FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

MINISTÈRE
DE L'ÉCONOMIE,
DES FINANCES
ET DE LA SOUVERAINETÉ
INDUSTRIELLE ET NUMÉRIQUE
Liberté
Égalité
Fraternité

Direction générale
du Trésor

RAPPORT

MAI
2023

LES INCIDENCES ÉCONOMIQUES DE L'ACTION POUR LE CLIMAT

Modélisation

Rapport thématique

Jérôme Trinh (coord.)

LES INCIDENCES ÉCONOMIQUES DE L'ACTION POUR LE CLIMAT

Modélisation

Rapport thématique

Coordinateur

Jérôme Trinh (Direction générale du Trésor)

Mathieu Fouquet (CGDD), Pierre-Louis Girard (Direction générale du Trésor), Miquel Oliu-Barton (université Paris-Dauphine-PSL et France Stratégie) et Mathilde Viennot (France Stratégie)

MAI 2023

FRANCE STRATÉGIE

MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE LA SOUVERAINETÉ INDUSTRIELLE ET NUMÉRIQUE

Liberté Égalité Fraternité

Direction générale du Trésor

Présentation

Par une lettre du 12 septembre 2022, la Première ministre a confié à Jean Pisani-Ferry une mission d'évaluation des impacts macroéconomiques de la transition climatique, afin que ces incidences soient mieux prises en compte par les décideurs dans l'ensemble des politiques publiques. Selma Mahfouz, inspectrice générale des finances, est la rapporteure générale de la mission. Le secrétariat est assuré par France Stratégie.

Une première note de cadrage est parue en novembre 2022 sous le titre « L'action climatique : un enjeu macroéconomique » (Note d'analyse, n° 114, France Stratégie).

Remis à la Première ministre en mai 2023, le rapport final intitulé Les incidences économiques de l'action pour le climat *présente la synthèse des travaux de la mission.*

Ces travaux ont également donné lieu à la publication de onze rapports thématiques, rédigés par des équipes issues de différentes institutions. L'ensemble de ces documents sont disponibles sur le site de France Stratégie :

- *Bien-être, coordonné par Didier Blanchet,*
- *Compétitivité, coordonné par Lionel Fontagné,*
- *Dommages et adaptation, coordonné par Xavier Timbeau,*
- *Enjeux distributifs, coordonné par Vincent Marcus,*
- *Indicateurs et données, coordonné par Nicolas Carnot et Nicolas Riedinger,*
- *Inflation, coordonné par Stéphane Dees,*
- *Marché du capital, coordonné par Pierre-Louis Girard,*
- *Marché du travail, coordonné par Carole Hentzgen et Michaël Orand,*
- *Modélisation, coordonné par Jérôme Trinh,*
- *Productivité, coordonné par Anne Epaulard,*
- *Sobriété, coordonné par Aude Pommeret.*

Ce rapport thématique consacré à l'analyse et à la modélisation des effets des différents instruments de décarbonation était placé sous la direction de Jérôme Trinh (Direction générale du Trésor), en collaboration avec Mathieu Fouquet (CGDD), Pierre-Louis Girard (Direction générale du Trésor), Miquel Oliu-Barton (université Paris-Dauphine-PSL et France Stratégie) et Mathilde Viennot (France Stratégie).

Il a bénéficié des commentaires et de l'expertise des contributeurs suivants : Vincent Aussilloux (France Stratégie) ; Laura Berthet, Benoît Campagne, Logan Gourmand et William L'Heudé (Direction générale du Trésor) ; Gaël Callonnec (Ademe) ; Frédéric Ghersi et Nicolas Graves (Cired) ; et Frédéric Reynès (OCFE).

SOMMAIRE

Synthèse **5**

Introduction **7**

Chapitre 1 – Analyse et état de l'art de la modélisation des différentes mesures de décarbonation **9**

1. Instruments fondés sur le marché **11**

1.1. Tarification carbone ou des énergies fossiles 11

1.2. Tarification non carbone et mesures incitatives 13

2. Instruments non fondés sur le marché **15**

2.1. Mesures réglementaires (réglementations et normes) 15

2.2. Investissements et dépenses publiques 18

2.3. Information 19

Chapitre 2 – Cas d'étude : intégration et modélisation des mesures de décarbonation dans les modèles ThreeME et Imaclim-R **23**

1. Instruments fondés sur le marché **27**

2. Mesures réglementaires **28**

2.1. Énergie 28

2.2. Industrie 28

2.3. Agriculture 29

2.4. Forêts, utilisation des terres 29

2.5. Bâtiment 30

2.6. Transport 30

3. Financements publics **31**

4. Autres mesures **31**

Conclusion **33**

ANNEXES

Annexe 1 – Revue de littérature des évaluations *ex ante* de l'impact macroéconomique de l'Inflation Reduction Act 37

Annexe 2 – Comparaison de la performance économique de différentes mesures de décarbonation (Chateau *et al*., 2022) 41

Annexe 3 – Autres évaluations de mesures de décarbonation 45

Bibliographie 47

SYNTHÈSE

Trois grandes catégories d'instruments de décarbonation peuvent être distinguées. Les instruments fondés sur le marché (tarification explicite du carbone : quotas échangeables, taxes et subventions de prix) modifient le signal-prix auquel font face les ménages et les entreprises pour les inciter à orienter leurs transactions et leurs investissements vers la décarbonation. Ils sont les plus coût-efficaces lorsqu'ils ciblent et pénalisent précisément les émissions (les taxes plutôt que les subventions), mais peuvent avoir des effets inflationnistes et régressifs. Parmi les instruments non fondés sur le marché, les mesures réglementaires (normes et standards, interdictions) imposent des contraintes technologiques ou volumétriques sur les processus de production ou les comportements des secteurs d'activité ou institutionnels, les forçant à réallouer les facteurs de production. Elles sont notamment utiles pour cibler les secteurs que les mesures incitatives n'ont pas réussi à réorienter, et sont *a priori* plus prévisibles et crédibles que ces dernières. Elles peuvent également avoir des effets inflationnistes et régressifs, même s'ils sont moins directement visibles. Les interventions publiques directes (investissements ou achats publics), quant à elles, traduisent une orientation explicite vers une économie décarbonée mais peuvent être coûteuses à financer, et, comme les subventions, ne pas pénaliser suffisamment les émissions. D'autres instruments de décarbonation existent, comme le recours accru à l'information du consommateur (éco-score) ou de l'épargnant (rapportage extra-financier), mais sont très peu abordés dans les études économiques.

La tarification du carbone, par sa modélisation explicite dans un système de prix, a fait l'objet de nombreuses évaluations macroéconomiques dans la littérature académique et les travaux des administrations et des centres de recherche. Les autres instruments de décarbonation nécessitent une modélisation plus fine des secteurs institutionnels et d'activité, ce qui explique l'intérêt croissant des administrations à l'égard des modèles d'équilibre général à fin découpage sectoriel. Deux modèles calibrés pour l'économie française, ThreeME, développé conjointement par l'Ademe et l'OFCE, et Imaclim-R France, développé par le Cired, présentent le détail nécessaire à la modélisation de nombreux instruments de décarbonation déjà mis en place ou envisagés.

Plusieurs dimensions critiques pour l'analyse de l'efficacité des instruments de décarbonation, tels leur acceptabilité, leur accompagnement, leur crédibilité et la nécessité d'une coordination internationale, ne seront pas abordées ici.

INTRODUCTION

Afin d'assurer l'atteinte de nos objectifs de décarbonation, différents instruments peuvent être mis en œuvre. Ces instruments, qui ont pour but de modifier les comportements des agents, vont avoir des impacts différents sur les niveaux de décarbonation, de bien-être, de compétitivité, etc. Afin d'en quantifier les effets macroéconomiques, il est important de savoir comment les modéliser.

Ce travail dresse une typologie large des différents instruments de décarbonation existants et les répertorie selon l'analyse de leurs effets économiques dans la littérature académique et les travaux des administrations et des centres de recherche. Il revient ensuite sur la manière dont ces instruments de décarbonation peuvent être pris en compte dans les principaux modèles technico-économiques et macroéconomiques, et plus spécifiquement dans les deux grands modèles macro-environnementaux français, ThreeMe et Imaclim. En parallèle, une analyse comparative est proposée sur l'efficacité de ces mesures et leurs impacts économiques.

Cette étude vient compléter trois des rapports thématiques : *Sobriété* – qui traite des changements de préférences des ménages face aux politiques environnementales ; *Enjeux distributifs* – qui rappelle l'enjeu majeur des inégalités dans les possibilités de substitution vers des alternatives décarbonées, d'investissements et de changements de comportement ; et le complément *Simulations* – qui vise à évaluer l'impact macroéconomique des mesures de transition écologique documentées.

CHAPITRE 1

ANALYSE ET ÉTAT DE L'ART DE LA MODÉLISATION DES DIFFÉRENTES MESURES DE DÉCARBONATION

Cette partie analyse les différents types d'instruments de décarbonation à la fois déjà mis en place ou discutés dans la littérature académique et dans les institutions nationales ou internationales, ainsi que leur modélisation dans les évaluations sectorielles et macroéconomiques. Ces instruments peuvent être catégorisés selon leur caractère incitatif (les instruments fondés sur le marché) ou non, s'ils tarifient explicitement ou implicitement le carbone, ou encore s'ils constituent un changement de réglementation ou une intervention publique directe. À l'instar des travaux de l'OCDE[1] et de l'Ademe[2], une attention particulière sera accordée au potentiel d'atténuation et aux effets macroéconomiques, en vue de proposer dans le Tableau 1 une comparaison en matière d'arbitrage coût-efficacité des instruments de décarbonation. Certaines dimensions ne sont pas précisément développées, en particulier celle de l'acceptabilité des mesures qui dépendent en particulier de l'hétérogénéité des effets sur les ménages (voir le rapport thématique *Enjeux distributifs*) et qui réclame des mesures d'accompagnement, celle de leur crédibilité et celle du contexte international qui affecte leur efficacité (voir le rapport thématique *Compétitivité*). Les instruments sont par ailleurs présentés de manière indépendante, en fournissant les principaux faits stylisés, leurs caractéristiques économiques et la manière de les modéliser. En pratique, un mix de mesures est le plus souvent mis en place, tirant parti de leur complémentarité et de leurs spécificités selon les secteurs. Le Tableau 2 répertorie les différents modèles qui évaluent les mesures de décarbonation (voir Annexe 3 pour les mesures non détaillées dans ce chapitre).

---

[1] D'Arcangelo F. M., Johansson A., Levin I., Pagani A. et Pisu M. (2022), « A framework to decarbonise the economy », *OECD Economic Policy Paper*, n° 31, février.

[2] Ademe (2022), *Analyse des conditions de reprise d'une valeur équitable du carbone. État des lieux des arguments et examen comparé des options de politique publique*, « Expertises », juillet.

Tableau 1 – Analyse comparative des instruments de décarbonation

		Instrument fondé sur le marché					Instrument non fondé sur le marché		
		Tarification carbone		Prix non carbone					
Critère d'évaluation		**Taxes (taxes carbone, accises sur les énergies, etc.)**	**Marchés de quotas échangeables (ETS)**	**Autres taxes sur les biens et services**	**Subventions**	**Bonus-malus**	**Réglementation (cibles d'émission, normes)**	**Information**	**Intervention publique (investissements publics, commande publique)**
Potentiel d'atténuation		Élevé (coût-efficacité du signal-prix, incitation continue à réduire les émissions résiduelles)		Élevé si le bien ou service taxé est un bon proxy des émissions, faible sinon	Modéré selon les modalités (risque effets d'aubaine) et l'articulation avec les autres dispositifs d'atténuation (possible effet rebond), ne pénalise pas le brun	Élevé (incitation continue à réduire les émissions résiduelles et à la sortie des produits carbonés)	Élevé à modéré (signal explicite, peut être efficace pour imposer les solutions décarbonées mais possible effet rebond)	Difficile à estimer	Modéré selon la nature de l'intervention, ne pénalise pas le brun
Effets macro-économiques à court terme	**Mécanismes macro-économiques**	Choc d'offre négatif par la hausse des prix, impact atténué par le recyclage des recettes			Choc d'offre ou de demande positif par la baisse des prix pour les acteurs ciblés, impact atténué par le financement	Dépend de effets de réallocations, peut augmenter les coûts	Crée des frictions en contraignant les choix des entreprises (lock in technologique), coûts indirects (incidence sur les prix)	Dépend des effets de réallocations	Choc de demande positif pour les secteurs ciblés, impact atténué par le financement
	Impact sur les prix de l'énergie	Prix plus élevés, avec une propagation large à l'économie		Prix plus élevés, avec une propagation moins large à l'économie	Prix plus faibles si ciblage du secteur de l'énergie, limité sinon	Limité, dépend du coût moyen du nouveau mix énergétique (eg. positif si basculement induit vers des sources d'énergie plus coûteuses)			Prix plus faibles si soutien à l'offre énergétique décarbonée, limité sinon
	Impacts budgétaires	Recettes			Dépenses (potentiellement non capées)	Dépend des réallocations	Limité	Limité	Dépenses
	Compétitivité des secteurs d'activité	Pénalise *a priori* les secteurs intensifs en émission, et exposés au commerce sans lutte contre les fuites de carbone (MACF, coordination internationale accrue). Incite les entreprises ciblées à innover, augmenter leur efficacité énergétique à moyen terme (cas des ETS)		Neutre si les importations sont aussi taxées	Soutien aux entreprises ciblées	Pénalise les entreprises concernées par le malus et avantage celles concernées par le bonus	Pénalise les secteurs concernés en les soumettant à des normes plus strictes que les entreprises étrangères	Neutre, si coûts de mise en place faibles	Peut aider les entreprises nationales si critères géographiques (non conformes règle de l'OMC)
Effets redistributifs		Régressif si recyclage des recettes non ciblé			Régressif si non associées à des conditions de revenu	Possiblement régressif car capacité d'adaptation inférieure pour les acteurs plus modestes		Neutre	Difficile à estimer
Charge administrative (faisabilité pratique)		Faible	Modérée (surveillance du marché au niveau européen par la Commission)	Modérée (ciblage sectoriel)	Faible à modérée (peut nécessiter un suivi fin pour favoriser l'efficacité de la dépense)	Élevée (applications sectorielles du bonus et du malus)	Élevée (surveillance de l'application des normes), plus difficile à modifier une fois en place	Modéré (certaines informations ou certifications peuvent être coûteuses)	Facile à mettre en place

Note : les couleurs représentent à titre indicatif la favorabilité d'un instrument au profit du critère d'évaluation correspondant, de défavorable (rouge vif) à favorable (vert foncé).

Source : DG Trésor

1. Instruments fondés sur le marché

1.1. Tarification carbone ou des énergies fossiles

Le prix des émissions de gaz à effet de serre (GES) ou de l'énergie (par exemple, taxe carbone ou taxe d'accise) tout autant que leur quantité plafond (par exemple, marché d'échange de quotas[1]) peuvent être fixés pour que les agents économiques internalisent leurs externalités négatives sur l'environnement et modifient de ce fait leurs comportements.

Le signal-prix permet de réduire la demande relative des biens carbonés (en fonction de l'élasticité au prix) et d'inciter un report de la demande et ainsi de l'offre (production et innovation) vers des produits et des activités moins émissifs. Les études[2] mettent en évidence plusieurs avantages économiques de la tarification carbone permettant d'inciter les acteurs à cibler les actions de décarbonation (i) les plus coût-efficaces (présentant les coûts d'abattement les plus bas) ; (ii) continues dans le temps et sur les émissions résiduelles (limitant le risque d'effet rebond en cas d'investissement dans des équipements moins émissifs) ; et (iii) ne préemptant pas d'un choix technologique et facilitant une application harmonisée, y compris à l'international. Par les recettes qu'elle génère, cette tarification carbone ne détériore pas voire améliore les finances publiques, selon l'utilisation des recettes, et peut avoir un impact direct positif sur la balance commerciale lorsqu'elle touche des produits à l'importation, souvent plus carbonés que les productions françaises et européennes. L'effet sur la balance commerciale dépendra toutefois fortement des politiques mises en place dans les pays tiers et du risque associé de fuite de carbone.

Toutefois, la tarification carbone peut avoir un impact (i) inflationniste, en particulier sur les produits énergétiques pour lesquels les effets de propagation peuvent être larges (voir le rapport thématique *Bien-être* ou le rapport thématique *Enjeux distributifs* sur l'hétérogénéité des ménages) ; et (ii) régressif, car les ménages les plus exposés aux énergies fossiles (transport, chauffage notamment) sont mécaniquement et relativement les plus touchés, le poids des dépenses d'énergie étant plus important dans le budget des ménages les plus modestes, qui sont aussi plus contraints dans leurs options de substitution[3] (voir le rapport thématique *Enjeux distributifs*). La tarification carbone – et ses recettes – peut alors être combinée à des mesures de soutien pour les plus modestes afin

[1] Dans le cas d'un marché de quotas carbone, le prix des émissions de GES est déterminé par l'offre et la demande de quotas d'émissions.

[2] Voir par exemple D'Arcangelo *et al.* (2022), « A framework to decarbonise the economy », *op. cit.*

[3] Voir par exemple CGDD, DLF et DGT (2022), *Rapport sur l'impact environnemental du budget de l'État*, octobre.

de limiter ces effets redistributifs, par exemple des aides ciblées sur la rénovation thermique des logements. En augmentant le coût moyen de l'énergie, la tarification risque aussi de rendre les secteurs d'activité relativement intensifs en énergie ou, exposés au commerce international, moins compétitifs, et d'induire des « fuites de carbone » (voir le rapport thématique *Compétitivité* concernant le commerce, les fuites de carbone et la compétitivité)[1]. Les entreprises directement contraintes à décarboner, par exemple dans les secteurs soumis au système européen d'échange de quotas d'émission (*EU Emissions Trading System* – ETS), peuvent cependant être incitées à améliorer leur processus de production et la qualité de leurs produits, et donc leur compétitivité[2].

Enfin, il est complexe de déterminer un niveau de taxation adapté qui permette à la fois l'atteinte de l'objectif climatique et une adhésion massive de la population. Toutefois, les impacts inflationnistes et régressifs de la taxe carbone peuvent être atténués voire inversés par la mise en place de mesures d'accompagnement ciblées, notamment via la réutilisation des recettes supplémentaires[3], couplées à un travail d'information auprès du grand public sur les effets des politiques de décarbonation pour renforcer l'acceptabilité de la tarification carbone[4].

Exemples. Au sein de l'Union européenne, le marché de quotas carbone (marché ETS), ou encore, en France, diverses taxes pigouviennes (comme la « composante carbone ») ou, dans une acception plus large, les taxes d'accise sur l'énergie (TIC par exemple) correspondent à ce type d'approche. Certaines suppressions de régimes dérogatoires constituent aussi dans les faits une tarification carbone.

Modélisation. La modélisation de la taxe carbone n'est pas traitée dans ce document. De nombreux articles scientifiques et des évaluations par les administrations existent déjà sur le sujet et ce type de mesures ne présente pas de difficultés particulières pour leur intégration dans des modèles d'évaluation macroéconomiques (par exemple, dans les modèles français ThreeME et Imaclim).

---

[1] Augmentation des émissions dans le reste du monde suite à la mise en place d'une politique climatique ambitieuse par un pays ou une région, via une réallocation de la production (délocalisation ou perte de parts de marché) au profit de celle des pays tiers.

[2] Voir, par exemple, Dechezleprêtre A., Nachtigall D. et Venmans F. (2018), « The joint impact of the European Union emissions trading system on carbon emissions and economic performance », Document de travail du département d'économie, n° 1515, OCDE, décembre ; et Alla A. (2023), « Quel effet du marché carbone européen sur la productivité des entreprises ? », *Trésor-Éco*, n° 323, Direction générale du Trésor, février.

[3] Une mesure compensatoire peut être ciblée, dédiée à une catégorie spécifique d'acteurs (par exemple, le premier décile de ménages) et/ou une dépense spécifique (par exemple, le chèque énergie pour la rénovation thermique).

[4] La communication autour de la visée environnementale des mesures comme l'efficacité de la stratégie globale de décarbonation mise en place y participe également. Dechezleprêtre A., Fabre A. et Stantcheva S. (2022), « Les Français et les politiques climatiques », *Les notes du conseil d'analyse économique*, n° 73, juillet.

1.2. Tarification non carbone et mesures incitatives

La tarification directe du carbone n'est pas le seul instrument tarifaire pouvant contribuer à la décarbonation. D'autres instruments existent, visant une autre finalité que la réduction des émissions CO_2 (par exemple, la réduction d'émissions de polluants locaux), ou la visant indirectement (par exemple, via l'artificialisation des sols ou le poids des véhicules). Ces tarifications alternatives modifient cependant indirectement le signal-prix du carbone. Bien que visant également des objectifs environnementaux autres que la décarbonation, l'impact attendu sur la demande et l'offre de biens moins carbonés serait d'autant plus important que les objectifs environnementaux sont fortement corrélés à la décarbonation (par exemple, le poids des véhicules). Toutefois, le potentiel d'atténuation de ces mesures, jouant indirectement sur les émissions carbone, est complexe à évaluer.

Exemples. En France, peuvent s'assimiler à de la tarification non carbone des taxes sur les externalités environnementales indirectes (par exemple, la taxe sur les plus-values de terrains à construire ou, en lien plus direct, le malus automobile).

À l'opposé, le recours aux subventions publiques vise à inciter le développement d'activités moins carbonées ou à diminuer les plus émissives. Elles peuvent directement affecter les prix (par exemple, un tarif d'achat garantissant le prix de vente de biens décarbonés, ou la composante bonus du bonus-malus), ou diminuer les coûts des ménages et des entreprises (par exemple, les subventions à l'investissement), et indirectement affecter les prix. Ce soutien conditionné stimule l'offre et la consommation bas-carbone. Ces subventions permettent de cibler certains secteurs ou technologies bas-carbone relativement peu rentables, ou dont le développement se heurte à des contraintes de marché (temps de retour positif mais trop long, restriction d'accès au crédit, etc.). Elles peuvent notamment aider les acteurs à outrepasser une barrière d'investissements dans des biens ou des activités particulièrement intensives en capital (par exemple, les ménages pour la rénovation thermique de leur logement). Les aides peuvent être ciblées vers des catégories d'acteurs pour lutter contre des effets régressifs d'autres instruments. Leur ciblage sur des biens spécifiques permet également de favoriser, à un stade précoce, le développement de certaines filières clés pour la transition (par exemple, pour les entreprises, la R&D et le développement de l'industrialisation de la production d'hydrogène bas-carbone), ou d'inciter à l'investissement dans des biens pouvant être rentables à long terme (par exemple, pour les ménages, l'achat de véhicules électriques). Enfin, par rapport à une tarification carbone ou une mesure réglementaire, subventionner l'énergie décarbonée touche moins la chaîne de valeur des secteurs exposés (voir Annexe 2) et peut même favoriser les entreprises des secteurs déjà impliqués dans la décarbonation. Ces dispositifs constituent un choc d'offre positif en diminuant les coûts des secteurs

ciblés, mais ils peuvent se révéler coûteux pour les finances publiques[1]. Leur financement peut atténuer voire compenser leurs effets agrégés (voir Annexe 2).

La diminution des coûts des alternatives peu émissives au lieu du renchérissement des plus émissives risque cependant d'augmenter la consommation globale et de diminuer l'efficacité de la mesure de décarbonation (effet rebond direct). De plus, l'additivité des mesures est incertaine. Dans le cas où plusieurs mesures seraient mises en place pour la décarbonation d'un même secteur (tarification carbone, subvention des activités peu émissives), l'effet déclencheur propre à une mesure sera plus délicat à estimer, tout comme l'impact d'une mesure supplémentaire. Plus largement, le risque d'effets d'aubaine (par exemple en diminuant les coûts pour des entreprises ayant déjà effectué la transition vers une production moins émissive) dépendra fortement de l'efficacité des mesures mises en place.

Exemples. Plusieurs mesures correspondent à des subventions. Il existe différentes mesures incitatives en France, des subventions ou bonus aux produits ou procédés bas-carbone (le bonus automobile, par exemple), des contrats de complément de rémunération (le complément de rémunération pour les énergies renouvelables, par exemple) et des contrats carbone pour différence (*Carbon Contracts for Difference* – CCfD). Des exonérations ou réductions de taxes sur des produits ou procédés bas-carbone (sur les biocarburants, notamment) ont le même effet que des subventions en leur faveur. Aux États-Unis, dans le cadre de l'Inflation Reduction Act (IRA – voir Annexe 1), les subventions dans le secteur du transport visent la réduction des émissions diesel. Aux Pays-Bas, le dispositif subventionnel SDE++ compense la différence entre le prix de revient de l'énergie renouvelable ou la réduction des émissions de CO□ et le revenu (le cas échéant). Il consiste ainsi en un exemple de CCfD non symétrique. Des exemples de subventions non affectées directement sur les prix de marché, venant en soutien à l'investissement ou à l'innovation, sont le chèque forfaitaire MaPrimeRénov', les appels à projets décarbonation de France 2030 ou encore, dans le cadre de l'Union européenne, les appels à projets financés par le Fonds d'innovation de l'ETS.

Modélisation. Modéliser de tels instruments à des fins d'évaluation se fait en modifiant les prix relatifs des alternatives vertes et brunes, soit en augmentant le prix des dernières, soit en diminuant le prix des premières, soit en combinant les deux au sein d'un même secteur dans le cas du bonus-malus. Une incitation à la production décarbonée peut se modéliser en appliquant un taux de taxe ou de subvention dans les recettes des producteurs et constituer un choc d'offre. Par exemple, dans le cas des subventions de prix, Chateau *et al.* (2022)[2] modélisent dans le modèle IMF-ENV un tarif d'achat (*feed-in tariff*)

[1] Même si un bonus-malus est initialement conçu pour être budgétairement neutre, la mesure peut être déficitaire *a posteriori* lorsqu'elle est mal calibrée.

[2] Chateau J., Jaumotte F. et Schwerhoff G. (2022), « Climate Policy Options: A Comparison of Economic Performance », *IMF Working Papers*, décembre.

qui assure aux producteurs d'électricité solaire et éolienne un prix de vente au-delà du coût unitaire de production et dont le taux est cohérent avec une diminution de 20 % de la part des énergies fossiles en 2030, financé par des hausses de taxe sur le travail ; de même, Kalkuhl *et al.* (2013)[1] modélisent une subvention de l'achat d'énergies renouvelables (EnR) financée par les recettes d'une taxe carbone concomitante (*Carbon Trust*) ou retardée, ou par un prélèvement forfaitaire sur les ménages. Dans le cas des bonus-malus, Chateau *et al.* (2022) modélisent aussi un système de bonus-malus dans le secteur de l'énergie. Toute production d'électricité, dont l'émission d'équivalent CO_2 est au-dessus ou en dessous d'une cible d'émission permettant une diminution de 20 % de la part des énergies fossiles en 2030, est taxée ou bénéficie d'une remise, les taux de taxe et de remise assurant la neutralité budgétaire de la mesure. À l'opposé, pour modéliser une mesure visant à inciter une demande décarbonée, un taux de taxe ou de subvention peut être intégré dans la contrainte budgétaire des acheteurs, par exemple dans le cas du bonus-malus automobile dans le modèle *Energy Policy Simulator* (EPS)[2]. Dans le cas des subventions non affectées directement sur les prix, Ashmoore *et al*. (2022)[3] modélisent un soutien à l'investissement dans la construction, ainsi que des crédits d'impôt dans le secteur énergétique afin de substituer la production d'hydrogène, du gaz naturel et/ou du méthane au nucléaire et/ou au renouvelable, de modifier le bouquet énergétique de certaines industries ou d'augmenter la production électrique renouvelable.

2. Instruments non fondés sur le marché

2.1. Mesures réglementaires (réglementations et normes)

Les mesures réglementaires touchent directement l'offre (les entreprises) et la demande (les ménages pour la consommation finale, les entreprises pour la consommation intermédiaire) en visant à limiter, voire interdire, certaines activités émissives ou polluantes, ou à forcer le développement d'une offre de biens ou d'activités bas-carbone, dans une certaine zone ou à partir d'une certaine date. Elles sont efficaces pour lutter contre les externalités négatives, notamment en cas d'un danger majeur pour la santé (par exemple, l'interdiction de l'amiante), ou pouvant présenter un risque irréversible (par

[1] Kalkuhl M., Edenhofer O. et Lessmann K. (2013), « Renewable energy subsidies: Second-best policy or fatal aberration for mitigation? », *Resource and Energy Economics*, vol. 35(3), février, p. 217-234.

[2] Pisu M., D'Arcangelo F. M., Elgouacem A., Kruse T. et Hemmerlé Y. (2023), « Options for assessing and comparing climate change mitigation policies across countries », Document de travail du département d'économie, n° 1749, OCDE, février.

[3] Ashmoore O., Gopal A., Mahajan M., Orvis R. et Rissman J. (2022), « Update inflation reduction act modeling using the energy policy simulator », *Energy Innovation Policy and Technology LLC*, août.

exemple, les normes qui encadrent les installations classées pour la protection de l'environnement – ICPE). Cette approche a plusieurs effets positifs :

- l'envoi d'un signal prévisible et crédible (par rapport à une promesse d'augmenter graduellement le signal-prix par exemple) forçant certains acteurs à anticiper la restructuration de l'offre des filières concernées ou à changer de mode de production et/ou de consommation plus ou moins rapidement ;
- l'énonciation claire et explicite des objectifs environnementaux de la mesure ;
- permettre de cibler un secteur ou une technologie, en particulier si l'on souhaite une intervention spécifique.

Néanmoins, les réglementations ne sont pas les mesures les plus coût-efficaces : elles peuvent conduire à de mauvais choix technologiques, entraîner, pour les entreprises, un effet de verrouillage technologique[1] et nécessitent un pilotage fin et coûteux pour garantir le respect des objectifs climatiques (évolution des normes par à-coups) et leur efficacité (risque de sur- ou sous-investissement si la norme est mal calibrée).

Par ailleurs, contrairement à la tarification carbone qui s'applique sur l'ensemble des émissions à un instant donné, les mesures réglementaires visent à contraindre les émissions au niveau d'un certain seuil impliquant que l'incitation à la décarbonation ne porte pas sur les émissions restantes, c'est-à-dire résiduelles. En outre, elles ne permettent pas de contrôler l'effet rebond[2], contrairement aux outils de tarification du carbone qui favorisent la tarification des externalités de façon continue. Il est par ailleurs difficile d'estimer les coûts qu'elles impliquent (« coûts cachés » liés aux investissements induits, au risque de dépréciation du capital, à l'incidence sur les prix, etc.), et leurs impacts en matière de compétitivité, pour des entreprises soumises à une forte concurrence internationale, et de contrôle, qui peuvent être importants[3].

---

[1] Les effets de verrouillage technologique se traduisent en une difficulté à transiter vers une technologie moins carbonée, souvent par cause de prolongation de la durée de vie de l'alternative carbonée par des évolutions incrémentales, et/ou en une diffusion plus lente de technologies vertes innovantes par le cadre réglementaire en vigueur qui incite au développement d'un certain type de technologie verte en particulier. Voir par exemple Hawkins-Pierot J. T. et Wagner K. R. H. (2022). « Technology Lock-In and Optimal Carbon Pricing », Working Paper, Cesifo, mai ; ou Kalkuhl M., Edenhofer O. et Lessmann K. (2012), « », *Resource and Energy Economics*, vol. 34(1), p. 1-23.

[2] L'effet rebond est défini comme la différence entre la réduction d'émissions effective et la réduction théorique anticipée. Il peut être direct (portant sur les mêmes postes que ceux concernés par la décarbonation, par exemple une augmentation de la consommation de chauffage après une rénovation thermique) ou indirect (se rapportant à d'autres postes, par exemple les réinvestissements des économies sur la facture énergétique vers l'achat de nouveaux biens).

[3] Pour Chateau *et al.* (2022), les régulations sur les produits échangeables ont un impact négatif sur la compétitivité plus important que la taxe carbone.

Enfin, du point de vue des finances publiques, les mesures réglementaires n'impliquent pas de dépenses ou de recettes supplémentaires immédiates. Elles nécessitent néanmoins une surveillance de l'application des normes et la mise en place de sanctions pour les entreprises contrevenantes. Cette surveillance et les sanctions contribuent d'ailleurs à la crédibilité du signal envoyé par la réglementation et/ou la norme et participent donc de la bonne mise en œuvre de la décarbonation voulue.

Exemples. Plusieurs mesures réglementaires sont déjà mises en place en France et dans l'Union européenne. Concernant les réglementations environnementales, on retrouve par exemple la réglementation RE2020 pour les bâtiments, l'interdiction de la location des passoires thermiques à l'horizon 2025, les zones à faibles émissions (ZFE), ou encore le Décret éco-efficacité tertiaire (DEET) régissant les objectifs de baisse de consommation énergétique des bâtiments tertiaires ; dans l'UE, la directive européenne sur l'efficacité énergétique (DEE). Concernant les normes technologiques, l'UE a mis en place une interdiction de vente des véhicules thermiques en 2035 ainsi qu'une norme CO_2 sur les émissions des véhicules routiers. La France a imposé l'obligation d'installer des panneaux photovoltaïques sur les toits de certains bâtiments.

Modélisation. Une mesure réglementaire s'applique directement à un ou plusieurs secteurs industriels ou institutionnels de l'économie. Son intégration se fait plus ou moins directement dans les modèles selon la finesse de leur découpage et leur détail sectoriel. Les secteurs peuvent être soit modélisés et endogénéisés directement dans le modèle macroéconomique, soit modélisés séparément dans un modèle technico-économique qui est ensuite couplé avec le modèle macroéconomique.

Les modèles peuvent intégrer des contraintes sur les quantités d'intrants utilisés par les entreprises. De telles mesures affectent alors indirectement les prix relatifs des intrants et provoquent des réallocations sectorielles de biens. Dans IMF-ENV, Chateau *et al.* (2022) modélisent par exemple dans le secteur de l'énergie une réduction de 20 % des énergies fossiles en 2030 en imposant dans la contrainte de bouquet énergétique du programme d'optimisation des producteurs d'énergie une part croissante des énergies renouvelables, de telle manière qu'en 2030 la cible soit atteinte. Dans leur propre modèle d'équilibre général intertemporel, Kalkuhl *et al.* (2013)[1] modélisent une réduction des émissions en imposant une contrainte intertemporelle sur le secteur de l'extraction des combustibles fossiles sous la forme d'un plafond sur les extractions cumulées au cours d'une période donnée.

Certains modèles endogénéisent la capacité de production des secteurs industriels. Des mesures peuvent se modéliser alors comme un ajustement des investissements ou

[1] Kalkuhl M., Edenhofer O. et Lessmann K. (2013), « Renewable energy subsidies: Second-best policy or fatal aberration for mitigation? », *Resource and Energy Economics*, vol. 35(3), février, p. 217-234.

des canaux d'entrée de nouveaux acteurs dans les secteurs visés, ce qui contraint ou favorise l'offre en faveur de la décarbonation. Dans REMIND, Bertram *et al.* (2015)[1] modélisent un moratorium sur le charbon en contraignant l'investissement dans de nouvelles capacités de production utilisant le charbon (électricité, liquides, essence et hydrogène). Un soutien aux technologies peu carbonées est aussi modélisé en imposant un niveau plancher de déploiement de capacités de production d'électricité éolienne et solaire, de séquestration du carbone et de production de voiture électrique. Les coûts supplémentaires de la production d'électricité sont financés par un tarif additionnel sur l'électricité, évitant ainsi d'éventuels effets rebond.

Au lieu d'être le résultat de la résolution du modèle macroéconomique, des chroniques de quantités et de prix peuvent être celles d'un modèle technico-économique séparé, dont les sorties sont par la suite intégrées soit de manière exogène, soit en calibrant le modèle macroéconomique à travers des chroniques de prix fictifs qui lui permettent de reproduire les sorties des modèles technico-économiques. Par exemple, Weitzel *et al.* (2023)[2] évaluent l'effet de mesures du 2030 Climate Target Plan européen en faveur de l'efficacité énergétique, les EnR et le transport terrestre, tels les normes pour les véhicules et les codes de construction qui augmentent les coûts pour les ménages et les entreprises, soit en contraignant (seuils minimaux) ou en incitant (prix fictifs) à la rénovation et l'efficience énergétique dans le modèle énergétique PRIMES. Ce dernier produit alors des chroniques de consommation d'électricité et d'énergie dans le résidentiel et les transports qui fixent les volumes et les prix de ces transactions dans le modèle macroéconomique JRC-GEM-E3.

2.2. Investissements et dépenses publiques

Le secteur public peut également investir dans des activités bas-carbone ou favoriser leur développement via des achats publics ou des mesures ciblées de soutien à l'investissement privé. Ces achats ciblés augmentent la demande adressée aux activités bas-carbone pour stimuler leur production. Ils peuvent en outre être conditionnés à une remontée de données permettant de vérifier la réalisation effective des projets d'investissement. Cependant, les investissements ou achats publics ne pénalisent pas directement les émissions et peuvent être coûteux pour les finances publiques, s'ils n'engendrent pas une hausse d'activité et de recettes équivalentes.

[1] Bertram C., Luderer G., Pietzcker R. C., Schmid E., Kriegler E. et Edenhofer O. (2015), « Complementing carbon prices with technology policies to keep climate targets within reach », *Nature climate change*, 5(3), février, p. 235-239.

[2] Weitzel M., Vandyck T., Los Santos L. R., Tamba M., Temursho U. et Wojtowicz K. (2022), « A comprehensive socio-economic assessment of EU climate policy pathways », *Ecological Economics*, 204, 107660, novembre.

Exemples. Plusieurs investissements ou achats publics durables (de l'État notamment) pour la rénovation des réseaux et des infrastructures, ou encore dans les technologies bas-carbone, sont des exemples de dépenses publiques favorisant la décarbonation. Elles peuvent par exemple être faites via la prise de participation de l'État dans des entreprises (EDF, SNCF, à capitaux publics) ou directement par les collectivités ou l'État dans la rénovation énergétique des bâtiments publics (par exemple dans les écoles, les hôpitaux, etc.).

Modélisation. De la même manière que pour les mesures réglementaires, la modélisation de ces investissements et achats publics peut prendre plusieurs formes selon l'effet direct ou attendu de la mesure. Cependant, à la manière de la subvention, le coût de la mesure est à imputer aux administrations publiques. Par exemple, Ashmoore *et al.* (2022)[1] modélisent le financement d'emprunt dans la production de biens intermédiaires pour développer le réseau électrique.

2.3. Information

Enfin, les mesures informationnelles permettent d'apporter de l'information ciblée et de sensibiliser les acteurs sur l'impact de leurs activités sur le changement climatique et l'environnement (voir le rapport thématique *Sobriété*). Elles orientent ainsi les décisions de consommation[2] et d'investissements des acteurs. Ces mesures supposent des développements méthodologiques souvent lourds comme par exemple la mise en place de label intégrant toutes les étapes du cycle de vie d'un produit (analyse en cycle de vie, etc.). Pour être exhaustive, cette approche nécessite de mobiliser les acteurs étrangers pour agir sur les produits importés et les activités poursuivies étrangères. Il est par ailleurs difficile d'estimer des coûts pour les acteurs (certification, récolte de données, etc.) et un risque de *greenwashing* existe dans le cas d'une méthodologie peu robuste.

Exemples. En France, plusieurs exemples de ce type de mesures informationnelles existent : le diagnostic performance énergétique, les labels environnementaux, l'affichage éco-score, le score carbone, la taxonomie environnementale de l'Union européenne, les certificats de garantie d'origine, le budget vert pour les dépenses publiques de l'État, etc.

Modélisation. L'analyse des effets d'une mesure informationnelle au travers de modèles nécessiterait de modéliser finement les préférences des ménages, et donc d'émettre des hypothèses fortes sur leurs comportements pour quantifier des effets de substitution en faveur de la décarbonation (voir le rapport thématique *Sobriété*).

---

[1] Ashmoore *et al.* (2022), « Update inflation reduction act modeling using the energy policy simulator », *op. cit.*

[2] Lohmann *et al.* (2022) montrent une réduction de 4,3 % des émissions carbone liées à l'alimentation suite à l'introduction d'un écolabel : Lohmann Paul M., Gsottbauer E., Doherty A. et Kontoleon A. (2022), « Do carbon footprint labels promote climatarian diets? Evidence from a large-scale field experiment », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 114, juin.

Tableau 2 – Modélisation des mesures de décarbonation (hors taxe carbone explicite) dans les modèles technico-économiques sectoriels et macroéconomiques

Catégorie	*Secteur*	Instrument	Applications ou évaluations macro (* technico-éco)
Instruments fondés sur le marché	*Énergie*	Tarifs d'achat	IMF-ENV(3), Kalkuhl *et al.* 2011(5)
		Bonus-malus	IMF-ENV(3), Kalkuhl *et al.* 2011(5)
		Crédit d'impôt	EPS*(8)
	Industrie	Crédit d'impôt	EPS*(8)
	Transport	Bonus-malus	Energy Policy Simulator* (EPS)(6)
		Soutien à l'investissement	EPS*(8)
Instruments non-fondés sur le marché – Mesures régle-mentaires	*Énergie*	Contrainte de bouquet énergétique	AIM-HUB(6), GEM-E3(6), IMF-ENV(3), MESSAGE-GLOBIOM(6), WEGDYN(6)
		Contrainte de capacité de production	AIM-HUB(6), DNE21+(4), EPS*(6), GCAM*(4), GEM-E3(6), GRACE(6), Imaclim(4,6), IMAGE(4), MERGE-ETL(4), MESSAGE-GLOBIOM(4,6), POLES*(4), REMIND(2,4), WEGDYN(6), WITCH(4,6)
		Normes d'émission	AIM-HUB(6), GRACE(6), Imaclim(6), IMF-ENV(3), MESSAGE-GLOBIOM(6), SNOW GL HH(6), WEGDYN(6), WITCH(6)
		Amélioration du bilan carbone des fossiles	EPS*(6)
	Industrie	Normes d'émission	EPS*(6,8), IMF-ENV(3), Kalkuhl et al. 2011(5)
		Contraintes de capacité de production	REMIND(2)
		Amélioration de l'efficacité énergétique	AIM-HUB(6), CEEPA(6), DART(6), EPS*(6), GCAM*(1), GRACE(6), Imaclim(6), MESSAGE-GLOBIOM(1), IEG-CGE(8), MARKAL*(6), REMIND-MagPIE(1), TIMER*(6), WEGDYN(6), WITCH(6)
		Séquestration du carbone	EPS*(6), GCAM*(1), MESSAGE-GLOBIOM(1), REMIND-MagPIE(1)
	Agriculture	Aides aux producteurs et aux consommateurs	AIM-HUB(6), GRACE(6), WEGDYN(6), WITCH(6)
		Réduction des émissions	GCAM*(1), MESSAGE-GLOBIOM(1), NEV-RES*(6), REMIND-MagPIE(1)
		Conservation de la biodiversité	MESSAGE-GLOBIOM(1)
	Forêts, utilisation des terres	Protection des terres	AIM-HUB(6), GCAM*(1), MESSAGE-GLOBIOM(1), REMIND-MagPIE(1)
		Reforestation	EPS*(6)

Catégorie	*Secteur*	Instrument	Applications ou évaluations macro (* technico-éco)
	Bâtiment	Électrification	GCAM*(1), MESSAGE-GLOBIOM(1), NEV-RES*(6), REMIND-MagPIE(1)
		Normes sur les codes de construction	EPS*(6), JRC-GEM-E3(7), PRIMES*(7)
		Rénovation énergétique	EPS*(6), JRC-GEM-E3(7), PRIMES*(7)
	Transport	Efficacité énergétique	EPS*(6), GCAM*(1), JRC-GEM-E3(7), MESSAGE-GLOBIOM(1), NEV-RES*(6), PRIMES*(7), REMIND-MagPIE(1)
		Mobilité urbaine	EPS*(6)
		Électrification	EPS*(6)
Instruments non fondés sur le marché – Intervention publique	*Industrie*	Financement d'emprunt	EPS*(8)

Sources : (1) Bertram et al. *(2020)*[1], *(2) Bertram* et al. *(2015), (3) Chateau et al. (2022), (4) Eom* et al. *(2015)*[2], *(5) Kalkuhl* et al. *(2013), (6) OCDE (2022), (7) Weitzel* et al. *(2023), (8) Ashmoore* et al. *(2022)*

[1] Bertram C., Hilaire J., Kriegler E., Beck T., Bresch D. N., Clarke L., Yu S. *et al.* (2021), *NGFS Climate Scenarios Database*, Technical Documentation, version 2.2, septembre.

[2] Eom J., Edmonds J., Krey V., Johnson N., Longden T., Luderer G., Riahi K. et Van Vuuren D. P. (2015), « The impact of near-term climate policy choices on technology and emission transition pathways », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 90, p. 73-88, janvier.

CHAPITRE 2

CAS D'ÉTUDE : INTÉGRATION ET MODÉLISATION DES MESURES DE DÉCARBONATION DANS LES MODÈLES THREEME ET IMACLIM-R

ThreeME et Imaclim-R sont deux modèles macro-environnementaux calibrés pour la France (voir Encadrés 1 et 2) et utilisés pour évaluer l'impact macroéconomique de la transition écologique dans le cadre de ce groupe de travail. Les différents instruments de décarbonation détaillés dans la partie précédente peuvent y faire l'objet d'une modélisation, dont nous indiquons les pistes dans ce chapitre.

Encadré 1 – Présentation du modèle Imaclim-R

Le modèle Imaclim-R France est un modèle dynamique, récursif, multisectoriel, à arbitrages endogènes. Parmi les modèles du projet de modélisation Imaclim[1] porté par le Cired, il est le plus pertinent pour modéliser les comportements économiques de l'économie française. Il combine un cadre d'équilibre général calculable (CGE) avec des modules sectoriels dans une architecture dynamique, hybride et récursive. Il permet d'étudier les scénarios de croissance dans des mondes sous-optimaux (utilisations partielles des facteurs de production et anticipations imparfaites), en s'appuyant sur une représentation explicite des systèmes énergétiques et techniques (industrie, automobile, bâtiments, etc.).

[1] Il se décline en plusieurs projets calibrés pour plusieurs pays. Deux sont actuellement calibrés sur la France : un modèle statique « Imaclim-S » à comportements exogènes, utilisé pour l'évaluation de la Stratégie nationale bas -carbone 2 (SNBC 2), reconduit pour celle de la SNBC 3 (appelé dans ce dernier cadre à être étendu à la dynamique récursive) ; un modèle réduit KLEM conçu pour être couplé à des modèles d'ingénieur de type POLES, TIMES ou LEAP, et ne proposant que très peu de comportements endogènes, très agrégés, et en dehors des arbitrages opérés dans le modèle couplé.

Imaclim-R France modélise une trajectoire économie-énergie en résolvant un équilibre économique statique chaque année, et en ajustant les coefficients techniques dans des modules dynamiques *bottom-up*. Le commerce international est exogène, mais la balance commerciale peut être paramétrée pour tenir compte de contraintes sur l'investissement.

Ménages. La demande finale des ménages en biens et services est déterminée par la maximisation d'une fonction d'utilité qui tient compte des contraintes d'équipement (logement et transport via un coût du transport généralisé) des ménages. Les ménages économisent une partie de leur revenu.

Administrations publiques. Elles collectent les recettes des taxes et des mesures, réalisent les dépenses dans les infrastructures publiques, et organisent les transferts. La dette n'est pas représentée, et les transferts sont réalisés de sorte à permettre l'équilibre budgétaire chaque année.

Secteur électrique. Il est représenté en prenant en compte les contraintes physiques qui imposent une quasi-égalité entre la production et la demande à tout instant. Le mix énergétique comprend treize technologies possibles, qui sont caractérisées par des paramètres permettant de calculer leur coût de production d'énergie escompté : coût des capitaux installés (€/kW), efficacité énergétique (en pourcentage, pour les technologies qui utilisent des énergies fossiles), coûts opérationnels et de maintenance, coûts fixes et variables (€/kW et €/kWh) et taux d'escompte propre à chaque technologie. Cette représentation explicite permet de modéliser les principales politiques publiques portant sur le secteur : changements dans le bouquet énergétique, normes, efficacité énergétique…

Secteur résidentiel. La consommation énergétique du secteur résidentiel est déterminée lors de la résolution statique par des coefficients de consommation moyens au mètre carré, calculés à partir d'un suivi des types de logements (maisons individuelles, logements collectifs, logements sociaux), du stock, de la surface et de la catégorie énergétique de ces logements. Ces coefficients contraignent le budget des ménages, dont la demande énergétique dépend des choix d'équipement réalisés les années précédentes : ils sont considérés comme inélastiques aux prix à court terme. La surface par habitant est variable et fonction des revenus de l'année lors de l'équilibre statique précédent. Plusieurs types de politiques publiques ne s'appuyant pas sur les marchés sont utilisées dans le modèle : crédits d'impôt pour la rénovation / éco-prêt à taux zéro, normes (réglementation thermique) ou obligations de rénovation.

Secteur du transport. Lors de la résolution statique, le transport de passagers et de marchandises est caractérisé par le nombre et les caractéristiques des voitures des ménages, l'efficacité énergétique des voitures, les capacités des infrastructures

des différents modes de transport, et des coefficients de consommation d'énergie (à la fois du secteur des transports et du secteur composite / des services).

Le stock de véhicules est représenté explicitement et segmenté par type et consommation des véhicules. Un module technique bonus-malus modélise ce mécanisme. Les politiques publiques implémentées, à l'exception des différentes taxes sur le poids ou les carburants, comprennent les normes, l'éco-redevance poids lourds et l'électrification du parc automobile.

Autres secteurs productifs. L'industrie est scindée en deux ensembles, un secteur d'industries lourdes regroupant sidérurgie, ciment, papier et chimie, et un solde d'activités industrielles agrégé au secteur des services[1]. Ces secteurs productifs, dont en plus l'agriculture, réalisent un profit (spécifique au secteur) lors de la vente de leurs services. Ils peuvent investir dans l'efficacité énergétique lors de la résolution de l'équilibre statique.

Encadré 2 – Présentation du modèle ThreeME

ThreeME (Modèle macroéconomique multisectoriel pour l'évaluation des politiques environnementales et énergétiques) est un modèle macroéconomique et multisectoriel ouvert (« *open source* ») développé pour évaluer les impacts économiques de politiques environnementales et énergétiques à moyen et long terme en France[2] (pour une description détaillée, voir www.threeme.org).

ThreeME est un **modèle en équilibre général néo-keynésien**, où les prix et les quantités sont rigides à court terme et n'équilibrent donc pas instantanément l'offre et la demande optimales. Contrairement à un modèle à équilibre walrasien, ce cadre théorique modélise plus finement la phase de transition des effets d'une politique, et pas seulement une analyse de long terme. À court terme, l'offre s'ajuste à la demande. À moyen et long terme, l'offre influence la demande via les revenus générés par les facteurs de production.

La dynamique du modèle est guidée par les **processus d'ajustement** des prix et des quantités qui supposent que les valeurs effectives s'ajustent progressivement à leur niveau dit « notionnel » (c'est-à-dire désiré ou optimal à long terme). La spécification retenue est micro-fondée et est dérivée de la minimisation d'un

[1] Une désagrégation plus poussée est prévue dans le cadre des travaux en cours sur l'emploi financés par le CGDD.

[2] ThreeME est maintenant appliqué à d'autres pays tels que l'Union européenne, le Mexique, la Tunisie, l'Indonésie ou les Pays-Bas.

modèle avec coûts d'ajustement quadratiques. Les paramètres d'ajustement sont calibrés sur des estimations de la littérature économétrique[1]. Les prix et les quantités effectives s'ajustent alors lentement à leur optimum défini par un comportement de maximisation permettant ainsi des situations de déséquilibre entre l'offre et la demande ou de sous-emploi.

Les **entreprises** choisissent en concurrence imparfaite la demande de facteurs de production (capital, travail, consommations intermédiaires énergétiques et non énergétiques) optimale qui minimise les coûts de production sous l'hypothèse d'une fonction production flexible. Les **ménages** ont à long terme une cible de taux d'épargne endogène susceptible de dépendre de diverses variables mises en avant par les principaux modèles théoriques de consommation : taux d'intérêt réel (modèle du revenu permanent, de cycle de vie), taux de chômage (modèle avec épargne de précaution), taux d'endettement de l'État (équivalence ricardienne). Les **salaires** s'ajustent par une courbe de Phillips ou une courbe de *wage setting.* Le **taux d'intérêt réel** est fixé par les autorités monétaires selon une règle de Taylor : il augmente avec l'inflation et diminue avec l'activité.

La **désagrégation sectorielle** permet l'analyse des effets du transfert d'activité d'un secteur à un autre, notamment en termes d'emploi, d'investissement, de consommation d'énergie et de commerce extérieur. Le modèle pour la France dispose d'une segmentation en trente-sept secteurs économiques, dont dix-sept secteurs énergétiques et cinq secteurs de transport (transport ferroviaire, transport routier de voyageurs et de marchandises, par eau et aérien). Le secteur pétrolier est subdivisé en deux, pétrole et biocarburant ; celui de la production et distribution d'électricité en huit technologies : nucléaire, centrale au fioul, centrale combinée gaz, centrale au charbon, éolien, solaire, hydraulique et cogénération. Enfin, la production et distribution de gaz et de chaleur est assurée par six secteurs : gaz naturel, bois, biogaz, incinération des ordures ménagères, géothermie et cogénération.

La **désagrégation énergétique** permet l'analyse des comportements en matière de production et de consommation d'énergie. Les secteurs d'activité peuvent arbitrer entre différents investissements énergétiques : substitution entre capital, travail et énergie quand les prix relatifs changent, substitution entre sources d'énergie. Les ménages peuvent substituer entre sources énergétiques, entre modes de transport et entre types de biens ou services.

Concernant les **comportements de consommation de produits de base (*commodities*)**, deux versions de ThreeME peuvent être simulées. Dans la première, dite « standard », les ménages maximisent une fonction d'utilité, croissante des quantités consommées de chaque bien, sous une contrainte de

[1] En particulier à partir des estimations des modèles plus agrégés d'inspiration néo-keynésienne de l'économie française, tels E-MOD de l'OFCE ou Mésange de l'Insee et de la Direction générale du Trésor.

dépense globale cible. La consommation de chaque bien suit alors plus ou moins proportionnellement les évolutions du revenu en fonction des arbitrages possibles entre biens de consommation. En particulier, une structure de fonction d'utilité imbriquée permet de représenter les substitutions entre investissements d'efficacité énergétique et produits standards énergétiques. Dans la version dite « hybride », la quantité d'énergie consommée n'est pas liée directement au revenu des ménages. Elle n'entre pas directement dans la fonction d'utilité du ménage car elle n'est pas désirée pour elle-même. Elle est assimilée à un bien complémentaire d'un service rendu. Sa consommation dépend de l'évolution et de la nature du stock de capital (véhicules, immeubles, biens d'équipement). Par exemple, l'énergie utilisée pour les besoins du chauffage dépend du nombre de bâtiments existants et de la classe énergétique à laquelle ils appartiennent. Cette hypothèse empruntée aux modèles énergétiques *bottom-up* développés par les ingénieurs est plus réaliste que celle des modèles CGE (dits « *top-down* ») et reprise dans la version standard. En effet, elle permet de tenir compte de niveau de saturation, de la complémentarité de l'énergie avec d'autres biens (voitures, logements), mais aussi d'endogénéiser les mécanismes d'efficacité énergétique observés dans la consommation des ménages.

1. Instruments fondés sur le marché

ThreeME et Imaclim intègrent des taux de subventions et taxes sur les produits. Les mesures touchant les prix des produits (tarifs d'achat, subventions de prix, bonus-malus) peuvent être modélisées. Dans le secteur de l'énergie, un choc sur le taux des taxes intérieures de consommation (TIC) sur les renouvelables et les fossiles peut donc être calibré.

Ces chocs modifient le signal-prix des biens des secteurs concernés, une taxe renchérissant ou une subvention diminuant le prix relatif du bien contre ses alternatives. Du côté de la demande, un renchérissement relatif du coût d'achat diminue la demande et peut provoquer une substitution vers des alternatives de meilleur marché. Du côté de l'offre, un renchérissement relatif des coûts de production réduit l'offre et incite au basculement vers des alternatives technologiques moins onéreuses. La hausse des coûts de production se transmet ensuite progressivement à l'ensemble des prix dans l'économie.

Il est également possible de calculer le taux de taxe ou de subvention nécessaire pour atteindre une cible de prix en renversant les équations de prix.

2. Mesures réglementaires

2.1. Énergie

Dans ThreeME, il est possible d'introduire directement un choc sur le mix énergétique (parts de marché des sources d'énergie), de manière exogène, tandis que les demandes d'énergie sont endogènes. Dans Imaclim-R spécifiquement, le mix électrique et les mix des consommations d'énergie des transports et du secteur résidentiel sont endogènes, résultant d'une compétition entre technologies explicitement représentées – il est cependant possible d'introduire des contraintes sous forme de restrictions à l'investissement dans certaines technologies, ou même de retraits de capacités ou d'équipements. Les mix des consommations d'énergie des productions autres que d'électricité et de services de transport sont exogènes.

Pour les deux modèles, les capacités de production électrique sont modélisées par le suivi des puissances installées par type de centrale (26 technologies de production pour Imaclim-R).

Les émissions sont endogènes dans ThreeME. Elles dépendent à la fois de la demande énergétique et de la composition du mix énergétique. Les intensités en carbone peuvent être implicitement calculées en faisant le ratio des émissions sur la consommation énergétique. Dans le cas spécifique des énergies fossiles, leur bilan carbone est endogénéisable en jouant sur l'autoconsommation des branches et modélisant de la séquestration du carbone à la sortie des cheminées. Dans Imaclim-R, les intensités en carbone des différentes technologies de production électrique sont exogènes. Certaines existent dans des versions avec capture et stockage du carbone (CCS), dont les émissions sont supposées nulles.

2.2. Industrie

Les émissions énergétiques des secteurs industriels peuvent être modulées en jouant sur le bouquet énergétique (les entreprises peuvent substituer les sources d'énergies entre elles), et l'efficacité énergétique (en réalisant des investissements de substitution du capital à l'énergie). Ces mécanismes sont endogènes dans ThreeME, et exogènes mais pilotables dans Imaclim en modifiant les coefficients technologiques à la Leontief.

Les émissions non énergétiques (liées à la consommation de combustibles à double usage ou à la décarbonation des produits minéraux non métalliques) dépendent de la production des secteurs dans ThreeME. Ces émissions de carbone dites « de process » ne sont pas modélisées dans Imaclim-R.

Les capacités de production de chacun des secteurs industriels sont endogènes dans l'un et l'autre modèle. Elles résultent de l'accumulation de capital, par le biais d'une règle d'allocation sectorielle de l'investissement. Dans Imaclim-R, cette ventilation dépend des anticipations de demande (imparfaites) et du taux d'utilisation des capacités des secteurs, qui rétroagit aussi sur les coûts de production. Un certain pilotage des trajectoires de développement des différents secteurs peut aussi être obtenu en jouant sur les demandes intermédiaires, qui résultent pour chaque secteur de « coefficients techniques » (consommations par unités produites) exogènes.

La séquestration du carbone dans l'industrie est modélisée dans ThreeME, via l'utilisation de l'énergie comme consommation intermédiaire pour les processus industriels, mais pas dans Imaclim-R.

2.3. Agriculture

Le secteur agricole est modélisé à part entière dans ThreeME et Imaclim-R. Il n'y a pas de distinction entre les différents types d'agriculture (par exemple, agriculture biologique ou non). Des aides sont modélisables – comme des subventions sectorielles –, mais des aides ciblées, et de manière générale toute mesure ciblée sur un type particulier d'agriculture (par exemple, conservation, biodiversité) doit passer par l'appui d'un modèle technico-économique, nécessaire pour calibrer un choc cohérent agrégé sur le secteur agricole.

Les émissions des consommations d'énergie du secteur agricole sont modélisées comme celles des autres secteurs pour les deux modèles (voir *supra*). Imaclim-R ne représente pas les autres sources d'émissions : CH_4, N_2O ou émissions liées aux usages des sols. Dans ThreeME, les émissions des autres gaz à effet de serre sont proportionnelles à l'activité qui les génère. Les coefficients d'émissions peuvent être modifiés de manière exogène pour simuler soit un progrès technique, soit une modification des modes de production (la modification de la composition de l'assiette des Français pourrait entraîner un ralentissement de l'élevage au profit du maraîchage et limiter en conséquence les émissions de méthane).

2.4. Forêts, utilisation des terres

Les activités de foresterie sont agrégées au secteur agricole dans ThreeME comme dans la version actuelle d'Imaclim-R.

La reforestation est modélisable dans les deux modèles comme un choc calibré d'investissement dans la branche agricole qui comprend la sylviculture, ainsi que potentiellement un choc sur les puits de carbone.

Des expériences de couplage du modèle Imaclim-R Monde et des projets de couplage d'un modèle Imaclim-Sénégal à des modèles d'usage des sols développés au Cired (Nexus-LU, Agrimonde) pourraient bénéficier au modèle Imaclim-R France.

2.5. Bâtiment

ThreeME et Imaclim incluent un secteur du bâtiment où plusieurs modes de chauffage sont détaillés., Il est donc possible d'y modéliser des mesures d'électrification.

Dans Imaclim-R, un module technique est dédié à la modélisation des demandes d'énergie du bâtiment. Quatre types de chauffage sont modélisés (électrique, gaz, fioul, bois). Le stock et la qualité thermique des logements sont modélisés explicitement.

Les modèles intègrent également une distinction de classes de logement selon leur étiquette DPE et peuvent donc modéliser des mesures de rénovation énergétique (CEE, MaPrimeRénov'). Les sauts de classe sont endogènes dans ThreeME. Les mécanismes d'arbitrage des ménages entre rénovation et gains énergétiques sont calibrés de manière à reproduire les résultats des modèles technico-économiques de rénovation (ou déclassement) énergétique du stock de logements (MEMFIS).

Les classes de DPE étant modélisées dans ThreeME, il y est possible d'intégrer les effets attendus d'une mesure modifiant les normes sur les codes de construction. Il est ainsi possible de contraindre toutes les constructions neuves à relever des classes A ou B à partir d'une certaine date.

2.6. Transport

Dans ThreeME, la consommation énergétique et les émissions des divers modes de transport sont endogènes. Elles dépendent du nombre et des types de véhicules en circulation. Les ménages comme les transporteurs choisissent la classe énergétique de leur véhicule et le type de motorisation selon l'évolution du coût d'usage des diverses alternatives. Les parts de marché entre les divers modes de transport (train, fluvial, aérien ou maritime) dépendent également d'arbitrages en fonction des coûts. Il est aussi possible d'y introduire des chocs exogènes sur les besoins de mobilité (comme par exemple la demande de transport collectif liée à une extension de l'offre ou une piétonnisation de la voirie, ou la réduction des trajets domicile-travail liée au développement du télétravail) en faisant varier la distance parcourue par les ménages par mode de transport.

Dans Imaclim, l'efficacité énergétique et l'électrification dans les transports sont modélisées via la flotte de véhicules particuliers qui est endogène, et le mix énergétique des modes de transport qui est exogène. Il est possible d'y introduire des chocs exogènes

sur les intensités et le mix de carburants consommés (y compris l'électricité) pour le transport de marchandises ou de personnes (bus par exemple).

Des mesures affectant la mobilité peuvent être considérées en impactant les dynamiques du report modal. Dans Imaclim-R, le choix modal en matière de transport individuel est endogène, résultant notamment de l'investissement cumulé dans les infrastructures nécessaires à chaque mode. La ventilation de l'investissement public dans ces infrastructures est exogène. Son pilotage permet de contrôler l'évolution du choix modal.

3. Financements publics

Des crédits d'impôt sont modélisables en ajustant la fiscalité des entreprises différenciée par secteur. Dans ThreeME, il est possible de réduire les taxes à la production ou d'augmenter les subventions soit à la production soit à la consommation. Dans Imaclim-R, il est possible de calibrer un choc sur le total des impôts de production des différents secteurs.

Pour des mesures facilitant le financement, il est possible dans ThreeME de bonifier dans chaque secteur des taux de crédit et d'allonger la durée des prêts afin de diminuer le coût du capital. Dans Imaclim-R, les conditions de financement des secteurs productifs ne sont pas explicitées. Elles ne jouent qu'au travers d'un taux de marge appliqué à l'ensemble des coûts de production (*mark-up pricing*), qui couvre l'excédent brut d'exploitation donc la somme des coûts en capital et des profits (au sens comptable). Ce taux de marge peut être ajusté à la baisse afin de représenter des mesures de soutien au financement dans l'hypothèse où la concurrence est assez forte pour interdire les effets d'aubaine.

Le soutien à l'investissement est quant à lui modélisable en influant sur l'investissement et le stock de capital des différents secteurs (par exemple, soutien au ferroviaire, aux bornes électriques des particuliers).

4. Autres mesures

Des mesures informationnelles (par exemple, labels, taxonomie) relèvent de la modélisation comportementale qui n'est pas finement considérée dans les modèles étudiés. Des chocs exogènes sur la demande peuvent toutefois être calibrés. Imaclim-R explicite par ailleurs des coûts intangibles dans certains choix de technologie (coûts perçus par les utilisateurs mais sans contrepartie financière), qui peuvent être choqués également. Une augmentation de ces coûts intangibles en faveur de la décarbonation réduirait la demande adressée aux alternatives carbonées.

CONCLUSION

L'objectif de ce chantier est de comparer les différents instruments de décarbonation selon leurs effets sur les comportements des ménages et des entreprises, et de décrire des possibles modélisations pour en dériver les impacts macroéconomiques. Plusieurs enjeux ou recommandations en ressortent. Concernant les instruments, on peut identifier les faits stylisés suivants, même si, en pratique, une combinaison de mesures est le plus souvent mise en place, permettant de jouer sur leurs complémentarités et de s'adapter aux spécificités de chaque secteur :

1. La tarification du carbone et, dans une moindre mesure, les autres instruments fondés sur le marché (en particulier les taxes plutôt que les subventions) sont les instruments de décarbonation les plus coût-efficaces car ils internalisent le coût d'émission de GES de la manière la plus explicite et la plus continue dans le temps. Cependant, leurs effets inflationnistes et régressifs peuvent appeler des mesures d'accompagnement pour les atténuer et renforcer l'acceptabilité de la tarification (voir le rapport thématique *Enjeux distributifs* pour l'implication de l'hétérogénéité des ménages sur les effets redistributifs).

2. Les mesures de type réglementaire sont à la fois sectoriellement spécifiques mais également moins flexibles par leur calibrage ponctuel dans le temps, ce qui peut entraîner des effets rebond et de verrouillage technologique qui peuvent nuire à leur potentiel d'atténuation. Ces mesures permettent cependant de cibler des secteurs qu'une tarification carbone n'atteindrait pas ou peu et constituent un signal plus prévisible et crédible que cette dernière.

3. L'intervention publique directe (par exemple les achats et les investissements publics) permet à l'État de rediriger directement les entreprises et les ménages vers la décarbonation si les autres instruments ne le font pas déjà indirectement. Néanmoins, elle ne pénalise pas directement les émissions, peut aller à l'encontre de la sobriété énergétique et est coûteuse pour les finances publiques.

Concernant la modélisation, la plupart des mesures (taxes, bonus-malus, subventions, réglementations) peuvent être intégrées aux modèles macro-environnementaux tels que ThreeMe et Imaclim. Plusieurs dimensions importantes jouant sur l'efficacité des instruments sont cependant omises, ce qui appelle à des compléments méthodologiques :

4. Puisque les modèles ne disposent que d'un ménage représentatif, la prise en compte des effets régressifs des instruments et des mécanismes redistributifs n'est pas satisfaisante (voir le rapport thématique *Enjeux distributifs*). Pour apprécier l'impact des mesures sur le pouvoir d'achat des déciles de revenus, il pourrait être bénéfique de coupler les modèles avec des modules de désagrégation comme Prometheus ou Matisse. Certaines mesures ont également des effets comportementaux sur les ménages (labels, mesures informationnelles), que la modélisation fruste des modèles macroéconomiques ne permet pas de prendre en compte (voir le rapport thématique *Sobriété*).

5. L'impact quantitatif d'une mesure va dépendre de la crédibilité qui est accordée à celle-ci et du signal à l'action en réponse. Cette crédibilité peut être facilitée par des outils de pilotage public (Stratégie française énergie climat - SFEC), de coordination sectorielle privée (Feuilles de route sectorielles de la décarbonation dites « article 301 »), par des trajectoires de baisse de dépenses défavorables à la décarbonation (budget vert) et des négociations pour une tarification minimale du carbone. Modéliser les effets de tels outils reviendrait à définir des hypothèses sur les anticipations des agents économiques et la crédibilité de l'action publique. Des exemples d'évaluation consisteraient à étudier et à comparer des scénarios où une ou plusieurs mesures seraient appliquées de manière plus ou moins ordonnée ou retardée, en tenant compte de la crédibilité que leur accordent les ménages et les entreprises.

6. La prise en compte du scénario international est nécessaire pour analyser les conséquences de la mise en œuvre ou non d'une transition dans nos pays partenaires (voir le rapport thématique *Compétitivité* pour les dimensions internationales de la transition), mais également pour comprendre l'impact de mesures coordonnées entre plusieurs pays (par exemple, les standards internationaux). En matière de modélisation, un modèle multirégional serait particulièrement adapté, dans lequel une mesure serait mise en place dans plusieurs pays simultanément[1] ou de manière différée. Dans le cas d'un modèle-pays unique, il conviendrait alors de calibrer les variables du reste du monde pour rendre compte de l'application des mesures à l'étranger.

[1] Par exemple, Chateau *et al.* (2022) modélisent plusieurs mesures de décarbonation (taxe carbone, tarif d'achat, bonus-malus, réglementation), chacune mise en œuvre simultanément dans les pays du G7, de l'UE, l'Inde et la Chine. Chakraborty S., Lala C. et Pollin R. (2022), Job Creation Estimates Through Proposed Inflation Reduction Act. *Modeling Impacts of Climate, Energy, and Environmental Provisions of Bill*, Political Economy Research Institute, University of Massachusetts Amherst, août.

ANNEXES

ANNEXE 1

REVUE DE LITTÉRATURE DES ÉVALUATIONS *EX ANTE* DE L'IMPACT MACROÉCONOMIQUE DE L'INFLATION REDUCTION ACT

L'Inflation Reduction Act (IRA) est une loi, promulguée en août 2022, visant notamment à réduire les coûts de santé pour les ménages, favoriser la sécurité énergétique et la lutte contre le changement climatique, réduire le déficit public et rendre l'impôt plus juste. Le volet « énergie et climat » consiste en une augmentation des dépenses publiques estimée à 391 milliards de dollars, non plafonnée, sur la période 2022-2031, pour développer la production de technologies vertes (par exemple, voitures électriques) et décarboner le secteur énergétique. Deux tiers de ce montant sont alloués à des crédits d'impôt à destination des entreprises pour soutenir l'investissement et la production verts, et des ménages américains pour les inciter à investir dans l'efficacité énergétique et à acheter des véhicules électriques. Le tiers restant abonde des programmes fédéraux permettant l'adoption de technologies propres, via les marchés publics ou des subventions.

Six évaluations *ex ante* de l'impact sur l'activité et/ou l'emploi, portant sur les mesures de décarbonation seules ou sur l'ensemble de l'IRA, ont été réalisées (voir Annexe 2 pour le détail), à partir des trois méthodes suivantes :

- *Tables des entrées-sorties* : elles détaillent les relations entre les différents secteurs d'activité et entre différentes variables économiques (production, consommations intermédiaires ou emplois), à une date donnée, de sorte à pouvoir inférer les impacts directs dans un secteur donné et indirects par les connexions intersectorielles. Chaque mesure a été modélisée sous la forme de dépenses publiques supplémentaires, avec un effet levier sur la dépense privée, pour calculer l'impact sur l'emploi.
- *Modèles technico-économiques sectoriels* : ils proposent une représentation fine et détaillée de différents secteurs d'activité (notamment des transports, de la production et de la distribution d'électricité, de la construction et de l'industrie). Ces modèles peuvent être couplés via des tables des entrées-sorties ou un modèle macroéconomique,

pour tenir compte des effets indirects et de bouclage intersectoriel. Les mesures ont été modélisées directement par des variables exogènes équivalentes (subventions dont les crédits d'impôt, coût marginal d'abattement, taxation, ajustement des émissions carbones) ou indirectement via des variables permettant de répliquer les effets attendus (par exemple, par des signaux-prix fictifs pour modéliser l'ajustement de la production et de la consommation énergétiques), selon des méthodes proches de celles proposées par ThreeME, décrites ci-dessus. Ces modèles ont principalement été utilisés pour inférer l'impact de l'IRA sur l'emploi.

- *Modèles macroéconomiques* : ils proposent une représentation synthétique des interactions économiques entre les ménages, les entreprises, les administrations publiques, ainsi qu'avec le reste du monde, permettant de tenir compte des effets indirects et de bouclage dans un cadre cohérent. Chaque mesure a été modélisée par des variables exogènes visant à en répliquer les montants ou les effets attendus (investissement public, transferts forfaitaires aux ménages, ajustement des coûts de production, des prix, de la demande adressée aux entreprises ou de la production), dans une approche analogue aux évaluations pouvant être réalisées avec des modèles du type Mésange, ThreeME ou Imaclim-R. Ces modèles ont pu être couplés avec des modèles technico-économiques pour affiner le calcul des chroniques de chocs. Ils ont été utilisés pour évaluer l'impact de l'IRA sur l'activité et l'emploi.

Dans le cas de l'utilisation de modèles (technico-économiques ou macroéconomiques), l'impact de l'IRA est comparé à un scénario de référence agrégeant diverses lois et mesures prises jusqu'à une date donnée, généralement début 2021. Cette approche est analogue à l'évaluation *ex ante* de l'impact macroéconomique de la SNBC 2, où un scénario dit « avec mesures supplémentaires », permettant de respecter les objectifs de décarbonation, est comparé à un scénario « avec mesures existantes », agrégeant l'ensemble des mesures de décarbonation prises jusqu'en 2017.

Les évaluations des mesures de décarbonation seules font état d'un impact majoritairement positif, mais contenu, sur l'activité et l'emploi à l'horizon 2030 (voir Tableau A1). Selon les mesures modélisées, elles concluent à un rehaussement de l'activité entre 0,6 et 0,9 point de PIB. Seule l'étude de Diamond (2022), qui tient compte de l'ensemble des mesures de l'IRA, dont les hausses de taxes, estime un impact négatif de l'ordre de - 0,1 point de PIB. L'emploi augmenterait entre + 0,9 et + 1,7 million, avec d'importantes réallocations sectorielles (destruction d'emplois dans les secteurs des énergies fossiles, largement compensée par des créations dans la construction et les industries manufacturières).

Tableau A1 – Synthèse des évaluations *ex ante* de l'impact sur l'activité et l'emploi de l'IRA à l'horizon 2030

Article	Méthode de modélisation	Mesures de l'IRA couvertes	Impact sur l'activité (% en écart au scénario de référence)	Impact sur l'emploi (en millions d'emplois en écart au scénario de référence)
Chakraborty *et al.* (2022)[1]	Table des entrées-sorties	Mesures de dépenses en décarbonation	Non mesuré	+ 0,9 M
Ashmoore et al. (2022)2	Modèles technico-économiques	Mesures de dépenses et de recettes en décarbonation	+ 0,6 à + 0,8 pt de PIB	+ 1,2 M à +1,3 M
Diamond (2022)3	Modèle macroéconomique	Ensemble des mesures de dépenses et de recettes	- 0,1 pt de PIB	Non mesuré
Farbes et al. (2022)4	Modèles technico-économiques	Mesures de dépenses et de recettes en décarbonation	Non mesuré	+ 1,7 M
Foster et al. (2023)5	Modèles technico-économiques et macroéconomique	Ensemble des mesures de dépenses et de recettes	+ 0,9 pt de PIB	+ 1,5 M
Maye et Mazewski (2023)6	Table des entrées-sorties	Mesures de dépenses et de recettes en décarbonation	+ 0,7 pt de PIB	+ 1 M

Source : auteurs

[1] Chakraborty S.*et al.* (2022), Job Creation Estimates Through Proposed Inflation Reduction Act, *op.cit.*

[2] Ashmoore O., Gopal A., Mahajan M., Orvis R. et Rissman J. (2022), « Update inflation reduction act modeling using the energy policy simulator », *op. cit.*

[3] Diamond J. (2022), « Macroeconomic Effects of the Inflation Reduction Act », Working Paper, Baker Institute for public policy, Rice University, août.

[4] Farbes J., Jenkins J., Jones R., Mayfield E., Patankar N., Schivley G. et Xu Q. (2022), « Preliminary Report: The Climate and Energy Impacts of the Inflation Reduction Act of 2022 », *Zero Lab*, Princeton University, août.

[5] Foster D., Maranville A. et Savitz S. F. (2023), « Jobs, Emissions, and Economic Growth. What the Inflation Reduction Act Means for Working Families », *Energy Futures Initiative*, Policy Paper, janvier.

[6] Maye A. et Mazewski M. (2023), « Economic Impacts of the Inflation Reduction Act's Climate and Energy Provisions », *Data for Progress*, janvier.

ANNEXE 2

COMPARAISON DE LA PERFORMANCE ÉCONOMIQUE DE DIFFÉRENTES MESURES DE DÉCARBONATION (CHATEAU *ET AL.*, 2022)

Chateau *et al.* (2022) compare plusieurs combinaisons de mesures réglementaires ou tarifaires réduisant de 20 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2030 dans différents pays grâce au modèle macroéconomique mondial, dynamique et multi-sectoriel IMF-ENV. La performance macroéconomique (PIB, dépenses, niveaux de prix, parts de marché) de mesures de décarbonation appliquées conjointement par les pays du G7, la Chine, l'Inde et l'UE est simulée. Quatre scénarios sur le secteur de l'énergie sont évalués – une tarification du carbone, une réglementation directe des émissions[1], un tarif d'achat pour les énergies solaire et éolienne (*feed-in tariffs*)[2] et un bonus-malus[3] (*feebates*).

Chaque mesure est évaluée à objectif équivalent de réduction des émissions et impact neutre sur les finances publiques *ex post*[4], en comparaison avec un contrefactuel sans mesure de décarbonation.

Il en ressort qu'une taxe carbone est la mesure la plus inflationniste pour les prix de l'énergie, contrairement au tarif d'achat qui les diminue fortement. Les prix augmentent dans les cas de la réglementation et du bonus-malus car le secteur bascule vers des sources d'énergie en moyenne plus coûteuses, mais avec un impact moindre que par la tarification du carbone (Graphique A1).

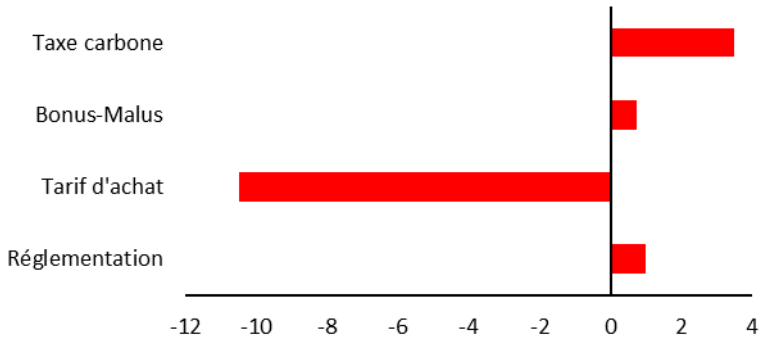
[1] Un seuil croissant de sources non carbonées est imposé dans la contrainte de bouquet énergétique.

[2] Un prix d'achat est garanti aux producteurs.

[3] Une mesure budgétairement neutre prélève des taxes sur les énergies très émissives et subventionne les énergies peu émissives.

[4] La recette (respectivement, le coût) des mesures est compensée par une augmentation (respectivement, une diminution) de la taxation des revenus du travail de sorte à rendre les mesures budgétairement neutres. La régulation et le bonus-malus étant budgétairement neutres par nature, ils ne nécessitent pas de financement mais modifient la base taxable de l'économie. Les taux d'imposition du travail sont alors modifiés de sorte à ne pas impacter les recettes gouvernementales.

Graphique A1 – Impact en 2030 des mesures de décarbonation sur les prix de l'énergie (en % d'écart au compte central)



Note : réduction de 20 % des émissions de GES avec recyclage ou financement par variation du taux de cotisations salariales.

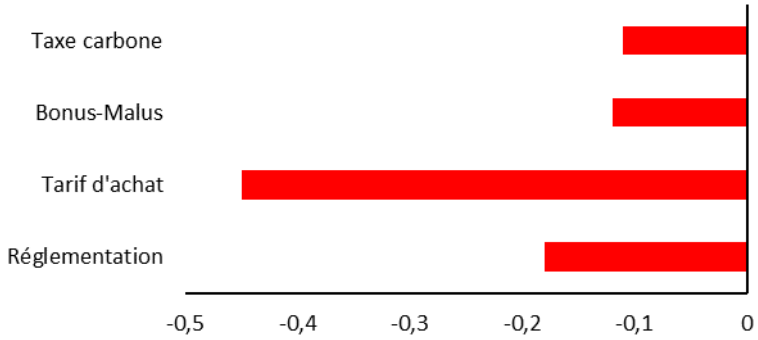
Champ : pays du G7.

Source : Chateau J., Jaumotte F. et Schwerhoff G. (2022), « Climate Policy Options: A Comparison of Economic Performance », IMF Working Papers, décembre

En matière d'impact sur l'activité, le recyclage de la taxe carbone ne permet pas de compenser totalement le choc d'offre négatif, qui est comparable au final aux effets récessifs d'une réglementation ou d'un bonus-malus. La subvention des prix par le tarif d'achat est quant à elle tellement coûteuse que l'effet récessif de son financement dépasse le choc d'offre positif de la subvention, ce qui rend cette mesure au final encore plus récessive que les trois autres (Graphique A2).

Le tarif d'achat est la mesure qui impacte le moins la compétitivité des entreprises des secteurs intensifs en énergie ou exposés au commerce international (*energy intensive or trade exposed* - EITE, voir Graphique A3).

Graphique A2 – Impact en 2030 des mesures de décarbonation dans le secteur de l'énergie sur le PIB réel (en % d'écart au compte central)

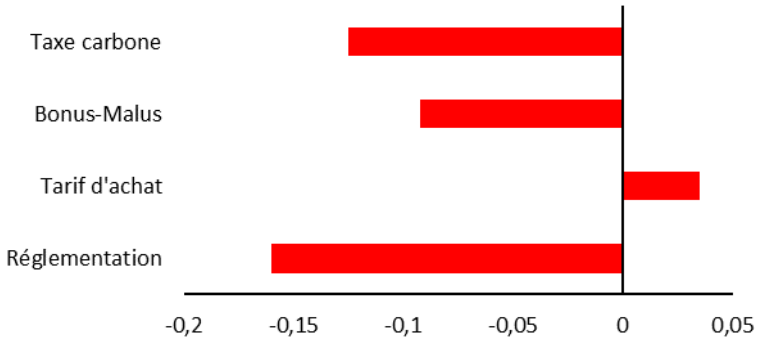


Note : réduction de 20 % des émissions de GES avec recyclage ou financement par variation du taux de cotisations salariales.

Champ : pays du G7.

Source : Chateau J., Jaumotte F. et Schwerhoff G. (2022), « Climate Policy Options: A Comparison of Economic Performance », IMF Working Papers, décembre

Graphique A3 – Impact en 2030 des mesures de décarbonation dans le secteur de l'énergie sur les parts de marché des secteurs EITE (en % d'écart au compte central)



Note : réduction de 20 % des émissions de GES avec recyclage ou financement par variation du taux de cotisations salariales.

Champ : pays du G7.

Source : Chateau J., Jaumotte F. et Schwerhoff G. (2022), « Climate Policy Options: A Comparison of Economic Performance », IMF Working Papers, décembre

ANNEXE 3

AUTRES ÉVALUATIONS DE MESURES DE DÉCARBONATION

D'après Bertram *et al.* (2020)[1], les modèles GCAM, MESSAGEix-GLOBIOM et REMIND-MagPIE pourraient modéliser l'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie et les transports, l'électrification des bâtiments et la séquestration du carbone dans l'industrie. Ils pourraient aussi modéliser la protection et la gestion des forêts, ainsi que les limites d'émission dans l'agriculture. Cependant, aucun détail n'est donné pour une telle modélisation.

Eom *et al.* (2015)[2] effectuent l'analyse comparative en matière de réduction d'émissions de GES de différents scénarios de déploiement des technologies de production d'électricité dans les modèles DNE21+, GCAM, Imaclim, IMAGE, MERGE-ETL, MESSAGE, POLES, REMIND et WITCH.

Le modèle technico-économique NEV-RES de l'institut néerlandais PBL a permis en 2016 d'évaluer l'impact environnemental d'une panoplie de mesures réglementaires telles que l'exigence de niveaux minimaux d'efficacité énergétique pour les logements locatifs, l'obligation d'utiliser des pneus énergétiquement efficaces ou encore l'interdiction de méthaniser d'autres produits que le fumier.

D'après l'OCDE (2022)[3], des normes de bouquet énergétique, des cibles de capacité, des normes d'émission, des normes d'efficacité énergétique, et la protection des terres sont modélisables dans AIM-Hub, GEM-E3, GRACE, Imaclim, MESSAGE-GLOBIOM, SNOW GL HH, WEGDYN ou WITCH. Le modèle *Energy Policy Simulator* (EPS) modélise des normes d'efficacité énergétique et de réduction d'émissions dans les secteurs industriels,

[1] Bertram C., Hilaire J., Kriegler E., Beck T., Bresch D. N., Clarke L., Yu S. *et al.* (2021), *NGFS Climate Scenarios Database*, *op.cit.*

[2] Eom J., Edmonds J., Krey V., Johnson N., Longden T., Luderer G., Riahi K. et Van Vuuren D. P. (2015), « The impact of near-term climate policy choices on technology and emission transition pathways », *op. cit.*

[3] Pisu M., D'Arcangelo F. M., Elgouacem A., Kruse T. et Hemmerlé Y. (2023), « Options for assessing and comparing climate change mitigation policies across countries », *op. cit.*

des normes d'efficacité énergétique, de mobilité urbaine et l'électrification dans le transport, la mise en arrêt ou l'efficacité énergétique des centrales à charbon et le soutien aux ENR dans l'énergie, les normes sur les codes de construction, la rénovation énergétique dans le bâtiment, et la reforestation.

Enfin, Johannson *et al.* (2015)[1] modélisent, dans le cadre de l'étude de l'impact d'une action climatique sur la Chine et l'Inde, les effets d'une mesure d'efficacité énergétique dans les modèles TIMER, DART, CEEPA, IEG-CGE et MARKAL.

D'autre part, plusieurs évaluations macroéconomiques de l'Inflation Reduction Act américain (voir Annexe 1) modélisent l'ajustement de la production et de la consommation énergétique, le coût marginal d'abattement, l'ajustement des émissions, l'ajustement des coûts de production, des prix, de la demande adressée aux entreprises ou de la production. Certaines de ces variables sont explicitement intégrées dans les modèles de manière exogène (par exemple, coût marginal d'abattement, émissions carbone, fiscalité), de sorte à pouvoir être modifiées directement, tandis que d'autres variables peuvent être mobilisées pour répliquer indirectement les effets attendus de certaines mesures (via par exemple des signaux-prix fictifs pour ajuster la demande ou la production). Ashmoore *et al.* (2022)[2], modélisent dans EPS (agrégats de modèles technico-économiques), notamment la diminution des émissions pour le ciment, l'acier et le fer au prorata du montant dépensé et du coût de décarbonation dans leur secteur industriel.

Enfin, d'après D'Arcangelo *et al.* (2022)[3], AIM-Hub, GRACE et WEGDYN peuvent modéliser une subvention pour les entreprises et les consommateurs dans le secteur agricole. De son côté, l'IRA met en place une subvention dont des crédits d'impôt, et de l'investissement public (voir Annexe 1) ; Ashmoore *et al.* (2022)[4] modélisent ainsi, pour le bâtiment, le soutien à l'investissement dans la construction (effet de levier de 3,4 par dollar dépensé) ; pour l'industrie, le financement de crédit dans la production de biens pour réseau électrique (calcul d'un coût moyen par MW-mile) ; pour l'énergie, des crédits d'impôt afin de substituer dans la production d'hydrogène, du gaz naturel et/ou du méthane vers le nucléaire et/ou le renouvelable, de modifier le bouquet énergétique de certaines industries en fonction des scénarios et d'augmenter la production électrique renouvelable correspondante.

---

[1] Johansson D. J., Lucas P. L., Weitzel M., Ahlgren E. O., Bazaz A. B., Chen W. *et al.* (2014), « Multi-model comparison of the economic and energy implications for China and India in an international climate regime », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 20, février, p. 1335-1359.

[2] Ashmoore O., Gopal A., Mahajan M., Orvis R. et Rissman J. (2022), « Update inflation reduction act modeling using the energy policy simulator », *op. cit.*

[3] D'Arcangelo F. M., Johansson A., Levin I., Pagani A. et Pisu M. (2022), « A framework to decarbonise the economy », *op. cit.*

[4] Ashmoore *et al.* (2022), « Update inflation reduction act modeling using the energy policy simulator », *op. cit.*

BIBLIOGRAPHIE

Ademe (2022), *Analyse des conditions de reprise d'une valeur équitable du carbone. État des lieux des arguments et examen comparé des options de politique publique*, « Expertises », juillet.

Alla A. (2023), « Quel effet du marché carbone européen sur la productivité des entreprises ? », *Trésor-Éco*, n° 323, Direction générale du Trésor, février.

Ashmoore O., Gopal A., Mahajan M., Orvis R. et Rissman J. (2022), « Update inflation reduction act modeling using the energy policy simulator », *Energy Innovation Policy and Technology LLC*, août.

Bertram C., Hilaire J., Kriegler E., Beck T., Bresch D. N., Clarke L., Yu S. *et al.* (2021), *NGFS Climate Scenarios Database*, Technical Documentation, version 2.2, septembre.

Bertram C., Luderer G., Pietzcker R. C., Schmid E., Kriegler E. et Edenhofer O. (2015), « Complementing carbon prices with technology policies to keep climate targets within reach ». *Nature climate change*, 5(3), février, p. 235-239.

CGDD, DLF et DGT (2022), *Rapport sur l'impact environnemental du budget de l'État*, octobre.

Chakraborty S., Lala C. et Pollin R. (2022), *Job Creation Estimates Through Proposed Inflation Reduction Act. Modeling Impacts of Climate, Energy, and Environmental Provisions of Bill*, Political Economy Research Institute, University of Massachusetts Amherst, août.

Chateau J., Jaumotte F. et Schwerhoff G. (2022), « Climate Policy Options: A Comparison of Economic Performance », *IMF Working Papers*, International Monetary Fund, décembre.

D'Arcangelo F. M., Johansson A., Levin I., Pagani A. et Pisu M. (2022), « A framework to decarbonise the economy », *OECD Economic Policy Paper*, n° 31, février.

Dechezleprêtre A., Fabre A. et Stantcheva S. (2022), « Les Français et les politiques climatiques », *Les notes du conseil d'analyse économique*, n° 73, juillet.

Dechezleprêtre A., Nachtigall D. et Venmans F. (2018), « The joint impact of the European Union emissions trading system on carbon emissions and economic performance », Document de travail du département d'économie, n° 1515, OCDE, décembre.

Diamond J. (2022), « Macroeconomic Effects of the Inflation Reduction Act », *Working Paper*, Baker Institute for public policy, Rice University, août.

Eom J., Edmonds J., Krey V., Johnson N., Longden T., Luderer G., Riahi K. et Van Vuuren D. P. (2015), « The impact of near-term climate policy choices on technology and emission transition pathways », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 90, p. 73-88, janvier.

Farbes J., Jenkins J., Jones R., Mayfield E., Patankar N., Schivley G. et Xu Q. (2022), « Preliminary Report: The Climate and Energy Impacts of the Inflation Reduction Act of 2022 », *Zero Lab*, Princeton University, août.

Foster D., Maranville A. et Savitz S. F. (2023), « Jobs, Emissions, and Economic Growth—What the Inflation Reduction Act Means for Working Families », *Energy Futures Initiative*, Policy Paper, janvier.

Hawkins-Pierot J. T. et Wagner K. R. H. (2022). « Technology Lock-In and Optimal Carbon Pricing », Working Paper, Cesifo, mai.

Johansson D. J., Lucas P. L., Weitzel M., Ahlgren E. O., Bazaz A. B., Chen W. *et al.* (2014), « Multi-model comparison of the economic and energy implications for China and India in an international climate regime », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 20, février, p. 1335-1359.

Kalkuhl M., Edenhofer O. et Lessmann K. (2013), « Renewable energy subsidies: Second-best policy or fatal aberration for mitigation? », *Resource and Energy Economics*, vol. 35(3), février, p. 217-234.

Kalkuhl M., Edenhofer O. et Lessmann K. (2012), « Learning or lock-in: Optimal technology policies to support mitigation », *Resource and Energy Economics*, vol. 34(1), p. 1-23.

Lohmann Paul M., Gsottbauer E., Doherty A. et Kontoleon A. (2022), « Do carbon footprint labels promote climatarian diets? Evidence from a large-scale field experiment », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 114, juin.

Maye A. et Mazewski M. (2023), « Economic Impacts of the Inflation Reduction Act's Climate and Energy Provisions », *Data for Progress*, janvier.

Pisu M., D'Arcangelo F. M., Elgouacem A., Kruse T. et Hemmerlé Y. (2023), « Options for assessing and comparing climate change mitigation policies across countries », Document de travail du département d'économie, n° 1749, OCDE, février.

Weitzel M., Vandyck T., Los Santos L. R., Tamba M., Temursho U. et Wojtowicz K. (2022), « A comprehensive socio-economic assessment of EU climate policy pathways ». *Ecological Economics*, 204, 107660, novembre.

Directeur de la publication
Gilles de Margerie, commissaire général
Directeur de la rédaction
Cédric Audenis, commissaire général adjoint
Secrétaires de rédaction
Valérie Senné, Gladys Caré
Contact presse
Matthias Le Fur, directeur du service Édition/Communication/Événements
01 42 75 61 37, matthias.lefur@strategie.gouv.fr

RETROUVEZ LES DERNIÈRES ACTUALITÉS
DE FRANCE STRATÉGIE SUR :

www.strategie.gouv.fr

@strategie_Gouv

france-strategie

francestrategie

@FranceStrategie_

StrategieGouv

Les opinions exprimées dans ce rapport engagent leurs auteurs et n'ont pas vocation à refléter la position du gouvernement

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

Institution autonome placée auprès de la Première ministre, France Stratégie contribue à l'action publique par ses analyses et ses propositions. Elle anime le débat public et éclaire les choix collectifs sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Elle produit également des évaluations de politiques publiques à la demande du gouvernement. Les résultats de ses travaux s'adressent aux pouvoirs publics, à la société civile et aux citoyens.

FRANCE STRATÉGIE – 20, AVENUE DE SÉGUR – TSA 90725 – 75334 PARIS CEDEX 07 TÉL. 01 42 75 60 00