{E_1}$  pour la firme 1 dans la trajectoire d'escalade s'obtient comme solution en  $t$  de l'équation

$$\int_t^{t^{E_2}} (\pi_c(1;u) - f) e^{-ru} du = \int_t^{t^{E_2}} \pi_d(1;u) e^{-ru} du$$

La Figure 1 visualise ces résultats. Reprenons chaque étape du raisonnement :

- ✓ La courbe ABDE représente le cash-flow d'une firme lorsqu'aucune firme n'a adopté la technologie clean.
- ✓ La courbe FGLH représente le cash-flow d'une firme dirty lorsque la firme concurrente a adopté la technologie clean
- ✓ La courbe KC représente le cash-flow d'une firme clean lorsque la firme concurrente a adopté la technologie dirty
- ✓ La droite HE représente le cash-flow d'une firme clean lorsque les deux firmes ont adopté la technologie clean, cash-flow qui en effet ne dépend donc pas de  $t$
- ✓ L'abscisse du point B correspond à la date  $t^{M_1}$ , date à laquelle le coût marginal d'adoption pour la firme 1 est nul :  $\pi_d(0;t) = \pi_c(1;t) - f$
- ✓ L'abscisse du point H correspond à la date  $t^{M_2}$ , date à laquelle le coût marginal d'adoption pour la firme 2 est nul, sachant que son concurrent a déjà adopté :  $\pi_d(1;t) = \pi_c(2;t) - f$
- ✓ L'abscisse du point E correspond à la date  $t^p$ , date à laquelle le coût marginal d'adoption pour la firme 1 ou la firme 2 est nul sachant que son concurrent adopte à la même date:  $\pi_d(0;t) = \pi_c(2;t) - f$
- ✓ L'abscisse des points AFK correspond à la date  $t^{E_1}$ , date à laquelle la valeur actualisée du cash-flow  $(\pi_c(1;t) - f)$  du point K au point C est égale à la valeur actualisée du cash-flow  $\pi_d(1;t)$  du point F au point H.
- ✓ L'abscisse  $t^s$  sur l'axe horizontal correspond à la date à laquelle la firme 2 dirty a intérêt à sortir du marché (son cash-flow devient nul) lorsqu'elle fait face à un concurrent clean.

Figure 1 Les cash flows en fonction des technologies adoptées par chaque firme



Il reste à démontrer que les trajectoires potentielles d'équilibre que nous avons identifiées peuvent être générées par des équilibres de Nash. Cette question est étudiée dans l'annexe 2. Nous poursuivons notre présentation informelle. Une observation préliminaire s'impose. Le coût fixe  $F$  peut être suffisamment élevé pour remettre en cause la structure de marché initiale : il existe en effet une valeur limite  $F^*$  (ou  $f^* = rF^*$ ) telle qu'un duopole ne soit pas viable sur le long terme, cette valeur s'obtient par

$$f^* = \pi_c(2; t) = (a-c)^2/9b$$

Si  $f > f^*$ , il existe une date  $t^s$  à laquelle la firme 2 va sortir du marché (voir Figure 1), cette date correspond à la solution de l'équation :

$$\pi_d(1; t) = (a+c-2d(t))^2/9b = 0$$

Dans ce cas, la trajectoire  $(t^{E_1}, t^{E_2})$  est telle que  $t^{E_2} = t^s$ , et le résultat 4 doit être revu en conséquence. Quant à la trajectoire de procrastination  $t^p$  elle est tout simplement irréalisable.

**Résultat 5 :** Lorsque les équilibres co-existent on peut s'attendre à ce que l'équilibre de procrastination soit retenu car il donne un cash-flow actualisé plus élevé que le cash-flow de l'équilibre d'escalade. On a alors :

$$t^{E_1} < t^{E_2} < t^p$$

$$\Pi_1(t^{E_1}, t^{E_2}) = \Pi_2(t^{E_1}, t^{E_2}) < \Pi_1(t^p, t^p) = \Pi_2(t^p, t^p)$$

Tous ces résultats se généralisent lorsqu'on passe de 2 firmes à  $n > 2$  firmes.

### Les équilibres de Nash

Considérons d'abord la trajectoire d'escalade  $(t^{E_1}, t^{E_2})$ . Les stratégies d'équilibre sont les suivantes <sup>xiii</sup> :

- ✓ Pour chaque firme
  - Si le concurrent a adopté avant la date  $t^{E_1}$ , adopter à la date  $t^{E_2}$

Par construction de la date  $t^{E_1}$  le concurrent n'a pas intérêt à adopter à  $t < t^{E_1}$ , la trajectoire  $(t < t^{E_1}, t^{E_2})$  génère un cash-flow actualisé inférieur ;

- Si le concurrent n'a pas adopté avant la date  $t^{E_1}$ , adopter à la date  $t^{E_1}$

La réponse optimale de la firme 2 est bien  $t^E_2$ .

Considérons maintenant la trajectoire de procrastination  $t^P$ . Les stratégies d'équilibre sont les suivantes :

- ✓ Pour chaque firme
  - Si le concurrent a adopté avant la date  $t_1 < t^{M_2}$ , adopter à la date  $t^{M_2}$
  - Si le concurrent a adopté à la date  $t^{M_2} < t_1 < t^P$ , adopter à la date  $t_1$
  - Si le concurrent n'a pas adopté avant la date  $t^P$ , adopter à la date  $t^P$ .

Il est facile de voir qu'après l'une de ces déviations du concurrent la stratégie proposée est bien une meilleure réponse. Mais il faut encore vérifier que le cash-flow actualisé de la firme qui dévie est inférieure à son cash-flow de départ. Si le concurrent adopte après  $t^P$  alors il se pénalise lui-même mais ce n'est pas forcément le cas pour des déviations avant  $t^{M_2}$ . Cette déviation serait obligatoirement suivie par une adoption à la date  $t^{M_2}$ . Pour la trajectoire jointe soit stable il faut donc que l'inégalité suivante soit vérifiée :

$$II_1(t^{M_1}, t^{M_2}) < II_1(t^P, t^P)$$

Cette condition ne peut pas être explorée analytiquement mais une analyse numérique montre que l'inégalité est toujours satisfaite sauf lorsque  $f$  est inférieur et très proche de  $f^*$ .

En résumé, si  $f < f^*$ , il existe deux équilibres de Nash, celui qui génère l'adoption avec procrastination donne un paiement plus élevé que celui qui génère une adoption avec escalade, c'est un point focal. Si  $f > f^*$ , seul l'équilibre d'escalade existe.

## Les auteurs

Christophe Caron est Président Fondateur de SIRAH-Consulting, société de conseil spécialisée dans les analyses stratégiques des industries de commodités.

Jean-Pierre Ponssard est Directeur de recherche émérite au CNRS (UMR CREST ENSAE-Ecole Polytechnique). Il a créé la chaire Energie et Prospérité en 2015.

---

<sup>i</sup> Cette note a bénéficié du soutien financier de la chaire Energie et Prospérité de la Fondation du Risque et du contrat ADEME APR 25ESD0492. Les auteurs remercient Alberto Gil-Moral et Maryam Sadighi pour leur assistance dans les analyses stratégiques et opérationnelles du secteur cimentier.

<sup>ii</sup> <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/les-aides-la-decarbonation-de-lindustrie-du-plan-de-relance-et-de-france-2030>

<sup>iii</sup> Cette note s'inscrit dans la suite des réflexions initiées dans Meunier et Ponssard (2024). Elle reprend les présentations des auteurs lors du séminaire du 23 juin 2026 organisée par la Chaire Energie et Prospérité sur le thème « Quelle politique publique pour la décarbonation des sites industriels par un investissement de rupture ? Réflexions à partir du cas du captage et stockage du carbone dans l'industrie cimentière ».

<sup>iv</sup> L'analyse stratégique du modèle stylisé est présentée en détail dans Hoarau et Ponssard (2025). Si les résultats théoriques sur lesquels s'appuie cette note sont développés de manière formelle dans Hoarau et Ponssard (2025), la présente contribution s'en distingue sur trois points. Premièrement, elle traduit ces résultats en termes accessibles aux décideurs, en privilégiant les implications concrètes sur les niveaux de subvention plutôt que la démonstration mathématique. Deuxièmement, elle mobilise des données réalistes sur les 38 projets CSC identifiés en Europe en 2026, permettant de confronter le modèle stylisé à la réalité industrielle. Troisièmement, elle tire de cette analyse des recommandations opérationnelles.

<sup>v</sup> Cette valeur est calculée à partir d'une valeur de l'ordre de 140€/tCO<sub>2</sub> en 2030 telle que prévue dans 2030 EUA Price Predictions: Expert Analysis of 3 Scenarios <https://www.homaio.com/post/2030-eua-price-predictions-expert-analysis-of-3-scenarios>

<sup>vi</sup> L'hypothèse de croissance du SCC au taux d'actualisation social découle de la règle d'Hotelling : à l'optimum, le prix du carbone doit croître au taux d'intérêt social pour assurer l'indifférence intertemporelle entre abattre aujourd'hui ou demain (Quinet, 2025). Ce choix assure également la cohérence interne du modèle et se distingue volontairement des prix spot EU-ETS, trop volatils et distordus par les quotas gratuits pour servir de référence normative à des investissements de long terme. Noter que la valeur de l'action climat préconisée dans ce rapport pour 2024 est de l'ordre de 250 €/tCO<sub>2</sub> soit bien supérieure aux estimations retenues dans notre analyse.

<sup>vii</sup> Dans cette formule, on pourrait aussi introduire une distorsion entre les projections publiques et privées du prix du carbone, distinction non prise en compte dans cette note.

<sup>viii</sup> Le lecteur intéressé trouvera en annexe l'analyse théorique du modèle stylisé.

<sup>ix</sup> Par construction, les profits actualisés associés aux premières et dernières adoptions sont strictement égaux, pour éviter toute préemption par la dernière firme à adopter.

<sup>x</sup> Le logiciel SVA (Strategic Value Analysis) est mobilisé par le cabinet de conseil SIRAH-Consulting afin d'alimenter des réflexions lors de prise de décisions stratégiques (cibles de prix et de parts de marchés, augmentation de capacité, amélioration des coûts de

---

production, nouvelle usine, restructuration, fermeture, acquisition, ...) en tenant compte des réactions concurrentielles et de tester leur robustesse dans différents scénarios d'évolution du contexte de marché.

<sup>xi</sup> Cf. détails dans Caron (2004).

<sup>xii</sup> Le lecteur intéressé pourra se reporter au compte rendu de la Table Ronde du séminaire du 23 juin 2023 disponible sur le site de la chaire. Cette table ronde était présidée par Vincent Mages avec la participation de Nicolas Berghmans, Alienor Cameron, Patrick Criqui et Laure Héléard.

<sup>xiii</sup> Techniquement il peut y avoir une double adoption à la date  $tD1$ , si les deux firmes considèrent qu'elles sont la première à adopter ; il faudrait introduire des stratégies probabilisées ; nous laissons ce point de côté en supposant qu'il existe une légère asymétrie entre les deux firmes de telle sorte qu'un ordre naturel s'impose.