



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

DOCUMENT DE TRAVAIL

Évaluation macroéconomique de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC2) avec le modèle ThreeME

Février 2022

Résumé

Une Stratégie nationale bas-carbone révisée (SNBC2) a été publiée en avril 2020, pour tracer le chemin de la transition écologique vers la « neutralité carbone » en 2050.

Le rapport d'accompagnement de cette SNBC2 fournit notamment une évaluation de ses effets macroéconomiques et sectoriels sur l'investissement, la croissance et l'emploi, réalisée par l'Ademe et le CGDD avec le modèle ThreeME, un modèle d'équilibre général calculable d'inspiration keynésienne développé précisément pour évaluer les effets de la politique énergétique.

Cette évaluation met en évidence que la transition énergétique peut être source de croissance et d'emploi. En effet, selon ces simulations, la stratégie SNBC2 aurait un effet graduel positif sur le PIB de 2,5 % en 2030, puis 3,8 % en 2050, permettant de créer près de 900 000 emplois à l'horizon 2050, soit un supplément de 38 000 emplois par an en moyenne, grâce aux effets d'entraînement des investissements, à la baisse de la facture énergétique et la réduction de la dépendance extérieure aux énergies fossiles.

Ce document de travail complète les résultats précédemment résumés dans le rapport d'accompagnement, en présentant de manière détaillée le modèle utilisé et les hypothèses formulées, et en développant certains résultats, notamment les trajectoires des grandeurs macroéconomiques d'intérêt sur toute la période jusqu'en 2050.

Remerciements

Nous remercions Pierre Vannetzel pour sa contribution déterminante à l'analyse développée dans cette étude, Martin Becuwe pour sa contribution au développement du module de demande automobile, notamment de véhicules électriques, Elsa Pivard pour sa contribution au développement du modèle de parc automobile, Hugo Bailly pour sa contribution au développement de la modélisation de la demande de transport, Amandine Schall pour son aide dans la simulation des différents scénarios et enfin Hervé Gouédard qui a participé au calibrage des mesures et à la réalisation des tests de sensibilité.

Auteurs

Gaël CALLONNEC - économiste
Ademe – Direction économie, prospective et recherche (DEPR)

Raphaël CANCE - économiste
CGDD - Service de l'économie verte et solidaire (SEVS)

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
MESSAGES CLÉS.....	4
KEY MESSAGES	8
PARTIE I - THREEME, UN MODÈLE MACROÉCONOMIQUE POUR ÉVALUER LA TRANSITION ÉNERGETIQUE	13
1. <i>Un modèle d'équilibre général calculable</i>	13
2. <i>Un modèle keynésien</i>	14
3. <i>Un modèle multisectoriel</i>	19
4. <i>Un modèle hybride pour représenter la demande d'énergie</i>	20
PARTIE II – LE CADRAGE SNBC2	31
1. <i>Les hypothèses de la SNBC2</i>	31
2. <i>Les mesures qui sous-tendent la SNBC2</i>	33
3. <i>Le cadrage énergétique et ses conséquences</i>	35
4. <i>Les effets sur les parcs automobile et de logements et les émissions de CO₂</i>	41
5. <i>Les émissions de CO₂</i>	42
PARTIE III – L'IMPACT MACROÉCONOMIQUE ET SECTORIEL.....	47
1. <i>Les effets macroéconomiques</i>	47
2. <i>Les effets sectoriels</i>	52
3. <i>Les effets sur les finances publiques</i>	55
ANNEXE : TABLES DÉTAILLÉES DES SIMULATIONS PAR SECTEUR	58
BIBLIOGRAPHIE	63

Introduction

Face à l'urgence climatique, la deuxième Stratégie nationale bas-carbone (SNBC2) publiée en avril 2020 constitue la feuille de route de la France pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES). Alors que la première SNBC publiée en 2015 visait une réduction de 75 % de ces émissions à horizon 2050 (facteur 4), la SNBC2 dessine le chemin de la transition écologique vers la « neutralité carbone » en 2050, en cohérence avec l'objectif plus ambitieux inscrit dans l'Accord de Paris en 2015. Elle a été finalisée et rendue publique le 24 avril 2020 par le ministère de la Transition écologique.

La transition énergétique implique des changements de comportements de l'ensemble des acteurs à la fois dans la façon de consommer l'énergie et dans les choix d'investissements. Pour éclairer l'action publique, la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) a demandé au Commissariat général au développement durable (CGDD) et à l'Ademe d'évaluer les effets macroéconomiques et sectoriels de la SNBC2 avec le modèle macroéconomique ThreeME d'inspiration keynésienne. Dans cet exercice, un effort de cadrage important, tant sur les hypothèses que sur la modélisation des mesures, a été demandé par la DGEC, afin de s'assurer que l'évolution des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ corresponde bien à celle prévue par la SNBC2. Les principaux résultats de cette évaluation ont été présentés dans le rapport d'accompagnement de la SNBC2 (*voir bibliographie*).

Messages clés

Adoptée pour la première fois en 2015, la SNBC a été révisée en 2018-2020, avec l'objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050 (ambition rehaussée par rapport à la première SNBC qui visait le facteur 4, soit une réduction de 75 % de ses émissions GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990). Le présent rapport décrit l'évaluation macroéconomique de la Stratégie nationale bas-carbone réalisée par l'Ademe et le CGDD à partir du modèle ThreeME.

LA STRATÉGIE NATIONALE BAS-CARBONE RÉVISÉE EN 2018-2020 (SNBC2) VISE DÉSORMAIS LA NEUTRALITÉ CARBONE EN 2050

La deuxième Stratégie nationale bas-carbone (SNBC2) a été finalisée et rendue publique le 24 avril 2020. Elle trace le chemin de la transition écologique vers la « neutralité carbone » en 2050, correspondant à un nouvel objectif inscrit dans l'accord de Paris en 2015. Nos émissions nationales de GES devront être inférieures aux quantités de GES absorbées par nos forêts, nos sols et par les nouveaux procédés de capture et stockage du carbone. Cet objectif est plus ambitieux que celui de la SNBC1, qui visait une réduction de 75 % des émissions de GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990 (facteur 4).

Pour parvenir à réduire les émissions, il faut modifier les choix d'investissement et de consommation, ainsi que les comportements, afin de réduire de moitié les consommations d'énergie, décarboner sa production, diminuer les émissions non liées à l'énergie et augmenter les puits de carbone. Pour cela, la SNBC2 décline un ensemble d'orientations et de leviers pour réussir la mise en œuvre de cette nouvelle économie verte.

THREEME EST UN MODÈLE D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL CALCULABLE, KEYNÉSIEEN, HYBRIDE ET MULTISECTORIEL CONÇU POUR ÉVALUER LA POLITIQUE ENVIRONNEMENTALE

Le modèle ThreeME (*Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy*), a été spécifiquement conçu pour évaluer les effets macroéconomiques et environnementaux de la politique énergétique. Il a été développé depuis 2008 par l'Observatoire français des conjonctures économiques (OFCE) et l'Ademe, et depuis 2013 par le ministère de la Transition écologique.

En tant que modèle d'équilibre général calculable, ThreeME représente un système complet de marchés où les agents interagissent en prenant des décisions fondées microéconomiquement par la maximisation de leur profit ou de leur utilité. Cette représentation microfondée permet de simuler les comportements des agents, en particulier la possibilité de réaliser des investissements pour s'adapter aux évolutions importantes qu'implique la transition énergétique. Ce choix de modélisation se distingue en particulier des modèles économétriques couramment utilisés en macroéconomie, qui tendent à reproduire le comportement passé des agents, et qui n'envisageraient que les effets de sobriété de la politique environnementale sur la consommation d'énergie.

ThreeME est d'inspiration keynésienne au sens où il peut y avoir un déséquilibre temporaire sur les marchés. Surtout, l'offre de monnaie dépend de la politique monétaire qui fixe le taux d'intérêt, à la différence du cadre walrassien où celui-ci est déterminé par la confrontation offre-demande de capital. Ainsi, les investissements de transition énergétique n'entraînent pas nécessairement de hausse du taux d'intérêt qui conduirait à pénaliser l'investissement dans d'autres secteurs de l'économie par effet d'éviction. Ce cadre peut conduire à surestimer l'impact positif de la transition énergétique sur la croissance, tandis qu'à l'inverse, un cadre plus walrassien surestimerait l'effet récessif.

ThreeME est également un modèle multisectoriel, avec 24 secteurs économiques représentés pour analyser les effets des transferts d'activité d'un secteur à un autre, et évaluer finement les impacts en termes d'investissement ou d'emplois. L'énergie y est identifiée comme un bien particulier : pour les entreprises comme un facteur de production au même titre que le capital, autorisant ainsi des substitutions capital-énergie ; pour les ménages comme un bien de consommation spécifique, non pas demandé pour lui-même, mais en complément d'une autre demande, de transport ou de chauffage.

ThreeME est hybride au sens où il juxtapose une approche macroéconomique « *top-down* » avec une modélisation « *bottom-up* » fine des dépenses énergétiques des ménages dans un bloc « énergétique ». Dans ThreeME, les ménages sont capables d'investir pour la rénovation de leur logement et pour l'achat de véhicules selon divers niveaux de performance énergétique. Leur choix du niveau de performance tient compte des prix des énergies et des politiques publiques. Par ailleurs, une modélisation des parcs de logements et de véhicules permet de rendre compte de l'inertie de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂, qui dépendent des stocks cumulés et non des seuls investissements de l'année.

THREEME A ÉTÉ MOBILISÉ POUR ÉVALUER L'IMPACT MACROÉCONOMIQUE DE LA SNBC2 SOUS UN JEU D'HYPOTHÈSES ET DE TRAJECTOIRES ÉNERGÉTIQUES DÉTERMINÉES

La DGEC a demandé au CGDD et à l'Ademe d'évaluer les effets macroéconomiques et sectoriels de la SNBC2 avec ThreeME, en comparaison avec un scénario de référence sans nouvelle mesure. Le scénario SNBC2 évalué est très cadré : s'il suppose de prendre en compte différentes mesures, il fixe également des trajectoires énergétiques qui doivent être atteintes. Il fournit par ailleurs certaines hypothèses de coûts.

Ce cadrage SNBC2 permet par construction d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Ainsi, la consommation globale d'énergie serait amenée à baisser de près de 50 % à l'horizon 2050 par rapport à aujourd'hui, tandis que la consommation électrique progresserait de 20 %, stimulée notamment par l'électrification progressive du parc

automobile. Parallèlement la quasi-totalité de la consommation de gaz serait décarbonée à l'horizon 2050, comme celle de carburant automobile, soit donc plus des trois quarts de la consommation de carburant (essence et kérosène), tandis que les taux d'incorporation de ces biocombustibles resteraient stables dans le scénario de référence.

Par ailleurs, l'environnement international est supposé favorable à la lutte contre le changement climatique, ce qui est traduit dans la modélisation par une hausse des prix d'importation proche de l'inflation française induite par la transition énergétique. Le taux d'intérêt réel est supposé fixe, ce qui signifie que les investissements de transition énergétique ne pénalisent pas les investissements des autres secteurs par effet d'éviction.

Cet exercice est donc différent de celui organisé par France Stratégie et la commission Quinet pour déterminer la valeur de l'action pour le climat, au sens où il s'agit uniquement d'évaluer l'impact macroéconomique de la SNBC2, mais pas de valider la capacité des mesures à atteindre la neutralité carbone.

LES PRINCIPALES MESURES QUI SOUS-TENDENT LA SNBC2 ONT ÉTÉ MODÉLISÉES, MAIS DE NOUVELLES MESURES DEVRONT ÊTRE SPÉCIFIÉES À L'AVENIR POUR ATTEINDRE LES TRAJECTOIRES ÉNERGÉTIQUES

Dans le scénario SNBC2, des mesures et hypothèses de nature très différentes ont été modélisées : des incitations fiscales, des subventions, des mesures réglementaires d'efficacité énergétique dans le tertiaire et l'industrie, des soutiens aux transports alternatifs, un choix de mix énergétique et des changements de comportements qui diminuent l'usage de la voiture comme le covoiturage, le partage de la voirie ou le télétravail. Le niveau de la taxe carbone est considéré comme gelé depuis 2018 dans cet exercice SNBC2.

Les mesures ont été modélisées de manière plus ou moins fine, en recourant parfois à des proxys. L'évolution de la demande d'énergie liée aux dépenses des ménages dans la rénovation de leur logement ou en véhicules « propres » qui font l'objet d'un bloc spécifique dans ThreeME, a été modélisée de façon endogène. Des paramètres exogènes ont été introduits pour atteindre ou approcher la consommation (demande) et le mix (offre) énergétique fixé par la SNBC2 et la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

Des mesures supplémentaires importantes devront être prises à l'avenir pour atteindre les objectifs ambitieux fixés par la SNBC2. C'est à l'aide de signaux prix fictifs sur les énergies, qui orientent les décisions des ménages et des entreprises, que ces mesures supplémentaires, dont le contenu reste à définir, sont représentées. Néanmoins, il faut noter que le coût de ces mesures supplémentaires est probablement sous-estimé par ce choix de modélisation, car celui-ci ne permet pas de prendre en compte tous les coûts supplémentaires induits par des dispositifs réels, par rapport à un signal prix fictif.

AVEC CE CADRAGE, LA SNBC2 PERMETTRAIT DE GÉNÉRER QUELQUES GAINS ÉCONOMIQUES

D'après ThreeME, le scénario SNBC2 aurait un effet graduel positif sur le PIB de 2,5 % en 2030, puis 3,8 % en 2050 par rapport au scénario de référence qui prend en compte seulement les mesures liées à la transition énergétique prises avant le 1^{er} juillet 2017, soit + 0,1 % par an en moyenne. Cet effet d'entraînement serait tiré par la croissance de la demande intérieure (+ 7,3 % de PIB), la baisse de la facture énergétique et la réduction de la dépendance extérieure aux énergies fossiles. La demande intérieure serait soutenue par l'effet multiplicateur des investissements directs de la transition énergétique, dont le cumul sur la période s'élèverait à 1 000 Mds€₂₀₁₅ en incluant les achats de véhicules, soit un tiers du total cumulé des investissements additionnels directs et indirects. Ces investissements stimulent la croissance et l'emploi, et contribuent à réduire la facture énergétique, ce qui à terme soutient le pouvoir d'achat des ménages, une fois réglées les dépenses de logement et de transport, de plus de 2 000 €₂₀₁₅ par tête à horizon 2050. Ces

gains de revenus permettraient alors aux ménages d'accroître leurs dépenses, et à la consommation de prendre le relai de l'investissement. Ainsi, le stimulus domestique engendrerait un certain cercle vertueux sur l'ensemble de l'économie, entraînant à la fois une augmentation de la production, des créations d'emplois, une baisse du chômage et une hausse des salaires.

Ces effets positifs sur le plan intérieur seraient atténués par l'impact négatif du regain de l'inflation et de l'accélération des prix à l'export sur la compétitivité des entreprises par rapport à leurs concurrents étrangers. En parallèle, l'augmentation de la consommation s'accompagnerait d'une hausse des importations. Au bout du compte, le commerce extérieur pèserait sur le PIB en volume, mais l'effet net resterait positif sur l'économie et la balance des échanges extérieurs ne serait pas affectée en valeur. Au contraire son déficit se réduirait légèrement de 0,1 pt de PIB par rapport au scénario de référence en 2050, en raison de la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles importés, dont le prix augmenterait plus vite que les prix domestiques selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

L'accroissement de la production permettrait de créer 878 000 emplois à l'horizon 2050, par rapport au scénario de référence, soit un supplément de 38 000 emplois par an en moyenne. Les secteurs les plus créateurs d'emplois seraient le tertiaire avec 550 000 postes supplémentaires (63 % du total), compte tenu de son poids dans l'économie, et la construction avec un gain de 196 000 emplois (22 % du total), en lien avec les investissements d'efficacité énergétique. Le secteur de l'énergie créerait peu d'emplois (30 000 emplois en 2050 par rapport au scénario de référence, 3 % du total) compte tenu de la chute attendue de la consommation d'énergie (réduite quasiment moitié en 2050), principalement dans le secteur des biocombustibles et de la chaleur renouvelable. Enfin, le nombre d'emplois dans les transports diminueraient (-17 000). Les emplois supplémentaires dans les chemins de fer (+14 000 emplois) ne compenseraient pas totalement les diminutions d'emplois dans le transport routier de marchandises (-36 000 emplois).

Key messages

THE MACROECONOMIC EVALUATION OF FRANCE'S SECOND LOW CARBON STRATEGY (SNBC2) WITH THE THREEME MODEL: FOREWORD

Faced with the climate emergency, the second National Low-Carbon Strategy (SNBC2) published in April 2020 constitutes France's roadmap for reducing its greenhouse gas (GHG) emissions. While the first SNBC published in 2015 aimed to reduce these emissions by 75% by 2050 (factor 4), the SNBC2 sets out the path of the ecological transition towards "carbon neutrality" in 2050, in line with the more ambitious objective enshrined in the Paris Agreement in 2015. It was finalised and made public on 24 April 2020 by the ministry of Ecological Transition.

The energy transition implies changes in the behaviour of all actors both in the way they consume energy and in their investment choices. To inform public action, the Directorate General for Energy and Climate (DGEC) asked the general Commissariat for sustainable Development (CGDD) and ADEME (the national environmental and energy management agency) to assess the macroeconomic and sectoral effects of the SNBC2 using the Keynesian ThreeME macroeconomic model. In this exercise, the DGEC required a significant framework effort, both in terms of the assumptions and the modelling of the measures, in order to ensure that the evolution of energy consumption and CO2 emissions corresponds to that forecast by the SNBC2. The main results of this assessment were presented in the SNBC accompanying report (see bibliography, « rapport d'accompagnement de la SNBC »).

This exercise highlights that energy transition may be a source of growth and employment. Indeed, according to these simulations, the SNBC2 strategy would have a gradual positive effect on GDP of 2.5% in 2030, then of 3.8% in 2050, making it possible to create nearly 900 000 jobs by 2050, i.e. an additional 38 000 jobs per year on average, thanks to the spillover effects of investments, the decrease in the energy bill and the reduction in external dependency on fossil fuels.

This working paper complements the results previously summarised in the accompanying report by presenting in detail the model used and the assumptions made, and by developing some results, in particular the trajectories of the macroeconomic variables of interest over the entire period to 2050.

REVISED IN 2018-2020, THE NATIONAL LOW CARBON STRATEGY (SNBC2) HENCEFORTH TARGETS CARBON NEUTRALITY BY 2050

On April 24, 2020, the french Ministry of the Environment published the second national low carbon strategy (SNBC2). It traces the path for the ecological transition towards "carbon neutrality" in 2050, in line with the new objective inscribed in the 2015 Paris Agreement. Our national GHG emissions will have to be lower than the amount of GHG absorbed by our forests, soils and by the new carbon capture and storage processes. This target is more ambitious than that in the SNBC1, which aimed to reduce GHG emissions by 75% by 2050 compared to 1990 (factor 4).

To achieve the reduction of emissions, it is necessary to adapt investment and consumption choices, as well as behaviours, so as to halve energy consumption, decarbonise its production, reduce non-energy-related emissions and increase carbon sinks. To this end, the SNBC2 proposes a set of orientations and levers to ensure the successful implementation of this new green economy.

The ThreeME model is a computable general equilibrium model, of Keynesian inspiration, hybrid and multisectoral, designed to assess environmental policy.

THE THREEME MODEL IS A COMPUTABLE GENERAL EQUILIBRIUM MODEL, OF KEYNESIAN INSPIRATION, HYBRID AND MULTISECTORAL, DESIGNED TO ASSESS ENVIRONMENTAL POLICY

The ThreeME model (Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy), has been specifically designed to assess the macroeconomic and environmental effects of energy policy. It has been developed since 2008 by OFCE (an independent and publicly-funded centre focusing on economic research, forecasting and policy evaluation) and ADEME, and since 2013 by the french ministry of Ecology Transition.

As a computable general equilibrium model, ThreeME represents a comprehensive system of markets where agents interact by making decisions microeconomically founded by the maximisation of their profit or their utility. This micro-funded depiction enables to simulate agents' behaviours, and in particular the possibility to make investments, so as to adapt to the significant changes implied by energy transition. This modelling choice may in particular be distinguished from econometric models commonly use in macroeconomics, which tend to replicate agents' past behaviours, and to only consider the sobriety effect of environment policy on energy consumption.

ThreeME is of Keynesian inspiration in the sense that it allows for temporary imbalance on markets. Above all, money supply depends on the monetary policy that defines the interest rate, unlike the Walrasian frame where the interest rate results from the demand-supply confrontation of capital. Thus, investments in energy transition would not necessarily trigger a rise in interest rates, that would lower investments in other economic sectors through crowding out effects. This frame may lead to overestimate the positive impact of energy transition on economic growth, whereas conversely a Walrasian framework would overestimate the negative impact on growth.

ThreeME is also a multisectoral model, with 24 economic sectors represented in order to analyse the effects of activity transfers from sector to sector, and to thoroughly assess the impacts on investment and on employment. Energy is identified as a particular good: as a production factor for firms, in the same manner as capital, hence allowing capital-energy substitutions; as a specific consumption good for households, that is not demanded for itself, but as a complement to another demand, for transport or heating.

ThreeME model is hybrid" in the sense that it juxtaposes a "top-down" macroeconomic approach with an "energy block" consisting of a detailed "bottom-up" modelling representing household energy spending. In ThreeME, households are able to invest in the renovation of their home and in the purchase of vehicles according to various energy levels. Their choice of performance level takes into account energy prices and public policies. In addition, a modelling of housing and vehicle fleets makes it possible to account for the inertia of energy consumption and CO₂ emissions, which depend on accumulated stocks and not only on yearly investments.

THREEME WAS USED TO ASSESS THE MACROECONOMIC IMPACT OF THE SNBC2 UNDER A SET OF SPECIFIC ASSUMPTIONS AND DETERMINED ENERGY TRAJECTORIES

The Energy and climate Direction (DGEC) of the French Ministry of Environment asked the CGDD and Ademe to assess the macroeconomic and sectoral effects of the SNBC2 with ThreeME, in comparison with a reference scenario without new measures. The SNBC2 scenario evaluated is very circumscribed: if it assumes to take into account various measures, it also sets energy trajectories, which have to be reached. Besides, it provides specific cost assumptions.

This SNBC2 framework allows by construction to achieve carbon neutrality by 2050. Thus, overall energy consumption would drop by almost 50% by 2050 compared to today, while electricity consumption would increase by 25%, boosted in particular by the progressive electrification of the takeup of the car fleet. At the same time, almost all of the gas

consumption would be decarbonized by 2050, as for automobile fuel, i.e. more than three quarters of the fuel consumption (petrol + kerosene), while the incorporation rates of these biofuels would remain stable in the baseline scenario.

Moreover, the international environment is assumed to be in favour of the fight against climate change, which is translated in the modelling by a rise in import prices close to the French inflation induced by the energy transition. The real interest rate is set to be exogenous and fixed, which means that investments in energy transition do not lead to crowding-out effects that could penalize the growth of other sectors.

This exercise is therefore different from the one organised by France Stratégie to assess the "value for climate action" (the shadow price of carbon), in the sense that it only consists of assessing the macroeconomic impact of the SNBC2, but not of certifying the capacity of the measures to achieve carbon neutrality.

THE MAIN MEASURES INCLUDED IN THE SNBC2 STRATEGY HAVE BEEN MODELED, BUT NEW MEASURES WILL HAVE TO BE SPECIFIED IN THE FUTURE TO REACH ENERGY TRAJECTORIES

In the SNBC2 scenario, measures and hypotheses of very different nature have been modeled: tax incentives, subsidies, regulatory energy efficiency measures in the service sector and the industry, support for alternative transport, an energy mix choice and behavioral changes that reduce car use, such as carpooling, road sharing or teleworking. The carbon tax level is assumed to be frozen from 2018 in this SNBC2 exercise.

These different measures have been modeled in a more or less detailed way, sometimes using proxies. The evolution of energy demand related to household spending on home renovation or on "clean" vehicles that are the focus of a specific block in ThreeME, has been endogenously modeled. Exogenous parameters have been introduced in order to achieve or be on the verge of the consumption (demand) and energy mix (supply) set by the SNBC2 and the National energy Programming ("Programmation Pluriannuelle de l'Énergie", PPE).

Significant add-on measures will need to be taken in the future to achieve the ambitious targets set by the SNBC. These supplementary measures, whose content still needs to be defined, have been represented with the help of shadow prices on energy. However, it should be noted that this modeling choice might lead to underestimate the additional costs induced by real measures, compared to a fictitious price signal.

WITH THIS FRAMEWORK, THE SNBC2 WOULD ALLOW FOR SOME ECONOMIC GAINS

According to ThreeME, the SNBC2 scenario would have a positive incremental effect on GDP of 2.5% in 2030 and of 3.8% in 2050 compared to the reference scenario, that only takes energy transition measures taken before July 1, 2017, i.e. +0.1% per year on average. This spillover effect would be driven by the growth in domestic demand (+7.3% of GDP), the lower energy bill and the reduction in foreign dependence on fossil energies. Domestic demand would primarily be driven by the multiplier effect of direct investments in energy transition, whose accumulation would amount to €₂₀₁₅ 1 000 bn over the period, including vehicle purchases, i.e. one third of the cumulative total of additional direct and indirect investments. These investments stimulate growth and employment, and contribute to reducing the energy bill in the long run, which would support the purchasing power of households, after payment of housing and transport expenditure, by more than €₂₀₁₅ 2 000 per capita by 2050. These revenue gains would then allow households to increase their spending, and consumption to take over from investment. Thus, the domestic stimulus would generate a relative virtuous circle throughout the economy, leading to increased production, job creation, lower unemployment and higher wages.

These positive effects at domestic level would be mitigated by the negative impact of rising inflation and higher export prices on firm competitiveness with respect to their

foreign competitors. Meanwhile, the increase in consumption would be combined with an increase in imports. Ultimately, foreign trade would act as a drag on real GDP, but the net effect would remain positive on the economy and the external trade balance would not be affected in value. On the contrary, its deficit would decrease by 0.1 pt of GDP compared to the reference scenario in 2050, due to the reduced dependence on imported fossil fuels, whose prices are set to increase faster than domestic prices, according to IEA.

Increasing production would enable to create 878 000 jobs by 2050, compared to the reference scenario, which would represent 38 000 new jobs per year on average. The sectors with the best job-creation performance would be the tertiary sector with 550 000 additional jobs (63% of the total), given its weight in the economy, and the construction sector with a gain of 180 000 jobs (22% of the total), mainly due to energy efficiency investments. The energy sector would create few jobs (30 000 jobs in 2050 compared to the baseline scenario, 3% of the total), in line with the assumed fall in energy consumption (cut by almost half), mainly in biofuels and in renewable heat. Finally, employment in the transport sector would decrease (- 17 000 jobs). Job creations in railways (+14 000 jobs) would not offset the decline in the road freight transport (- 36 000 jobs).

PARTIE I - ThreeME, un modèle macroéconomique pour évaluer la transition énergétique

Le modèle ThreeME, développé depuis 2008 par l'OFCE et l'Ademe, est co-utilisé par le ministère de la transition énergétique depuis 2013. C'est un modèle d'équilibre général calculable d'inspiration keynésienne. Il est multisectoriel (24 secteurs) et « hybride », au sens où il contient un « bloc ménages » décrivant la demande d'énergie des ménages et leur comportement en matière de d'achat de véhicules et de rénovation du logement.

1. UN MODÈLE D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL CALCULABLE

Un modèle macroéconomique est une représentation réduite et quantifiée de la réalité reproduisant à l'échelle d'un pays ou d'une région les interactions entre les grandes variables économiques (PIB, chômage, balance commerciale, déficit public, etc.).

Les modèles macroéconomiques se distinguent fondamentalement en deux grandes familles caractérisées par l'approche des comportements des acteurs économiques : les modèles macroéconométriques qui font intervenir les interactions entre les agrégats macroéconomiques et les modèles d'équilibre général calculable (MEGC) qui considèrent des agents représentatifs donnant un fondement microéconomique à leurs décisions. Les modèles macroéconométriques tels que Mésange (DG Trésor-Insee) représentent les comportements des agents à l'aide d'équations économétriques. Il s'agit par exemple de réaliser des projections à partir de la relation économétrique établie sur les observations passées entre la consommation des ménages et leur revenu disponible. Ces outils ont l'avantage de donner une image relativement exacte des interactions en jeu au sein d'une économie au moment présent. En revanche, selon la critique de Lucas (1976), ils ne peuvent pas être mobilisés pour évaluer l'impact à long terme de politiques structurelles visant précisément à modifier le comportement des agents.

Le fondement microéconomique des MEGC permet de prendre en compte cette critique de Lucas dans la mesure où les comportements des agents sont modifiés par la politique économique. Pour cela, ils reposent sur un système complet de marchés relatifs aux biens et services, au travail et au capital où les agents représentatifs interagissent en prenant des décisions qui maximisent leur intérêt. Les entreprises déterminent leurs facteurs de production de façon à maximiser leur profit et les ménages leurs choix de consommation et d'épargne de façon à optimiser leur bien-être. Cette spécification fondée microéconomiquement rend ainsi possible l'interprétation des effets de la politique économique à long terme.

À la différence de certains modèles uni-sectoriels d'inspiration néo-keynésienne de l'économie française, tels E-Mod (voir Chauvin et *al.*, 2002) ou Mésange (voir Dufernez et *al.*, 2017), ThreeME n'est pas un modèle à proprement parler économétrique puisque ces équations ne sont pas directement estimées économétriquement. Toutefois, les délais d'ajustement et le niveau des élasticités sont calibrés sur des estimations de la littérature économétrique. Par ailleurs, sa périodicité est annuelle alors qu'elle est trimestrielle pour des modèles tels qu'E-Mod ou Mésange.

Dans leur fonction de production, les entreprises minimisent leurs coûts à partir de fonction CES (*Constant Elasticity of Substitution*) « généralisée » et de trois arbitrages : entre les différents facteurs de production, entre les différents types de biens et les différents vecteurs énergétiques (le mix électrique étant exogène) et entre les produits domestiques et les produits importés.

Cette fonction de production prend la forme d'une fonction KLEM comme ci-dessous :

$$Y = K^{\alpha} L^{\beta} E^{\gamma} M^{1-\alpha-\beta-\gamma}$$

où :

- Y est la production ;
- K est le capital ;
- L est l'emploi ;
- E est l'énergie ;
- M sont les consommations intermédiaires (*materials*) ;
- α, β, γ sont des constantes déterminées par la technologie.

L'équation d'investissement dépend de la production anticipée, de sa dynamique passée, des substitutions entre facteurs de production. À court terme, le stock de capital est déduit de l'investissement selon l'équation standard d'accumulation du capital, et résulte à long terme de l'optimisation des facteurs de production.

Le commerce extérieur suppose l'imparfaite substitution entre les produits domestiques et les produits importés (voir Armington, 1969), qui sont caractérisés par leurs prix relatifs. Les biens sont importés ou non, exportés ou non, selon leurs prix relatifs, une élasticité de substitution et le niveau de demande agrégée.

Pour déterminer leur fonction de consommation, les ménages décident d'abord de leurs investissements en logement et voitures. Ils arbitrent entre les différents choix possibles en tenant compte des coûts d'usage associés (amortissement du prix d'achat net des aides, part d'autofinancement et d'emprunt, coût de la consommation d'énergie, etc.). En particulier, la demande totale de logement (en m²) croît comme la population et celle de transport croît avec le revenu et les prix relatifs des carburants. Le taux de pénétration des voitures électriques est endogène. Il est défini en fonction des coûts relatifs entre les véhicules électriques et thermiques, en tenant compte d'effets dynamiques dans le cadre d'un modèle de « Bass » de diffusion de l'innovation (voir Bass, 1969). En plus d'un effet de substitution (et donc d'efficacité), le modèle tient également compte d'un effet de sobriété qui amène les ménages à réduire leur consommation de chauffage et de carburants si leurs prix augmentent. Enfin, la consommation des autres biens est modélisée à travers une fonction d'utilité de type *Linear Expenditure System* (LES) généralisée qui tient compte d'une consommation incompressible et d'un arbitrage optimisé entre les différents biens de consommation.

2. UN MODÈLE KEYNÉSIEEN

Un modèle macroéconomique est une représentation réduite et quantifiée de la réalité reproduisant à l'échelle d'un pays ou d'une région les interactions entre les grandes variables économiques (PIB, chômage, balance commerciale, déficit public, etc.).

2.1. Les prix sont fixés selon la théorie du *markup*.

Le modèle ThreeME est un modèle keynésien au sens où la dynamique des prix et de l'offre de monnaie rend compte de l'existence de déséquilibres transitoires sur les marchés, et notamment d'un chômage involontaire sur le marché du travail. À la différence des modèles néoclassiques « walrassien », les prix ne s'ajustent pas instantanément pour équilibrer l'offre et la demande sur les marchés. Sur le marché des biens, le prix est obtenu en appliquant un taux de marge sur les coûts unitaires de production, selon la théorie du *markup*. Les marges elles-mêmes dépendent de la variation de la demande en volume adressée aux entreprises :

$$p = (1 + \beta) * cu$$

où :

- p est le prix de vente du produit ;

- β est le *markup* sur la production lui-même défini par $\beta = \alpha \Delta Q$ avec α est une constante et ΔQ la différence entre la demande et la quantité produite ;
- c_u est le coût unitaire de production.

En conséquence, une hausse de la demande se traduit par une hausse de la production et implique, selon la théorie du *markup*, une hausse du taux de marge et des prix domestiques et à l'exportation. L'inflation induite ainsi joue comme une force de rappel susceptible de peser sur le pouvoir d'achat des ménages et la compétitivité des entreprises, ce qui ralentirait *in fine* les gains de croissance.

2.2. Les salaires sont déterminés par une équation de « *wage-setting* ».

Contrairement aux modèles classiques dans lesquels le salaire est un prix directement fixé sur le marché du travail, les modèles néokeynésiens le font dépendre de plusieurs variables dont le chômage. Cela implique que le salaire ne permet pas automatiquement d'équilibrer l'offre et la demande sur le marché du travail. Il peut donc exister un équilibre de sous-emploi chronique et du chômage involontaire. Deux types d'équations sont proposés pour modéliser la formation des salaires, la courbe de Phillips ou l'équation de *wage-setting* (WS, voir Reynès 2006), selon les hypothèses retenues concernant le lien entre le salaire et la situation sur le marché du travail.

La courbe de Phillips est une relation empirique (voir Phillips 1958 mise à jour en 1958 reliant le taux de croissance des salaires nominaux et le taux de chômage en niveau). Une courbe de Phillips comparable est ensuite mise en évidence par Sollow et Samuelson, reliant l'inflation au taux de chômage.

La courbe de Phillips :

$$w = \beta_0 + \beta_1 p - \beta_2 U + \beta_3 a$$

où :

- w est le salaire réel (en dlog) ;
- U est le taux de chômage ;
- p est le niveau général des prix (en dlog) ;
- a est la productivité du travail ;
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ et β_3 représentent les autres variables pouvant influencer le salaire.

Mais la fragilité théorique de la courbe de Phillips et son incapacité à expliquer la persistance du chômage en Europe dans les années 1980 ont conduit les modélisateurs néokeynésiens à introduire une courbe de *wage-setting*, équation concurrente, qui décrit la formation des salaires comme résultant d'un processus de négociation salariale entre le salarié et son employeur prenant en compte la productivité du travail, l'inflation, et le niveau du chômage. Le débat entre ces deux approches n'est toujours pas tranché, mais l'équation de *wage-setting* est celle retenue dans les travaux actuels de simulation avec ThreeME, et notamment pour l'évaluation de la SNBC2.

L'équation de *wage-setting* :

$$w - p - a = \beta_0 - \beta_1 U$$

où :

- w est le salaire réel (en dlog) ;
- U est le taux de chômage ;
- p est le niveau général des prix (en dlog) ;
- a est la productivité du travail ;
- β_0 et β_1 représentent les autres variables pouvant influencer le salaire.

L'équation de *wage-setting* est accompagnée d'une équation de *price-setting*. On suppose alors que les entreprises, dans un cadre de concurrence imparfaite, établissent une marge sur le coût unitaire du travail.

L'équation de *price-setting* :

$$p = M + w - a \Leftrightarrow M = p - w + a$$

où :

- w est le salaire réel ;
- p est le niveau général des prix ;
- a est la productivité du travail ;
- M est la marge bénéficiaire.

Le modèle *wage-setting/price-setting* (WS/PS) implique une symétrie entre les attentes des salariés qui veulent augmenter leur revenu et des employeurs qui défendent leurs marges bénéficiaires. Le taux de chômage résulte de cette négociation.

2.3. Un modèle « IS-LM » pour fixer les prix

Comme la plupart des modèles macroéconomiques keynésiens, le modèle ThreeME s'inspire du modèle IS-LM proposé par John Hicks et aménagé par Alvin Hansen. Dans sa version en économie ouverte, il retranscrit des éléments de la Théorie générale de John Maynard Keynes en termes néoclassiques.

La courbe IS (*Investment and savings*) représente les combinaisons de niveau de production Y et de taux d'intérêt r qui correspondent à un équilibre sur le marché des biens et services, et dont l'agrégation est assimilée à la production nationale. Les mécanismes du marché des biens conduisent à une augmentation de la demande, et donc de la production, lorsque le taux d'intérêt diminue. La demande, et donc la production à l'équilibre, est une fonction décroissante du taux d'intérêt. Les biens sont soit consommés, soit investis. La production de biens est à l'origine de revenus (salaires, profits) qui permettent d'acheter les biens produits.

Contrairement au cas néoclassique dans lequel le taux d'intérêt équilibre l'épargne et l'investissement, dans le modèle ThreeME, ce taux n'égalise pas l'offre et la demande d'épargne, mais permet d'égaliser l'offre et la demande de monnaie. Ici, l'épargne n'est pas systématiquement réinjectée dans l'économie et le sous-emploi est donc possible. La « loi des débouchés » de Jean-Baptiste Say selon laquelle l'offre crée sa propre demande n'est plus valide. L'épargne ne se transforme pas automatiquement en investissement et il peut y avoir des fuites dans l'économie. L'offre globale ne correspond pas forcément à la demande globale de l'économie et des contraintes de débouché peuvent exister. S'il y a un déséquilibre sur le marché des biens, l'offre est supérieure à la demande, et les producteurs doivent diminuer le volume de production et embaucher moins de salariés, ce qui se traduit par une apparition du chômage.

2.4. Un marché monétaire où le taux d'intérêt est fixé par la banque centrale

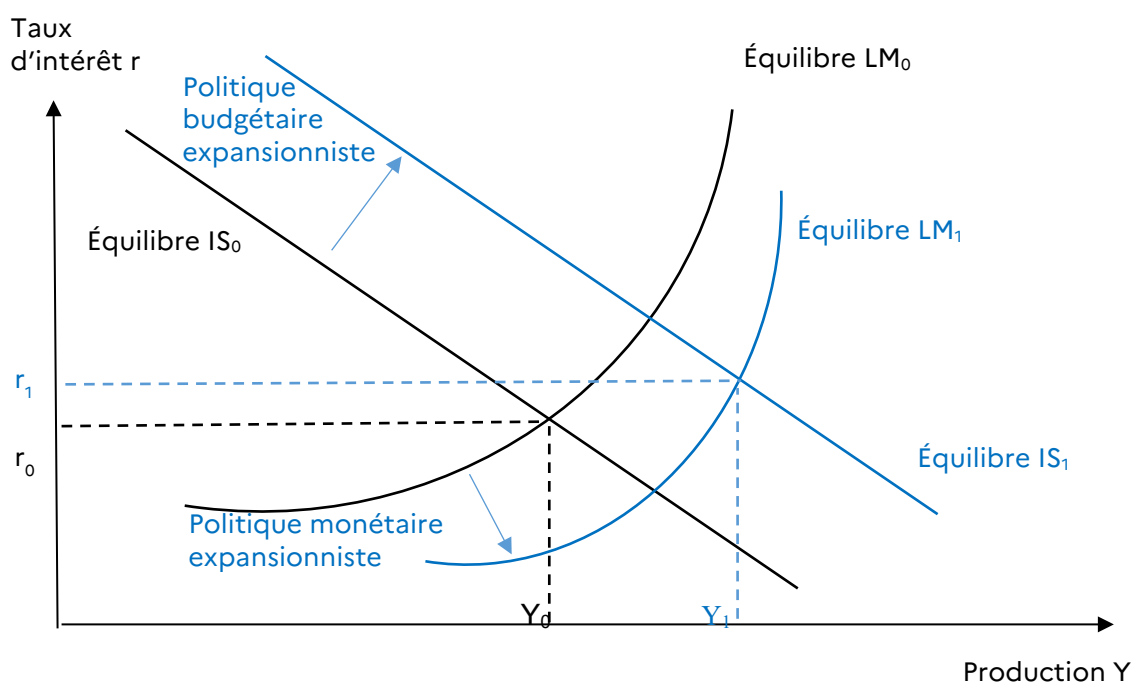
La relation LM (*Liquidity and money*) illustre une autre différence essentielle du schéma néokeynésien avec la théorie néoclassique. Sur le marché du capital, les taux d'intérêts n'équilibrent pas instantanément l'épargne et l'investissement car les investissements peuvent être financés non seulement par l'épargne mais aussi par des crédits bancaires, autrement dit par de la création monétaire. Contrairement au modèle néoclassique, dans lequel le taux d'intérêt équilibre l'épargne et l'investissement, ce taux est un prix d'équilibre qui permet désormais d'égaliser la demande et l'offre de monnaie, autrement dit la masse monétaire et la préférence pour la liquidité. Le marché obligataire devient un marché bancaire. L'introduction d'un « marché bancaire » permet de financer les investissements par de la création monétaire, c'est-à-dire par des prêts. La masse monétaire est déterminée par la banque centrale, soit directement de manière exogène, soit indirectement via la fixation des taux, tandis que la monnaie est demandée pour trois motifs, le premier de transaction, le deuxième d'épargne et le troisième de spéculation. Le financement d'un projet n'est limité que par sa rentabilité. Dans ThreeME, le taux d'intérêt est déterminé par une règle de décision de la banque centrale, soit à partir d'une règle de Taylor en fonction de l'évolution de l'inflation et de l'activité économique, soit de façon exogène.

Dans l'exercice de l'évaluation de la SNBC2, le modèle ThreeME a été basé sur l'hypothèse d'un taux d'intérêt exogène fixe. Cette hypothèse limite les possibles effets d'éviction qui peuvent être captés en partie par une règle de Taylor (*encadré 1*).

La demande de liquidité est décroissante en fonction de i , car les agents lui préfèrent les titres, plus rémunérateurs, et croît avec le revenu Y et le prix P . Il existe un taux d'intérêt minimum pour lequel tous les investisseurs s'attendent à une hausse, et où la demande de monnaie est alors infiniment élastique, ce qui correspond à une trappe à liquidité. C'est de cette relation que provient l'arbitrage entre détention de titres et de monnaie. En plus d'être une fonction décroissante du taux d'intérêt, la demande de monnaie est une fonction croissante du revenu, car la demande d'épargne de précaution augmente avec le revenu. La pente de la courbe LM dépend ainsi de l'élasticité de la demande de monnaie en fonction du revenu et du taux d'intérêt.

La lutte contre le chômage dans le modèle IS/LM se matérialise soit par une politique budgétaire expansionniste avec investissement public ou baisse des impôts, soit par une politique monétaire accommodante (*figure 2*). Les deux politiques provoquent une augmentation du revenu d'équilibre, qui réduit le sous-emploi. Pour lutter plus efficacement contre le chômage, les pouvoirs publics sont amenés à employer un *policy mix* combinant les deux instruments simultanément, de façon à accroître le revenu d'équilibre sans provoquer de forte variation du taux d'intérêt. En effet, une politique de relance budgétaire provoque une hausse de la croissance, mais génère un effet d'éviction (*encadré 1*) sur l'investissement privé via une hausse des taux d'intérêts. Une politique monétaire expansionniste d'accompagnement permettrait de contenir les hausses du taux d'intérêt et d'atténuer les effets d'éviction.

Figure 1 : équilibre IS-LM



Encadré 1 : formation des taux d'intérêt et effets d'éviction

Les modèles d'équilibre général keynésiens se distinguent des modèles walrassiens car ils tiennent compte de l'existence d'une offre de crédit bancaire, générée par la création monétaire. En effet, on peut considérer que l'épargne n'est pas la seule source de financement et que toute l'épargne n'est pas consacrée au financement de l'investissement. Dans les modèles keynésiens comme ThreeME (OFCE-Ademe-CGDD), ils sont déterminés par la Banque Centrale, soit à travers une règle de Taylor prenant en compte la croissance et les anticipations d'inflation soit de façon fixe. La limite des modèles keynésiens est qu'ils peuvent sous-estimer les effets d'éviction et négliger les possibles tensions sur le marché financier.

L'hypothèse de l'exercice SNBC2 reposant sur des taux d'intérêts fixes par soucis de simplicité, peut ainsi conduire à surestimer les gains de croissance. Ce qui signifie que les investissements dans la transition énergétique ne conduisent pas à une raréfaction des fonds disponibles qui génèreraient des effets d'éviction susceptibles de pénaliser la croissance des autres secteurs. À l'inverse, une modélisation avec des taux d'intérêts établis sur le marché obligataire sans tenir compte de l'intervention de la banque centrale aurait conduit à surestimer les effets d'éviction et sous-estimer la croissance.

Il est intéressant de noter que la Commission européenne simule l'impact de la transition énergétique européenne en matière d'efficacité énergétique avec les deux types de modèle. Ce faisant, elle souhaite tenir compte avec l'approche keynésienne de la façon dont sont formés les taux d'intérêts, mais aussi avec l'approche walrassienne de contrôler les risques de tension sur les marchés financiers et d'effets d'éviction sur les autres secteurs de l'économie. Sans surprise, l'impact est généralement positif en matière de croissance et d'emploi avec le modèle keynésien (E3ME) et négatif avec le second (GEM-E3).

2.5. La prise en compte des retards d'ajustement

Les keynésiens s'appuient sur l'idée qu'à court terme les prix et les salaires n'ajustent pas l'offre et la demande sur tous les marchés. La modélisation néokeynésienne passe donc par l'intégration de phénomènes microéconomiques permettant d'expliquer les rigidités macroéconomiques. La modélisation de ces phénomènes passe notamment par l'introduction de retards et de temps d'ajustement : les prix ne sont pas vraiment fixes mais présentent une certaine rigidité. Celle-ci peut notamment se justifier par des coûts d'ajustements et des incertitudes.

Dans ThreeME, on distingue ainsi les variables effectives (réelles) et notionnelles. Les variables notionnelles prennent les valeurs optimales issues des programmes d'optimisation des agents. Ces variables se rapprochent de celles issues du modèle néoclassique quand les prix s'ajustent instantanément. Les variables effectives sont issues de phénomènes de retard et d'anticipation qui les font graviter autour des valeurs notionnelles. Le processus d'ajustement est le suivant :

$$\ln(X_t) = \lambda_0^X * \ln(X_t^n) + (1 - \lambda_0^X) * (\ln(X_{t-1}) + \Delta \ln(X_t^e))$$

avec

$$X_{t-1}^e = \lambda_2^X * \Delta \ln(X_{t-1}) + \lambda_3^X * \Delta \ln(X_t^n)$$
$$\Delta \ln(X_t^e) = \lambda_1^X * \Delta \ln$$

où :

- X_t est la valeur effective d'une variable donnée (e. g. le prix à la production, le travail, le capital, etc.) ;
- X_t^n est son niveau notionnel ;
- X_t^e sa valeur anticipée à la période t ;

- λ_{tx} représente les différents paramètres d'ajustement (avec $\lambda_1^x + \lambda_2^x + \lambda_3^x = 1$).

À long terme, le mécanisme d'ajustement fait tendre les valeurs effectives vers les valeurs notionnelles. La spécification de ThreeME est un cadre général qui permet aussi d'intégrer la spécification de modèles à correction d'erreur estimés sur données historiques, comme Mésange. Les deux modèles ont donc de nombreuses similitudes, mais il faut bien avoir conscience des différences de concepts. D'une part les équations notionnelles sont issues de modélisations théoriques réalisées à partir de programmes d'optimisations micro fondés et ne sont pas estimées économétriquement. D'autre part, les vitesses d'ajustement et les élasticités de substitution ont été calibrées de façon à correspondre *in fine* aux résultats obtenus avec le modèle Mésange quand cela était pertinent.

3. UN MODÈLE MULTISECTORIEL

Le modèle ThreeME a l'avantage de permettre une approche sectorielle fine de l'économie française pour analyser les effets des transferts d'activité d'un secteur à un autre en termes d'emploi, d'investissement ou d'importations. Cela permet d'identifier les effets de la politique économique ayant pour objectif de faire évoluer les comportements de production et de consommation, en modifiant les prix relatifs entre secteurs et produits, comme c'est le cas avec la fiscalité carbone.

La décomposition multisectorielle comprend 37 secteurs économiques (*figure 2*), dont 17 secteurs énergétiques et 5 secteurs de transport. Dans le transport, on distingue le chemin de fer, le bus, le fret routier et maritime, et le transport aérien. Les industries pétrolières et gazières sont subdivisées en deux (fossile ou non fossile), le secteur électrique en 8 technologies (nucléaire, fioul, gaz, charbon, éolien, solaire, hydraulique et cogénération) et la production de chaleur en 4 secteurs. Ce niveau de détail est important pour l'analyse de toute politique économique.

Figure 2 : décomposition sectorielle du modèle ThreeME

Index	Sectors
1	Agriculture, forestry and fishing
2	Manufacture of food products and beverages
3	Manufacture of motor vehicles, trailers and semi-trailers
4	Manufacture of glass and glass products
5	Manufacture of ceramic products and building materials
6	Manufacture of articles of paper and paperboard
7	Manufacture of inorganic basic chemicals
8	Manufacture of organic basic chemicals
9	Manufacture of plastics products
10	Manufacture of basic iron and steel and of ferro-alloys
11	Manufacture of non-ferrous metals
12	Other industries
13	Construction of buildings and Civil engineering
14	Rail transport (Passenger and Freight)
15	Passenger transport by road
16	Freight transport by road and transport via pipeline
17	Water transport
18	Air transport
19	Business services
20	Public services
21	Mining of coal and lignite
22	Manufacture of refined petroleum products
	1. Oil
	2. Biofuels
23	Electric power generation, transmission and distribution
	1. Nuclear
	2. Fuel
	3. Combined gas
	4. Coal
	5. Wind
	6. Solar
	7. Hydraulic
	8. Cogeneration (Combined Heat and Power, CHP)
24	Manufacture and distribution of gas and heating
	1. Natural gas
	3. Biogas
	2. Wood
	4. Waste incineration
	5. Geothermal
	6. Cogeneration (Combined Heat and Power, CHP)

Source : ThreeME (Ademe ; CGDD ; OFCE)

4. UN MODÈLE HYBRIDE POUR REPRÉSENTER LA DEMANDE D'ÉNERGIE

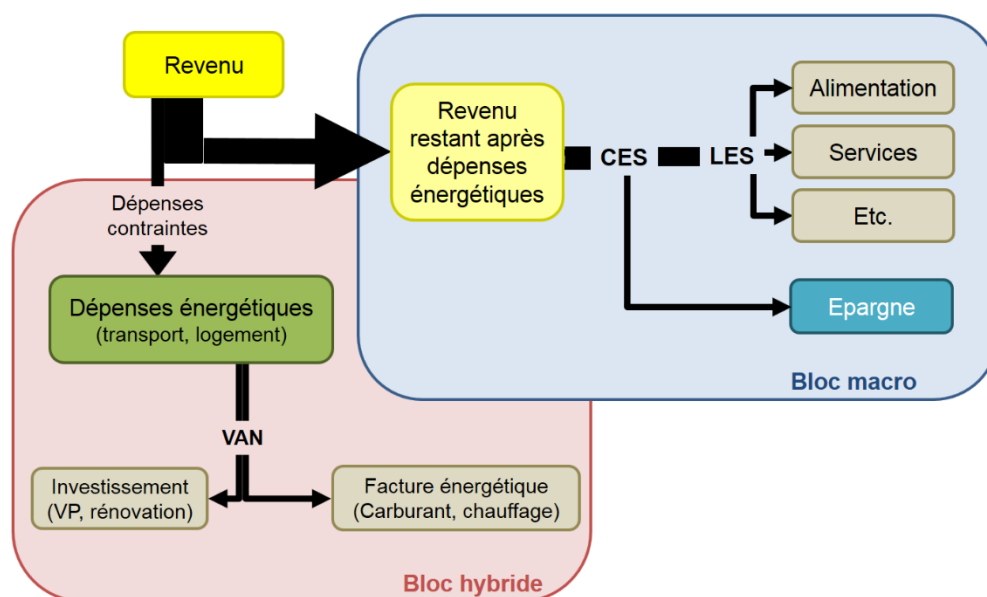
Le modèle ThreeME est un modèle hybride au sens où il juxtapose une approche macroéconomique « *top-down* » avec une approche sectorielle « *bottom-up* » ou technico-économique pour déterminer la consommation d'énergie. La représentation standard du comportement de maximisation de l'utilité du consommateur utilisée dans la plupart des modèles macroéconomiques suppose que les sources d'énergie fournissent une utilité. Or cela ne permet pas de prendre en compte le caractère particulier de l'énergie qui n'est jamais demandée pour elle-même, car elle ne procure d'utilité qu'en complément d'une autre demande, de transport ou de chauffage. Les ménages achètent de l'énergie pour assurer certains services de logement (chauffage et équipements) ou de transport. Par conséquent, la quantité d'énergie consommée pour le chauffage est davantage liée à la taille de la maison qu'au revenu des ménages. Certes, les ménages riches ont généralement des maisons plus grandes et leur consommation d'énergie sera donc généralement plus élevée, tandis que les ménages pauvres sont plus enclins à limiter leur température de chauffage. La consommation d'énergie par m² augmente avec le revenu mais toujours sans dépasser certaines limites. L'énergie est davantage un bien de

nécessité qu'un bien de luxe. Aucun ménage, aussi riche soit-il, ne souhaite une température de chauffage de 35°C.

Ce bloc a deux composantes principales, le logement et le transport. Nous supposons en outre que les dépenses liées à cette fonction de production sont prioritaires, c'est-à-dire que les ménages consacrent leur revenu disponible en premier lieu pour se loger et se déplacer, et utilisent dans un second temps le revenu restant pour les autres dépenses (figure 3). Celles-ci sont représentées par une équation linéaire standard (LES) qui permet de modéliser de manière simple la distinction entre biens de nécessité et produits de luxe. Dans cette section, nous ne présentons que les principales équations de notre modèle hybride de bloc de ménages.

La demande d'énergie évolue en fonction des besoins de transport ou de chauffage et selon la variation des performances énergétiques du parc immobilier et automobile. Les ménages réalisent des arbitrages entre diverses classes énergétiques de bâtiments et de véhicules en fonction de leurs coûts d'usage respectifs. Ce choix de modélisation permet de mesurer finement les émissions de CO₂ de l'économie, qui dépendent de stocks de bâtiments et de véhicules, et non des flux.

Figure 3 : la structure de consommation des ménages



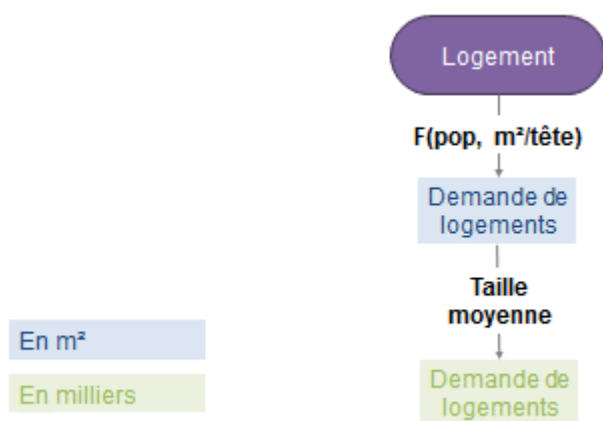
Source : ThreeME (Ademe-CGDD-OFCE)

4.1. Le bloc bâtiment

a) La demande de logement

Au départ, la demande de logement est déterminée par la taille de la population (figure 4). Le stock global de bâtiments BUIL est exprimé en m². Il évolue proportionnellement à la population et à la surface moyenne par habitant. Il s'agit là d'une spécificité de ThreeME qui permet de représenter de façon crédible le parc immobilier.

Figure 4 : évolution de la demande de logement



Source : ThreeME (Ademe ; CGDD ; OFCE)

Ainsi la demande de bâtiment dans le modèle s'écrit (figure 5) :

$$\Delta buil = \Delta pop + \Delta m2percapita$$

où

- pop est la population totale ;
- m2percapita représente le nombre de m² occupé par le ménage représentatif.

b) Le parc de logement

Nous différencions les bâtiments en fonction de leur classe d'efficacité énergétique, $k = \{1, \dots, 8\}$. Nous supposons que le parc de bâtiments de la classe k exprimé en m² est animé par la dynamique suivante :

$$\begin{aligned} \Delta BUIL_{k,t} = & \varphi_k^{newBUILD} (\Delta BUIL_t + BUIL_{0,t}) + \sum_{k'=0}^{k-1} REHAB_{k',k} - \sum_{k'=k+1}^K REHAB_{k,k'} \\ & - \sum_{k'=0}^{k-1} \varphi_{k,k'}^{BUILD} BUIL_{k,t-1} + \sum_{k'=k+1}^K \varphi_{k,k}^{BUILD} BUIL_{k',t-1} \end{aligned}$$

avec :

$$BUIL_{k,t} = \sum_{k=0}^n \varphi_{k,0}^{BUILD} BUIL_{k,t-1}$$

où :

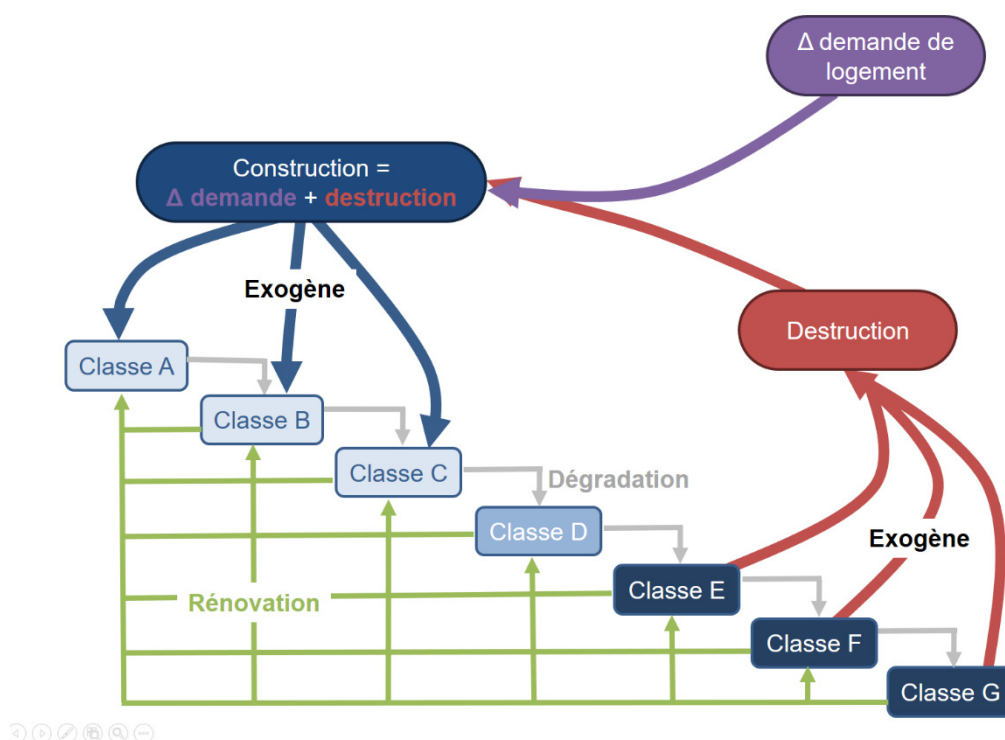
- $BUIL_{k,t}$ est le stock de bâtiments de classe k à la date t ;
- $BUIL_t$ est le stock total de bâtiments à la date t ;
- $BUIL_{0,t}$ est le stock bâtiment détruits à la date $t-1$ et reconstruit à la date t ;
- $\varphi_k^{newBUILD}$ est la part de nouveaux bâtiments construits de classe k ;
- $\sum_k \varphi_k^{newBUILD} = 1$;
- $REHAB_{k,k'}$ est le nombre de m² réhabilités de classe k en classe k' (avec $k < k'$) ;
- $\varphi_{k',k}^{BUILD}$ est le taux de dégradation de la classe k' vers la classe k .

Cette équation signifie qu'à chaque période t , le stock de bâtiments de classe k (figure 5) :

- augmente avec $\varphi_k^{newBUILD} (\Delta BUIL_t + BUIL_{0,t})$, la part de bâtiments nouvellement construits de classe k ;
- augmente avec $\sum_{k'=0}^{k-1} REHAB_{k',k}$, le nombre de bâtiments de classe inférieure à k rénovés en classe k ;

- augmente avec $\sum_{k'=k+1}^K \varphi_{k,k'}^{BUILD} BUIL_{k',t-1}$, le nombre de bâtiments de classe supérieure à k dégradés en classe k ;
- diminue avec $-\sum_{k'=k+1}^K REHAB_{k,k'}$, le nombre de bâtiments de classe k rénovés vers une classe supérieure ;
- diminue avec $\sum_{k'=0}^{k-1} \varphi_{k,k'}^{BUILD} BUIL_{k',t-1}$, le nombre de bâtiments de classe k dégradés vers une classe inférieure.

Figure 5 : le parc de logements dans ThreeME



Source : ThreeME (Ademe ; CGDD ; OFCE)

c) L'acquisition de logements neufs

Le nombre de nouveaux bâtiments construits est égal à la somme des bâtiments détruits et du nombre de bâtiments à construire pour satisfaire la variation de la demande de logement. La classe du bâtiment construit dépend d'un facteur exogène fixé.

d) La rénovation des logements

Les ménages peuvent aussi choisir de rénover leur logement pour réduire leur facture énergétique. Le taux de réhabilitation (τ_{kREHAB}) correspond à la part des bâtiments que les ménages choisissent de rénover. Cette part n'est pas constante dans le temps, elle augmente avec la hausse du prix de l'énergie qui encourage la rénovation de logements.

τ_k^{REHAB} dépend du coût unitaire du logement et des exigences imposées d'efficacité énergétique (τ_k^{REHAB*} , qui est exogène). Cela nous donne la spécification suivante :

$$\Delta\tau_k^{REHAB} = \Delta\tau_k^{REHAB*} + \eta_k * \ln(PAYBACK_k)$$

$$PAYBACK_k = \frac{UC_k^{K_{REHAB}} - UC_k^K}{UC_k^E - UC_k^{E_{REHAB}}}$$

où :

- une tendance exogène, τ_k^{REHAB*} , qui permet de modéliser d'éventuelles obligations d'efficacité énergétique ;
- un arbitrage du ménage : $\eta_k * \ln(PAYBACK_k)$;
- avec η_k une variable exogène $\eta_k < 0$. En effet, plus PAYBACK est élevé, plus l'agent est dissuadé d'investir ;
- $PAYBACK_k$ est le temps de retour de l'investissement de rénovation énergétique pour les logements de classe k. Il correspond au ratio entre le surcoût d'investissement lié à la rénovation et le montant de la baisse de la facture énergétique. Le surcoût d'investissement correspond à l'écart entre les coûts unitaires du logement si le logement est réhabilité ($UC_k^{K_{REHAB}}$) et s'il ne l'est pas (UC_k^K). La baisse de la facture énergétique correspond à l'écart entre des coûts unitaires énergétiques des logements non rénovés (UC_k^E) et rénovés ($UC_k^{E_{REHAB}}$). Ces coûts unitaires énergétiques sont définis sur toute la durée de vie de l'investissement et intègrent donc le taux de croissance anticipé du prix de l'énergie.

Dans la réalité, un logement d'une classe donnée k peut être réhabilité de diverses manières correspondant à différentes classes supérieures. Il aurait donc été logique de supposer que le choix entre les classes supérieures soit endogène et qu'il dépende des coûts relatifs de chaque option de rénovation. Malheureusement, faute de données, ce type d'arbitrage est difficile à modéliser. De plus, ce choix est fortement déterminé par les standards techniques de rénovation, ce qui limite l'influence des prix relatifs. C'est pourquoi cet arbitrage a été fixé de façon exogène, c'est-à-dire que la part des logements de classe k réhabilités en classe k' ($\varphi_{k,k'}^{REHAB}$) est exogène :

$$REHAB_{k,k'} = \varphi_{k,k'}^{REHAB} * \tau_k^{REHAB} * BUIL_{k,t-1}$$

$$\sum_{k'} \varphi_{k,k'}^{REHAB} = 1$$

Le taux de dégradation d'un bâtiment de la classe k à k' (avec $k > k'$) est quant à lui exogène.

Pour ce qui est du PIB, le cadrage jusqu'à l'année 2035 est celui de la Commission européenne¹. Le cadrage a ensuite été prolongé jusqu'en 2050 en conservant le même taux de croissance que sur la période 2030-2035.

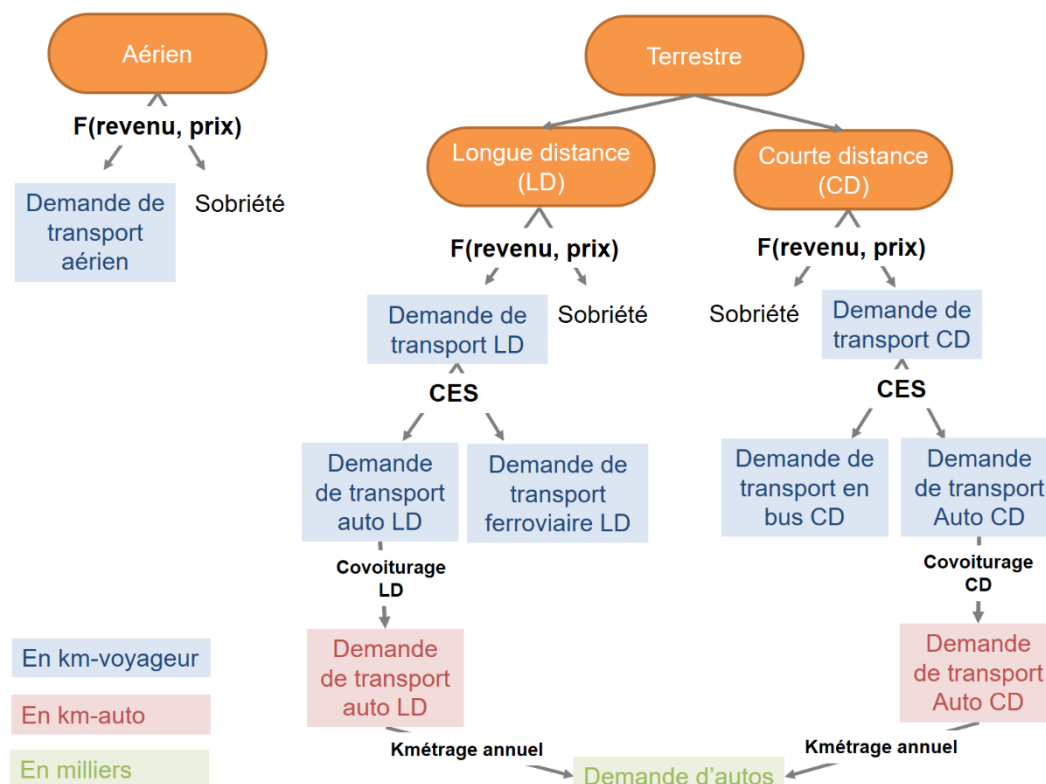
4.2. Le bloc transport

a) Les demandes de transport en kilomètres.voyageurs

La demande de transport est décomposée en trois éléments. La demande en kilomètres parcourus par les voyageurs en avion et ceux parcourus en transports terrestres est modélisée en distinguant les longues distances des courtes distances (*figure 6*).

¹ European Commission, EU Reference Scenario 2016. Energy, transport and GHG emissions. Trends to 2050, 2016

Figure 6 : la demande transport dans ThreeME



Source : ThreeME (Ademe ; OFCE ; CGDD)

Si ce schéma conserve le caractère propre et indépendant de la demande de transport aérien, la distinction entre longue et courte distance dans le transport terrestre permet de prendre en compte des modalités d'arbitrage différentes, et d'appréhender l'existence d'un effet de substitution intermodal plus importants pour les trajets de longue distance. Ceux-ci sont en effet souvent le fruit de choix ponctuels et de comparaisons plus fines des prix.

La fonction de demande de km.voyageur est la suivante pour l'avion :

$$dlog(km.voy_{AVION}) = 1,5 * dlog(PIB) - 0,2 * dlog(p_{AVION} - PCH)$$

- km.voy_{avion} est la demande de transport en avion exprimée en km.voyageurs ;
- p_{avion} est le prix du transport en avion ;
- PCH est l'indice harmonisé des prix à la consommation.

La fonction de demande de km.voyageur est la suivante pour les km longue distance (km.voy/avion et cd) :

$$\begin{aligned}
 dlog(km.voy_{LD}) &= 0,8 * dlog(PIB) - 0,4 * dlog\left(\frac{km.voy_{LD,FER}(-1)}{km.voy_{LD,FER}(-1) + km.voy_{LD,AUTO}(-1)}\right) \\
 &\quad * \frac{p_{FER}}{PCH} + \frac{km.voy_{LD,AUTO}(-1)}{km.voy_{LD,FER}(-1) + km.voy_{LD,AUTO}(-1)} * \frac{p_{AUTO}}{PCH}
 \end{aligned}$$

où :

- $km.voy_{LD}$ est la demande de transport terrestre longue distance exprimée en km.voyageurs ;
- $km.voy_{LD,FER}$ est la demande de transport terrestre longue distance en train exprimée en km.voyageurs ;
- $km.voy_{LD,FER}$ est la demande de transport terrestre longue distance en voiture exprimée en km.voyageurs ;
- p_{FER} est le prix du transport en train ;
- p_{AUTO} est le prix du transport en voiture ;
- PCH est l'indice harmonisé des prix à la consommation.

La fonction de demande de km.voyageurs est la suivante pour les km courte distance (km.voy/avion et CD) :

$$dlog(km.voy_{CD}) = 0,8 * dlog(PIB) - 0,2 * dlog\left(\frac{km.voy_{CD,BUS}(-1)}{km.voy_{CD,BUS}(-1) + km.voy_{CD,AUTO}(-1)} * \frac{p_{BUS}}{PCH}\right) + \frac{km.voy_{CD,AUTO}(-1)}{km.voy_{CD,BUS}(-1) + km.voy_{CD,AUTO}(-1)} * \frac{p_{AUTO}}{PCH}$$

où :

- $km.voy_{CD}$ est la demande de transport terrestre longue distance exprimée en km.voyageurs ;
- $km.voy_{CD,BUS}$ est la demande de transport terrestre longue distance en train exprimée en km.voyageurs ;
- $km.voy_{LD,FER}$ est la demande de transport terrestre longue distance en voiture exprimée en km.voyageurs ;
- p_{BUS} est le prix du transport en bus ;
- p_{AUTO} est le prix du transport en voiture ;
- PCH est l'indice harmonisé des prix à la consommation.

Les trois sources de demande de kilomètres.voyageurs sont indépendantes et évoluent positivement avec le revenu des ménages et négativement avec le prix moyen du type du trajet (avion, longue distance et courte distance). C'est à ce stade que sont modélisés les effets de sobriété.

Le transport terrestre, constitué des kilomètres « longues distance » et « courte distance » se décompose ensuite à l'aide d'arbitrages « CES ».

Pour la demande de km auto longue distance la fonction est la suivante :

$$dlog(km_{LD,AUTO}) = dlog(km_{LD}(-1)) + 0,5 * \frac{km_{LD,FER}(-1)}{km_{LD,FER}(-1) + km_{LD}(-1)} * dlog\left(\frac{PCH_{FER}}{PCH_{AUTO}}\right)$$

Pour la demande de km auto courte distance la fonction est la suivante :

$$dlog(km_{CD,AUTO}) = dlog(km_{CD}(-1)) + 0,2 * \frac{km_{CD,BUS}(-1)}{km_{CD,BUS}(-1) + km_{CD}(-1)} * dlog\left(\frac{PCH_{BUS}}{PCH_{AUTO}}\right)$$

L'arbitrage est identique pour toutes les demandes. Les kilomètres « longue distance » sont répartis entre les modes ferroviaire et automobile de façon endogène, selon un arbitrage coût relatif. De même, le choix de répartition pour les courtes distances entre voiture et bus résulte du même arbitrage. Le coût du transport par automobile correspond aux seuls coûts variables supportés par le voyageur.

b) La demande d'automobiles

L'automobile est un moyen de transport à la fois de courte et de longue distance. La demande de transports étant calculée en km-voyageurs on utilise le taux de remplissage des véhicules pour transformer cette demande en km-auto. Ce taux de remplissage des automobiles diffère selon la longueur du trajet, d'où la différenciation entre demande de transport automobile longue distance et courte distance.

$$km. auto = \frac{km. voy}{tx\ remplissage}$$

Au final, la somme de ces distances permet de connaître le nombre de kilomètres réalisés en automobile au total, puis le nombre d'automobiles circulant dans le pays via le kilométrage annuel moyen des véhicules.

$$auto = \frac{km. auto}{km\ annuel\ moyen}$$

i. Le choix entre électrique et thermique : le modèle de Bass

Concernant le choix de type de véhicule, l'évolution de la part de marché de l'électrique est modélisée suivant un modèle de Bass. Le modèle de diffusion de Bass est un modèle qui décrit le processus d'adoption d'une nouvelle technologie comme l'automobile ou le téléphone par une population. Plus précisément, il modélise la propension des acheteurs à prendre en compte les nouvelles technologies dans leurs comportements d'achat. Il repose sur la distinction des consommateurs en deux catégories, d'un côté les innovateurs et de l'autre les imitateurs.

Les innovateurs sont des technophiles pour lesquels l'utilité tirée de l'utilisation d'une nouvelle technologie est si grande qu'ils sont les premiers à l'adopter en dépit de son prix très élevé, en raison du coût d'adaptation ou des coûts de développement du réseau. Au fil de son utilisation, la nouvelle technologie se propage, son réseau se développe et sa visibilité augmente. Elle séduit de plus en plus de consommateurs et son coût se réduit. Ces deux effets incitent alors les imitateurs, moins technophiles et plus sensibles au prix, à acheter la nouvelle technologie à leur tour. Ici le modèle de diffusion de Bass est utilisé pour prédire l'évolution de la part de marché de la voiture électrique sur le marché automobile français. D'après ce modèle, la dynamique d'adoption de la voiture électrique dépend de deux coefficients, la propension à innover et la propension à imiter.

Ces deux coefficients nous permettent de déterminer l'augmentation de la part de marché de la voiture électrique à l'année t selon la relation suivante :

$$(1) d(\varphi_{elec,t}) = \alpha_{innov} (1 - \varphi_{elec,t-1}) + \alpha_{imit} (\varphi_{elec,t-1}) (1 - \varphi_{elec,t-1})$$

où :

- α_{innov} la propension à innover (déterminé par (2)) ;
- α_{imit} la propension à imiter (exogène).

L'équation (1) différentielle est donc une fonction croissante du taux d'innovation et du taux d'imitation. Par ailleurs on constate que conformément aux principes énoncés plus haut, plus la part de marché (ϕ) de l'électrique est élevée plus la contribution des imitateurs à la croissance de cette part de marché est importante. Si α_{imit} la propension à imiter est exogène, α_{innov} la propension à innover est déterminée par l'équation :

$$(2) d(\alpha_{innov}) = \eta_{innov} d\left(\frac{\beta U_{elec,t}^{-\mu}}{\sum_{i=elec,th} U_{i,t}^{-\mu}}\right)$$

Où :

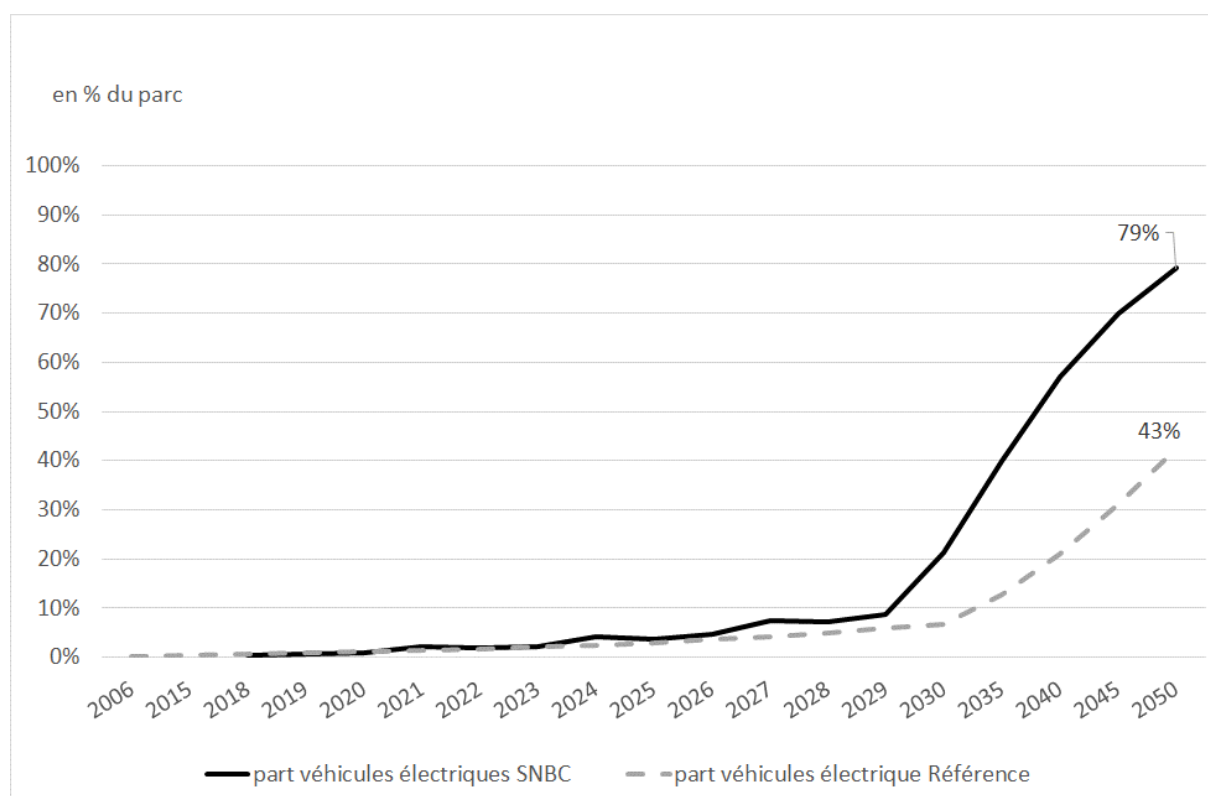
- μ est un indicateur de durée de diffusion ;
- η_{innov} est un coefficient d'innovation exogène ;
- U l'utilité tirée de l'utilisation d'une voiture électrique, qui dépend notamment de son coût (voir *infra*).

Cette équation (2) indique que le taux d'innovation est lui-même déterminé par deux variables exogènes, à savoir μ , un indicateur de durée de diffusion et η_{innov} est un coefficient d'innovation exogène.

Les variables exogènes de ce modèle ont été calibrées a priori de sorte que la courbe de diffusion corresponde à court terme à la courbe de diffusion de la voiture électrique telle qu'elle est observée en 2018, et à plus long terme aux courbes de diffusion observées pour des technologies récentes comme celle du téléphone portable.

In fine, la montée en charge du parc électrique dépend non seulement du paramétrage du modèle de Bass, mais également des prix des véhicules, comme des coûts des énergies. Ainsi, dans le scénario SNBC2, le parc électrique atteint 79 % du parc automobile en 2050, contre 43 % dans le scénario de référence (figure 7).

Figure 7 : part des véhicules électriques selon le scénario SNBC2 ou le scénario de référence



Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

ii. Le choix de la classe de véhicule

Après avoir fait son choix entre un modèle de véhicule thermique ou électrique, le ménage choisit la classe de son véhicule. Pour ce faire, il réalise un arbitrage en prenant en compte les coûts d'usage (facture énergétique) et coût d'achat du véhicule avec une fonction CES.

La part de marché de chaque classe au sein des véhicules thermiques et électriques correspond au rapport de l'utilité tirée par le ménage pour le véhicule de la classe concernée sur la somme des utilités de toutes les classes. Ainsi, plus l'utilité correspondante à une classe donnée est importante plus la demande pour cette classe est forte.

Cette utilité est calculée de la manière suivante :

$$U_{\text{auto}}(\text{tec}, X) = -0.76 * UC_{\text{K_auto}}(\text{tec}, X) - 0.2 * UC_{\text{E_auto}}(\text{tec}, X)$$

Avec :

- Tec, la technologie du véhicule, thermique ou électrique ;
- X, la classe de consommation du véhicule, A, B, C, etc. ;
- $UC_K_auto(tec,X)$ coût du capital associé à un véhicule de la classe X. Ce coût du capital est égal au montant comptant déboursé par l'acheteur (20 %) plus le remboursement de la dette et les intérêts payés sur cette dette ;
- $UC_E_auto(tec,X)$, coût d'usage associé à un véhicule de la classe X. Ce coût d'usage est quant à lui égal aux consommations d'énergie du véhicule fois le prix de cette énergie.

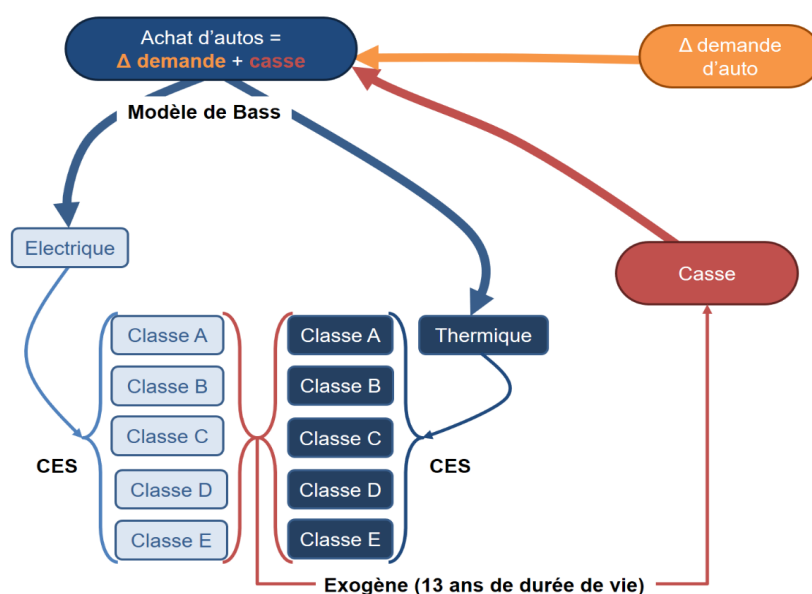
Les élasticités choisies dans ces simulations traduisent une plus grande sensibilité au coût du capital qu'au coût d'usage de la part des ménages.

Ainsi, lorsque le prix de l'énergie augmente, par exemple avec une taxe carbone, un véhicule cher à l'achat mais énergétiquement performant apporte une utilité relativement plus importante à l'acheteur qu'une voiture peu onéreuse mais énergivore.

c) Le parc automobile

Le parc automobile ventilé par classe évolue avec l'entrée de nouveaux véhicules dans le parc et la sortie de vieux véhicules qui vont à la casse (figure 8). L'entrée de nouveaux véhicules est déterminée par la demande pour chaque classe et type d'automobile comme expliqué dans les sections précédentes. Concernant les sorties de véhicules du parc, nous considérons que tous les véhicules, indépendamment de leur classe et type sont mis à la casse au bout de 13 ans d'utilisation.

Figure 8 : le parc automobile dans ThreeME



Source : ThreeME (Ademe ; OFCE ; CGDD)

PARTIE II – Le cadrage SNBC2

Le modèle ThreeME a permis de modéliser les mesures de la SNBC2 soit de manière endogène soit avec des proxys de sorte que les points de passage fixés par la SNBC2 en termes de consommation d'énergie et d'émission de CO₂ soient respectés.

La DGEC a demandé au CGDD et à l'Ademe d'évaluer les effets macroéconomiques et sectoriels de la SNBC2 avec le modèle ThreeME. Dans cet exercice, un effort de cadrage important, tant sur les hypothèses que sur la modélisation des mesures, a été demandé par la DGEC, afin de s'assurer que l'évolution des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ corresponde bien à celle prévue par la SNBC2.

L'exercice d'évaluation de la SNBC2 coordonné par la DGEC est différent de celui consistant à estimer la valeur de l'action pour le climat, mené par la commission Quinet. En effet dans l'exercice « valeur de l'action pour le climat », il s'agissait d'évaluer l'effet d'une mesure (la valeur du CO₂) sur la consommation d'énergie, les émissions de CO₂ et l'économie. Ici, le scénario énergétique est en partie prédéfini du fait de l'utilisation de certains proxys. Il s'agit essentiellement d'en évaluer l'impact macroéconomique et non de valider la capacité des mesures à atteindre la neutralité carbone. S'agissant d'un scénario construit de façon à atteindre le mix énergétique fixé par la SNBC2, le niveau d'émissions de CO₂ est, par construction, proche de celui permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. En outre, de façon à atteindre les cibles énergétiques et d'émissions fixées par la SNBC2, des signaux prix fictifs sur l'énergie sont introduits dans la modélisation ThreeME. Ces prix fictifs viennent augmenter, pour les ménages et les entreprises, le prix des énergies et les conduisent à prendre leurs décisions de consommation et d'investissement en conséquence, mais sans avoir pour autant à payer effectivement cette hausse des prix. Ces prix fictifs doivent être interprétés comme des représentations des politiques supplémentaires qui devront être ajoutées à l'avenir, afin de bien atteindre les objectifs prévus.

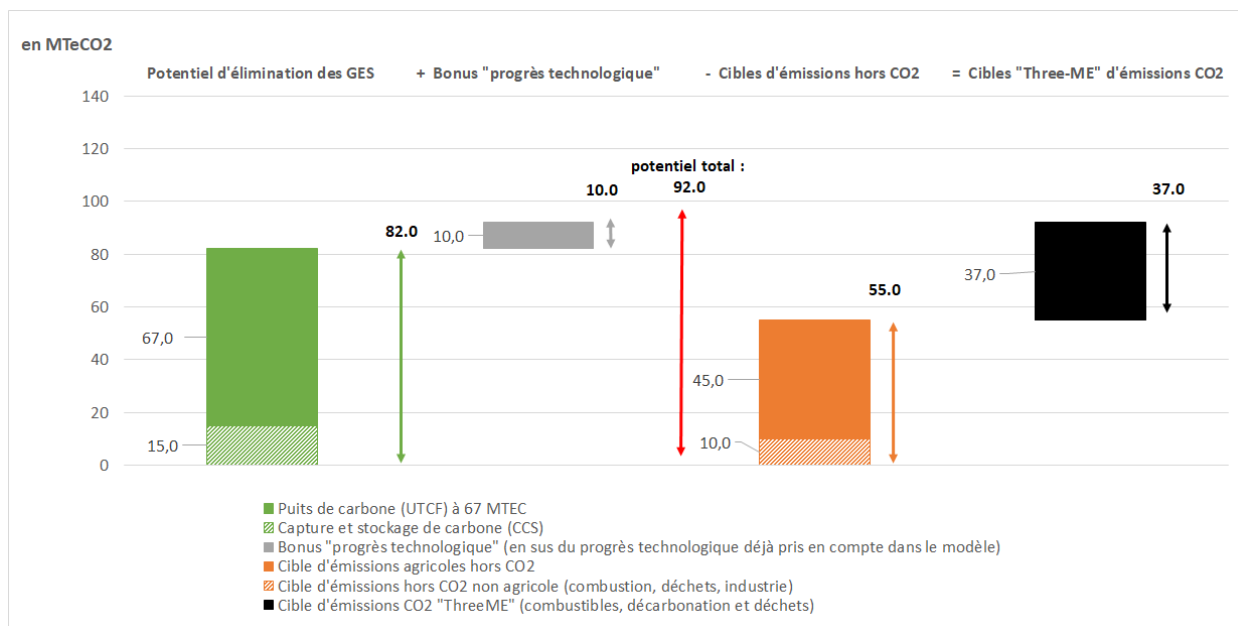
1. LES HYPOTHÈSES DE LA SNBC2

1.1. La neutralité carbone

La deuxième Stratégie nationale bas-carbone vise désormais la neutralité carbone à l'horizon 2050, conformément à la loi du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat. Ce nouvel objectif est plus ambitieux que l'engagement précédent pris par la France devant la communauté internationale en 2003 de diviser par un facteur 4 les émissions nationales de GES du niveau de 1990 d'ici 2050. Cet engagement avait été validé par le « Grenelle de l'environnement » en 2007, puis confirmé par la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) du 17 août 2015, qui prévoyait une baisse de 40 % en 2030.

La neutralité carbone désigne un objectif d'émissions de GES qui serait neutre sur l'environnement : les émissions résiduelles sont compensées par la capacité d'absorption de CO₂. Dans l'exercice de modélisation, le potentiel d'élimination annuelle des gaz à effet de serre est supposé s'élever à 92 MtCO₂eq en 2050. Il est équivalent à la capacité d'absorption du puits de carbone français évalué 67 MtCO₂ par an, à laquelle sont ajoutés un potentiel annuel de capture et stockage de carbone estimé à 15 MtCO₂eq en 2050 et un « bonus » supplémentaire de 10 MtCO₂eq par rapport à la SNBC2 (qui estime le puits total à 82 MtCO₂eq) pour tenir compte de possibles progrès techniques additionnels (figure 1). Si l'on déduit de ce potentiel les objectifs d'émissions de GES autres que le CO₂, qui ne sont pas couverts par le modèle ThreeME, la cible d'émissions de CO₂ s'établit à 37 millions de tonnes. Le respect de cet objectif signifie une baisse de 89 % des émissions de CO₂ par rapport à 2015.

Figure 1 : cibles d'émissions en de CO₂ correspondant au puits de carbone à 67 MtCO₂eq



Source : DGEC (cadre SNBC2)

1.2. L'environnement international

L'environnement international est supposé favorable à la lutte contre le changement climatique, ce qui est intégré sous la forme d'une hausse des prix étrangers proche de l'inflation française induite par la réalisation de la transition énergétique vers la neutralité carbone. Cela a été modélisé en répercutant 80 % de l'inflation française sur les prix internationaux, ce qui correspond à la part des pays développés dans nos échanges extérieurs. En effet, conformément à l'Accord de Paris, l'effort demandé aux pays émergents dans le processus de transition serait moins important que celui des pays développés.

L'évolution des exports d'électricité est supposée exogène.

1.3. Une trajectoire tendancielle de référence

Dans le cadre de la mise à jour de la SNBC en 2018-2019, la DGEC rassemble les nouvelles mesures sous-jacentes à la stratégie dans un scénario « SNBC2 », qu'elle associe à une trajectoire tendancielle de référence où la croissance croît à un niveau potentiel de 1,6 % par an en moyenne. Ce scénario de référence prend en compte toutes les mesures liées à la transition énergétique prises avant le 1^{er} juillet 2017, mais pas celles prises depuis lors. Dans ce scénario de référence, les taux d'incorporation des biocombustibles resteraient stables, mais le mix électrique prend en compte une montée en charge graduelle des énergies renouvelables (EnR).

1.4. Taux d'intérêt fixe

Le taux d'intérêt réel est supposé exogène et fixe, comme souvent dans ce type d'exercice. Cela signifie que les investissements dans la transition énergétique ne conduisent pas à une raréfaction des fonds disponibles générant des possibles effets d'éviction susceptibles de pénaliser la croissance des autres secteurs.

2. LES MESURES QUI SOUS-TENDENT LA SNBC2

Le scénario SNBC2 comprend un paquet de mesures complémentaires de nature fiscale, budgétaire ou réglementaire. Certains dispositifs sont de nature transversale, d'autres s'articulent autour de trois secteurs en particulier, le transport, le bâtiment et l'industrie.

Le modèle ThreeME permet de modéliser de façon endogène certaines mesures, en particulier dans le bloc énergétique celles touchant à la rénovation des logements et à l'achat de véhicules particuliers par les ménages, ainsi que les choix modaux effectués par les particuliers pour leurs déplacements. Cependant, certaines mesures peuvent être modélisées de façon légèrement plus restrictive que celles intégrées dans le scénario associé à la SNBC2. D'autre part, toutes les mesures de la SNBC2 ne peuvent être modélisées de façon endogène. Certaines ont dû être représentées par des « proxys » de manière exogène. Les proxys ont été calés de sorte que la trajectoire énergétique par secteur d'activité et par type d'énergie et que l'évolution des émissions respectent celles de la SNBC2. Dans ce cadrage SNBC2, la DGEC a également associé aux deux scénarios des hypothèses de coûts dans les énergies, notamment les énergies renouvelables (EnR).

Les mesures sont ventilées ci-dessous suivant le secteur qu'elles affectent. Dans un souci de transparence, lorsque les mesures sont modélisées de façon exogène, cela est indiqué, et il est précisé si le surcoût associé est pris en compte ou non dans le modèle et de quelle manière.

2.1. Les mesures transversales

- Conformément au scénario associé à la SNBC2, la taxe carbone reste figée jusqu'en 2050 au niveau qui était le sien en 2018, à savoir 44,6 €/tCO₂.
- Les taux de TICPE sont indexés sur l'inflation.
- Les prix des énergies ont été fixés et sont différents dans les scénarios SNBC2 et de référence compte tenu de mix différents (*voir paragraphe 3 sur le cadrage énergétique*).

2.2. Les mesures pour réduire les émissions dans le transport

- Les mesures favorisant les mobilités douces, le covoiturage et le télétravail : un paramètre exogène négatif est introduit dans la fonction de demande de kilomètres parcourus en courte distance, sans surcoût associé.
- L'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules particuliers par un paramètre exogène s'accompagne d'un surcoût de production des voitures.
- La pénétration des véhicules électriques : le taux de bonus actuel versé à l'achat des véhicules électriques est prolongé jusqu'en 2040. Mais le besoin de subvention décroît graduellement avec la baisse anticipée du coût du stockage en kWh des batteries.
- De même, pour simuler une amélioration de l'efficacité énergétique des autres types de véhicules, des paramètres exogènes des rendements énergétiques des moteurs thermiques, des bus, des poids lourds, du secteur maritime et aérien, ont été introduits, sans possibilité toutefois dans la modélisation d'y associer un surcoût.
- Le report modal des voyageurs est modélisé par l'introduction d'un signal prix virtuel positif dans les fonctions d'arbitrage des modes de déplacements des agents en faveur du ferroviaire. La hausse de la demande de transport ferroviaire s'accompagne d'une hausse des investissements de capacité du secteur.
- La substitution de l'électricité et du gaz aux produits pétroliers dans le transport de marchandises a été modélisée par l'introduction d'un signal prix virtuel sur le pétrole dans la fonction de demande des consommations intermédiaires énergétiques des divers secteurs.

2.3. Les mesures destinées à l'isolation des bâtiments et logements

- Les aides à la rénovation dans le résidentiel, comme le crédit d'impôt transition énergétique (CITE) ou les aides à la rénovation de l'habitat (Anah) sont prolongées jusqu'en 2050.
- Pour tenir compte du tiers financement en rénovation énergétique, représenté par un organisme qui offre des crédits à bas taux et de longue durée aux ménages, afin de les inciter à rénover, l'élasticité des travaux de rénovation au prix de l'énergie est augmentée pour simuler la levée partielle de la contrainte de liquidité des ménages.
- L'obligation de rénovation dans le tertiaire en introduisant un signal prix fictif dans l'équation de substitution capital énergie. Ainsi, la diminution de la consommation d'énergie du secteur s'accompagne d'une augmentation de ses investissements.

2.4. Les mesures ciblant l'industrie

- Les gains d'efficacité énergétique dans l'industrie sont modélisés par l'introduction d'un signal prix fictif dans l'équation de substitution capital énergie. La réduction des consommations d'énergie s'accompagne d'un regain d'investissement.
- La substitution de l'électricité aux combustibles fossiles en introduisant un signal prix fictif dans l'équation de substitution des consommations intermédiaires énergétiques

2.5. Des mesures supplémentaires non encore connues modélisées par des signaux prix fictifs sur les énergies

Les mesures explicites de la SNBC2 sont complétées dans cet exercice par l'introduction de signaux prix fictifs sur les énergies. Ceux-ci ont pour propriété de modifier les choix faits par les acteurs, ménages et entreprises, de consommation et d'investissement. Ils apparaissent comme des modifications des prix des énergies auxquels ceux-ci réagissent, mais dont ils n'ont pas à assumer la dépense associée (c'est en cela qu'ils sont fictifs).

Ces signaux représentent en fait l'ensemble des mesures supplémentaires qui devront être ajoutées à celles explicitement modélisées dans la trajectoire de la SNBC2 pour atteindre les objectifs énergétiques et environnementaux fixés. Un des scénarios sous-jacent à la SNBC2 qui avait été testé au début des travaux de simulation prévoyait une augmentation graduelle de la taxe carbone jusqu'en 2050, dont l'ajustement permettait d'atteindre les cibles énergétiques et en CO₂. Cette orientation dans la modélisation a depuis été abandonnée. Sa contribution à l'atteinte des objectifs dans la modélisation était forte : en raisonnant sans prendre en compte aucune des autres mesures de la SNBC2, sa trajectoire croissante jusqu'en 2050 suffisait à elle seule à atteindre 55 % de la baisse prévue des émissions de GES en 2030 et 44 % en 2050.

Les signaux prix fictifs, auxquels on recourt, sont un moyen utilisé en modélisation (ici avec ThreeME) pour représenter les mesures non fiscales supplémentaires nécessaires pour atteindre quand même les objectifs fixés. Ce moyen n'est pas idéal, car il a tendance à sous-estimer les coûts des mesures non fiscales, et donc des mesures qui viendraient remplacer la taxe carbone dans la SNBC2. En effet, celles-ci s'avèrent économiquement plus coûteuses qu'une taxe, qui aurait, elle, l'avantage de privilégier l'exploitation des gisements aux coûts d'abattement les plus faibles. En effet, seules les actions dont le coût d'abattement est inférieur à la taxe sont entreprises, pas les autres. Comme les taxes, les mesures non fiscales pèsent sur le pouvoir d'achat des ménages. Par exemple, quand une norme s'applique à un producteur ou à un fournisseur, son application entraîne une contrainte supplémentaire pour eux, qui finit nécessairement par se répercuter sur les prix de vente payés par les consommateurs. De même, introduire de nouvelles subventions suppose au préalable de prélever des ressources supplémentaires auprès des ménages et des entreprises. En outre, en contraignant le choix des ménages et en empêchant une

allocation optimale des ressources, l'application d'une norme peut introduire des rigidités et des à-coups supplémentaires. Ainsi, par exemple, si une norme rend obligatoire la rénovation des bâtiments faisant partie des classes les moins efficaces énergétiquement, elle contraint la réalisation de la rénovation avant une certaine date, et force ainsi les ménages à prendre des décisions qui ne sont pas encore forcément optimales au moment où ils les prennent. La modélisation par signaux prix fictifs des mesures qui seront nécessaires pour remplacer la taxe carbone dans la SNBC2 n'est pas à même de rendre compte de ces coûts supplémentaires par rapport à une taxation carbone.

Les signaux prix utilisés pour représenter les mesures additionnelles qui devront être prises pour que les objectifs SNBC2 soient pleinement réalisés, correspondent à un signal fictif sur le prix des énergies atteignant 200 €/2015/TCO₂ en 2030 et 600 €/2015 en 2050.

3. LE CADRAGE ÉNERGÉTIQUE ET SES CONSÉQUENCES

Le scénario évalué a été cadré (*voir partie précédente*) afin que les cibles en consommation d'énergie et en émissions de CO₂ correspondent peu ou prou à celles de la SNBC2. Cette partie présente les cibles fournies par la DGEC et indique les résultats de ThreeME qui, par construction, en sont proches.

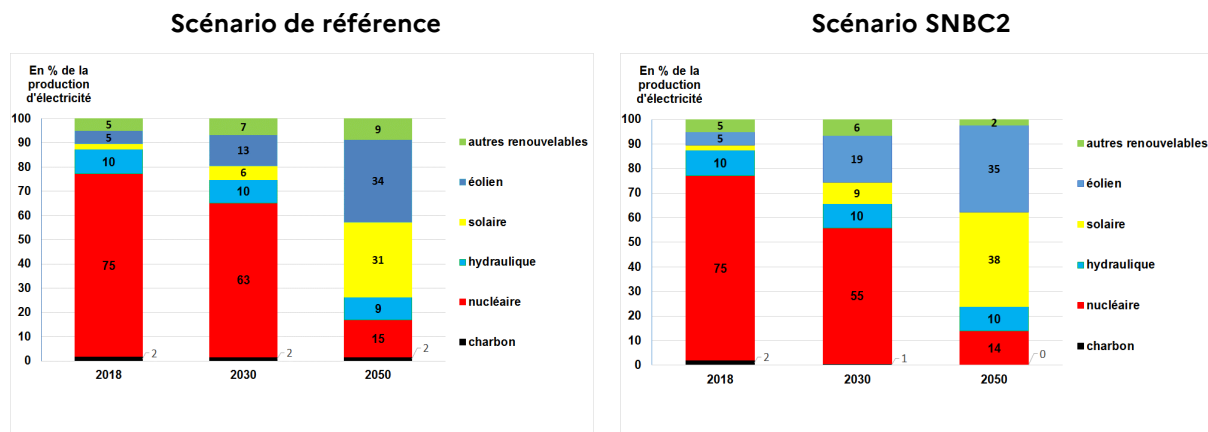
3.1. Un exercice calibré sur le bilan énergétique de la DGEC

Cet exercice est contraint par les cibles de consommations d'énergies fixées par la DGEC. Ces cibles énergétiques sont atteintes de manière forcée pour coller avec le cadrage, par exemple au moyen de signaux prix virtuels ou de proxys.

3.2. Les hypothèses de mix et de prix énergétiques

Le mix électrique (entendu comme les parts de chaque type de moyen de production d'électricité) est le même dans les deux scénarios SNBC2 et de référence avec, dans le cadrage de la modélisation, une montée en charge graduelle des énergies renouvelables qui atteindrait les 4/5^e de la production électrique en 2050 (*figure 2*). De même, le prix de l'électricité est le même dans les deux scénarios. Il convient de noter l'importance de ces hypothèses concernant l'offre énergétique pour mesurer les impacts en termes de dépenses énergétiques des ménages. En effet, lorsqu'on compare la situation entre le scénario de référence et la SNBC2, le mix électrique est quasiment le même dans les deux scénarios, alors que les consommations électriques baissent avec la SNBC2. Ainsi, la production des énergies renouvelables, et les emplois créés par ce secteur vont diminuer avec la SNBC2, compte tenu de ce choix de cadrage particulier.

Figure 2 : hypothèses de mix électrique dans les scénarios SNBC2 et de référence



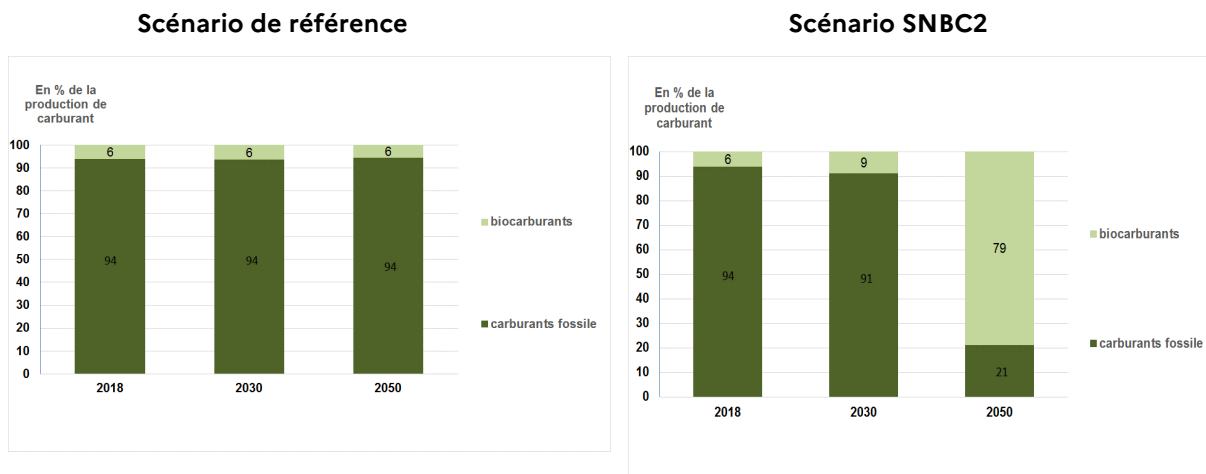
Note : l'hypothèse SNBC2 (figure de droite) retenue correspond à un mix retenu pour les nécessités de l'exercice de modélisation. Pour rappel, dans la SNBC2 publiée en avril 2020, il a simplement précisé que le mix électrique sera décarbonné en 2050.

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadastre DGEC ad hoc pour la modélisation TheeME)

À l'inverse, les hypothèses d'incorporations des biocarburants sont très différentes. Par hypothèse, dans le scénario SNBC2, le taux d'incorporation des biocarburants dans les carburants devrait monter en charge progressivement jusqu'à atteindre 79 % en 2050, tandis que celui du biogaz s'élèverait à 92 % (figures 3 et 4). À l'inverse dans le scénario de référence, le taux d'incorporation de biocarburants et de biogaz n'évolue pas.

Les prix des combustibles hors taxes sont calculés en fonction de la part des biocarburants, de la trajectoire de prix des énergies fossiles et de la trajectoire de prix des biocarburants. Or les hypothèses relatives au prix d'import des énergies fossiles s'appuient sur le rapport « EU reference scenario » de 2016, elles-mêmes en ligne avec le *World Energy Outlook* de l'AIE de 2015. Les prix du pétrole suivent une forte croissance sur la période pour atteindre 108 \$/baril en 2050, contre 48 \$/baril en 2015. Quant au prix des biocarburants, il reste stable à 0,94 €/l hors taxe et le celui du bio-GNV à 150 €/MWh (y compris coût de transformation du biogaz en bio-GNV et de distribution du bio-GNV). Cela signifie que les biocarburants sont plus coûteux que leur équivalent fossile hors taxe carbone en début de période et deviennent moins cher en fin de période. En conséquence, compte tenu de la forte croissance de la part biogénique des énergies, le prix des combustibles est moins dynamique dans le scénario SNBC2 que dans celui de référence où il évolue au même rythme que le prix du baril de pétrole.

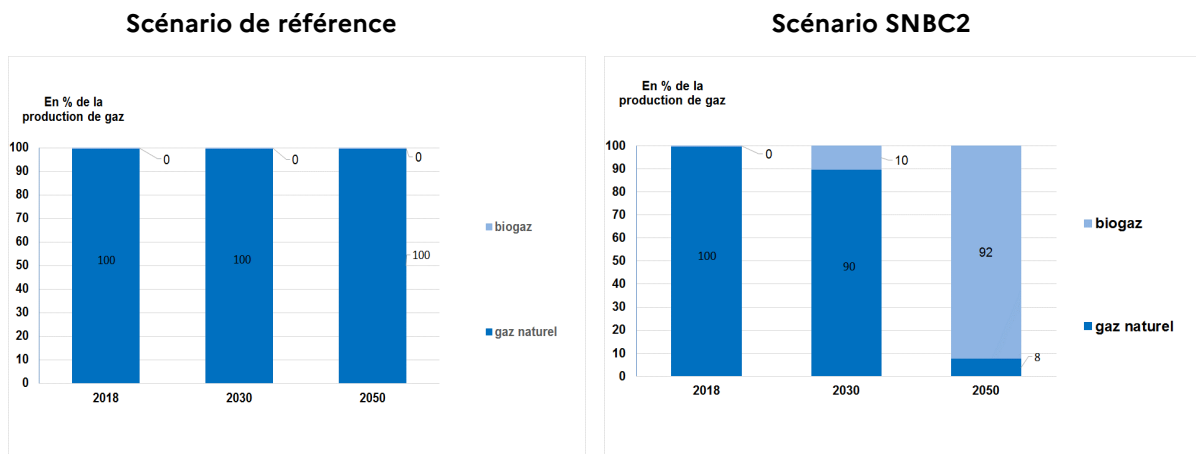
Figure 3 : taux d'incorporation du biocarburant dans les scénarios SNBC2 et de référence



Note : dans le cadrage SNBC2 (figure de droite) donné pour cette évaluation, il reste une part résiduelle de carburants fossiles, tandis que dans la SNBC2 finale publiée en avril 2020, le carburant est totalement décarboné en 2050.

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC ad hoc pour la modélisation ThreeME)

Figure 4 : Taux d'incorporation du biogaz dans les scénarios SNBC2 et de référence



Note : dans le cadrage SNBC2 (figure de droite) donné pour cette évaluation il reste une part résiduelle de gaz naturel, tandis que dans la SNBC2 finale publiée en avril 2020, le gaz est totalement décarboné en 2050.

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC ad hoc pour la modélisation ThreeME)

3.3. Le bilan énergétique obtenu dans l'exercice

Le mix énergétique prévu avec la simulation est conforme au cadre fixé par la DGEC (figure 5). Ainsi, la projection SNBC2 table sur une réduction graduelle de la consommation finale d'énergie, jusqu'à atteindre en 2050 la moitié de son niveau actuel. En particulier, la consommation finale de carburant (d'origine fossile et bio) serait divisée par 8 à cet horizon, celle de charbon par 5 et celle de gaz (naturel et bio) baisserait d'un tiers. Dans le même temps, une électrification plus importante dans tous les secteurs ferait augmenter la consommation finale d'électricité d'un quart.

En conséquence, en comparaison de la consommation d'énergie finale inscrite dans le scénario de référence qui resterait globalement inchangée, celle projetée par la SNBC2 s'écarterait progressivement jusqu'à en atteindre la moitié en 2050. Parallèlement, comme la part de l'électricité croîtrait dans les deux scénarios, la consommation finale d'électricité atteindrait en 2050 un niveau moindre de celui inscrit dans le scénario de référence. Il convient de remarquer que cet écart de consommation finale d'électricité

entre les deux scénarios en 2050 est légèrement plus marqué dans la modélisation TheeME (53-45 Mtep) que dans la trajectoire déterminée par la DGEC (49-46Mtep).

Figure 5 : consommations finales d'énergie par secteur et combustible en Mtep(*)

Scénario SNBC2

Consommation d'énergies prises en compte dans ThreeME en Mtep

2015	coal	oil	elec	gas	Total
Transport	0	45	1	0	46
Personal vehicles	0	25	0	0	25
Public and freight transpo	0	20	1	0	20
Residential	0	7	12	14	33
Service	0	4	12	9	25
Industry and agriculture	5	20	11	14	50
Industry	4	16	11	12	43
Industry non energetic use	1	2	0	2	4
Agriculture	0	2	0	0	3
Total Final Mtep	5	75	36	37	154

2030	coal	oil	elec	gas	Total
Transport	0	31	3	1	35
Personal vehicles	0	16	1	0	17
Public and freight transpo	0	15	2	1	18
Residential	0	2	12	11	25
Service	0	1	12	7	20
Industry and agriculture	2	12	10	13	37
Industry	2	8	10	12	31
Industry non energetic use	0	1	0	1	3
Agriculture	0	3	0	0	4
Total Final Mtep	2	45	36	32	116

2050	coal	oil	elec	gas	Total
Transport	0	5	8	4	16
Personal vehicles	0	2	3	0	5.4
Public and freight transpo	0	3	4	4	11
Residential	0	0	11	10	21
Service	0	0	10	5	14
Industry and agriculture	1	3	16	8	28
Industry	0	2	16	7	25
Industry non energetic use	0	1	0	1	1
Agriculture	0	1	0	0	1
Total Final Mtep	1	9	45	26	80

Bilan cible DGEC

fuel and				Total
coal	biofuel	elec	gas	
0	43	0.9	0	44
0	24	0	0	24
0	19	1	0	20
0	7	14	14	34
0	3	13	9	25
5	19	11	13	49
1	2	10	13	26
4	14	0	0	18
0	3	1	0	4
5	72	38	36	151

fuel and				Total
coal	biofuel	elec	gas	
0	31	3.2	1	35
0	16	1	0	18
0	15	2	1	18
0	2	12	11	25
0	1	12	7	20
2	12	10	14	37
0	1	9	12	22
2	9	0	1	11
0	2	1	1	4
2	45	37	33	117

fuel and				Total
coal	biofuel	elec	gas	
0	5	8.2	4	17
0	1	4	0	6
0	4	4	4	11
0	0	11	10	21
0	0	10	4	14
1	3	16	8	28
0	0	16	6	21
1	3	0	2	5
0	0	1	1	1
1	9	46	26	81

Scénario de référence

Consommation d'énergies prises en compte dans ThreeME en Mtep

2015	coal	oil	elec	gas	Total
Transport	0	45	1	0	46
Personal vehicles	0	25	0	0	25
Public and freight transpo	0	20	1	0	20
Residential	0	7	12	14	33
Service	0	4	12	9	25
Industry and agriculture	5	20	11	14	50
Industry	4	16	11	12	43
Industry non energetic use	1	2	0	2	4
Agriculture	0	2	0	0	3
Total Final Mtep	5	75	36	37	154

2030	coal	oil	elec	gas	Total
Transport	0	40	2	0	42
Personal vehicles	0	22	0	0	23
Public and freight transpo	0	17	2	0	19
Residential	0	5	13	10	27
Service	0	4	14	7	25
Industry and agriculture	4	18	12	12	47
Industry	3	15	11	11	40
Industry non energetic use	1	1	0	1	4
Agriculture	0	2	0	0	3
Total Final Mtep	4	67	40	29	141

2050	coal	oil	elec	gas	Total
Transport	0	34	4	0	39
Personal vehicles	0	15	2	0	17
Public and freight transpo	0	20	2	0	22
Residential	0	3	13	7	24
Service	0	4	19	7	30
Industry and agriculture	5	20	17	14	56
Industry	4	15	16	12	48
Industry non energetic use	1	2	0	2	5
Agriculture	0	3	1	0	4
Total Final Mtep	5	62	53	29	149

Bilan cible DGEC

fuel and coal	biofuel	elec	gas	Total
1	43	1	0	45
0	24	0	0	24
0	19	1	0	20
0	7	14	14	34
0	3	13	9	25
5	19	11	13	49
1	2	10	13	26
4	14	0	0	18
0	3	1	0	4
7	72	38	36	152

fuel and coal	biofuel	elec	gas	Total
0	40	2	0	42
0	21	1	0	21
0	19	1	0	20
0	4	13	11	28
0	2	14	7	23
3	17	11	17	49
0	0	11	16	27
3	14	0	0	17
0	3	1	0	4
3	63	41	35	142

fuel and coal	biofuel	elec	gas	Total
0	38	4	0	42
0	17	3	0	19
0	21	2	0	23
0	3	14	10	27
0	1	17	5	24
3	20	13	19	55
0	0	13	19	32
3	17	0	0	20
0	3	1	0	4
3	62	49	35	148

(*) hors bois domestiques, consommation non énergétique incluse.

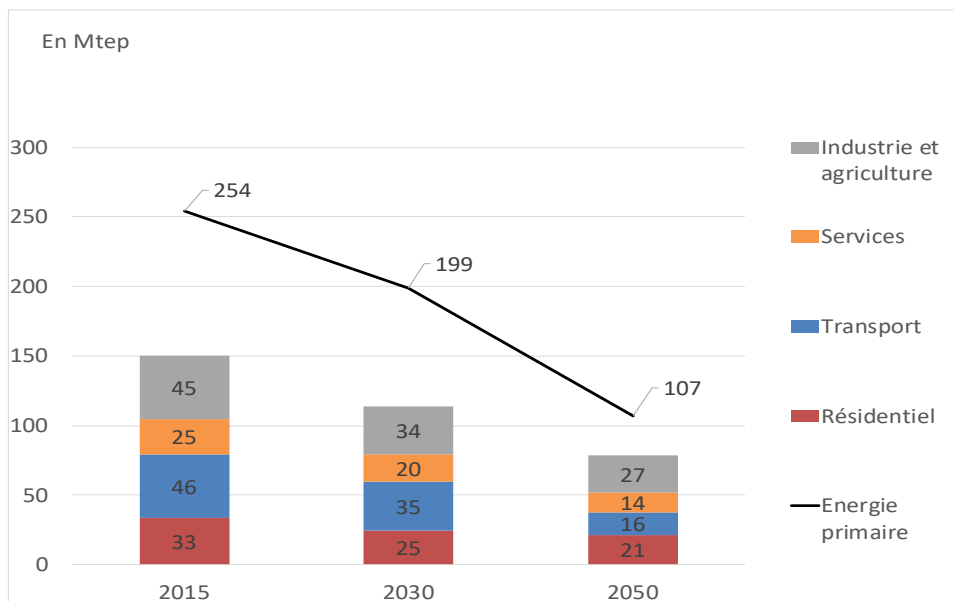
Note : le bilan cible défini par la DGEC pour l'exercice (tableau de droite) peut comporter certaines légères différences avec le bilan final des cibles énergétiques retenues dans la SNBC2 publiée en avril 2020. Pour précision, le bilan énergétique pris en compte dans la modélisation (tableau de gauche) tendait vers les cibles sans les atteindre exactement pour des raisons liées à la modélisation.

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

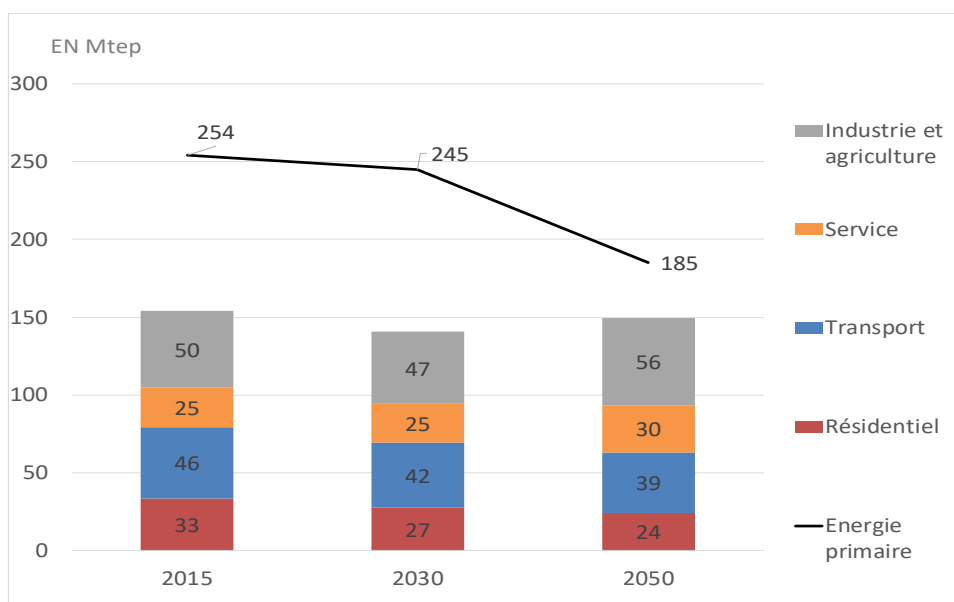
Dans le cadrage SNBC2, la consommation d'énergie finale baisserait de 82 Mtep entre 2015 et 2050, soit une baisse de 45 %. La moitié de cette baisse serait atteinte dès 2030. Tous les secteurs de l'économie participeraient à cette chute, mais le transport y prendrait la plus grande part avec une baisse de 29 Mtep à lui seul, en raison de l'amélioration de la performance énergétique découlant notamment de l'électrification du parc et des hypothèses de la SNBC2 relatives au covoiturage, au télétravail et au partage de la voirie. Les véhicules particuliers baisseraient à eux seuls leur consommation d'énergie de 20 Mtep du fait notamment du passage à l'électrique. Ensuite, le deuxième secteur qui baisserait ses consommations serait l'industrie avec une baisse de 17 Mtep, comprenant les consommations de combustibles à usage non énergétique comme le charbon dans la fabrication de l'acier ou le pétrole dans celle du plastique. Ensuite, le résidentiel et les services (principalement leurs bâtiments) baisseraient leur consommation respectivement de 11 et 10 Mtep, principalement grâce à leurs dépenses de rénovation des bâtiments. Enfin les consommations d'énergie dans l'agriculture baisseraient de 2 Mtep.

Figure 6 : évolutions des consommations finales d'énergie par secteur et du total des consommations d'énergie primaire* en Mtep

Scénario SNBC2



Scénario de référence



Note : les consommations primaires d'énergie sont les consommations totales d'énergie à usage énergétique, incluant les consommations propres et pertes du secteur énergétique et excluant les consommations du secteur industriel à usage non énergétique.

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

4. LES EFFETS SUR LES PARCS AUTOMOBILE ET DE LOGEMENTS ET LES ÉMISSIONS DE CO₂

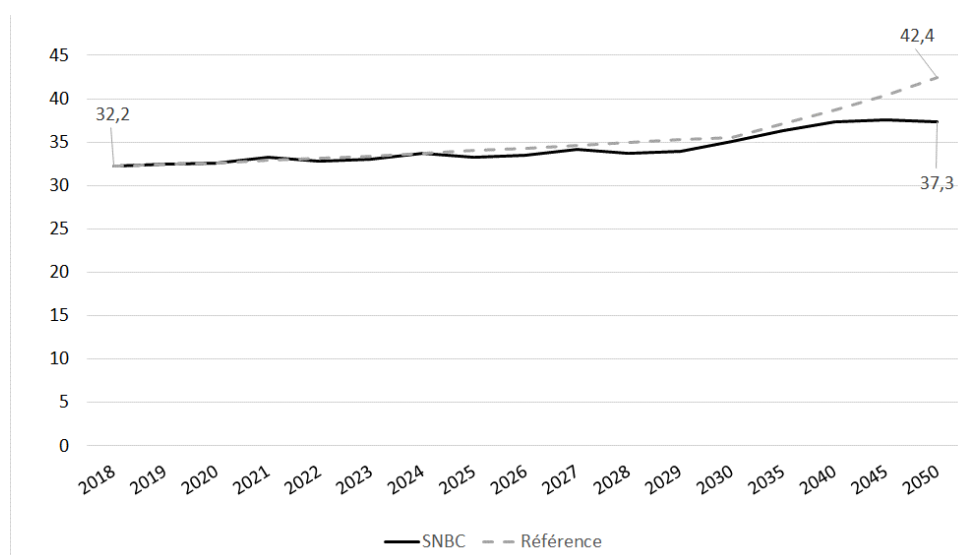
En cohérence avec les objectifs fixés par la DGEC, la simulation réalisée avec le modèle ThreeME nous fournit une projection de parc automobile et de logement à horizon 2050. Les résultats en termes d'émissions de CO₂ sont eux aussi contraints par construction mais sont tout de même obtenus avec un certain degré de liberté dans le modèle.

4.1. Le parc automobile

Dans le scénario SNBC2, le nombre de véhicules passerait de 32 M en 2015 à 37 M en 2050 (contre 42 M en 2050 dans le scénario de référence, *figure 7*). Les achats de voitures seraient très majoritairement des véhicules électriques en 2050 (92 % des ventes, contre 66 % dans le scénario de référence, *figure 8*). Le parc automobile serait donc électrifié à 79 % à cette date, contre encore 1 % en 2020, *figure 9*). La pénétration de l'électrique est modélisée dans ThreeME selon un modèle de diffusion technologique de Bass (voir *partie 1*).

Figure 7 : parc automobile

En millions de véhicules



Sources : ThreeME (Ademe ; CGDD) ; cadrage DGEC

Figure 8 : achats d'automobile selon la motorisation et la performance énergétique

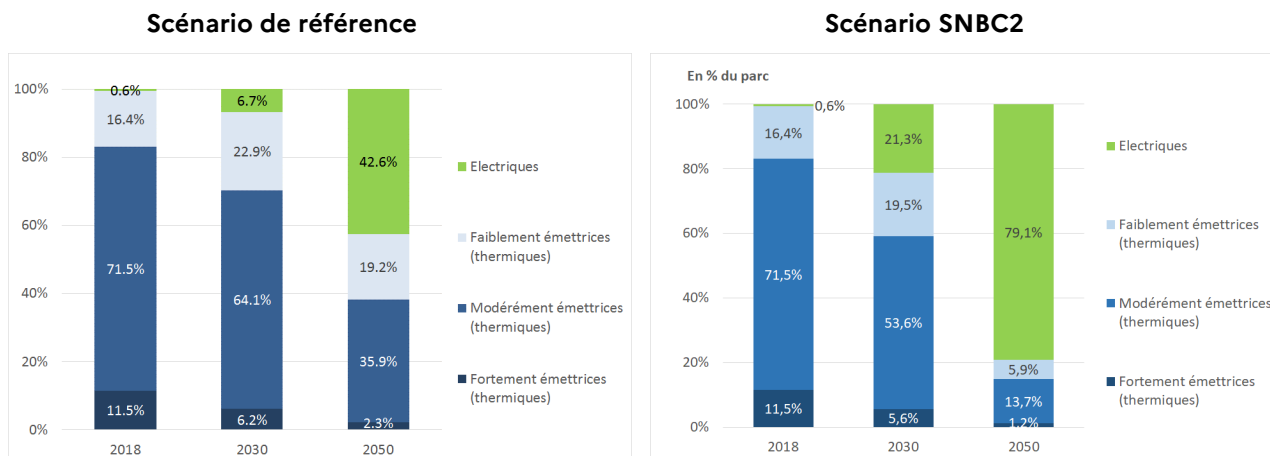
En milliers et %

Scénario de référence				Scénario SNBC2			
	2018	2030	2050		2018	2030	2050
FLUX (en milliers)	2 664	3 042	3 691	FLUX (en milliers)	2 685	3 033	2 866
Électriques	2.2%	16.6%	67.0%	Électriques	2,3%	59,0%	98,3%
Thermiques	97.8%	83.4%	33.0%	Thermiques	97,7%	41,0%	1,7%
Faiblement émettrices	24.4%	26.3%	13.4%	Faiblement émettrices	24,4%	14,0%	0,7%
Modérément émettrices	68.8%	54.2%	18.7%	Modérément émettrices	68,8%	25,8%	0,9%
Fortement émettrices	4.5%	2.9%	0.9%	Fortement émettrices	4,5%	1,3%	0,0%

Note : les automobiles « faiblement émettrices » sont celles appartenant aux classes d'émissions A et B (inférieure à 120 g/km), celles « modérément émettrices » regroupent les classes C, D et E (121 à 200 g/km) et les voitures « fortement émettrices » désignent les classes F et G (plus de 201 g/km).

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

Figure 9 : parc automobile



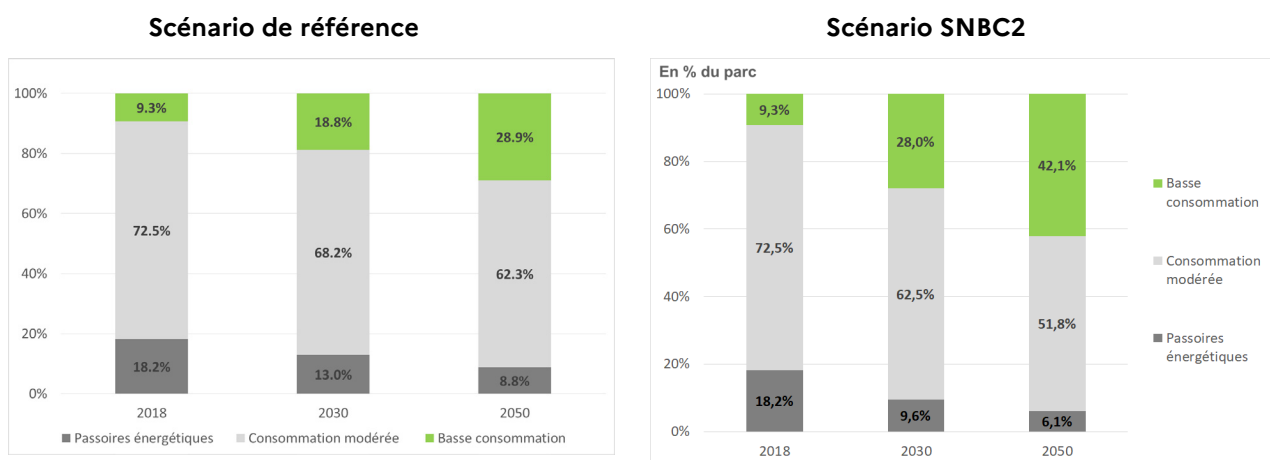
Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

4.2. Le parc de logements

Avec le scénario SNBC2, les investissements en rénovation amélioreraient la performance énergétique : les logements performants de catégorie A et B représenteraient 34 % du parc en 2050, contre 29 % dans le scénario de référence (figure 10), et surtout les passoires thermiques (catégories F et G) ne seraient plus que très marginales (5 % contre 9 % dans le scénario de référence).

Figure 10 : parc de logements selon la performance énergétique

En %



Note : les logements nommés « basse consommation » sont ceux appartenant aux classes énergétiques A et B (inférieur à 90 kWh/m².an), ceux labélisés « consommation modérée » regroupent les classes C et D et E (91 à 330 kWh/m².an) et les « passoires énergétiques » désignent les classes F et G (plus de 331 kWh/m².an). Il s'agit ici de kWh en énergie finale.

Sources : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

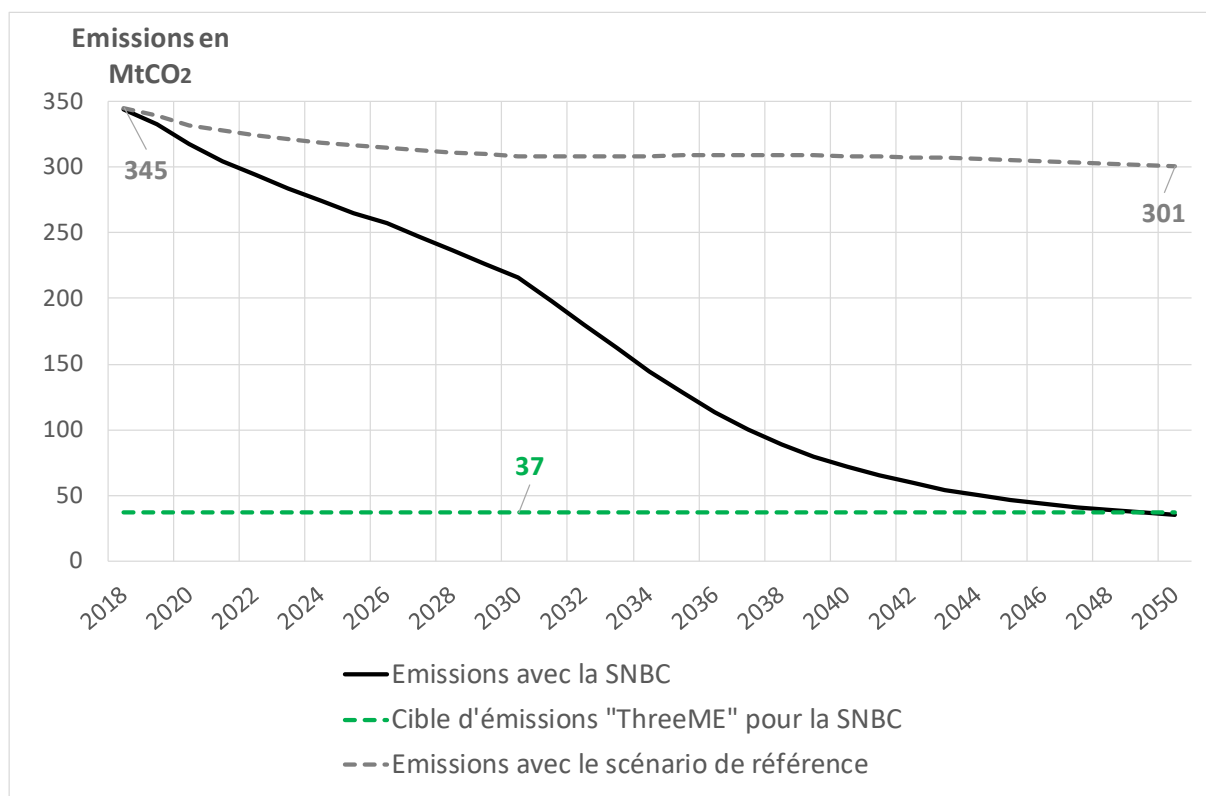
5. LES ÉMISSIONS DE CO₂

En cohérence avec les objectifs fixés par la DGEC, la simulation réalisée avec le modèle ThreeME nous fournit une projection de parc automobile et de logement à horizon 2050. Les résultats en termes d'émissions de CO₂ sont eux aussi contraints par construction mais sont tout de même obtenus avec un certain degré de liberté dans le modèle.

5.1. Les émissions globales de CO₂

Les trajectoires de consommations d'énergie associées à la stratégie SNBC2, en lien avec l'ensemble des mesures et hypothèses, permettraient bien à la France d'atteindre un niveau d'émissions annuelles de CO₂ de 38 MtCO₂ (figure 11), soit un niveau équivalent à la cible de la neutralité carbone (37 MtCO₂). Cela correspond à une baisse des émissions de 322 MtCO₂ par rapport à 2015 (- 89 %). Pour rappel, cette cible ne concerne que les seules émissions de CO₂, les émissions de GES autres que le CO₂, comme le méthane et le protoxyde d'azote, générées par l'agriculture, la combustion des déchets et les procédés industriels ne sont pas dans le champ des émissions couvertes par le modèle ThreeME et font l'objet d'une cible d'émissions à part.

Figure 11 : émissions de CO₂ liées aux mesures SNBC2



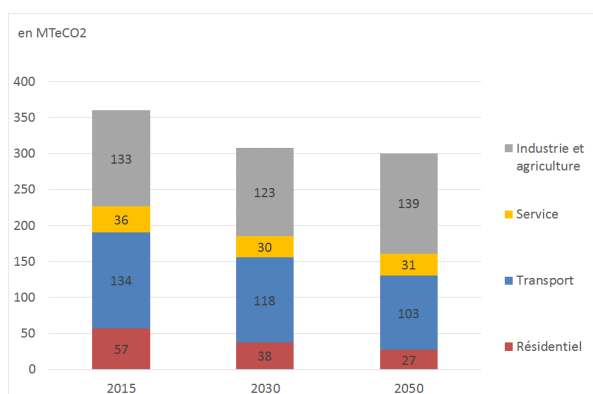
Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

5.2. Les émissions par secteur et énergie

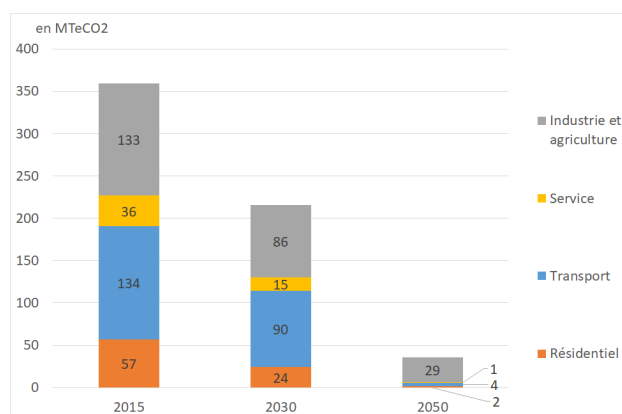
Le transport à lui seul expliquerait 41 % de cette baisse d'émissions de CO₂, avec une contraction de 129 MtCO₂ (- 96 %, figures 12 et 13), dont 74 MtCO₂ pour les véhicules particuliers grâce à l'électrification progressive du parc et à la baisse de la consommation d'énergie permise par l'amélioration continue de l'efficacité énergétique. Les émissions des transports collectifs et du fret ferroviaire baisseraient quant à elles de 54 MtCO₂, pour les mêmes raisons. Après cela, le transport n'émettrait plus que 5 MtCO₂ en 2050, soit 13 % du total de 38 MtCO₂, émis par les combustibles fossiles du parc de véhicules encore thermiques. Ensuite, le secteur qui diminuerait le plus ses émissions en absolu serait l'industrie avec une réduction de 96 MtCO₂. Néanmoins, l'industrie deviendrait alors le secteur le plus émetteur de CO₂ avec un niveau d'émissions qui atteindrait 30 MtCO₂, soit 79 % du total en raison principalement des émissions incompressibles liées aux procédés industriels de décarbonation (ciment, céramique, verre, etc.) à hauteur de 23 MtCO₂. L'isolation des bâtiments et la décarbonation des vecteurs énergétiques dans le résidentiel et les services permettraient une baisse d'émissions respectivement de 55 MtCO₂ et 35 MtCO₂ pour atteindre un niveau très marginal (respectivement 2 MtCO₂ et 1 MtCO₂) lié à la combustion de gaz naturel. Enfin, l'agriculture baisserait ses émissions de CO₂ de 7 MtCO₂ pour atteindre 1 MtCO₂.

Figure 12 : émissions de CO₂ par secteur

Scénario de référence



Scénario SNBC2 :



Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

Figure 13 : émissions de CO₂ par secteur et combustible

Scénario SNBC2

Emissions en MtCO2						
2015						
	coal	oil	elec	gas	decarb	Total
Transport	0	133	0	0,1	0	134
Personal vehicles	0	77	0	0	0	77
Public and freight transport	0	57	0	0,1	0	57
Residential	1	21	6	29	0	57
Service	0	12	6	18	0	36
Industry and agriculture	21	65	5	30	12	133
Industry	21	58	5	29	12	126
Agriculture	0	6	0	1	0	7
Total Final MTEC	22	230	18	77	12	360
2030						
	coal	oil	elec	gas	decarb	Total
Transport	0	88	1	1,6	0	90
Personal vehicles	0	46	0	0	0	46
Public and freight transport	0	42	0	1,6	0	44
Residential	0	5	3	16	0	24
Service	0	3	3	10	0	15
Industry and agriculture	8	37	2	20	18	86
Industry	8	30	2	20	18	78
Agriculture	0	7	0	1	0	8
Total Final MTEC	9	134	9	48	18	216
2050						
	coal	oil	elec	gas	decarb	Total
Transport	0	3	0	0,3	0	4
Personal vehicles	0	1	0	0	0	2
Public and freight transport	0	2	0	0,3	0	3
Residential	0	0	0	1	0	2
Service	0	0	0	0	0	1
Industry and agriculture	2	2	0	1	23	29
Industry	2	2	0	1	23	28
Agriculture	0	1	0	0	0	1
Total Final MTEC	3	6	1	2	23	36

Scénario de référence

2015	coal	oil	elec	gas biogas biomass	decarb	Total
Transport	0	133	0	0	0	134
Personal vehicles	0	77	0	0	0	77
Public and freight transp	0	57	0	0	0	57
Residential	1	21	6	29	0	57
Service	0	12	6	18	0	36
Industry and agriculture	21	65	5	30	12	133
Industry	21	58	5	29	12	126
Agriculture	0	6	0	1	0	7
Total Final MTEC	22	230	18	77	12	360

2030	coal	oil	elec	gas	decarb	Total
Transport	0	117	1	0.4	0	118
Personal vehicles	0	67	0	0.0	0	67
Public and freight transp	0	50	1	0.4	0	51
Residential	0	14	5	18	0	38
Service	0	12	6	13	0	30
Industry and agriculture	17	61	5	23	16	123
Industry	17	55	5	23	16	116
Agriculture	0	6	0	1	0	7
Total Final MTEC	17	204	17	54	16	308

2050	coal	oil	elec	gas	decarb	Total
Transport	0	101	1	0.4	0	103
Personal vehicles	0	44	1	0	0	45
Public and freight transp	0	57	1	0	0	58
Residential	0	10	4	12	0	27
Service	0	13	6	12	0	31
Industry and agriculture	21	66	6	25	22	139
Industry	21	58	5	25	22	131
Agriculture	0	7	0	1	0	8
Total Final MTEC	21	189	18	50.2	22	300

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

PARTIE III – L'impact macroéconomique et sectoriel

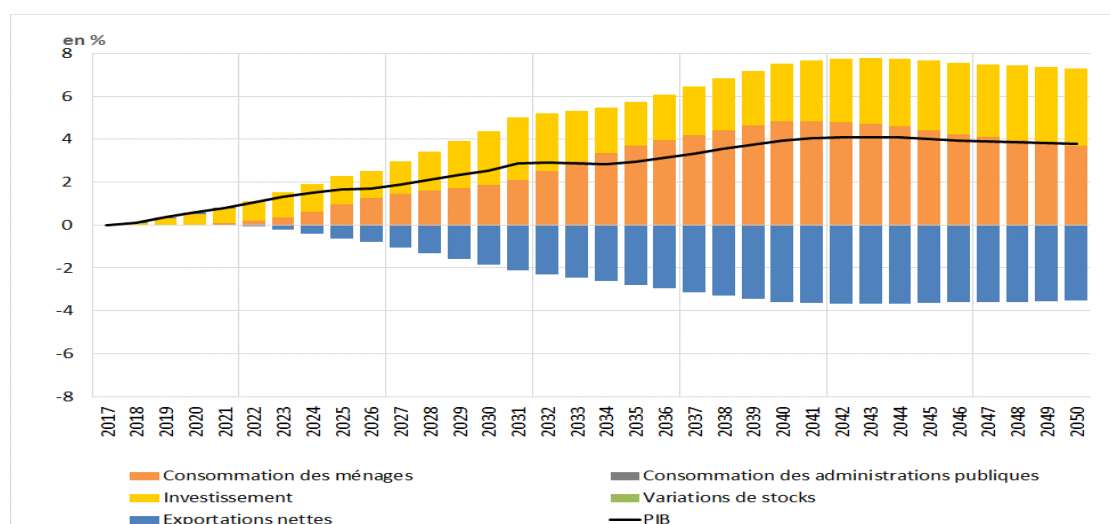
La simulation de la SNBC2 avec le modèle ThreeME a permis d'évaluer son impact macroéconomique en termes de croissance, d'emploi et de commerce extérieur, mais aussi de souligner les interactions sectorielles. Enfin les effets sur les finances publiques ont été mis en avant. D'après ThreeME, le scénario SNBC2 aurait un effet graduel positif sur le PIB de 2,5 % en 2030, puis 3,8 % en 2050 par rapport au scénario de référence sans mesure, ce qui se traduirait par une création de 878 000 emplois à l'horizon 2050. La SNBC2 aurait aussi des effets positifs sur le pouvoir d'achat des ménages et les finances publiques.

1. LES EFFETS MACROÉCONOMIQUES

1.1. Des gains de croissance et emplois.

Selon les estimations établies avec le modèle ThreeME, les mesures prises dans le scénario SNBC2 auraient un effet graduel positif sur le PIB de + 3,8 % en 2050 par rapport au scénario de référence (après + 2,5 % en 2030, *figures 1 et 2*). Cela correspondrait à un gain de + 0,1 % par an en moyenne. L'effet sur le PIB serait tiré par la croissance de la demande intérieure (+ 4,4 pts puis + 7,3 pts de contribution à l'écart de PIB en 2030 et 2050), tandis que la contribution du commerce extérieur serait négative (- 1,8 pt puis - 3,5 pts de PIB en 2030 et 2050). Le premier moteur de cette croissance « intérieure » serait l'investissement (+ 2,5 pt de contribution à l'écart de PIB en 2030, puis + 3,6 pts en 2050) avec un effet d'entraînement sur la consommation (+ 1,9 pt de contribution à l'écart de PIB en 2030, puis + 3,7 pts en 2050). Parallèlement, les échanges extérieurs atténueraient les gains de PIB en raison d'une fuite par les importations et une dégradation de la compétitivité externe.

Figure 1 : effets de la SNBC2 sur le PIB et ses contributions



Note de lecture : le graphe se lit en écart entre les deux scénarios : en 2050, le PIB, dans le scénario SNBC2, est supérieur de 3,8 % au PIB dans le scénario de référence. Il ne s'agit donc pas de l'écart des taux de croissance annuels, mais de leur cumul sur toute la période.

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

Figure 2 : chocs macroéconomiques résultant des mesures SNBC2

Choc macro	Ecart relatif SNBC / référence en %	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040	2045	2050
PIB et VA (volume)	PIB	0,1	0,4	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5	1,7	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,9	3,9	4,0	3,8
Ecart relatif SNBC / Référence en %	VA du secteur marchand	0,1	0,5	0,9	1,1	1,4	1,8	2,0	2,1	2,2	2,4	2,6	2,9	3,1	4,0	5,3	5,6	5,4
Composantes :	Consommation des ménages	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,9	1,3	1,5	1,6	1,7	1,9	3,7	4,8	4,4	3,7
Contribution à l'écart de PIB (volume)	dont consommation automobile	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,3	0,4	-0,2
	Consommation des administrations publiques	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Investissement	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2	1,3	1,4	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5	2,0	2,7	3,2	3,6
	dont entreprises	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9	0,8	1,0	1,1	1,2	1,2	1,9	2,5	2,9	3,3
	ménages	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,6	0,9	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
	investissement public	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3
	Variations de stocks	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Exportations nettes	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1,1	-1,3	-1,6	-1,8	-2,8	-3,6	-3,6	-3,5
Variations des composantes	Consommation des ménages	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,6	1,1	1,7	2,2	2,6	2,8	3,0	3,3	6,5	8,4	7,6	6,3
Ecart relatif SNBC / Référence en % (volume)	dont consommation automobile	0,5	-0,9	-1,4	-1,0	0,6	3,5	8,1	14,3	20,4	26,1	31,6	36,9	42,4	41,6	33,9	10,1	-6,4
	Consommation des administrations publiques	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Investissement	0,4	1,6	2,4	3,3	4,5	5,8	6,3	6,7	6,1	7,4	9,1	10,9	12,5	10,3	13,8	16,8	18,9
	dont entreprises	0,7	1,9	2,8	3,9	4,9	6,2	6,9	7,6	6,8	8,5	9,1	9,6	10,2	15,2	19,8	23,5	26,1
	ménages	0,0	1,3	2,0	2,8	4,8	6,6	7,0	6,8	6,3	7,0	12,2	18,1	23,3	-0,4	-0,1	0,7	0,9
	investissement public	0,3	0,7	1,2	1,6	1,9	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,1	6,0	7,7	9,0	9,9
	Exportations	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,7	-0,9	-1,2	-1,5	-1,8	-3,6	-4,7	-5,3	-5,6
	Importations	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,2	0,6	1,1	1,6	1,9	2,5	3,0	3,5	4,1	5,5	7,0	6,6	6,0
Ménages	Revenu disponible réel des ménages en %	0,0	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	1,3	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,9	4,3	5,7	5,9	5,3
	Revenu disponible réel des ménages en MdsK2015	0	1	3	7	11	16	21	26	30	33	37	43	49	77	109	119	116
Ecart relatif SNBC / Référence en %	Revenu disponible réel par tête	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	1,8	2,6	2,5	2,2
	Taux d'épargne	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,5	-0,7	-0,9	-1,2	-1,5	-1,7	-2,0	-2,6	-1,9	-1,4
Prix	Prix à la consommation des ménages	0,0	0,2	0,4	0,7	1,1	1,6	2,1	2,7	3,3	4,0	4,8	5,5	6,3	9,7	12,3	14,1	14,8
Ecart relatif AMS/AME en %	Prix à la production marchande	0,0	0,1	0,3	0,6	1,0	1,5	2,1	2,7	3,4	4,1	4,9	5,8	6,6	10,7	13,7	15,8	16,5
	Prix des exportations	0,0	0,1	0,3	0,6	1,0	1,5	2,1	2,7	3,4	4,2	4,9	5,7	6,6	10,8	14,2	16,5	17,4
	Prix des importations	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,0	3,9	4,9	5,6	5,9
Travail	Salaire net réel (hors cotisations employeurs et employés, unitaire)	0,0	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,1	0,2	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	3,5	4,3	5,2	5,2
Ecart relatif SNBC / Référence en %	Coût réel du travail (yc. Cotisations employeurs et employés, unitaire)	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,3	1,4	1,8	1,7
	Emploi en %	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,1	2,5	3,1	3,3	3,1
	Emploi en millier	7	35	75	121	176	238	294	341	366	398	440	490	541	650	837	925	878
	Taux de chômage (en point)	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,8	-2,2	-2,4	-2,2
Solides en % de PIB (en valeur)	Balance commerciale (M-X)	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,5	-0,5	-0,2	0,1
	Facture énergétique (M-X)	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,6	-1,9	-2,1	-2,1
	Solde public primaire	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,9	2,1	1,9
	Solde public	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,8	2,7	3,5	3,8
	Dette publique	-0,1	-0,5	-1,0	-1,5	-2,3	-3,2	-4,2	-5,4	-6,5	-7,8	-9,2	-10,8	-12,4	-21,1	-31,1	-42,2	-52,5

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

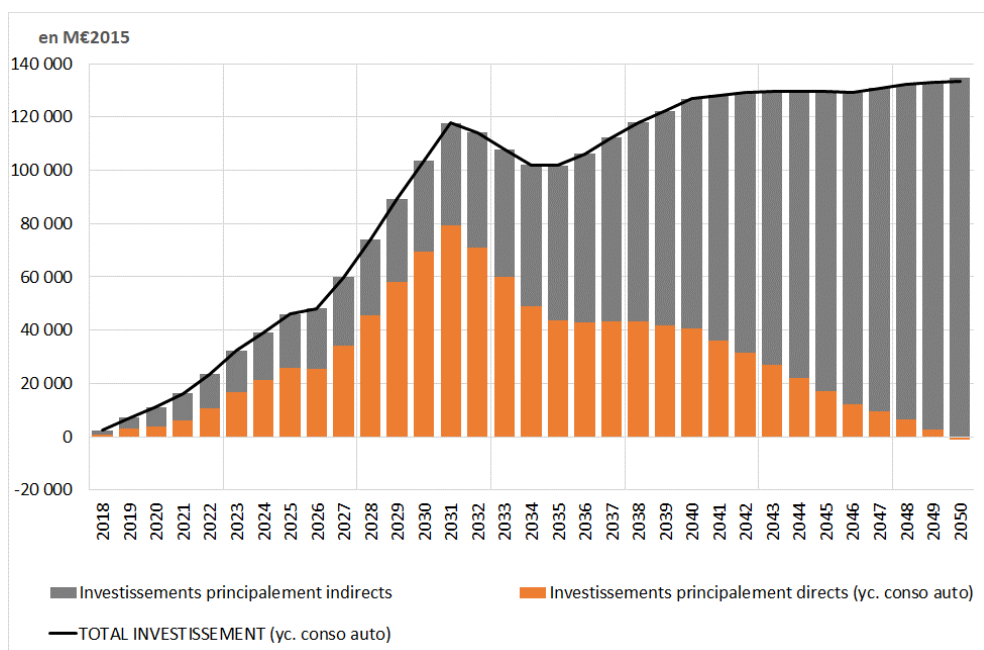
1.2. Un choc d'investissement

La hausse des investissements dans le scénario SNBC2 s'élèverait à 3,6 pts de PIB à l'horizon 2050. Ce supplément d'investissement correspond à un effort de 0,1 pt de PIB par an en moyenne, dont un tiers serait des investissements directement liés à la transition énergétique et les deux autres tiers seraient induits par les effets d'entraînement macroéconomique (*figures 3 et 4*).

À court terme, les investissements directs, en générant de la production et de l'emploi, accroissent le revenu des ménages, ce qui stimule la consommation et donc le PIB. À plus long terme, la consommation et la croissance sont soutenues par les gains de revenus dus aux économies d'énergies. Cet effet multiplicateur entraînerait ensuite des investissements indirects pour répondre à la demande. Les effets sur le revenu des ménages seront précisés ultérieurement dans le paragraphe suivant.

Au final, l'augmentation de PIB est donc générée par l'effet multiplicateur keynésien des investissements de la transition énergétique, dont le cumul sur la période s'élèverait à 1 000 Mds€₂₀₁₅, soit un tiers du total cumulé des investissements additionnels (2 986 Mds€₂₀₁₅).

Figure 3 : investissements directs et indirects résultant des mesures SNBC2



Note : les investissements directs dans la transition énergétique correspondent aux investissements principalement directs des secteurs du bâtiment, de l'énergie, aux investissements logements des ménages et à leurs achats de véhicules particuliers.

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

Figure 4 : écart d'investissement entre la SNBC2 et le scénario de référence

Investissements: écarts SNBC-Référence en M€ann	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040	2045	2050	Inv additionnel moyen	Inv additionnel cumulé
Agriculture et IAA	-1	13	34	9	-82	-227	-425	-674	-721	-761	-797	-830	-859	930	3 488	6 031	8 425	2 115	69 795
Construction automobile	1 348	2 048	2 719	3 297	3 804	4 203	4 463	4 549	5 179	5 643	5 964	6 147	6 200	4 010	1 738	151	-795	2 870	94 719
Industrie hors auto	9	59	153	462	843	1 283	1 737	2 195	2 632	3 168	3 752	4 385	5 070	10 067	17 047	25 157	33 805	12 025	396 833
BTP	8	57	113	162	241	335	401	444	486	576	770	1 026	1 298	1 147	1 387	1 724	1 970	1 105	36 477
Résidentiel (ménages)	42	1 697	2 746	3 829	6 575	9 052	9 514	9 112	8 359	9 205	16 005	23 885	30 662	-1 692	-1 333	-930	-1 293	5 632	185 869
dont construction neuve	3	283	355	468	703	861	808	688	536	568	1 222	1 790	2 123	-2 038	-1 941	-1 738	-1 615	-524	-17 289
renovation énergétique	27	1 316	2 183	3 013	5 369	7 526	7 893	7 494	6 809	7 574	13 636	20 853	27 201	-804	-969	-471	-319	5 086	167 831
renovation non énergétiques	12	98	208	343	503	665	812	931	1 014	1 063	1 148	1 242	1 339	1 330	1 578	1 279	641	1 071	35 327
Transport	0	18	48	19	14	34	66	104	137	179	225	276	333	676	1 692	2 996	4 811	1 291	42 603
dont Aérien	0	3	9	1	-2	-1	3	7	12	17	25	34	44	100	225	338	398	144	4 753
Train	2	6	12	16	22	30	40	51	62	74	87	102	117	184	334	528	767	251	8 297
Bus	1	4	8	7	7	7	8	8	7	8	9	12	17	124	304	481	668	201	6 625
Fret	-3	5	20	-5	-13	-3	15	39	56	80	104	128	155	268	829	1 650	2 978	695	22 928
Total Energie	-767	15	-691	-370	34	1 412	1 681	1 946	-3 237	-476	-1 234	-2 065	-2 348	792	723	1 174	1 818	617	20 359
Charbon	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-1	-1	-1	-1	-1	-18
Carburants	-10	-46	-83	-106	-120	-129	-135	-140	-145	-153	-160	-166	-171	-154	-27	191	382	-24	-780
dont carburants fossiles	-7	-23	-42	-59	-73	-84	-94	-102	-113	-127	-140	-152	-165	-166	-330	-362	-375	-226	-7 461
biocarburants	-2	-23	-41	-47	-47	-45	-42	-37	-32	-26	-20	-13	-7	112	303	553	757	202	6 681
Gaz	-5	67	155	230	298	356	416	486	594	700	798	891	992	1 959	3 208	3 497	3 411	1 875	61 864
dont gaz naturel	-4	29	71	86	86	73	53	35	32	23	7	-14	-36	-291	-478	-563	-568	-246	-8 103
biogaz	-0	2	9	16	22	28	35	44	54	65	78	92	108	275	571	819	1 029	368	12 153
chaleur (bois, biomasse)	-1	35	75	128	190	256	327	408	508	611	713	813	920	1 974	3 115	3 241	2 952	1 752	57 814
Electricité	-753	-6	-763	-493	-144	1 185	1 401	1 599	-3 685	-1 023	-1 872	-2 790	-3 169	-1 012	-2 457	-2 513	-1 976	-1 234	-40 708
dont nucléaire	-504	-326	-582	-993	-860	-142	-122	-113	-3 921	-2 485	-3 047	-3 630	-3 901	-1 892	-860	-551	0	-790	-26 066
thermique à flammes	-12	-22	-23	-58	-45	-8	-5	-6	-65	14	-9	-34	-44	-189	-152	-76	-16	-83	-2 730
éolienne	-102	623	126	410	515	801	917	1 034	506	1 088	979	845	815	-78	-564	-788	-876	24	807
solaire	-62	280	40	462	553	758	856	958	125	482	404	311	282	287	-58	-309	-398	170	5 609
hydroélectrique	-50	-483	-257	-13	8	77	79	78	-82	61	20	-23	-38	-1	-70	-84	-61	-36	-1 188
cogénération	-22	-78	-66	-301	-315	-301	-323	-351	-248	-183	-219	-258	-283	-737	-754	-705	-624	-519	-17 133
Services marchands	1 286	3 454	6 077	8 344	10 356	12 247	13 999	15 634	17 589	19 590	21 541	23 484	25 465	40 210	56 363	69 666	79 424	39 415	1 300 708
Services publics	183	471	811	1 095	1 339	1 560	1 765	1 961	2 233	2 516	2 803	3 095	3 394	5 473	7 791	10 102	12 308	5 562	183 554
TOTAL INVESTISSEMENT	2 108	7 832	12 009	16 846	23 123	29 899	33 200	35 272	32 656	39 641	49 029	59 402	69 215	61 612	88 895	116 070	140 473	70 634	2 330 916
Consommation automobile (ménages)	299	-612	-946	-661	418	2 514	5 877	10 745	15 459	20 200	25 080	29 903	34 524	40 152	38 006	13 370	-6 978	19 858	655 308

Investissements (yc. conso auto): Ecart SNBC-Référence en M€2015	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040	2045	2050	Inv additionnel moyen	Inv additionnel cumulé
Investissements principalement directs (yc. conso auto)	948	3 125	3 780	5 933	10 582	16 885	21 190	25 969	25 369	34 264	45 663	57 930	69 330	43 754	40 634	17 205	-1 108	30 304	1 000 039
Investissements principalement indirects	1 459	4 095	7 283	10 253	12 599	15 527	17 888	20 048	22 747	25 577	28 447	31 875	34 410	58 009	86 267	112 234	134 604	60 187	1 986 185
TOTAL INVESTISSEMENT (yc. conso auto)	2 407	7 220	11 063	16 186	23 541	32 413	39 077	46 017	48 116	59 840	74 110	89 305	103 739	101 764	126 902	129 440	133 495	90 492	2 986 224

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

1.3. Une baisse des dépenses énergétiques à long terme

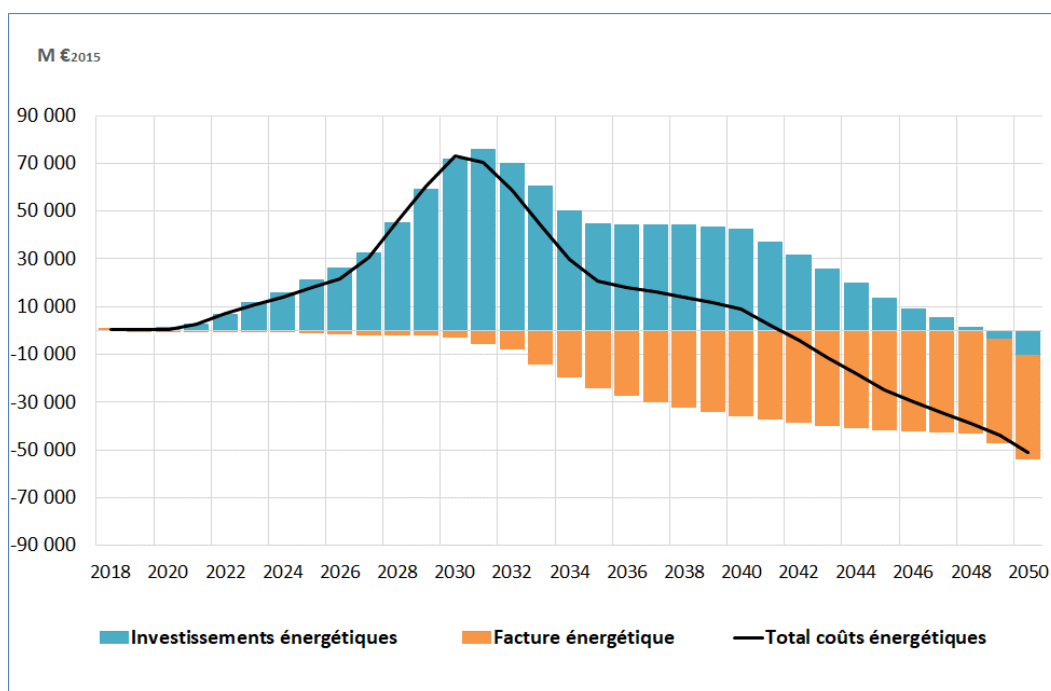
Entre la SNBC2 et le scénario de référence, il apparaît à moyen terme une économie sur la facture énergétique (véhicule et logement, *figure 5*). Ceci s'explique par plusieurs facteurs.

D'abord, en améliorant l'efficacité énergétique de leurs logements et véhicules, les investissements de transition énergétique permettent aux ménages de diminuer leur

consommation d'énergie. Ensuite, l'incorporation de biocombustibles, dont le prix est supposé devenir graduellement compétitif par rapport à leur équivalent fossile, permet aux ménages de réaliser des économies de facture. Enfin, troisième facteur, les mesures comportementales de mobilité douce, comme le covoiturage, le télétravail ou le partage de voirie permettent de réduire le besoin de transport en véhicules, la consommation d'énergie et donc la facture énergétique.

Il est intéressant de suivre l'évolution du total des coûts énergétiques, défini comme la somme de la facture énergétique et des investissements de transition énergétique. Dans un premier temps ces coûts bondissent jusqu'au tournant 2030-2032 en raison principalement du dynamisme des besoins d'investissements. Passé cette date, les besoins d'investissements additionnels commencent à se réduire graduellement. Les ménages, qui ont massivement rénové leurs logements et investi dans les véhicules électriques ont de moins en moins besoin de le faire. Par ailleurs, ces investissements commencent à porter leurs fruits et à permettre une réduction progressive de la consommation d'énergie. La facture énergétique se réduit d'autant plus que le prix des énergies renouvelables, EnR comme biocombustibles, qui tendent à remplacer progressivement les énergies carbonées baisse avec le temps. *In fine*, les investissements de transition écologique commenceraient à être rentabilisés à partir du milieu des années 2040, permettant une réduction des coûts énergétiques pour les ménages par rapport au scénario de référence. Cela favoriserait le pouvoir d'achat hors énergie, permettant aux ménages d'accroître leur consommation, avec un effet d'entraînement sur la croissance économique.

Figure 5 : écarts de coûts énergétiques des ménages entre la SNBC2 et le scénario de référence



Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

Il faut noter que le total des coûts énergétiques ne rend pas compte des effets concrets en matière de trésorerie courante. En réalité, l'argent déboursé par les ménages pour leurs dépenses de transport et logement est moins important à court terme, car ils ne paient pas tous leurs investissements au comptant et peuvent avoir recours à l'emprunt. Leurs dépenses énergétiques réelles peuvent donc être lissées, avec un profil moins heurté que ce que suggèrent les coûts énergétiques, même si l'on prend en compte la charge d'intérêt. Grâce à l'emprunt et à la progressivité de son remboursement, l'effort d'investissement est réalisé de manière plus douce sur la période. Par conséquent, les ménages ne seraient pas nécessairement perdants dans la période d'investissements

intenses et peuvent parvenir à maintenir la baisse des dépenses énergétiques sur toute la période.

1.4. La balance commerciale serait affectée en volume, mais pas en valeur

Le regain de l'inflation et l'accélération des prix à l'export pénaliserait la compétitivité-prix des entreprises et freinerait l'accroissement du PIB. Conformément à la loi de l'offre et de la demande sur les marchés du travail et des biens et services, le regain d'activité économique s'accompagnerait de nettes pressions inflationnistes. Les prix à la consommation seraient ainsi supérieurs de 14,8 % par rapport à leur niveau dans le scénario de référence en 2050. En effet, l'augmentation de la demande domestique les incite à accroître davantage leurs marges en renchérissant leurs prix.

Parallèlement, la compétitivité-coût des entreprises serait grevée par deux facteurs. D'une part, les investissements induits par la SNBC2 renchérissent les coûts de production des entreprises. D'autre part, la réduction du chômage exerce une pression à la hausse sur les salaires réels qui est répercutée sur les prix de vente.

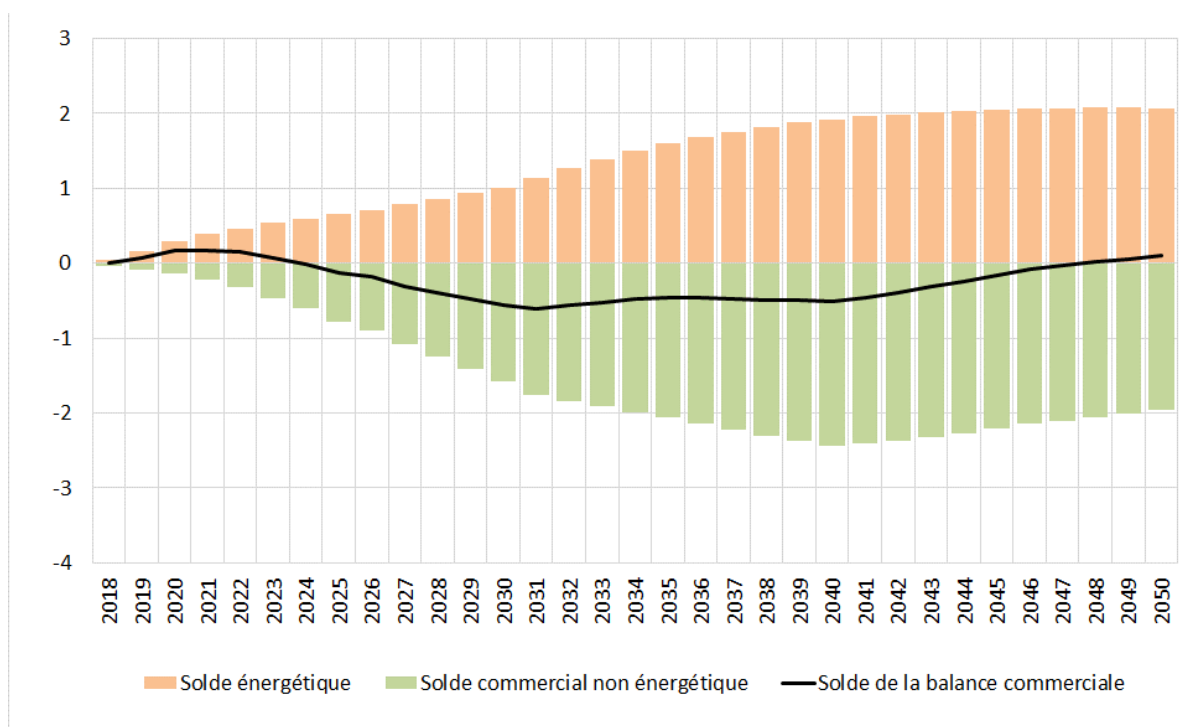
Au final, le prix des exportations augmenterait de + 17,4 % en 2050 par rapport au scénario de référence, et entraînerait des pertes de parts de marchés qui feraient chuter les exportations de - 5,6 %. En parallèle, l'augmentation de la consommation s'accompagnerait d'une fuite par les importations. Au bout du compte, le commerce extérieur contribuerait négativement à l'écart de PIB à hauteur de - 3,5 pts, mais cet effet récessif demeurerait à moitié inférieur à l'effet expansif de la demande intérieure.

La dégradation de la compétitivité externe de l'économie française est limitée dans cet exercice, car l'environnement international est supposé coopératif, c'est-à-dire que le reste du monde s'engage aussi dans la lutte contre le réchauffement climatique. Ainsi, 80 % de la hausse des prix domestiques, estimée à 6,8 % dans le cadre où la France agirait seule, a été répercutée sur les prix étrangers (soit + 5,4 %).

Le commerce extérieur pèserait sur le PIB en volume, mais l'incidence nette resterait positive sur l'économie, sans générer de déséquilibre extérieur. En effet, l'impact sur la balance commerciale en valeur serait compensé par un effet « termes de l'échange ». Le prix des combustibles augmentant, selon les projections de l'AIE, plus vite que les prix domestiques sur la période, la diminution des importations de pétrole et de gaz en valeur compense la baisse des exportations françaises. La réduction de la facture énergétique extérieure de - 2,1 pts de PIB nominal serait même légèrement supérieure à la baisse du solde non énergétique (- 2,0 pts, *figure 6*) dans cette simulation. *In fine*, le solde de la balance commerciale en valeur serait légèrement amélioré de 0,1 pt de PIB par rapport au scénario de référence.

Figure 6 : impact de la SNBC2 sur la balance commerciale en valeur

En % de PIB en valeur



Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

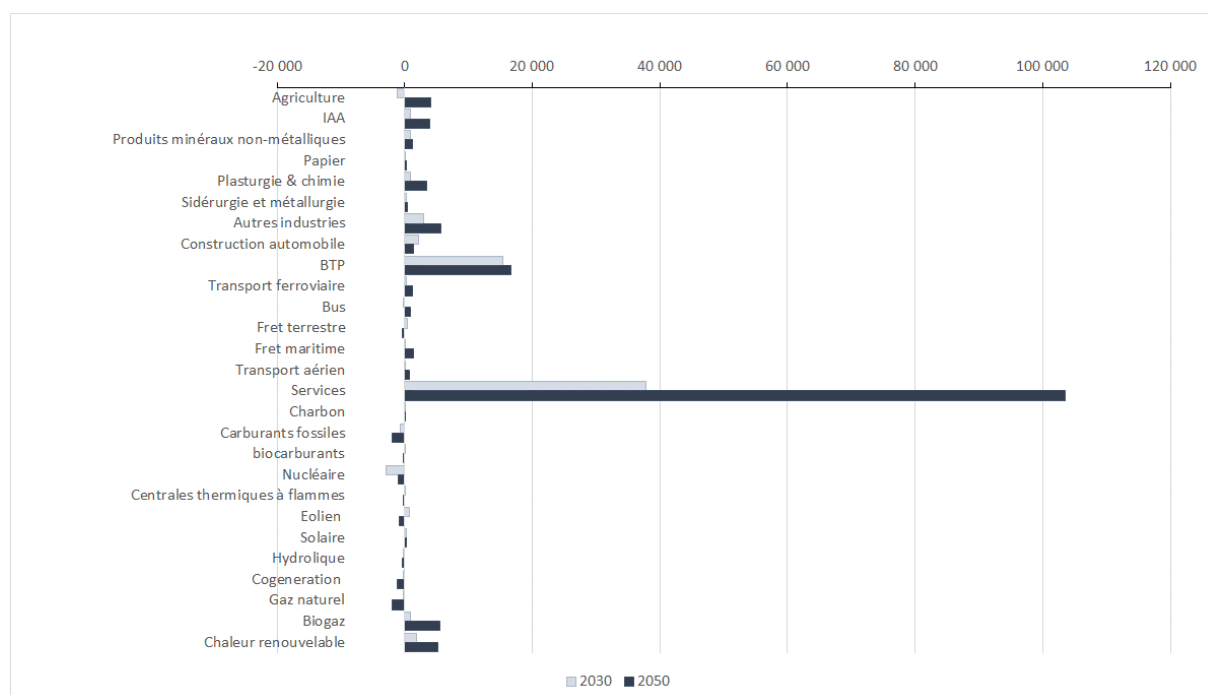
2. LES EFFETS SECTORIELS

2.1. Une augmentation de la valeur ajoutée dans les secteurs

L'effet expansionniste généré par le scénario de la SNBC2 permettrait un gain de PIB de 3,8 % et stimulerait graduellement l'ensemble de l'économie. La valeur ajoutée de tous les secteurs de l'économie augmenterait par rapport au scénario de référence, à l'exception de quelques secteurs spécifiques comme la production d'électricité thermique ou nucléaire ou de combustibles fossiles (*figure 7*). L'essentiel des gains de valeur ajoutée seraient concentrés (65 %) dans le tertiaire en 2050 en raison de son poids dans l'économie (79 % en 2018), et dans une moindre mesure dans l'industrie 11 %, à hauteur de son poids dans l'économie.

On remarque le dynamisme relatif des secteurs de la construction et de certaines énergies renouvelables qui représenteraient respectivement 12 % et 2 % de gains de valeur ajoutée, soit une contribution double de leur poids dans le total de la valeur ajoutée en 2018. Dans le secteur de la construction, les investissements d'efficacité énergétique auraient un effet stimulant sur la production. De même, les pertes de valeur ajoutée dans les combustibles fossiles seraient plus que compensées par les gains dans les filières de chaleur renouvelable (biogaz, biomasse) biocarburant et de biogaz. Le secteur automobile connaît également un certain dynamisme lié au basculement vers la voiture électrique dont le coût de production est plus important que celui de la voiture thermique. Dans le cadre de ces travaux, l'hypothèse a été faite que la part des voitures électriques importées demeure la même que celle des véhicules thermiques. Si les batteries électriques, responsables du surcoût de production, étaient supposées toutes importées, l'impact positif sur le PIB serait amoindri.

Figure 7 : gains nets de VA en volume par secteur entre la SNBC2 et le scénario de référence en 2030 et 2050



Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

2.2. La SNBC2 créerait 38 000 emplois par an en moyenne, principalement indirects

L'accroissement de la production permettrait de créer 878 000 emplois à l'horizon 2050, par rapport au scénario de référence, soit un supplément de 38 000 emplois par an en moyenne. Cette hausse de l'emploi correspond à une baisse de 2,2 points du taux de chômage en 2050 par rapport au scénario de référence. La transition énergétique permettrait de créer 223 000 emplois principalement directs (figure 9), tandis que les 655 000 postes restants seraient principalement indirects, générés à l'issue du bouclage macroéconomique. Les secteurs les plus créateurs d'emplois seraient le secteur tertiaire avec 550 000 postes supplémentaires (63 % du total, figure 10), principalement indirects, compte tenu de son poids dans l'économie. L'industrie quant à elle créerait 50 000 emplois (6 % du total), également principalement indirects.

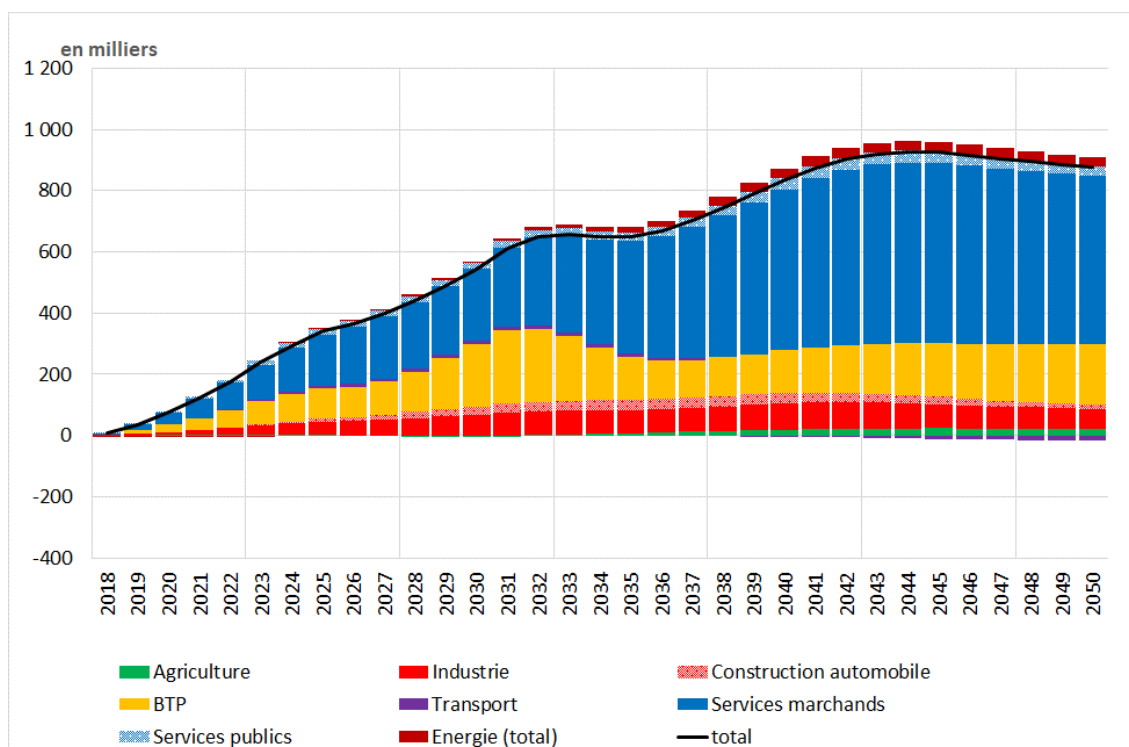
Figure 8 : gains nets d'emplois par secteur entre la SNBC2 et le scénario de référence en 2035 et 2050

Emplois: écart SNBC-Référence en milliers	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040	2045	2050	Emplois par an
Emplois principalement directs	1	11	24	38	59	84	104	118	124	137	166	206	249	202	202	220	223	10
Emplois principalement indirects	5	24	51	83	117	155	190	223	242	261	274	283	293	448	634	705	655	28
Création totale d'emplois	7	35	75	121	176	238	294	341	366	398	440	490	541	650	837	925	878	38

Note : les emplois directs correspondent aux emplois principalement directs des secteurs du bâtiment, de l'énergie, aux investissements logements des ménages et à leurs achats de véhicules particuliers. Les emplois indirects sont ceux induits à l'issue du bouclage macroéconomique.

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

Figure 9 : gains nets d'emplois par secteur entre la SNBC2 et le scénario de référence



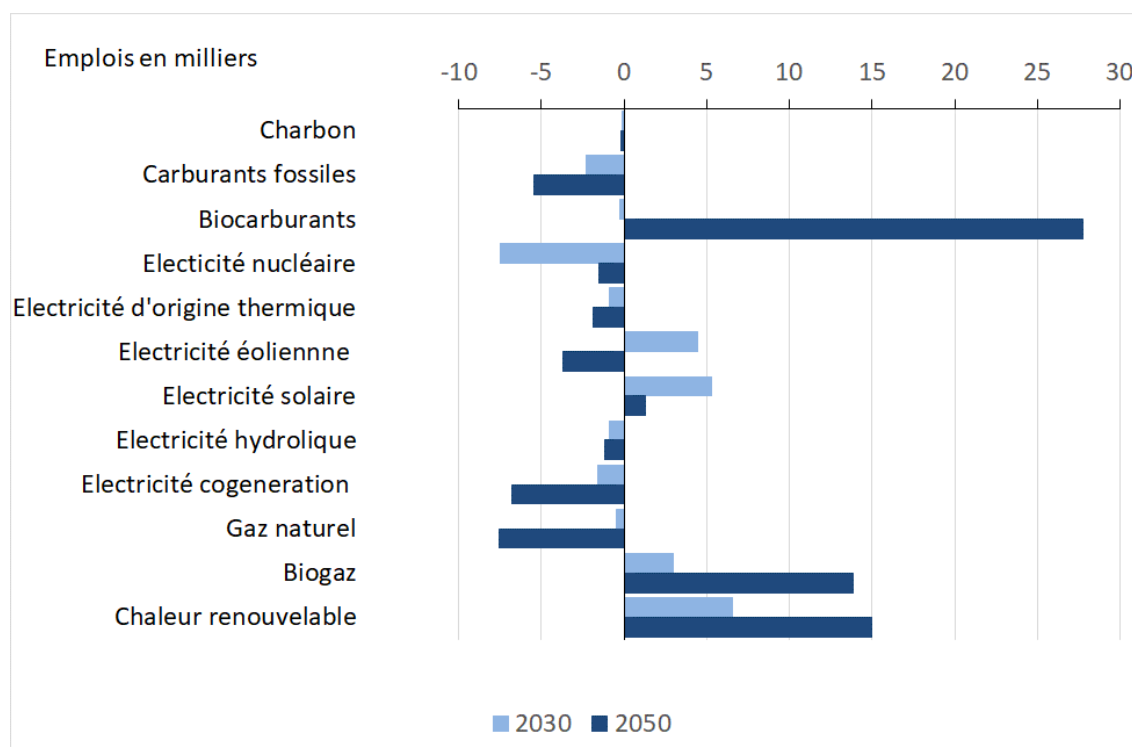
Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

En ce qui concerne les secteurs liés à la transition énergétique, la construction et le secteur automobile génèreraient respectivement 196 000 et 15 000 emplois (22 % et 2 % du total), principalement directs découlant des investissements d'efficacité énergétique. Le nombre d'emplois dans les transports diminuerait (- 17 000). Le dynamisme des chemins de fer (+ 14 000 emplois) ne compenserait pas totalement les diminutions d'emplois dans le transport routier de marchandises (- 36 000 emplois).

Le secteur de l'énergie créerait 30 000 emplois à horizon 2050 par rapport au scénario de référence (3 % du total, *figure 11*) en lien direct avec les hypothèses du scénario SNBC2 retenues, et en particulier des choix de mix énergétique. Ce dynamisme relatif cache un redéploiement significatif des emplois au sein du secteur. Les biocarburants et la chaleur renouvelable concentreraient l'essentiel des emplois créés (respectivement 28 000 et 29 000), et compenseraient largement les pertes d'emplois dans les combustibles fossiles (- 8 000 emplois dans le gaz naturel et - 5 000 dans les carburants fossiles). L'absence de gains d'emplois dans les filières d'énergie renouvelable en écart entre la SNBC2 et le scénario de référence (- 4 000 postes dans l'éolien, + 1 000 dans le solaire, - 1 000 dans l'hydraulique et - 7 000 dans la cogénération électrique) s'explique par les hypothèses particulières de l'exercice SNBC2, selon lesquelles le niveau de consommation d'électricité en 2050 est inférieur dans le scénario SNBC2 à celui de référence, tandis que les parts de production d'électricité renouvelable sont relativement similaires dans les deux scénarios, bien que légèrement supérieure dans la SNBC2 pour le photovoltaïque, en cohérence avec la programmation pluriannuelle de l'énergie. Dans ce contexte, seul le secteur photovoltaïque, dont la montée en charge serait la plus dynamique créerait des emplois.

Au-delà de cet écart de consommation entre les deux scénarios qui peut paraître en défaveur de l'emploi dans les EnR avec la SNBC2, compte tenu du jeu d'hypothèses retenu, il faut rappeler ici que la montée en charge des énergies renouvelables dans le temps dans les deux scénarios se traduirait par des créations nettes d'emplois dans la filière pour chacun des deux scénarios (+ 40 000 postes en 2050 par rapport à 2018 avec la SNBC2, et + 50 000 dans le scénario de référence).

Figure 10 : gains nets d'emplois par secteur producteur d'énergie entre les scénarios SNBC2 et de référence en 2030 et 2050



Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

3. LES EFFETS SUR LES FINANCES PUBLIQUES

Les recettes publiques additionnelles (TVA, impôt sur le revenu - IR, impôt sur les sociétés - IS) dues à la croissance permettraient une réduction progressive du déficit public, jusqu'à - 3,8 pts de PIB en valeur par rapport au scénario de référence en 2050, malgré les dépenses associées aux mesures encourageant la transition énergétique, et sous l'hypothèse forte d'une trajectoire de consommations publiques inchangées qui suppose que lorsque les recettes augmentent, les consommations publiques (hors dépenses pour la transition énergétique) n'augmentent pas mécaniquement. Cela permettrait de réduire le ratio de dette publique de 52,5 points de PIB au même horizon par rapport au contrefactuel.

3.1. La fiscalité énergétique

En conséquence de la décarbonation progressive de l'économie, le produit de la taxe carbone (figée à son niveau de 2018) diminue graduellement jusqu'en 2050, soit une baisse de 8,1 Mds€ par rapport au scénario de référence (*figure 11*). Dans le même temps, le produit des taxes énergétiques « hors composante » carbone (TICPE, TICGE, etc.) augmenterait d'abord de 2,1 Mds€ par rapport au scénario de référence à l'horizon 2030 en raison de son indexation sur l'inflation, ce qui n'est pas le cas dans le scénario de référence, mais son produit diminuerait ensuite de 1,5 Mds€ en 2050, du fait de la baisse de la consommation d'énergies carbonées.

Figure 11 : recettes fiscalités énergétiques, écarts entre les scénarios SNBC2 et de référence

Produit de la fiscalité énergétique (SNBC-Référence, volume M€ 2015)	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040	2045	2050
Fiscalité énergétique	-424	-297	-315	-260	-125	-28	73	155	-58	-580	-1 133	-1 708	-2 340	-8 537	-11 249	-11 282	-10 127
taxe carbone	-42	-140	-333	-573	-822	-1 134	-1 456	-1 797	-2 136	-2 654	-3 212	-3 800	-4 421	-7 648	-9 064	-8 844	-8 069
Ménages	36	61	47	-87	-251	-495	-760	-1 045	-1 210	-1 509	-1 823	-2 151	-2 500	-3 785	-4 053	-3 742	-3 139
Entreprises	-78	-200	-380	-486	-571	-639	-696	-752	-926	-1 145	-1 389	-1 649	-1 921	-3 863	-5 011	-5 102	-4 930
taxe carbone pétrole	-6	-199	-502	-749	-985	-1 236	-1 491	-1 762	-2 098	-2 544	-2 990	-3 440	-3 925	-6 374	-7 312	-6 975	-6 285
taxe carbone gaz naturel	-36	67	185	198	190	134	71	5	6	-63	-171	-305	-437	-1 202	-1 681	-1 802	-1 721
taxe carbone charbon	-1 700	-1 946	-2 140	-2 181	-2 212	-2 236	-2 252	-2 262	-2 272	-2 278	-2 280	-2 280	-2 277	-1 913	-1 619	-1 369	-1 152
TIC hors composante carbone	-382	-157	18	313	697	1 105	1 529	1 952	2 078	2 074	2 079	2 092	2 081	-889	-2 185	-2 438	-2 058
dont TICPE	-371	-135	50	362	756	1 163	1 584	2 004	2 165	2 173	2 196	2 232	2 242	-756	-2 035	-2 237	-1 817
TICGN	-1	3	7	7	6	4	3	2	3	2	1	-1	-2	-9	-13	-19	-19
TICE	-10	-26	-39	-54	-65	-62	-57	-52	-88	-100	-117	-137	-158	-122	-135	-181	-221
TICC	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

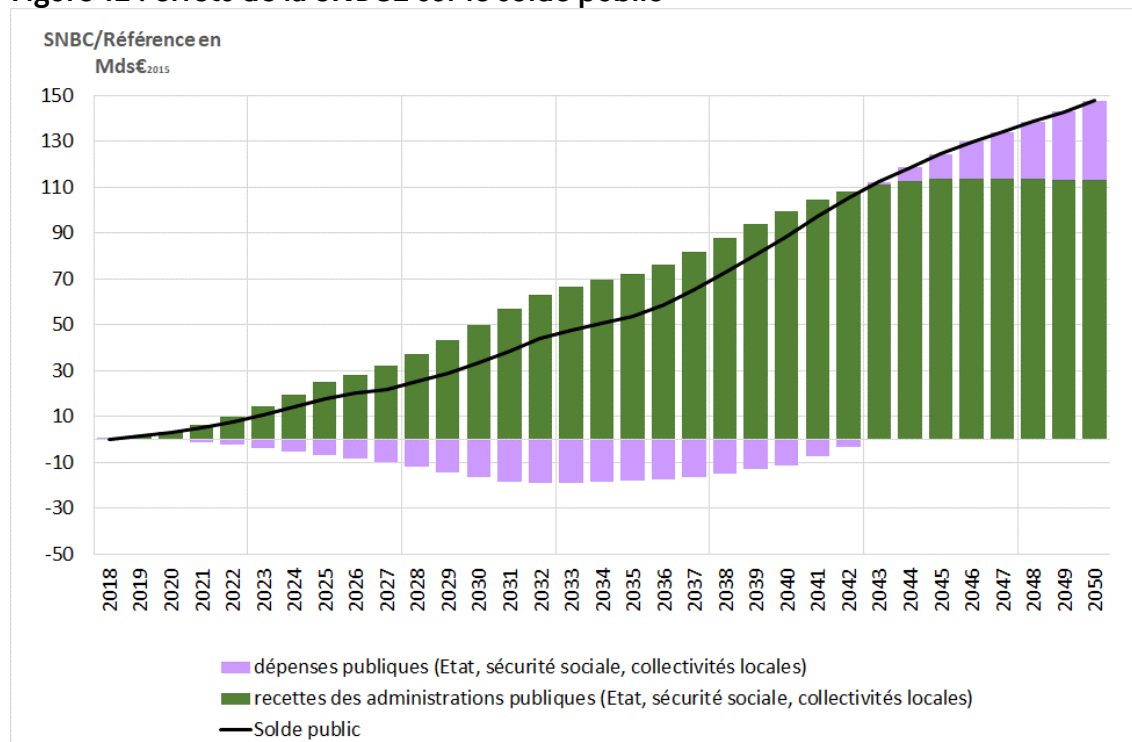
3.2. Effet de la SNBC2 sur le déficit et la dette publics

La SNBC2 contient diverses dépenses publiques qui engagent le budget de l'État, des versements de subventions à l'isolation dans le résidentiel et aux transports collectifs ou encore des dépenses d'investissements dans l'isolation du bâti public. Or, les subventions et les investissements publics dans la transition énergétique peuvent constituer une incitation importante pour l'investissement du secteur privé et l'économie française. Cet effet de levier permet de compenser tout ou partie de la dépense publique grâce à un regain de recettes généré ensuite par l'augmentation de l'activité.

À titre d'exemple, avec un taux d'aide publique à l'isolation des parois opaques de 25 %, 100 € de travaux occasionnent 25 € de dépenses publiques supplémentaires. Même en supposant qu'il existe un effet d'aubaine de 50 % (voir modèle Menfis de l'Ademe), et que la moitié de ces travaux aurait été effectuée sans crédit d'impôt, le CITE génère donc 50 € de chiffre d'affaire supplémentaire pour le secteur du BTP. Sachant que celui-ci importe très peu de consommations intermédiaires du reste du monde, ces 50 € entraînent une hausse du PIB quasi équivalente (toutes choses égales par ailleurs, hors effet multiplicateur, pour peu que les ménages ne réduisent pas ou peu leurs dépenses par ailleurs ce qui est le cas lorsqu'ils financent leurs investissements à crédit). Sachant que le taux de prélèvement obligatoire sur le PIB est de 45 %, l'État perçoit presque 24 € de recettes supplémentaires, sans compter le supplément de recettes perçus grâce à l'effet d'entraînement du BTP sur le reste de l'économie.

Au bout du compte, l'effet de ces dépenses de transition énergétique sur les finances publiques serait bénéfique en vertu des gains de PIB, toutes choses égales par ailleurs et notamment sous l'hypothèse de trajectoires de consommations publiques inchangées. En effet, la croissance supplémentaire obtenue après le bouclage macroéconomique accroîtrait les recettes de TVA, d'impôt sur le revenu et d'impôt sur les sociétés, ce qui conduirait à un gain de recettes publiques de l'ordre de 113 Mds€₂₀₁₅ en 2050 (figure 12). Par ailleurs, sous l'hypothèse d'une trajectoire de consommations publiques inchangées, les dépenses publiques seraient même amoindries en fin de période de simulation, sous l'effet de la réduction des charges de la dette, diminuant de 34 Mds€₂₀₁₅ en 2050. Ainsi, le déficit des administrations publiques se résorberait de 1,3 point de PIB en valeur en 2030 par rapport au scénario de référence, puis de 3,8 points de PIB en 2050. Cela permettrait de réduire progressivement le ratio de dette publique jusqu'à de 52,5 points de PIB au même horizon par rapport au contrefactuel.

Figure 12 : effets de la SNBC2 sur le solde public



Source : simulation Ademe-CGDD (ThreeME/cadrage DGEC pour la SNBC2)

Annexe :

Tables détaillées des simulations par secteur

Figure 1 : impact de la SNBC2 sur la valeur ajoutée détaillée par secteur (en écart au scénario de référence)

VA: écart AMS-AME en M€ 2015	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040	2045	2050	VA par an
Agriculture	-2	59	126	97	-33	-251	-560	-958	-1 035	-1 069	-1 088	-1 097	-1 096	1 080	2 732	3 579	4 128	179
Industrie (hors automobile)	111	549	861	1 556	2 338	3 240	3 831	4 313	4 110	4 865	5 196	5 548	5 928	8 200	11 613	13 474	14 993	652
dont IAA	0	33	91	178	271	390	516	634	741	772	777	792	829	2 154	3 227	3 720	3 878	169
Produits minéraux non-métalliques	8	50	84	140	222	303	352	389	404	470	594	724	838	719	969	1 122	1 233	54
Papier	1	6	11	28	48	70	87	102	112	125	135	144	154	228	294	312	323	14
Plasturgie & chimie	-1	2	25	136	266	391	493	575	637	715	793	866	930	1 303	1 960	2 713	3 521	153
Sidérurgie	1	3	5	20	39	59	75	89	99	117	134	149	159	216	286	328	388	17
Métallurgie métaux non ferreux	0	0	1	5	10	14	17	19	21	23	25	26	27	28	32	30	35	2
Autres industries	102	455	644	1 049	1 482	2 013	2 291	2 505	2 095	2 644	2 738	2 846	2 991	3 552	4 846	5 248	5 615	244
Construction automobile	26	71	140	215	319	460	635	859	1 131	1 409	1 665	1 915	2 156	2 505	2 678	1 921	1 412	61
BTP	222	1 358	2 078	2 859	4 216	5 480	5 856	6 004	5 636	6 766	9 680	12 710	15 315	7 363	11 172	14 239	16 638	723
Transport	-14	32	90	94	149	269	386	503	540	625	690	762	842	1 687	2 500	3 108	3 871	168
dont ferroviaire	12	27	47	66	89	116	144	172	197	225	253	282	311	370	646	917	1 253	54
bus	-3	4	8	11	15	17	16	12	1	-11	-19	-25	-28	240	551	747	874	38
fret terrestre	-7	27	64	67	95	159	220	282	299	347	372	394	416	742	475	128	-365	-16
fret maritime	-19	-37	-54	-76	-81	-68	-53	-36	-34	-25	-19	-9	4	81	371	704	1 303	57
aérien	3	11	25	25	31	45	59	73	77	88	102	120	139	255	458	612	806	35
Services marchands	2 234	6 392	10 710	14 121	17 062	20 240	22 909	25 323	27 030	29 261	30 852	32 471	34 315	56 945	81 429	92 017	94 924	4 127
Services publics	356	913	1 490	1 887	2 161	2 379	2 540	2 660	2 858	3 053	3 215	3 368	3 524	5 274	6 976	7 924	8 548	372
Energie (total)	-302	-359	-258	-310	-255	-33	203	488	26	42	-102	-363	-590	2 951	5 115	4 269	3 213	140
Charbon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
Carburants	-116	-266	-324	-313	-319	-338	-360	-385	-462	-542	-587	-629	-680	-1 226	-1 540	-1 823	-2 020	-88
dont carburants fossiles	-112	-232	-318	-332	-340	-358	-378	-401	-477	-554	-597	-637	-685	-1 230	-1 517	-1 744	-1 893	-82
biocarburants	-4	-33	-7	19	21	20	18	16	15	11	10	8	6	4	-24	-79	-127	-6
Electricité (*)	-158	-498	-715	-894	-984	-843	-708	-563	-1 314	-1 454	-1 752	-2 153	-2 554	-1 207	-1 193	-2 212	-3 414	-148
dont nucléaire	-121	-176	-286	-471	-599	-569	-553	-544	-1 280	-1 597	-2 016	-2 500	-2 983	-1 872	-1 445	-1 244	-953	-41
fuel	1	1	1	2	1	0	-2	-3	-2	-2	-1	0	2	127	145	140	125	5
gaz	-4	-12	-18	-17	-15	-7	1	7	0	11	15	14	12	-73	-186	-290	-346	-15
charbon	-1	-2	-1	-19	-19	-17	-16	-15	-9	-9	-9	-9	-9	-11	-11	-10	-9	0
éolien	-7	40	41	72	110	173	246	332	367	475	568	651	737	883	685	19	-839	-36
solaire	-1	5	3	13	24	41	63	92	90	118	141	163	186	396	571	509	187	8
hydrolique	-23	-345	-440	-429	-415	-371	-327	-284	-317	-280	-265	-270	-282	-135	-152	-321	-441	-19
cogénération	-2	-10	-15	-44	-71	-95	-120	-147	-163	-171	-184	-201	-219	-521	-801	-1 014	-1 139	-50
gaz et chaleur	-27	404	780	897	1 048	1 148	1 270	1 435	1 801	2 039	2 237	2 418	2 643	5 384	7 847	8 303	8 646	376
dont gaz naturel	-16	143	232	181	154	94	45	8	47	7	-50	-113	-163	-895	-1 518	-1 892	-2 040	-89
biogaz	0	66	229	266	316	372	437	513	593	674	759	848	948	1 982	3 344	4 416	5 533	241
bois	-6	140	213	232	247	242	233	228	306	351	378	391	407	1 304	1 744	1 348	826	36
déchets	-1	-45	-49	-42	-37	-34	-32	-30	-20	-15	-11	-9	-7	102	168	140	97	4
géothermie	-1	-1	3	19	36	53	71	93	140	190	244	303	372	861	1 405	1 682	1 893	82
cogénération	-3	101	152	241	333	422	517	623	735	831	918	999	1 085	2 030	2 705	2 608	2 337	102
total	2 631	9 015	15 237	20 519	25 957	31 784	35 799	39 191	40 295	44 952	50 109	55 313	60 392	86 005	124 214	140 532	147 726	6 423

(*) Dans le cadrage DGEC pour la SNBC2, le mix électrique prend en compte une montée en charge graduelle des énergies renouvelables (EnR) semblable dans les deux scénarios (« SNBC2 » et Référence)

Source : Ademe-CGDD (ThreeME-cadrage DGEC)

Figure 2 : impact de la SNBC2 sur l'emploi détaillé par secteur (différence en écart au scénario de référence en milliers d'emplois)

Emplois: écart SNBC2 / Référence en milliers	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040	2045	2050	Emplois par an
Agriculture	0	1	1	2	2	2	2	1	1	0	0	-1	-1	8	19	23	23	1
Industrie (hors automobile)	1	4	7	12	18	25	30	35	34	36	37	38	39	42	52	55	50	2
dont IAA	0	0	1	1	2	3	4	5	6	7	7	7	7	17	26	30	29	1
Produits minéraux non-métalliques	0	0	1	1	2	3	3	4	4	4	5	6	7	6	6	7	7	0
Papier	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Plasturgie & chimie	0	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	2	2	0	-2	-3	-4	0
Sidérurgie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0
Métallurgie métaux non ferreux	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0
Autres industries	1	3	5	9	13	17	20	23	21	22	23	22	22	20	23	23	21	1
Construction automobile	0	1	1	2	3	5	7	9	13	16	20	23	27	33	33	24	15	0
BTP	2	12	24	37	56	76	90	99	100	107	131	167	205	141	140	176	196	6
Transport	0	0	1	2	3	4	6	8	9	10	10	11	11	8	-3	-11	-17	-1
dont ferroviaire	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	4	4	4	5	7	10	14	0
bus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0
fret terrestre	0	0	0	1	2	2	3	5	5	6	6	6	6	3	-12	-25	-36	-1
fret maritime	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	0
aérien	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0
Services marchands	4	18	38	61	86	115	143	170	189	205	216	225	234	370	527	588	550	17
Services publics	1	2	5	8	10	13	15	17	19	20	20	20	20	27	36	38	32	1
Energie (total)	-1	-2	-3	-3	-2	-1	0	2	3	4	5	5	5	19	31	32	30	1
Charbon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carburants	0	-2	-3	-3	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-3	-3	1	8	16	22	1
dont carburants fossiles	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-4	-5	-5	-5	0
biocarburants	0	-1	-2	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	0	5	13	21	28	1
Electricité (*)	0	-1	-2	-2	-2	-2	-1	0	0	0	0	-1	-1	3	1	-6	-14	0
dont nucléaire	0	0	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-3	-4	-5	-6	-8	-5	-3	-2	-2	0
fuel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
gaz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0
charbon	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
éolien	0	0	0	0	1	1	1	2	2	3	3	4	4	6	4	1	-4	0
solaire	0	0	0	1	1	2	2	3	4	4	5	5	5	7	7	4	1	0
hydrolique	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	0
cogénération	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-3	-5	-6	-7	0
gaz et chaleur	0	1	2	3	4	4	5	5	6	7	8	8	9	15	23	22	21	1
dont gaz naturel	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	-3	-6	-7	-8	0
biogaz	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	6	10	12	14	0
bois	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	4	3	2	0
déchets	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
géothermie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	3	5	6	6	0
cogénération	0	0	0	1	1	2	2	2	3	3	4	4	4	7	9	9	7	0
total	7	35	75	121	176	238	294	341	366	398	440	490	541	650	837	925	878	27
Emplois: écart SNBC2 / Référence en milliers	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040	2045	2050	moyenne par an
Emplois principalement directs	1	11	24	38	59	84	104	118	124	137	166	206	249	202	202	220	223	10
Emplois principalement indirects	5	24	51	83	117	155	190	223	242	261	274	283	293	448	634	705	655	28
Création totales d'emplois	7	35	75	121	176	238	294	341	366	398	440	490	541	650	837	925	878	38

(*) Dans le cadrage DGEC pour la SNBC2, le mix électrique prend en compte une montée en charge graduelle des énergies renouvelables (EnR) semblable dans les deux scénarios (SNBC2 et Référence)

Source : Ademe-CGDD (ThreeME-cadrage DGEC)

Bibliographie

- Aldy J., Ley E., Parry I. (2010), « What is the role of carbon taxes in climate change mitigation », *PREMnotes, The World Bank*
- Armington P. (1969), « A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production », *International Monetary Fund Staff Papers*, XVI
- Bass F. (1969), « A new product growth model for consumer durables », *Management Science*, vol. 15, no 5, p215–227
- Bundesverband der deutschen Industrie (BDI), BCG(Boston) – Prognos (Bâle) (2018), « Klimapfade für Deutschland » (Les trajectoires climats pour l'Allemagne)
- Callonnec G., Cals G., Nauleau M-L., Saussay A., Reynes F., Landa G., Malliet P. (2013) « Un mix électrique 100 % renouvelable ? Analyse et optimisations », *Ademe, OFCE*
- Callonnec G., Landa G., Malliet P., Reynes F., Yeddir-Tamsamani Y. (2013), « A full description of the ThreeME model : Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy », *Ademe, OFCE*
- Callonnec G., Landa G., Malliet P., Saussay A., Reynès F. (2016), « Les propriétés dynamiques et de long terme du modèle ThreeME : Un cahier de variantes », *OFCE, Sciences-po*
- Callonnec G., Baiz G. (2016), « SNBC : Une évaluation macroéconomique », *Théma, CGDD, Ademe*
- Ceci-Renaud N., Guillot L., Thao Khamsing W. (2016), « Simuler l'impact social de la fiscalité énergétique : le modèle Prometheus », *Etudes et documents, Commissariat général au développement durable*
- Commission européenne (2018), « Une planète propre pour tous, une vision européenne stratégique à long terme pour une économie prospère, moderne, compétitive et neutre pour le climat »
- Conseil des prélèvements obligatoires (2019), « La fiscalité environnementale au défi de l'urgence climatique »
- Dufernez A-S., Elezaar C., Leblanc P., Masson E., Partouche H., Bardaji J., Campagne B., Khder M-B., Lafféter Q., Simon O. (2017), « Le modèle macroéconomique Mésange : réestimation et nouveautés », *Cahiers, Documents de travail de la DG Trésor*
- Holmstrom B., Tirole J., « Financial Intermediation, Loanable Funds, and the Real Sector », *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 112, No. 3. (Aug., 1997), pp. 663-691
- Ministère de la Transition écologique (2020), « La stratégie nationale bas-carbone (SNBC) »
- Ministère de la Transition écologique (2020), « La stratégie nationale bas-carbone (SNBC) : Rapport d'accompagnement »
- Phillips W. (1958), « The Relation between Unemployment and the Rate of Change of Money Wage Rates in the United Kingdom », *Economica*
- Quinet A. et al. (2019), « La valeur de l'action pour le climat : une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques », *France Stratégie*
- Reynès F. (2006), « La formation des salaires et le concept de taux de chômage d'équilibre : une tentative de réconciliation des courbes Wage Setting et de Phillips », *Science Po publications*



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

**Commissariat général
au développement durable**

Service de l'économie verte et solidaire

Sous-direction de l'économie et de l'évaluation

Tour Séquoia – 92055 La Défense cedex

Courriel : diffusion.cgdd@developpement-durable.gouv.fr

www.ecologie.gouv.fr