

Pour un financement conditionnel des projets risqués bas carbone

Guy Meunier, Jean-Pierre Ponsard

Une critique récurrente des subventions aux technologies propres (énergies renouvelables, solaire, mécanismes de développement propre, voiture électrique...) est l'existence d'effets d'aubaine : des investissements bénéficient de subventions dont ils n'ont pas besoin pour être rentables. Dans une situation de rareté des fonds publics, ces effets d'aubaine limitent les innovations vertes par euros dépensés. Cet article formalise ce type de situation comme la sélection d'un portefeuille de projets par l'État dans un contexte d'asymétrie d'information et de fonds publics coûteux. Il montre qu'une forme de garantie du financement, avec remboursement en cas de succès, permet de limiter les effets d'aubaine et les dépenses publiques tout en maximisant le bénéfice social en termes de réduction des émissions.

1. L'idée de départ

Le défi du changement climatique ne pourra pas être relevé sans un effort important sur le plan technologique. Les programmes de recherche correspondants s'inscrivent le plus souvent dans un horizon de plusieurs dizaines d'années. À cet horizon les mécanismes d'incitation sous la forme de marchés carbone, lorsqu'ils existent, sont inopérants : l'Union européenne n'a pas encore défini les règles de l'EU-ETS (*European Union Emission Trading Scheme*) à l'horizon 2020, l'expérience du SO₂ aux États Unis montre que l'État pouvait revenir sur une régulation préalablement définie,

les annonces faites lors de la COP 21 n'ont pas débouché sur un prix du carbone. L'impossibilité pour l'État à s'engager sur un prix du carbone à long terme constitue un frein pour l'investissement dans les technologies non carbonées.

Il existe certes d'autres formes d'incitation. L'État peut accorder des aides à la R&D (capture du carbone), subventionner la production d'énergies non carbonées (photovoltaïque ou éolien). La multiplication de ces aides sectorielles peut légitimement susciter un débat sur le gaspillage qu'elles peuvent engendrer. Il existe en effet de nombreuses situations dans lesquelles l'État est encouragé à apporter sa participation sans qu'il soit facile d'opérer une sélection entre les projets nécessitant vraiment un support public et les projets intrinsèquement rentables. Le contexte des crédits carbone accordés dans le cadre des mécanismes de développement propres (CDM – *Clean Development Mechanism*) en fournit un bon exemple [Gillenwater et Seres, 2011]. Le financement était accordé à tout projet dont

Nous remercions Pierre Boyer, François Larmande, Christian de Perthuis, Philippe Quirion ainsi que les participants à l'atelier Déclinaison sectorielle des scénarios de transition : application au secteur de la mobilité, 16 septembre 2015, Paris, au workshop on CO₂ pricing and sectoral complementary policies, April 18, 2016, CIRANO, Montréal, Québec (Canada), et au Friday Lunch Meeting, Chaire Économie du Climat, Paris 1^{er} Juillet 2016 pour leurs commentaires et suggestions. Cet article a été partiellement financé par la chaire Énergie et Prospérité et par l'ANR/ Investissements d'avenir (ANR -11- IDEX-0003-02).

on pouvait démontrer *ex ante* que l'attribution de crédits carbone permettrait d'obtenir une rentabilité seuil alors que sans financement cette rentabilité ne serait pas obtenue. L'expérience a montré la faiblesse d'une telle procédure facilement manipulable ; de nombreux projets intrinsèquement rentables ont en fait bénéficié d'un tel financement. Les encouragements de certains macro-économistes néo-keynésiens à relancer l'économie européenne en finançant la transition énergétique [Aglietta et al., 2015] laissent à penser que de telles dérives pourraient se multiplier si un certain nombre de précautions n'étaient pas mises en œuvre.

L'idée de cet article est de démontrer l'intérêt d'un mécanisme de subvention contingent propre à minimiser ces effets pervers. Schématiquement, il s'agit de reconnaître la part d'incertitude à la plupart de ces investissements, d'en encourager le plus possible par une aide remboursable finançant seulement une fraction de l'investissement, le remboursement n'ayant lieu qu'en cas de succès du projet. Nous supposons explicitement que le porteur de projet est mieux informé que l'État sur les conditions de succès. L'aide reste acquise en cas d'échec mais pas en cas de succès. Cette idée peut paraître paradoxale, surtout si l'aide est gagée sur les émissions évitées en cas de succès. Mais, d'une part, en ne finançant qu'une partie de l'investissement, on responsabilise le porteur du projet et on évite de financer des projets ayant une faible probabilité de réussite. Et, d'autre part, en demandant un remboursement en cas de succès, on limite l'effet d'aubaine, les projets déjà intrinsèquement rentables n'ayant pas besoin de la subvention pour être mis en œuvre. L'existence d'asymétrie d'information entre l'État et les industriels est au cœur de notre réflexion. Il existe de nombreux travaux économiques sur l'asymétrie d'information qui relèvent de la théorie générale des contrats. Pour une application au contexte des CDM voir [Fischer, 2005].

Le mécanisme proposé s'apparente à la pratique de l'avance remboursable. Cette pratique a été historiquement introduite pour les programmes aéronautiques. Elle répond alors au

besoin élevé de financement des industriels et constitue une forme de partage de risque. Elle s'est aussi substituée à une pratique de subventions pures et simples susceptible d'être contestée au regard des lois du commerce international. L'introduction progressive des avances remboursables dans le programme investissements d'avenir piloté par l'Ademe relève de la même logique. À notre connaissance, l'analyse économique de ce mécanisme en tant que réponse aux problèmes d'asymétrie d'information n'a pas encore été explorée.

Notre intérêt pour le sujet vient d'une proposition faite à propos du financement des coûts d'infrastructure pour le déploiement des véhicules à hydrogène (mécanisme eTICC, pour *Energy Transition Infrastructures with Carbon reduction Certificates*). Les véhicules électriques à batterie (BEV, *Battery Electric Vehicles*) et à hydrogène (FCEV, *Fuel Cell Electric Vehicles*) joueront en effet un rôle important dans le secteur des transports pour réduire les émissions associées aux véhicules à combustion interne d'énergie fossile [Harrison, 2014]. Or, sans infrastructure, pas de vente possible de véhicules propres ; sans vente de véhicules propres, pas besoin d'infrastructure. La rentabilité effective des projets d'infrastructure est difficile à évaluer, puisqu'elle dépend de la vitesse de mise sur le marché des véhicules qui elle-même dépend de la mise en place de la politique climatique de l'État. D'où l'idée de recourir à la pratique de l'avance remboursable. Pour une présentation détaillée du mécanisme eTICC voir [Laffitte et al., 2015].

Par ailleurs, nous n'analysons pas le coût public de la transaction d'une avance remboursable. La mise en place et le versement initial est plus complexe que celui d'une subvention tout en demeurant raisonnable. La vérification du succès, son authentification et le déclenchement des remboursements représentent un coût élevé (recours à une expertise pointue, risque de contestation du succès ou du niveau de succès atteint...).

Cet article pourra apporter un premier éclairage économique pour fonder de telles

pratiques. La formalisation adoptée se fait dans un cadre très stylisé indépendamment de toute une série de questions qui pourraient se poser par ailleurs. Par exemple, dans le cas d'investissement en recherche appliquée sur l'innovation en technologies propres, l'avance remboursable est conçue comme un partage du risque lié à l'innovation elle-même entre le public et le privé. L'État participe ainsi à une stimulation de l'innovation via une politique industrielle offensive avec des prises de risques calculées. Ayant accepté de partager le risque au départ, l'État se rémunère en cas de succès.

Dans le cas de la diffusion d'investissement de technologies propres, l'avance remboursable se construit sur le constat du recours à un surinvestissement initial par rapport à une technologie classique référente tout en bénéficiant ensuite de coûts d'exploitation plus légers auxquels s'ajoutent aussi des bénéfices environnementaux (cela correspond bien à l'illustration donnée en annexe sur le cas des voitures électriques versus carbonées – essence ou diesel).

Il s'agit ici d'apporter les premiers éléments d'analyse économique. Des prolongements explorant ces autres dimensions liées à la pratique des avances remboursables seront poursuivis dans des travaux ultérieurs.

2. Le modèle

Considérons la situation stylisée suivante. Il s'agit de sélectionner certains projets risqués au sein d'un portefeuille $N = (1, 2, \dots, i, \dots, n)$; chaque projet i est caractérisé par quatre paramètres :

- un coût d'investissement F_i
- une date de réalisation du projet T_i
- un revenu R_i privé ($R_i > F_i$) et une externalité sociale b_i seulement en cas de succès, et à aucun revenu ni privé ni social en cas d'échec,
- une distribution de probabilité jointe définissant les aléas des projets.

Dans un premier temps nous nous limitons au cas le plus simple :

- les projets ont les mêmes caractéristiques financières et temporelles (F, T, R, b) ; pour simplifier nous n'introduisons pas de taux d'intérêt entre les périodes ;
- les projets sont indépendants et identiquement distribués ; dénotons par p la probabilité de succès et appelons $G(p)$ la fonction de répartition de p ; à titre d'illustration nous supposons la répartition de p uniforme sur l'intervalle $[0, 1]$.

Il y a deux parties prenantes : l'État et l'entreprise. L'État maximise le bien-être social, l'entreprise son profit. Les paramètres financiers et temporels sont connaissance commune, c'est-à-dire observables et vérifiables. La probabilité de succès d'un projet est une information privée de l'entreprise mais la fonction de distribution $G(p)$ est connaissance commune. Ces hypothèses sont cruciales pour l'analyse. En particulier il convient de souligner que l'État observe l'investissement et son coût F ; en l'absence de cette observation il y aurait un risque d'aléa moral : les entreprises pourraient obtenir la subvention, ne rien faire et donc courir à l'échec, et garder la subvention !

Il existe deux probabilités de succès seuils (voir figure 1). La probabilité p_f telle que si $p > p_f$ l'entreprise entreprend le projet, et la probabilité p_{FB} telle que si $p > p_{FB}$ l'État

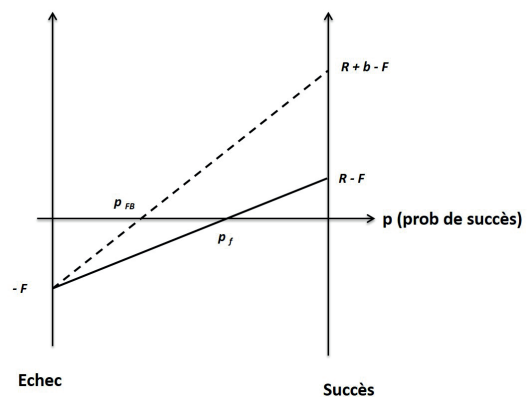


Figure 1. Les probabilités de succès seuils pour l'État et l'entreprise

entreprendrait le projet (optimum social ou *optimum de premier rang*) s'il en connaissait la probabilité de succès. On a :

$$p_f = F/R < p_{FB} = F/(R+b)$$

La question posée est de savoir comment et à quel coût l'État peut se rapprocher de l'optimum social grâce à un mécanisme décentralisé.

Formellement nous supposons que l'État cherche à maximiser le bénéfice social :

$$B = \int_0^1 pb \, d(p)$$

à l'aide d'un mécanisme de subventions (s_1, s_2) où s_1 représente la subvention en cas de succès et s_2 celle en cas d'échec. Le bénéfice social BN net de la subvention s'écrit :

$$BN = \int_0^1 [pb - (s_1p + (1-p)s_2)] \, d(p).$$

Cette formulation fait l'hypothèse que la subvention est coûteuse pour l'État et donc que ce dernier ne peut pas se permettre de redistribution de son coût auprès des agents. Une telle hypothèse est en phase avec les contraintes budgétaires actuelles et les difficultés politiques liées à l'instauration d'une taxe carbone. Noter que dans ces conditions la taxe carbone ne permettrait pas d'obtenir l'optimum de premier rang (voir le cas de la prime unitaire proportionnelle traité dans l'annexe 1).

Connaissant (s_1, s_2) l'entreprise n'entreprend le projet que si

$$-F + pR + s_1p + (1-p)s_2 \geq 0.$$

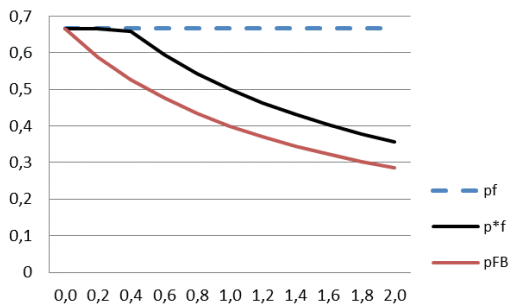


Figure 2. Probabilités seuils en fonction de b

Il est assez simple de montrer que le mécanisme optimal consiste à fixer $s_1 = 0$ et n'utiliser que s_2 , la subvention en cas d'échec. Un tel mécanisme permet de minimiser le montant de subvention nécessaire pour mettre en œuvre des projets $p > p^*$ où p^* est une cible. Les projets mise en œuvre sont moins souvent en situation d'échec que p^* et reçoivent donc moins fréquemment la subvention s_2 et plus fréquemment s_1 . Ainsi, réduire s_1 et augmenter s_2 en laissant p^* indifférent permet de réduire le montant de subvention total.

Le mécanisme que nous souhaitons étudier met en place une subvention uniquement en cas d'échec. Il procède de la manière suivante :

- il apporte une subvention $s_2 = D$ en cas d'échec du projet,
- c'est le fait que $D < F$ qui dissuade les entreprises ayant des projets à faible taux de succès de faire appel au mécanisme d'aide. Ce mécanisme opère une sélection implicite sur le portefeuille de projets.

Dans ces conditions la nouvelle probabilité seuil $p_f(D)$ à partir de laquelle l'entreprise s'engage dans le projet s'écrit :

$$p_f(D) = (F - D) / (R - D)$$

En reportant cette expression dans BN un calcul simple montre que la valeur de $p_f(D)$ qui maximise BN est obtenu pour :

$$p_f^* = (R + F) / 2(R + b)$$

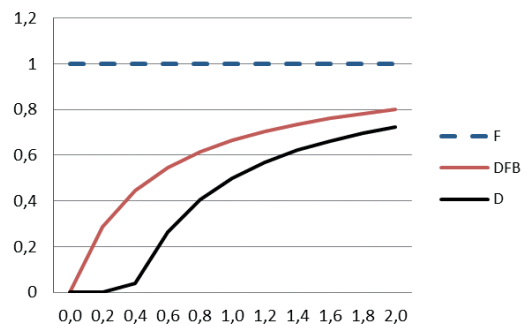


Figure 3. Subventions D en fonction de b

ce qui revient à choisir pour D la valeur

$$D^* = [F(R + 2b) - R^2] / (R + 2b - F)$$

d'où finalement une valeur minimale b^* pour b telle que $b^* = R(R - F)/2F$.

Il est possible d'illustrer le mécanisme de manière graphique avec $F = 1$ et $R = 1,5$, les valeurs de b allant de 0 à 2. On a donc $p_f = 2/3$ et p_{FB} qui décroît de $2/3$ à $0,27$ lorsque b augmente de 0 à 2. La valeur critique b^* est $0,375$. Il faut que b soit supérieur à cette valeur b^* pour que le mécanisme ait un intérêt économique.

La Figure 2 met en évidence la convergence relativement lente de p_f^* vers la probabilité seuil de l'optimum de premier rang p_{FB} lorsque le bénéfice social b augmente. Les projets p tels que $p_{FB} < p < p_f^*$ seront laissés de côté par le mécanisme alors qu'ils sont socialement profitables.

La Figure 3 met également en évidence la convergence relativement lente, lorsque b augmente, de la subvention D^* vers la subvention qui permettrait d'obtenir l'optimum de premier rang D_{FB} . Le fait que $D^* < D_{FB}$ est la contrepartie du fait que $p_{FB} < p_f^*$ d'où le non financement de projets socialement profitables. Noter que

de toute façon D^* reste bien inférieure au coût fixe F . C'est le fait que l'entreprise supporte une part significative du coût d'investissement qui décourage la mise en œuvre de projets à faible probabilité de réussite.

Noter aussi sur ces deux figures l'existence d'un seuil pour le bénéfice social b à partir duquel l'État aura intérêt à mettre en place le mécanisme approximativement $b > 0,37$ pour les valeurs numériques retenues.

3. Interprétation économique du mécanisme optimal

Revenons maintenant à la Figure 1 en faisant apparaître le mécanisme. Nous obtenons la Figure 4 qui nous permettra d'interpréter le mécanisme proposé comme la minimisation de la somme de deux formes d'effets pervers. La mise en place du mécanisme fait passer le profit espéré de l'entreprise de la droite EC à la droite FC (le point E correspond à la probabilité seuil p_f , le point F à la probabilité seuil p_{FB} et le point A à la probabilité seuil p_{FB}).

Cette figure fait apparaître le bilan coût-bénéfice du mécanisme. En l'absence de subvention, le bénéfice social correspond à

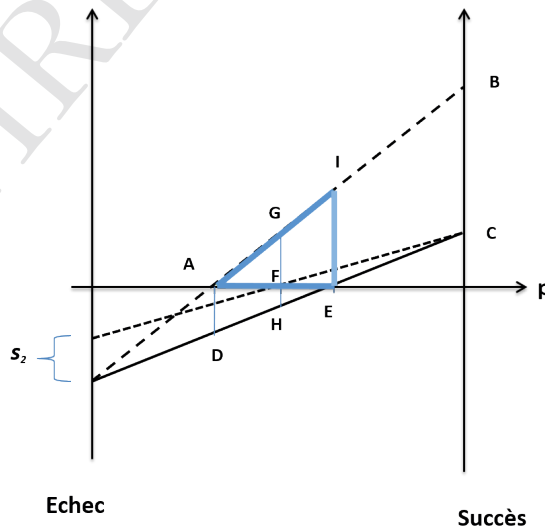


Figure 4. Représentation graphique du mécanisme

l'aire du quadrilatère EIBC : seuls les projets profitables pour l'entreprise sont engagés. L'approche dite de l'optimum de premier rang est intéressante à identifier à titre de *benchmark* (elle n'est pas réalisable par hypothèse du fait de l'absence d'un prix du CO₂ à l'horizon du projet). Elle permettrait d'augmenter le bénéfice brut de l'aire du quadrilatère AIED moins le coût pour l'entreprise égal au triangle AED, soit, en termes de bénéfice net, l'aire correspondant au triangle AIE.

La question est maintenant de savoir comment le mécanisme permet de récupérer une partie de ce bénéfice net en faisant passer le seuil d'acceptabilité des projets pour l'entreprise de p_f à p_f^* .

Le mécanisme génère un bénéfice brut égal au quadrilatère HGIE (au lieu du quadrilatère AIED) mais au prix d'une subvention correspondant à l'aire du triangle FCH. Décomposons cette dernière en deux triangles FCE et FHE. L'aire de HGIE moins l'aire du triangle FHE peut se calculer comme l'aire du triangle AIE moins celle du triangle AFG. En définitive, le bénéfice net dû à ce mécanisme peut se calculer comme $AIE - AFG - FCE$. Il y a donc deux pertes par rapport à l'optimum de premier rang :

- un *biais de sélection* : les projets dont les probabilités de succès sont situées entre A et F ne sont pas engagés alors qu'il serait socialement profitable de le faire ;

- un *effet d'aubaine* pour les projets dont les probabilités de succès sont supérieures à p_f^* et donc pour lesquelles la subvention génère un excédent de profit ; noter que cet excédent diminue avec la probabilité de succès pour les projets intrinsèquement rentables.

La position précise du point F entre A et E arbitre entre ces pertes en en minimisant la somme. Plus le bénéfice social en cas de succès est élevé plus le point F se rapproche de A.

Les Figures 5 et 6 illustrent le bilan social du mécanisme (en valeur absolue et en pourcentage de l'optimum de premier rang). Cette évaluation est quantifiée en identifiant l'origine de la perte en termes d'effet de sélection et d'effet d'aubaine. L'efficacité du mécanisme s'accroît avec la valeur de l'externalité sociale b . Lorsque b augmente, p_f^* se rapproche de p_{FB} si bien que le biais de sélection diminue. L'effet d'aubaine augmente avec b mais, à partir d'une certaine valeur, il diminue en pourcentage du bénéfice associé à l'optimum de premier rang ; il reste donc bien maîtrisé.

Pour conclure cette analyse coût bénéfice il est intéressant de comparer le mécanisme avec l'internalisation pure et simple de l'externalité. Cette option reviendrait ici à attribuer directement des certificats carbone d'une valeur égale à b en cas de succès. On retrouverait certes l'optimum de premier

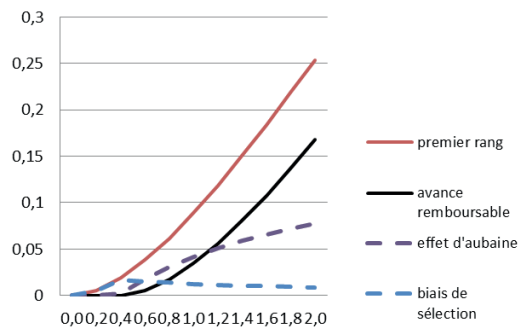


Figure 5. Bilan social

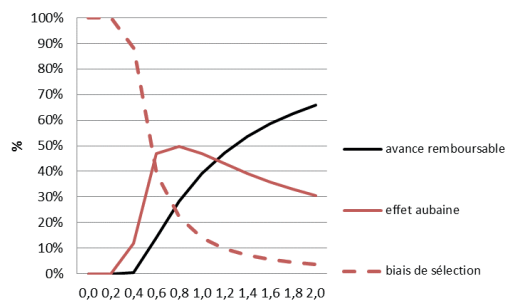


Figure 6. Bilan social en % de l'optimum de premier rang

rang (c'est à-dire l'aire AIE) mais alors, en l'absence d'une taxe sur les profits de l'entreprise, non seulement la totalité de ce bénéfice social serait entièrement récupérée par celle-ci mais l'aire associée au quadrilatère IBCE le serait aussi (on attribuerait des certificats verts aux projets déjà rentables pour l'entreprise). L'effet d'aubaine serait maximal !

4. Discussion

Cette analyse d'un mécanisme de subvention contingent de projets risqués bas carbone en l'absence d'un marché du carbone suggère plusieurs remarques. Nous sommes dans une situation dite d'*optimum de second rang*. Les mécanismes envisagés vont donc générer des distorsions qu'il convient de réduire.

Dans la plupart des cas, le bénéfice social consiste en émissions évitées : le projet permet la mise en place d'une technologie propre qui va se substituer à une technologie polluante. Le bénéfice social est $b = \tau u_H$ où τ représente le coût social du CO_2 et u_H les émissions évitées. Le revenu privé est obtenu sur le marché du bien, le prix du bien étant fixé par référence au coût de la technologie polluante. Le mécanisme étudié revient à faire une analyse coût bénéfice. Il est facile de vérifier que le coût marginal d'abattement pour le régulateur au point $p = p_f^*$ correspond bien au coût social du carbone τ (en ce point le bénéfice marginal est égal au coût marginal).

L'originalité du problème porte sur le choix d'un portefeuille de projets risqués sachant que l'État ne connaît pas la probabilité de succès de chaque projet alors que l'entreprise la connaît ou, au moins, en a une meilleure idée. Certains projets non rentables le seraient d'un point de vue social, compte tenu des émissions évitées en cas de succès. En l'absence d'un marché du carbone, comment définir un mécanisme de financement de second rang qui encourage la mise en place de ces projets sans pour autant créer un effet d'aubaine pour ceux qui sont déjà rentables du point de vue de l'entreprise ?

Attribuer le gain potentiel des émissions évitées à tous les projets (par exemple comme c'est le cas sous la forme d'un prix de rachat pour les investissements en panneaux photovoltaïques ou en éoliennes) générerait un effet d'aubaine maximal. Le mécanisme étudié ici de type avance remboursable réalise un compromis : tous les projets socialement profitables ne sont pas entrepris mais l'effet d'aubaine pour les projets intrinsèquement rentables est limité. Ce résultat est obtenu en apportant une garantie de remboursement d'une fraction des coûts d'investissement en cas d'échec du projet. Si la probabilité d'échec est forte, l'entreprise ne prendra pas le risque de s'engager dans le projet même avec la subvention ; si la probabilité de succès est élevée, l'entreprise s'engagera dans le projet mais il y a de fortes chances que la subvention ne soit pas versée. Le bilan carbone résultant de ce mécanisme est moins favorable qu'avec un prix du carbone combiné avec une taxe (l'optimum de premier rang) mais beaucoup plus qu'avec un mécanisme qui rembourserait la totalité des émissions évitées.

Il est clair que subventionner l'échec d'un projet, quoique permettant de limiter les rentes des projets réussis, réduit l'incitation à faire un effort pour réussir. La prise en compte de l'aléa moral permettrait d'obtenir une formulation plus générale du mécanisme optimal envisagé (voir [Meunier et Ponsard, 2017]).

Le côté paradoxal du mécanisme, qui consiste à accorder des crédits pour émissions évitées justement dans les situations où il n'y en pas, disparaît dès lors qu'on raisonne en moyenne sur un portefeuille de projets.

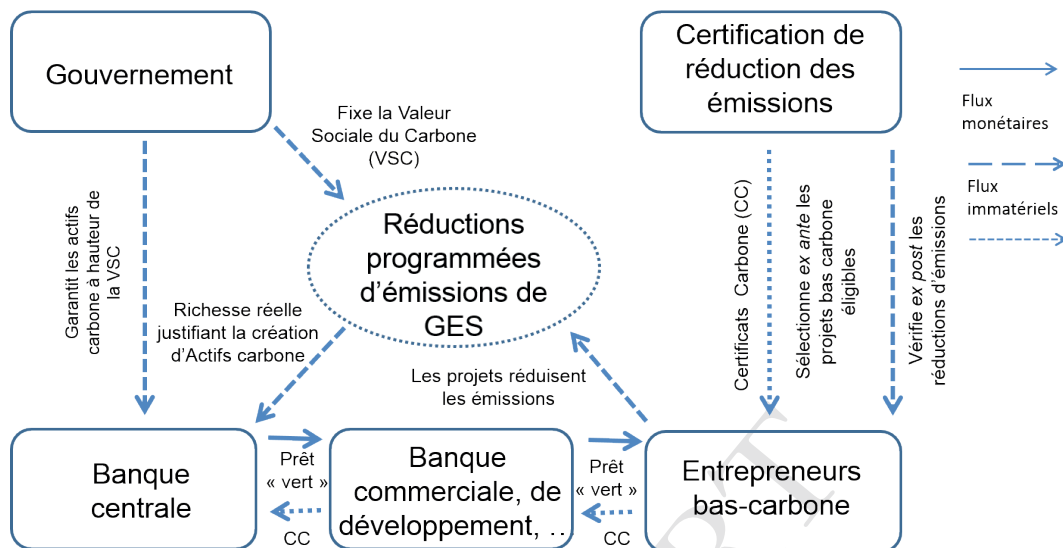


Figure 7. Dispositif d'intermédiation financière gagée sur le carbone (source Aglietta et al., 2015)

Quand ce mécanisme prend la forme d'une garantie permettant à l'entreprise de financer son projet auprès des banques, et que l'externalité sociale est mesurée par le potentiel d'abattement de CO₂ permis par l'infrastructure (cas du mécanisme eTICC), on retrouve les principales caractéristiques de la proposition de [Aglietta et al., 2015] schématisée par la figure 7 :

- l'État fixe la valeur sociale du carbone ;
- un organisme certificateur attribue des certificats carbone pour les projets risqués innovants sur la base de leurs caractéristiques financières et temporelles ;
- un intermédiaire financier fait un prêt vert à l'entreprise gagé sur ces certificats en cas d'échec et sur les revenus privés dégagés en cas de succès ;
- l'intermédiaire financier se refinance auprès de la banque centrale ;
- l'État apporte sa garantie auprès de la banque centrale, ce qui l'encourage à respecter son engagement en termes de valeur sociale du carbone.

Annexe 1

Nous proposons ici une étude de cas. Nous supposons que la technologie verte consiste à mettre en place un nouveau type de véhicule électrique pour le substituer à un véhicule à combustion interne. Pour fixer les idées nous prendrons des données inspirées de l'achat d'une Zoé par rapport à une Clio. Notre étude est très simplifiée et nous ne cherchons pas à faire le tour de la question mais seulement à illustrer notre mécanisme contingent. L'incertitude porte sur le nombre de kilomètres parcourus par an, élément déterminant pour calculer l'économie d'utilisation entre les deux options. On peut supposer que le consommateur a une certaine idée de la distance qu'il parcourra alors que l'État ne peut se fier a priori qu'à des statistiques globales. Nous supposons ici que la distribution de kilomètres parcourus est uniforme sur [0, 20 000] ce qui est clairement faux mais simplifie considérablement nos calculs. La durée envisagée d'utilisation du véhicule est supposée être de 5 ans avec un prix de revente nul.

Dans notre modèle, il n'existe que deux possibilités pour le projet, soit l'échec soit le succès. Ici, il existe une continuité de résultats soit

Pour un financement conditionnel des projets risqués bas carbone

[0, 20 000]. Pour simplifier, nous supposons que l'État peut vérifier le résultat, soit ici la distance réellement parcourue après 5 ans d'usage du véhicule. Mais, avec cette hypothèse extrême, le problème de la sélection adverse disparaît et l'optimum de premier rang peut être obtenu. Il conviendrait d'enrichir nos résultats à ce type de situations ce qui nécessiterait des développements importants. On pourrait par exemple introduire des types θ tiré à partir d'une distribution de probabilité jointe sur les variables (R, b, θ) . A priori chaque agent apprend son type. *Ex post*, seul b (ici le nombre de kilomètres parcourus) est connaissance commune. La prime est conditionnelle à la réalisation de b . Chaque agent fait son analyse de rentabilité connaissant son type et la valeur conditionnelle de la prime. Le contexte de sélection adverse

réapparaît. Nous laissons volontairement ces questions de côté, l'objectif de cette étude de cas étant d'illustrer quantitativement les valeurs associées à chaque instrument de financement.

Le choix entre les options pour le consommateur non écologiste et pour l'État dépend des données rassemblées dans le tableau A1. Pour simplifier, nous n'introduisons pas d'actualisation. Les prix d'achat et de consommation correspondent aux données du constructeur. Nous avons introduit un facteur correctif (1,5) dans les émissions de CO₂ affichées de la Clio : de nombreuses études indépendantes mettent en effet en évidence l'écart entre émissions annoncées et émissions réelles.

	Clio	Zoé
Durée de vie	5 ans	5 ans
Utilisation	20 000 km/an	20 000 km/an
Prix d'achat du véhicule	13 700 €	22 100 €
Consommation unitaire	7,2 l/100 km	5,2 kWh/100 km
Prix d'achat énergie	1,35 €/l	100 € /MWh
Consommation d'énergie	9 720 €	520 €
Émissions unitaires	0,127 kgCO ₂ /100 km	0
Émissions totales *	19,05 tCO ₂	0

* avec facteur correctif de 1,5

Tableau A1. Le cas Zoé versus Clio

valeur tutélaire du CO ₂		100 €/t	100 €/t
gain social		0 €	1 905 €
kilométrage annuel		-	20 000 km
Zoé vs Clio	F	8 400 €	8 400 €
	R	0 €	9 200 €
	b	0 €	1 905 €
Bilan privé	- F + R	- 8 400 €	800 €
Bilan social	- F + R + b	- 8 400 €	2 705 €

Tableau A2. Paramètres équivalents pour le modèle

En prenant une valeur tutélaire du carbone de l'ordre de 100 €/tCO₂ pour l'année 2030, valeur suggérée par les travaux du Comité pour l'économie verte, nous en déduisons les valeurs des paramètres de notre modèle, reproduites dans le tableau A2 (Voir par exemple [Quinet, 2015]). Modifier la valeur du paramètre *b* revient à modifier la valeur tutélaire du carbone.

Le nombre de Zoé vendues part d'une hypothèse de cible potentielle de 50 000 véhicules. Nous allons comparer les différentes politiques : laisser faire, optimum de premier rang et optima de second rang selon le mécanisme envisagé. L'ensemble des résultats du modèle est rassemblé dans le tableau A3.

Laisser faire — L'achat d'une Zoé est profitable pour le consommateur dès qu'il envisage de faire parcourir une distance supérieure à 18 261 km/an (*p_f*), il y aurait alors 4 348 Zoé de vendues.

Optimum de premier rang — Pour l'État le bilan social est positif dès que la distance parcourue est supérieure à 15 128 km/an (*p_{FB}*), soit alors 12 179 ventes.

Optima de second rang

- Le mécanisme proposé (avance remboursable) encourage le consommateur à acheter une Zoé dès qu'il envisage de parcourir 15 849 km/an (*p_f*), soit 15 849 ventes ; elle s'appuie sur une prime fixe de 5 346 € intégralement remboursée par un consommateur parcourant 20 000 km/an pendant 5 ans (0,053*20 000*5 = 5 346 €).

- La prime fixe absolue optimale soit 426 € par véhicule propre (cette prime maximise le bilan coût bénéfice sous cette hypothèse de subvention fixe). La prime accordée par l'état en 2016 pour l'achat d'un véhicule électrique est de 6 300 €.

- La prime fixe optimale proportionnelle aux émissions évitées. Cette prime proportionnelle est de 22 €/tCO₂ évitée, bien moindre que le coût social de 100 €/tCO₂ du

Résultats	Unités	Laisser faire	Optimum de premier rang	Optima de second rang		
				Avance remboursable	Prime fixe optimale	Prime unitaire optimale (22 €/tCO ₂)
nb km/an seuil pour Zoé	€/km	18 261	15 128	15 849	17 336	17 470
nb Zoé vendues		4 348	12 179	10 378	6 661	6 325
prime achat	€			5 346	426	
rabais par km parcourus par an	€/km			0,053		
valeur brute des CO ₂ évitées	M€	0	12,45	9,80	3,92	3,36
coût total	M€	0	5,64	5,76	2,83	2,47
valeur nette des CO ₂ évitées	M€	0	6,81	4,04 (60 %)	1,09 (16 %)	0,90 (13 %)
effet d'aubaine	M€	0	–	2,41 (35 %)	2,34 (34 %)	2,11 (31 %)
biais de sélection	M€	0	–	0,36 (5 %)	3,38 (50 %)	3,81 (56 %)

Tableau A3. Comparaison du mécanisme d'aide remboursable avec des mécanismes de subvention à prime fixe absolue ou proportionnelle

Pour un financement conditionnel des projets risqués bas carbone

fait de l'impossibilité de redistribuer la taxe carbone.

Nous avons aussi reporté sur le tableau A3 la valeur nette des émissions évitées, l'effet d'aubaine et le biais de sélection pour chaque politique. Noter que par construction la somme de la valeur nette plus l'effet d'aubaine plus le biais de sélection est constante pour l'ensemble des politiques de décarbonisation envisagées, seule varie la répartition de cette somme pour les politiques de second rang. Cette répartition met en évidence l'efficacité relative des politiques de second rang. On voit que, pour le mécanisme d'aide remboursable, l'effet d'aubaine et le biais de sélection restent limités. La somme de ces deux termes est de l'ordre de 40 % du gain net associé à l'optimum de premier rang, ce qui n'est pas le cas pour les mécanismes à prime fixe (elle est de l'ordre de 85 %). Une grande partie de la subvention se retrouve alors sous la forme soit d'un effet d'aubaine du fait que tous les acheteurs de Zoé en bénéficieraient, même ceux qui n'en ont pas besoin pour acheter une Zoé ($p > p_f$), soit d'un biais de sélection. La baisse de l'effet d'aubaine du mécanisme d'aide remboursable vient du caractère conditionnel du remboursement, elle permet de diminuer à moindre frais le biais de sélection.

On peut enfin faire un bilan carbone et calculer le coût d'abattement associé à

chaque mécanisme. Le tableau A4 donne les résultats.

Pour l'optimum de premier rang, le coût total est de 5,64 M€ (compensation des surcoûts payés par les acheteurs situés entre p_{FB} et p_f) alors que les émissions évitées s'élèvent à 0,125 MtCO₂, d'où un coût d'abattement moyen de 45 €/t. Pour les aides remboursables, le coût total est de 5,76 M€, soit légèrement plus élevé alors que les émissions évitées sont plus faibles, d'où un coût moyen d'abattement de 59 €/tCO₂. Pour le mécanisme à prime fixe et le mécanisme à prime proportionnelle, les émissions évitées sont beaucoup plus faibles alors que le budget dépensé est loin de baisser dans les mêmes proportions, d'où un coût moyen d'abattement bien plus élevé.

Ces résultats mettent bien évidence la supériorité de l'avance remboursable par rapport à des mécanismes de prime fixe ou proportionnelle.

Résultats	Unités	Laisser faire	Optimum de premier rang	Optima de second rang		
				Avance remboursable	Prime fixe optimale	Prime unitaire optimale (22 €/tCO ₂)
Tonnes de CO ₂ évitées	Mt	0	0,125	0,098	0,039	0,034
Coût total de la politique	M€	0	5,64	5,76	2,83	2,47
Coût abattement moyen	€/tCO ₂	0	45	59	72	73

Tableau A4. Coût d'abattement pour les différents mécanismes

Annexe 2

La théorie économique nous enseigne que l'optimum de premier rang pourrait être obtenu grâce à la mise en place d'une taxe carbone (taxe Pigouvienne). Nous explicitons ici ce résultat et revenons sur certaines difficultés de mise en œuvre, raisons qui font préférer en pratique l'usage de subventions.

Le plus simple est de se situer dans le cadre de l'étude de cas stylisé Zoé versus Clio de l'annexe 1. Considérons explicitement les deux technologies avec les coûts associés investissement et exploitation. La figure A1 est l'équivalent de la figure 1.

Le coût pour la Clio en fonction du nombre de kilomètres parcourus correspond à la droite AD ; si l'utilisateur d'une Clio doit payer la taxe carbone, alors son coût correspond à la droite AE ; la différence entre AD et AE correspond à la perte sociale due aux émissions, et la différence d'ordonnée entre D et E représente précisément le paramètre b . Le coût pour la Zoé correspond à la droite BC : achat plus élevé mais coût d'exploitation plus faible. La différence d'ordonnée entre A et B représente précisément le paramètre F tandis que celle entre C et

D représente précisément la différence entre les paramètres R et F . Cette correspondance nous permettrait de raisonner directement dans le cadre de notre modèle tel que décrit dans la section 2. Raisonner dans le cadre de cette étude de cas est plus parlant.

En l'absence de la taxe carbone, l'arbitrage se fait pour un nombre de km correspondant à l'abscisse p_f alors qu'en présence de la taxe carbone optimale, l'arbitrage se fait pour un nombre de kilomètres correspondant à l'abscisse p_{FB} . Le choix entre les deux technologies est alors efficient.

Un point souvent très sensible dans la mise en œuvre de cette approche vient de l'aspect redistributif de la taxe : les utilisateurs effectuant un nombre de kilomètres inférieur à p_{FB} paieront la taxe carbone (triangle AHI), ceux situés entre p_{FB} et p_f ne la paieront pas mais paieront néanmoins le coût d'abattement pour passer de la Clio à la Zoé (triangle HIF) ; quant à ceux qui auraient acheté une Zoé indépendamment de la taxe carbone (ceux situés au-delà de p_f), ceux-là ne paieront rien. D'un autre côté, tous les utilisateurs de véhicules bénéficieront de la baisse des émissions. La taxe carbone permet d'obtenir l'efficacité économique mais laisse ouverte la

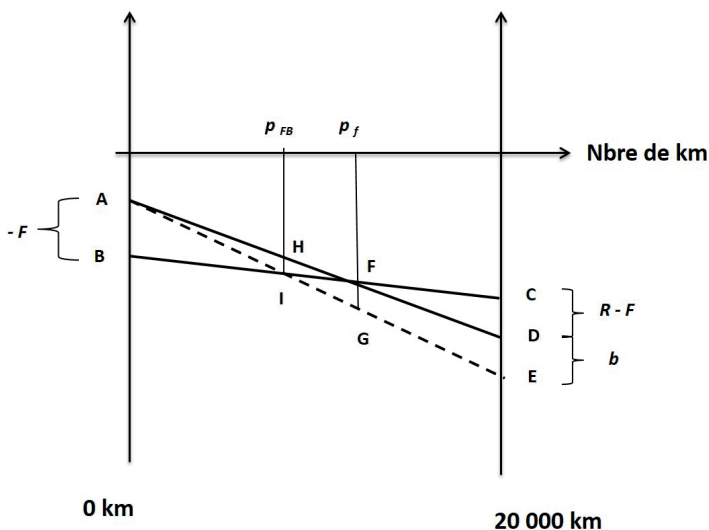


Figure A1. Optimum de premier rang et taxe carbone

question de la répartition du coût de l'amélioration de bien-être associé. Cette question devrait être étudiée dans un cadre d'une politique fiscale globale en situation d'équilibre général. Cela permettrait de représenter le coût des fonds publics et les effets redistributifs de la fiscalité carbone qui, en théorie, dépendent du reste de la fiscalité. On peut citer la littérature sur le double dividende [Bovenberg et Goulder, 1996, 2002] et celle sur la fiscalité optimale en présence d'externalité [Cremer et al., 1998, Cremer et Gahvari 2001]. D'autres points discutés en introduction rendent difficile la mise en place d'une taxe carbone dans un contexte de moyen long terme.

Il est plus facile de mettre en place des subventions et de les faire financer par le budget de l'État, donc par les contribuables. Autant le faire en maximisant le bénéfice environnemental au moindre coût, c'est l'objet du mécanisme étudié dans cet article.

RÉFÉRENCES

- Aglietta, M., Espagne, E., et Perrissin Fabert, B. (2015) Une proposition pour financer l'investissement bas carbone en Europe. Note d'analyse, France Stratégie, <http://www.strategie.gouv.fr/publications/une-proposition-financer-linvestissement-bas-carbone-europe>
- Bovenberg, A. L., & Goulder, L. H. (1996). Optimal environmental taxation in the presence of other taxes: general-equilibrium analyses. *The American Economic Review*, 86(4), 985-1000.
- Bovenberg, A. L., & Goulder, L. H. (2002). Environmental taxation and regulation. *Handbook of public economics*, 3, 1471-1545.
- Cremer, H., & Gahvari, F. (2001). Second-best taxation of emissions and polluting goods. *Journal of Public Economics*, 80(2), 169-197.
- Cremer, H., Gahvari, F., & Ladoux, N. (1998). Externalities and optimal taxation. *Journal of Public Economics*, 70(3), 343-364.
- Fischer, C., (2005). Project-based mechanisms for emissions reductions: balancing trade-offs with baselines, *Energy Policy* 33(14), 1807-1823.
- Gillenwater, M. and Seres, S. (2011). The Clean Development Mechanism: A Review of the first international offset program. Pew Center on Global Climate Change, Arlington, VA 22201 USA. <http://ghginstitute.org/wp-content/uploads/2015/04/PEW8037CDMReport.pdf>
- Harrison, P. (2014). Fueling Europe's Future: How auto innovation leads to eu jobs, Technical report, Cambridge Econometrics.
- http://www.camecon.com/Libraries/Downloadable_Files/Fuelling_Europe_s_Future-How_auto_innovation_leads_to_EU_jobs.sflb.ashx
- Laffitte, M., Leguet, B, Quint, A., Le Mer, C. (2015) Proposal for an innovative financing mechanism involving the establishment of eTICCs (Energy Transition Infrastructures with Carbon reduction Certificates) to encourage « early movers » of solutions for energy and environmental transition – Application to a hydrogen distribution infrastructure for road vehicles. Note Air Liquide CDC Climat.
- Meunier, G. et Ponsard, J.-P. (2017) Financing innovative green projects with asymmetric information and costly public funds. Note de recherche, École Polytechnique.
- Quinet, A. (2015) La valeur tutélaire du carbone, Colloque CGI – France Stratégie - CGEDD, http://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/5._alain_quinet.pdf