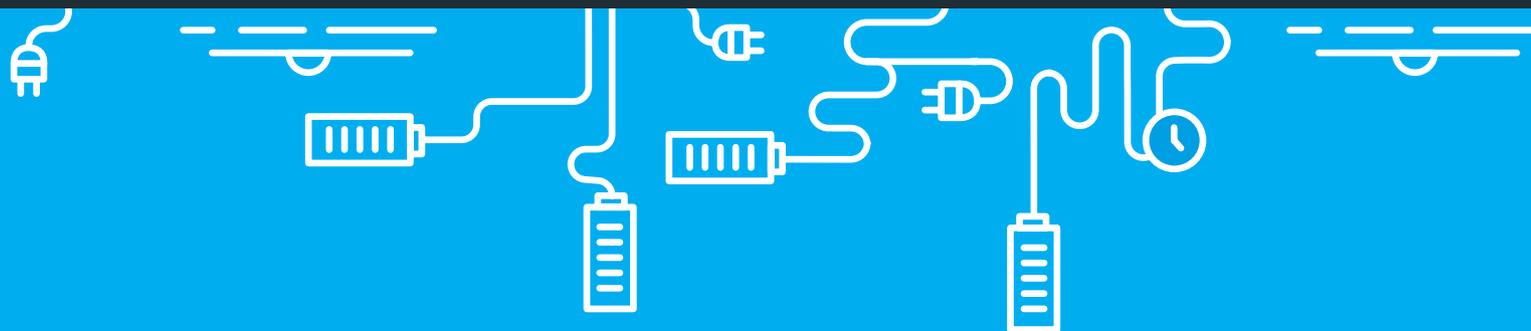




MIX ÉLECTRIQUE 100 % RENOUVELABLE À 2050

ÉVALUATION MACRO-ÉCONOMIQUE



Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Coordination technique et rédaction (ADEME) : Gaël Callonnet,
Guillaume Cals, Marie-Laure Nauleau

Rédaction (OFCE) : Aurélien Saussay, Frédéric Reynes, Gissela Landa,
Paul Malliet

Dépôt légal : ©ADEME Éditions, juin 2016

SOMMAIRE

①

INTRODUCTION P.4

②

HYPOTHÈSES ÉNERGÉTIQUES STRUCTURANTES P.6

Des « Visions » au « Mix 100 % EnRE »

Hypothèses structurantes sur la demande et l'offre d'énergie

③

UN MIX ÉNERGÉTIQUE TENDANCIEL ET TROIS VARIANTES À CONSOMMATION FINALE BASSE ET À HAUTE PÉNÉTRATION ENR P.9

Mix énergétique et électrique tendanciels

Trois variantes pour une extension de la part des filières renouvelables électriques

④

CADRAGE ÉCONOMIQUE DU SECTEUR ÉLECTRIQUE P.14

Evolution des coûts de production de l'électricité

Hypothèses sur la propension à importer des filières

⑤

LES RÉSULTATS MACROÉCONOMIQUES : DES EFFETS EXPANSIONNISTES P.17

Une augmentation du Produit Intérieur Brut

Des investissements renforcés dans le secteur électrique

Un effet positif sur l'emploi et un transfert intersectoriel important de l'activité

Une diminution du déficit de la balance commerciale

Une réduction de la facture énergétique des ménages et une augmentation du revenu disponible

Une réduction importante des émissions de CO₂

⑥

CONCLUSIONS P.24

⑦

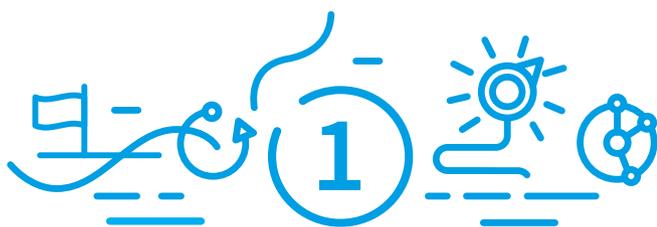
ANNEXE - DESCRIPTION DU MODÈLE THREEME P.25

Un modèle multisectoriel néo-keynésien

Une interaction dynamique entre l'offre et la demande

Comptabilisation des emplois dans le modèle ThreeME





INTRODUCTION

Le pilotage de la transition énergétique et la définition des politiques publiques qui doivent assurer sa mise en œuvre soulèvent d'importantes questions d'ordres technique et économique. Les travaux de l'ADEME contribuent à apporter des réponses à ces questions, afin d'accompagner les décideurs politiques dans leurs prises de décisions.

A travers les « Visions 2030-2050 »¹ (« Visions ») et l'étude intitulée « **Un mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations** » (« Mix 100 % EnRE »)², l'ADEME a, d'une part, établi et proposé un scénario complet et cohérent de transition énergétique prenant en compte l'offre et la demande et, d'autre part, étudié la faisabilité technique et économique de très forts taux d'énergies renouvelables (EnR) dans le cas particulier du mix électrique. Dans la continuité de l'évaluation

macro-économique des « Visions » seules, L'ADEME publie aujourd'hui les résultats de l'évaluation des retombées macro-économiques potentielles de trajectoires énergétiques combinant le scénario de transition développé dans les « Visions » et l'atteinte de mix électriques à haute pénétration EnR.

Afin de procéder à cette évaluation, l'ADEME a fait appel au « modèle macro-économique multisectoriel d'évaluation des politiques énergétiques et environnementale » (ThreeME), qu'elle a conjointement développé depuis 2008 avec l'Observatoire Français des Conjonctures Economiques (OFCE), centre de recherche en économie de Sciences Po.

ThreeME est un modèle néo-keynésien multisectoriel qui permet d'apprécier l'effet des mesures de

¹. ADEME. Contribution de l'ADEME à l'élaboration des Visions énergétiques 2030-2050. Juin 2013
². ADEME. Un mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations. Octobre 2015.

politiques publiques sur la production des entreprises, l'emploi et leurs répercussions sur la consommation, les comptes publics et par conséquent sur le revenu national (ou produit intérieur brut - PIB) et leur rétroaction sur le bilan énergétique et les émissions de CO₂. Ce modèle a des propriétés comparables à celles de Mesange (utilisé par l'Agence France Trésor), ou à Nemesis (développé par l'équipe Seureco-Erasme)³. Le travail réalisé recouvre le territoire métropolitain continental uniquement.

L'évaluation macro-économique réalisée à l'aide du modèle ThreeME permet de déterminer les gains ou les pertes économiques générées par l'extension de la part des énergies renouvelables au sein du mix énergétique français ainsi que par une diminution de la consommation finale d'énergie, à l'horizon 2050, par rapport à une trajectoire tendancielle d'évolution du mix et de la consommation finale d'énergie. Trois variantes de mix électriques ont été évaluées :

- Variante « Visions + 80 % EnRE » : les résultats de l'évaluation macro-économique des « Visions » menée en 2013⁴ sont-ils confirmés avec un cadrage actualisé⁵ ?
- Variante « Visions + 100 % EnRE » : quels gains économiques relatifs attendre d'une augmentation de la part des EnR dans la consommation d'électricité à 100 % ?
- Variante « Visions + 100 % EnRE Acceptabilité modérée » : quels gains/pertes économiques relatifs attendre dans le cas où des contraintes plus fortes en termes d'acceptabilité sociale pèsent sur l'atteinte d'un mix électrique 100 % EnR ?

Les résultats dépendent à la fois des principes de modélisation retenus, du calibrage de l'année de base et d'un certain nombre d'hypothèses complémentaires.

3. France Stratégie *La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques*, Octobre 2015.

4. ADEME. *Evaluation macroéconomique des visions énergétiques 2030-2050 de l'ADEME*. Octobre 2013

5. Cadrage macro-économique, projections des prix de l'énergie et coûts de production des différentes énergies actualisés





HYPOTHÈSES ÉNERGÉTIQUES STRUCTURANTES

Des « Visions » au « Mix 100 % EnRE »

En 2013, l'ADEME publiait les « Visions », scénario global cohérent, volontariste et argumenté d'une transition vers un avenir énergétique plus durable pour la France. Ce travail était le fruit de la mise en commun de l'expertise de différents services techniques et économiques de l'Agence et fournissait des propositions axées sur ses deux champs de compétences : la maîtrise de la consommation énergétique et le développement des EnR, tous vecteurs confondus. Pour l'horizon 2030, l'ADEME établissait ainsi un scénario ambitieux et réaliste d'évolution de la consommation énergétique et de la production d'énergies renouvelables. Pour l'horizon 2050, l'exercice, dans une approche cette fois-ci normative, imaginait une vision 2050 cohérente avec l'objectif « Facteur 4 » (division par quatre de nos émissions de CO₂ en 2050 par rapport à 1990), en fixant l'objectif final et en identifiant un chemin possible permettant d'y arriver, sur la base de changements plus structurants des modes de vie et de production.

En 2015, dans un contexte de progrès technologiques significatifs et de coûts des EnR en forte décroissance, l'ADEME s'est interrogée sur la faisabilité d'un mix électrique à plus fort taux de pénétration d'EnR. En prenant en compte la gestion du pilotage des différents moyens de production et de consommation, leur répartition entre les régions, et la circulation des flux électriques, l'analyse a permis d'identifier, à un horizon 2050, plusieurs mix électriques à forte pénétration d'EnR permettant, sous différentes contraintes, d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande au pas horaire. Au total, vingt jeux de contraintes ont été testés permettant d'aboutir à autant de solutions : des mix électriques à forte pénétration d'EnR qui, tout en respectant les contraintes posées, minimisent le coût total annuel du système électrique français.

Hypothèses structurantes sur la demande et l'offre d'énergie

Les conclusions des « Visions » et de l'étude « Mix 100 % EnRE » fournissent ainsi les fondations pour le cadrage énergétique de l'exercice de modélisation macro-économique : énergie primaire et consommation d'énergie finale, par usage (transport, résidentiel, tertiaire, industrie, et

agriculture), par vecteur (produits pétroliers et biocarburants, électricité, gaz et chaleur) et par macro-filière⁶ de production d'électricité (nucléaire, fioul, gaz, charbon, éolien, solaire, hydraulique et énergies marines renouvelables, et autres). Le tableau ci-dessous précise le périmètre de ces macro-filières.

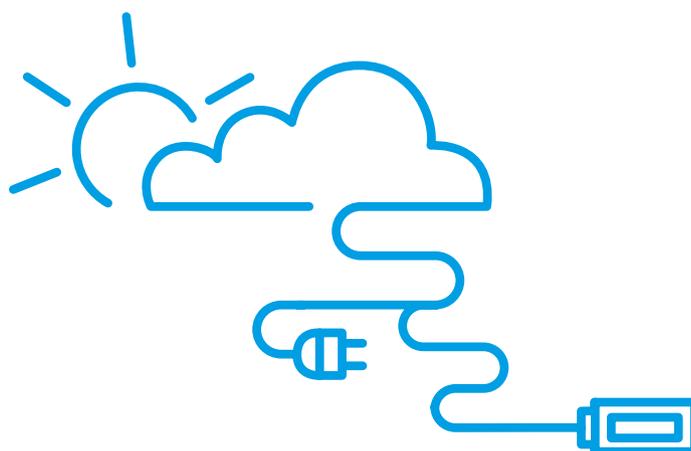
6. Le nombre de sous-secteurs électriques modélisé dans ThreeME étant limité à huit, les filières sont regroupées en macro-filières.



Macro-filières électriques	Périmètre
Gaz	Production d'électricité à partir de gaz naturel ou à partir de gaz de synthèse issue de la méthanation (power-to-gas et gas-to-power)
Eolien	Production d'électricité à partir d'installations éoliennes terrestres, d'installations éoliennes en mer posées ou flottantes
Solaire	Production d'électricité à partir d'installations solaires photovoltaïques ou thermodynamiques
Hydraulique et EmR	Production d'électricité à partir d'installations hydrauliques, marémotrices, hydroliennes et houlomotrices
Autres	Production d'électricité à partir de biomasse, de biogaz, d'ordures ménagères, et de ressources géothermiques

Pour chacune des variantes mises en regard avec la trajectoire tendancielle d'évolution du mix énergétique et de la demande d'énergie finale (le « Tendanciel »), les hypothèses d'évolution de la demande énergétique et d'évolution des mix de production, hors vecteur électrique, sont calées sur l'atteinte des bilans énergétiques 2030 et 2050 des Visions, en primaire et en final. Pour le vecteur électrique à horizon 2050, les hypothèses de consommation finale (en volume et par secteur) sont calées sur le bilan énergétique des Visions, et les hypothèses sur le mix de production correspondent à trois variantes tirées de l'étude "Mix 100% EnRE". Les points de passage 2030 de chaque variante, pour le vecteur électrique, sont obtenus par interpolation linéaire entre 2013 et les cibles 2050. À l'horizon 2050, les trois variantes ne diffèrent donc que par les hypothèses de composition du mix électrique, en particulier le taux de pénétration des EnR.

À l'horizon 2050, les trois variantes ne diffèrent que par les hypothèses de composition du mix électrique, en particulier le taux de pénétration des EnR, tirées de l'étude « Mix 100 % EnRE ».



Forte réduction de la demande d'énergie globale

A horizon 2050, les hypothèses de consommation énergétique (volume et structure) tirées des « Visions » sont intégralement reprises pour les besoins de l'évaluation macroéconomique.

Pour la demande adressée au vecteur électrique, les hypothèses des « Visions » ont été développées selon une approche « bottom-up » où tous les usages électriques sont considérés individuellement, aboutissant à reconstituer la demande électrique à l'horizon 2050. Ce scénario évalue la consommation annuelle totale d'électricité à 394 TWh⁷ en 2050, soit une diminution de plus de 10 % par rapport à 2010⁸. La consommation d'électricité baisse moins que la consommation d'énergie, malgré des efforts d'efficacité énergétique similaires, traduisant ainsi le report d'usage

vers l'électricité (véhicule électrique, pompes à chaleur pour le chauffage) et le développement de nouveaux usages électriques (développement des technologies de l'information et de la communication).

La demande d'énergie finale, tous vecteurs confondus et électricité comprise, est en diminution de 43 % entre 2010 et 2050. Cette baisse est obtenue grâce à une amélioration de l'efficacité énergétique dans tous les secteurs, sans rupture technologique majeure, mais aussi grâce au développement de la sobriété énergétique, notamment dans les transports.

Une électricité et une offre globale d'énergie hautement décarbonées

Pour l'énergie, hors électricité, les « Visions » fournissent pour les besoins de cette évaluation macro-économique des mix 2050 ainsi que des points de passage à 2030. En partant de la situation actuelle où la production énergétique totale est assurée à plus de 85 %⁹ par des énergies non renouvelables, les Visions « proposent » une modification radicale du mode de production de notre énergie. Le chauffage au fioul disparaît progressivement. La part du gaz naturel destiné à la production de chaleur chute de 70 % à 20 % entre 2010 et 2050, au bénéfice des énergies renouvelables et notamment du biogaz (via la méthanisation) et de la biomasse. Le tiers de la demande restante de combustibles fossiles de l'industrie (13 Mtep) et des transports (14 Mtep) en 2050 est satisfait par des biocarburants ou du biogaz (soit 7 Mtep).

À l'horizon 2050, les réseaux de chaleur distribuent une énergie thermique à 80 % d'origine renouvelable, principalement tirée de ressources centralisées (bois énergie et géothermie).



7. Consommation finale d'électricité, nette des pertes de conversion, de rendement du stockage et de réseaux, hors exportations.

8. SOeS. *Bilan énergétique de la France pour 2010*. Juillet 2011. P61.

9. Pour 2013. Source : ADEME. Chiffres clés climat air énergie 2014. Février 2015.

	Consommation 2050		Part EnR 2050	
	Énergie (finale)	Électricité (finale)	Énergie (finale)	Électricité (finale)
Tendanciel	115 Mtep	46 Mtep	16 %	17%
Visions + 80% EnRE	83 Mtep	34 Mtep	69 %	80 %
Visions + 100% EnRE	83 Mtep	34 Mtep	77 %	100 %
Visions + 100% EnRE Acceptabilité modérée	83 Mtep	34 Mtep	77 %	100 %

L'étude « Mix 100 % EnRE » redéfinit des hypothèses structurantes concernant la production, le stockage, et les échanges commerciaux d'électricité. Ainsi afin de proposer un mix électrique matériellement réalisable, un gisement maximal a été évalué pour chaque filière en fonction de la ressource naturelle disponible, puis ajusté de manière à prendre en compte les contraintes topologiques et sociales.

➔ **L'estimation des gisements éolien et photovoltaïque (PV)** a fait l'objet d'un travail reposant sur une modélisation cartographique, ainsi que sur l'analyse des contraintes au développement propres à chaque filière.

➔ **Les gisements des énergies renouvelables autres que solaire et éolien** sont quant à eux basés sur les hypothèses fournies par les « Visions ».

L'étude « Mix 100 % EnRE » repose sur l'hypothèse que les imports d'électricité depuis les pays frontaliers sont compensés par autant d'exports d'électricité 100 % renouvelable¹⁰. Les flux d'électricité vers et depuis l'étranger n'ont donc pas d'effet direct sur la balance commerciale. Les capacités d'interconnexion avec l'étranger n'ont pas fait l'objet d'une optimisation mais sont issues des travaux de RTE pour 2030.

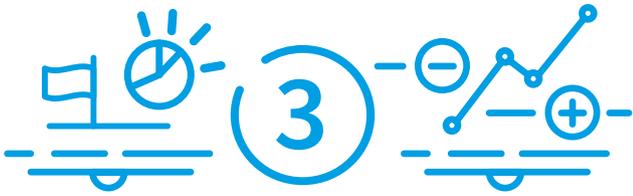
Sur la base de ces hypothèses, l'étude « Mix 100 % EnRE »

recours ensuite à un algorithme d'optimisation sous contrainte, visant à minimiser le coût total du système électrique. Les différentes contraintes analysées ont un impact important sur la composition des mix électriques optimaux associés. Les sources d'énergie électrique principales sont dans tous les cas l'éolien et le solaire. Les capacités des différentes filières de production et de stockage d'électricité sont optimisées, ainsi que les capacités d'échange inter-régionales, ce qui permet d'estimer le besoin d'évolution du réseau.

Il est important de préciser que l'étude « Mix 100 % EnRE » fournit des mix 2050 sans prise en compte de l'existant ; elle ne définit pas les trajectoires permettant de passer de la situation actuelle aux mix 2050. Il a donc été nécessaire, pour les besoins de cet exercice d'évaluation macro-économique, de tracer des trajectoires de développement temporel par macro-filière. Or définir une trajectoire d'évolution réaliste est un exercice, complexe et délicat, et de multiples hypothèses sont possibles quant à l'évolution des moyens de production actuels. Aussi, cet exercice macro-économique ayant pour principal objectif d'évaluer une situation finale 2050, nous avons retenu une approche simplifiée en choisissant des trajectoires qui reflètent une progression géométrique entre le niveau réel 2013, un point de passage à 2030 préalablement calculé par interpolation linéaire, et le niveau cible 2050 (en Mtep). Ces trajectoires varient d'une variante du mix électrique à l'autre, étant donné des mix cibles 2050 différents.

¹⁰. Sur ce point, la présente évaluation diffère de l'évaluation macro-économique des Visions menée en 2013 qui supposait que la France aurait un solde exportateur net de 3,4 Mtep à horizon 2050.





UN MIX ÉNERGÉTIQUE TENDANCIEL ET TROIS VARIANTES À CONSOMMATION FINALE BASSE ET À HAUTE PÉNÉTRATION ENR

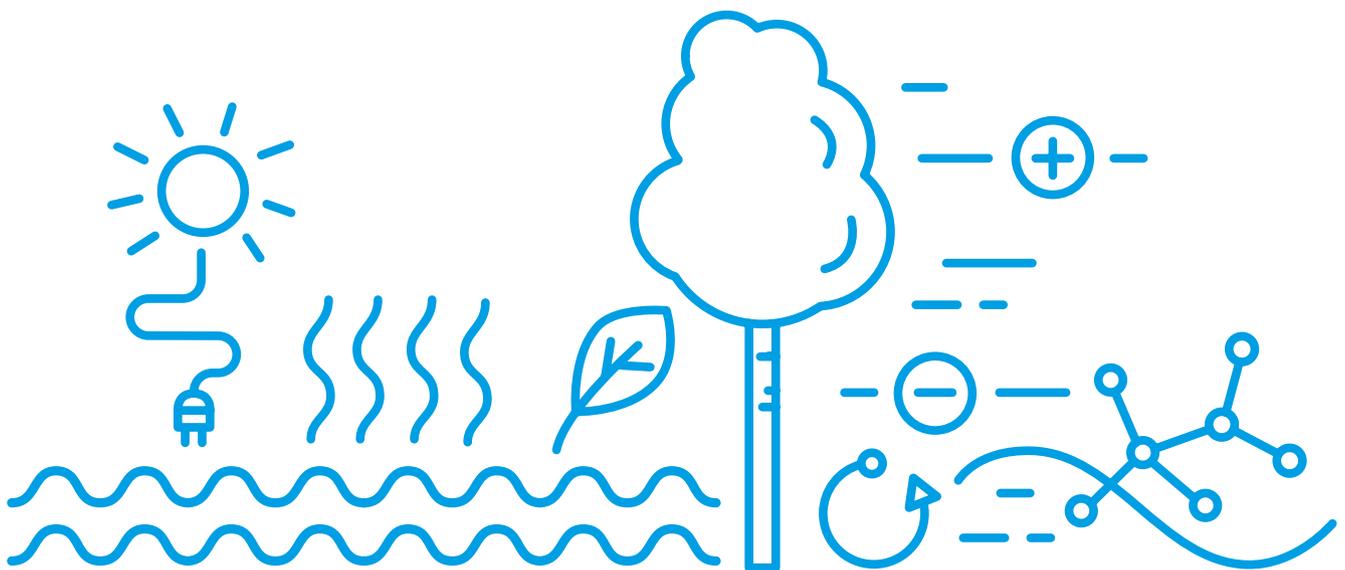
Dans le cadre de la présente évaluation macro-économique, trois variantes sont mises en regard avec la trajectoire tendancielle d'évolution du mix énergétique et de la demande d'énergie finale.

Pour chacune de ces variantes, les retombées macro-économiques estimées par le modèle sont à comprendre comme les gains ou pertes à attendre, à horizon 2050, par rapport au Tendanciel, d'une trajectoire d'évolution de la demande et de ce mix qui nous permette, à la fois :

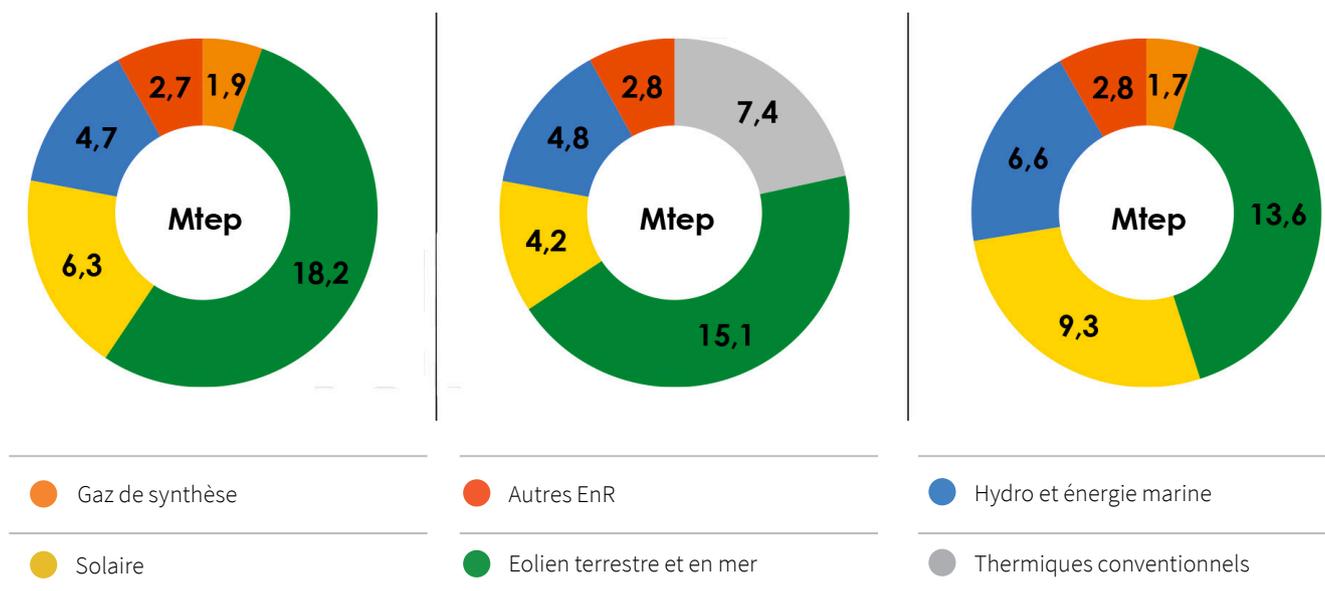
• **D'atteindre un très fort taux de pénétration des EnR** dans la consommation finale d'électricité (80 % à 100 % de l'électricité produite en 2050 d'origine EnR, selon la variante)

• **Et d'atteindre l'objectif « Facteur 4 »**, en réduisant fortement la consommation finale d'énergie de 146 Mtep à 83 Mtep, soit - 43 % sur la période 2010-2050 ; et en décarbonant le système énergétique, tous vecteurs confondus, pour faire passer la part renouvelable de la consommation finale d'énergie de 12,5 % en 2010 à 69 % voire 77 % en 2050, selon la variante.

Les graphiques de la page suivante fournissent un aperçu des mix électriques à forte pénétration d'EnR.



Répartition de la consommation finale électrique annuelle par macro-filière en 2050



Note Dans le cadre de cette évaluation macro-économique, les consommations intermédiaires de la filière stockage inter-saisonnier par production de gaz de synthèse (y-compris les pertes de rendement) ont, pour des besoins de simplification, été soustraites en totalité de la production primaire d'énergie éolienne

Mix électrique 100% EnR

La totalité de l'électricité consommée par les différents secteurs de l'économie est tirée de sources d'énergie renouvelables.

Mix électrique 80% EnR

80% de l'électricité consommée est tirée de sources EnR, les 20% restant étant fournis par des sources thermiques (fossiles et nucléaire).

Mix électrique 100% EnR avec Acceptabilité modérée

La totalité de l'électricité consommée est renouvelable, mais des contraintes d'acceptabilité sociales restreignent éolien terrestre et PV au sol aboutissant au développement du PV en toiture, des énergies marines, et de l'éolien en mer.

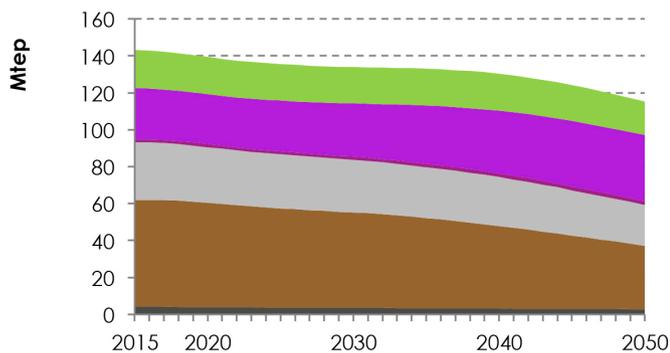


Mix énergétique et électrique tendanciels

Dans le mix électrique tendanciel utilisé comme référence, la part des EnR dans la production d'électricité reste inchangée sur la période, à 17 %. La part des EnR dans le mix énergétique en final reste quasi constant, passant de 14,2 % en 2013 à 15,8 % en 2050. La consommation finale d'énergie

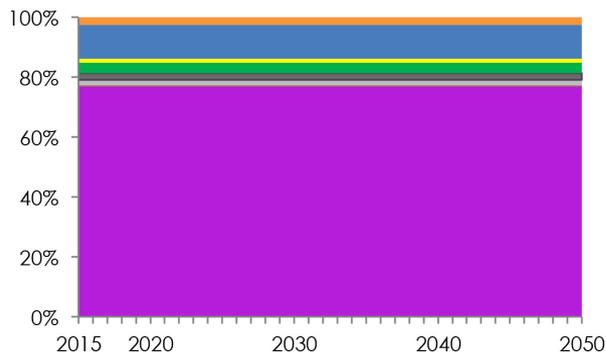
s'élève à 146 Mtep en 2010, 135 Mtep en 2030 et 115 Mtep en 2050, supposant une diminution de la consommation finale d'énergie de 21 % sur la période 2010-2050.

Tendanciel : évolution à 2050 du mix énergétique en Mtep énergie finale
source ThreeME 2016



- Renouvelables
- Centrales nucléaires
- Centrales fossiles
- Gaz naturel
- Pétrole
- Charbon

Tendanciel : évolution à 2050 du mix électrique en % de l'énergie finale
source ThreeME 2016



- Eolien terrestre et en mer
- Hydro et énergie marine
- Solaire
- Gaz naturel et de synthèse
- Autres
- Charbon
- Fioul
- Nucléaire

Note Autres représente l'électricité produite à partir de biomasse, de biogaz, d'ordures ménagères, et de ressources géothermiques

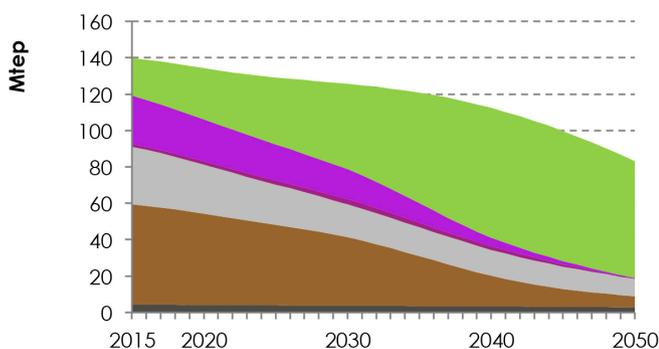
Trois variantes pour une extension de la part des filières renouvelables électriques

Variante dite « Visions + 100 % EnRE »

Dans la variante « Visions + Mix 100 % EnRE », la part EnR de la consommation finale d'électricité atteint le seuil des 100 % en 2050, après un point de passage à 49 % en 2030. Outre le déploiement de capacités importantes de production d'électricité renouvelable, les mix à très haute pénétration

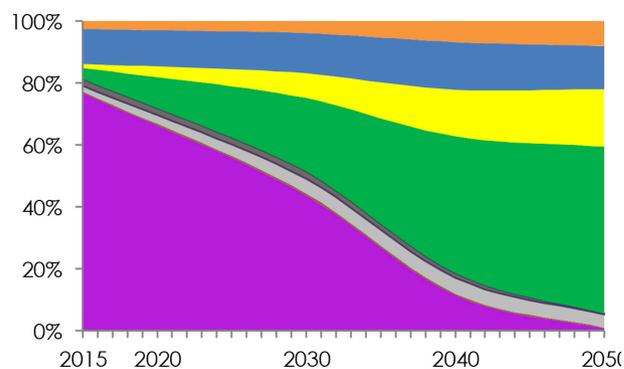
d'EnR électriques nécessitent également des investissements importants pour le renforcement du réseau, permettant de mutualiser les gisements des différentes régions, et dans les solutions de flexibilité (stockage et pilotage de la demande).

Variante « visions + 100 % EnRE » : évolution du mix énergétique en Mtep énergie finale
source ThreeME 2016¹¹



- Renouvelables
- Centrales nucléaires
- Centrales fossiles
- Gaz naturel
- Pétrole
- Charbon

Variante « visions + 100 % EnRE » : évolution à 2050 du mix électrique en % de l'énergie finale
source ThreeME 2016



- Eolien terrestre et en mer
- Hydro et énergie marine
- Solaire
- Gaz naturel et de synthèse
- Autres
- Charbon
- Fioul
- Nucléaire

Note Autres représente l'électricité produite à partir de biomasse, de biogaz, d'ordures ménagères, et de ressources géothermiques

¹¹ Pour les graphes de mix énergétique en Mtep d'énergie finale, toute production d'électricité à partir de gaz de synthèse est comprise dans « Renouvelables »



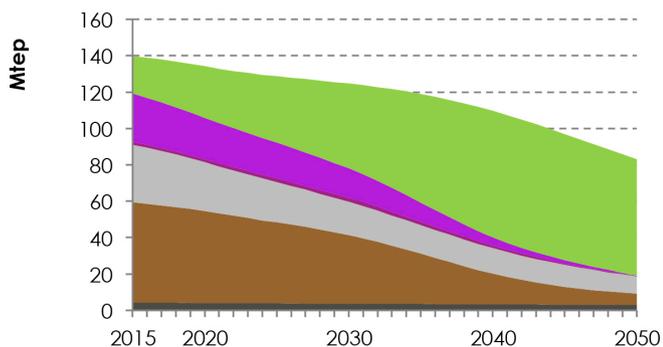
Variante dite « Visions + 100 % EnRE Acceptabilité modérée »

Dans la variante « Visions + Mix 100 % EnRE Acceptabilité modérée », la part EnR de la consommation finale d'électricité atteint également le seuil des 100 % en 2050, après un point de passage à 50 % en 2030, avec néanmoins une répartition entre macro-filières qui diffère de la variante précédente. En effet, les gisements accessibles par les filières utilisant de l'espace au sol ont été plus fortement contraints que pour les autres mix. Pour les centrales photovoltaïques au sol, le gisement potentiel est ainsi réduit à 25 GW (au lieu de 47 pour « Visions + 100 % EnRE »). Pour l'éolien terrestre, le gisement

potentiel est de seulement 61 GW (au lieu de 174 pour « Visions + 100 % EnRE »). Dans ce contexte, pour satisfaire l'équilibre offre-demande, le système fait appel à des filières moins contraignantes du point de vue de l'acceptabilité sociale, mais également plus coûteuses. Les énergies marines renouvelables font ainsi leur apparition dans le mix et l'éolien en mer ainsi que le PV sur toiture voient leur part dans le mix augmenter significativement. Cette variante implique également un surcoût dû aux besoins additionnels de renforcement du réseau de transport interrégional.

Variante « visions + 100 % EnRE acceptabilité modérée » : évolution du mix en Mtep énergie finale

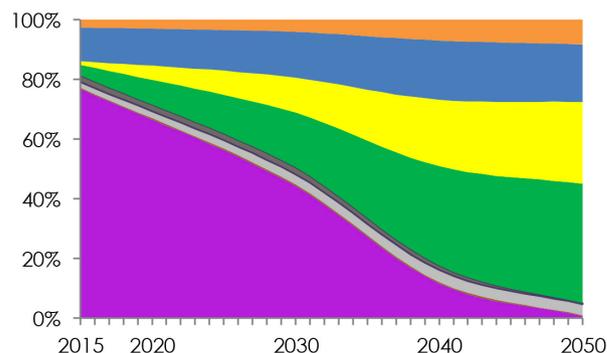
source ThreeME 2016



- Renouvelables
- Centrales nucléaires
- Centrales fossiles
- Gaz naturel
- Pétrole
- Charbon

Variante « visions + 100 % EnRE acceptabilité modérée » : évolution à 2050 du mix électrique en % de l'énergie finale

source ThreeME 2016



- Eolien terrestre et en mer
- Hydro et énergie marine
- Solaire
- Gaz naturel et de synthèse
- Nucléaire
- Autres
- Charbon
- Fioul

Note Autres représente l'électricité produite à partir de biomasse, de biogaz, d'ordures ménagères, et de ressources géothermiques

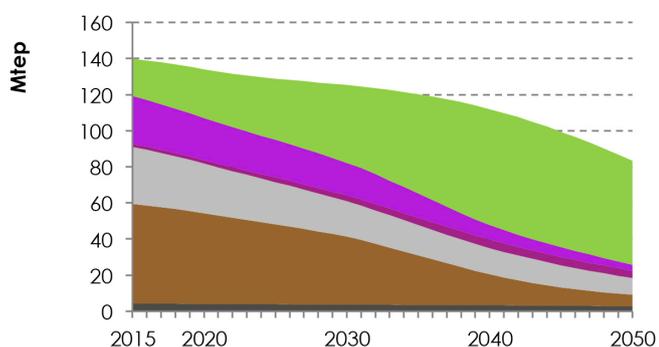
Variante « Visions + 80 % EnRE »

La variante « Visions + 80 % EnRE » voit quant à elle la part des EnR dans la consommation finale d'électricité atteindre 80 % en 2050, après un point de passage à 43 % en 2030. Cette variante nécessite des investissements moindres en solutions de stockage et renforcement de réseau, grâce à la présence plus importante de capacités de production thermique. En effet, de telles stations permettent au système électrique de faire face à des phénomènes météorologiques contraignants

sans faire appel à des moyens de stockage inter-saisonniers (sous forme de power-to-gas et gas-to-power). Seules des capacités de stockage de court-terme et hebdomadaire (STEP) sont alors utiles au système. Par ailleurs, la plus grande flexibilité de localisation de tels moyens de production réduit les besoins d'investissement dans le réseau.

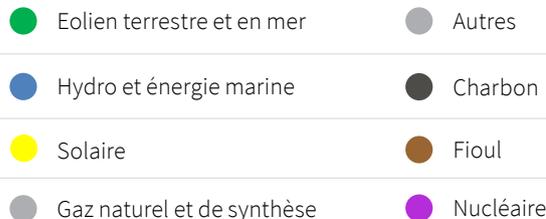
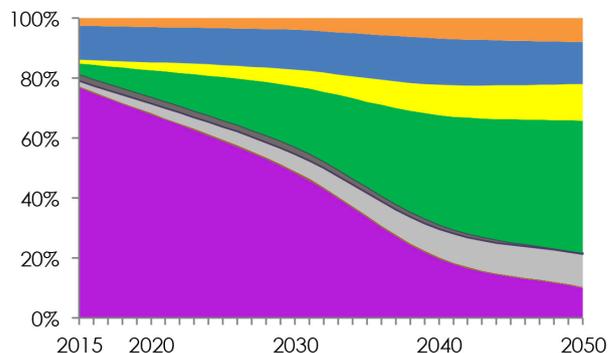
Variante « visions + 80 % EnRE » : évolution du mix en Mtep énergie finale

source ThreeME 2016



Variante « visions + 80 % EnRE » : évolution à 2050 du mix électrique en % de l'énergie finale

source ThreeME 2016



Note Autres représente l'électricité produite à partir de biomasse, de biogaz, d'ordures ménagères, et de ressources géothermiques





CADRAGE ÉCONOMIQUE DU SECTEUR ÉLECTRIQUE

Evolution des coûts de production de l'électricité

Les coûts initiaux de production de l'électricité pour chacune des filières électriques sont calibrés à partir du rapport In Numeri (2008)¹² et du rapport de la Cour de Comptes sur le coût du nucléaire (2012)¹³. Celui-ci tend vers 90€/MWh (taxes, distribution et commercialisation incluses) sous l'effet du « grand carénage » entre 2016 et 2030, puis il tend à nouveau vers 80€/MWh au-delà. Comme l'ensemble de la calibration du modèle, les estimations sont réalisées pour l'année de base 2006. L'évolution de ces coûts sur la période 2016-2050 est présentée ci-dessous pour chacune des variantes.

Ces coûts unitaires sont des coûts totaux moyens, incluant l'ensemble des coûts fixes et des coûts variables des différentes macro-filières, attribuables, pour une année donnée, aux nouvelles installations, ainsi qu'aux installations préexistantes. Ils diffèrent donc des LCOE (levelized cost of electricity) présentés dans l'étude « Mix 100 % EnRE », qui correspondent à des coûts marginaux de long terme. D'autre part, ces coûts unitaires incluent non seulement les coûts de production associés aux installations de production électrique, mais également les coûts du système électrique dans son ensemble (coûts des réseaux, du pilotage de la demande et des infrastructures de stockage), répartis entre les filières, au prorata de leur poids dans la consommation finale d'électricité.

En outre, chaque courbe associée à une macro-filière, représente les coûts unitaires de cette macro-filière, c'est-

à-dire la moyenne pondérée des coûts unitaires de chacune des filières qui la composent. La pondération s'opère sur la base du poids de chaque filière dans la production électrique de la macro-filière pour une année donnée. C'est le cas pour les macro-filières Eolienne terrestre et en mer, Solaire PV et thermodynamique ou Hydraulique et énergies marines (EmR). Par conséquent, une augmentation significative des taux de pénétration des filières les plus coûteuses (éolien en mer, PV sur toiture, ou EmR) peut conduire à une stagnation voire une augmentation des coûts unitaires d'une macro-filière donnée et ce, en dépit d'une décroissance des coûts unitaires de chacune des filières qui la composent sur la période.

Le prix des énergies fossiles évolue selon les prévisions de l'Agence Internationale de l'Energi (AIE), tirées du World Energy Outlook 2015.

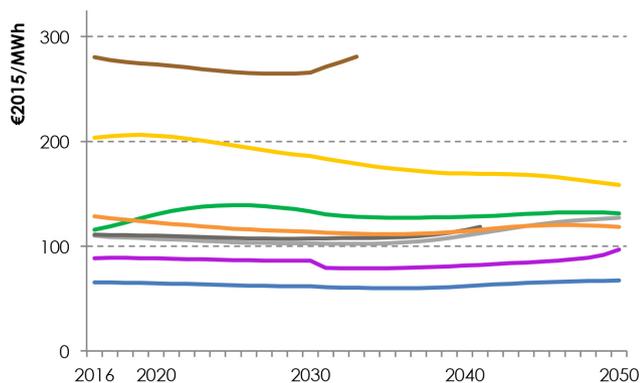


12. IN NUMERI, *Marchés, emplois et enjeu énergétique des activités liées à l'amélioration de l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables : situation 2008 2009, perspectives 2010*. Rapport ADEME, Octobre 2010

13. Cour des Comptes, *Les coûts de la filière électronucléaire*, Rapport Thématique, janvier 2012 http://www.ccomptes.fr/Publications/Publications/Les_couts_de_la_filiere_electronucleaire

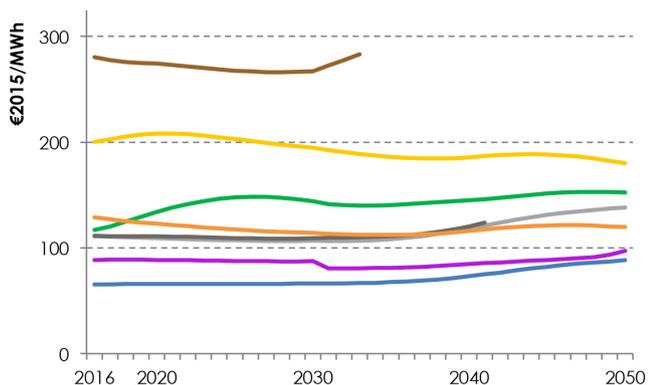
Trois variantes d'évolution des coûts unitaires de production par filière (coûts de réseaux, pilotage de la demande et stockage inclus)

source ThreeME 2016



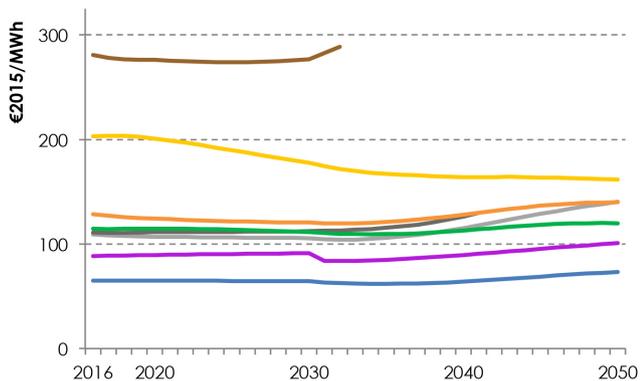
Variante dite « Visions + 100 % EnRE »

Évolution des coûts unitaires de production par filière



Variante dite « Visions + 100 % EnRE acceptabilité modérée »

Évolution des coûts unitaires de production électrique par filière

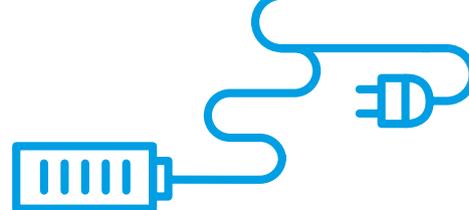


Variante dite « Visions + 80 % EnRE »

Évolution des coûts unitaires de production électrique par filière

Note Autres représente l'électricité produite à partir de biomasse, de biogaz, d'ordures ménagères, et de ressources géothermiques





Les coûts unitaires d'un certain nombre de macro-filière sont supérieurs, en fin de période, dans la variante « Visions + 100 % EnRE Acceptabilité modérée » comparativement à la variante « Visions + 100 % EnRE », en raison du développement de filières plus coûteuses :

➔ **La pénétration d'installation EmR** plus coûteuses mène à une augmentation des coûts unitaires de l'hydraulique et EmR en fin de période ;

➔ **Le déploiement plus important du PV sur toiture** conduit à une diminution moins rapide des coûts unitaires du Solaire PV et thermodynamique sur la période ;

➔ **Le déploiement plus important de l'éolien en mer**, notamment flottant, résulte dans une quasi-stagnation des coûts unitaires de l'Eolien terrestre et en mer sur la période.

Hypothèses sur la propension à importer des filières

On suppose que la propension à importer des investissements (y compris le coût d'installation des biens d'équipements) reste stable sur la période 2016 – 2050. L'essor éventuel d'une filière de production française n'a pas été modélisé. Cela signifie que les effets bénéfiques de la transition sur le déficit de la balance commerciale et les créations d'emplois dans les filières EnR sont sous-estimés. Le tableau ci-dessous présente la part de la formation brute de capital fixe (FBCF) importée par filière.

Par ailleurs, sur la période, le taux d'importation des biens d'équipements varie entre 4 % et 67 % selon la macro-filière considérée. Pour 2006, à l'échelle du secteur des EnR électrique dans son ensemble la part moyenne de FBCF importée est donc de 32,3 %, en ligne avec les niveaux estimés pour le secteur électrique dans son ensemble au sein des données disponibles dans la comptabilité nationale établie par l'INSEE.

Eolien	67 %
Solaire	48 %
Hydraulique et EmR	4 %
Biomasse solide	34 %
Gaz desynthèse	20 %

Source In Numeri 2010



LES RÉSULTATS MACROÉCONOMIQUES : DES EFFETS EXPANSIONNISTES

Cet exercice de modélisation confirme les résultats obtenus précédemment suite à l'évaluation macroéconomique des « Visions 2030-2050 » : les impacts expansionnistes de la transition énergétique l'emportent sur ses effets récessifs. En 2050, dans le cadre d'une trajectoire de transition énergétique dite « Visions + 100 % EnRE », le PIB français serait de 3.9 points supérieur à celui du Tendancier, et l'économie française serait enrichie de près de 900 000 emplois.

Cette évaluation macroéconomique du déploiement d'un scénario de transition énergétique associé à une très haute pénétration des EnRE, à l'aide du modèle ThreeME, souligne que les effets récessifs qu'il provoque, tels que la baisse d'activité liée à la baisse de production d'énergie, la hausse du coût de production de l'électricité, l'augmentation de la fiscalité environnementale, sont compensés par les effets expansionnistes tels que la hausse de l'emploi liée aux investissements dans les renouvelables et aux mesures d'efficacité énergétique (rénovation énergétique par exemple), la baisse de la facture énergétique à moyen terme (qui permet d'augmenter la consommation sur d'autres secteurs), la redistribution des recettes de la fiscalité énergétique aux ménages (sous forme de baisse d'impôt sur le revenu) et aux entreprises (via une baisse des charges), ainsi qu'à l'amélioration à moyen terme de la balance commerciale (baisse des importations notamment d'énergies fossiles).

Les impacts expansionniste de la transition énergétique

l'emportent sur ses effets récessifs, malgré des hypothèses conservatrices en termes de structuration des filières EnR françaises (propension à importer constante à horizon 2050).

L'évaluation a porté sur les indicateurs macro-économiques conventionnels, comme le PIB, qui ne comptabilisent que les transactions marchandes effectivement réalisées. Les pertes ou les gains en bien être, associés à la modification des comportements (baisse de la mobilité individuelle, autres modes de consommations énergétiques, etc.) ou à la modification des tendances climatiques et environnementales, ne sont pas évalués faute d'un consensus sur leurs définitions et les outils pour les mesurer.



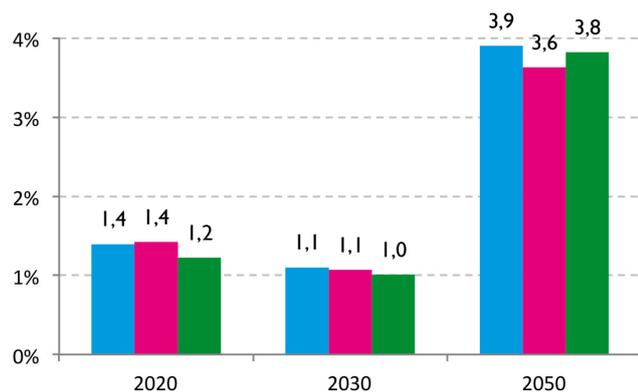
Une augmentation du Produit Intérieur Brut

Selon la variante étudiée, la transition vers un système énergétique décarboné et la diminution de la consommation finale d'énergie pourraient conduire, par rapport à une trajectoire tendancielle d'évolution du mix, à un niveau de PIB supérieur de 1 % à 1,1 % en 2030, et supérieur de 3,6 % à 3,9 % en 2050.

Un niveau de PIB supérieur de 1 % à 1,1 % en 2030, et supérieur de 3,6 % à 3,9 % en 2050.

PIB - Écart au tendanciel en pourcentages

source ThreeME 2016



- Visions + 100 % EnRE
- Visions + 100 % EnRE Acceptabilité modérée
- Visions + 80 % EnRE



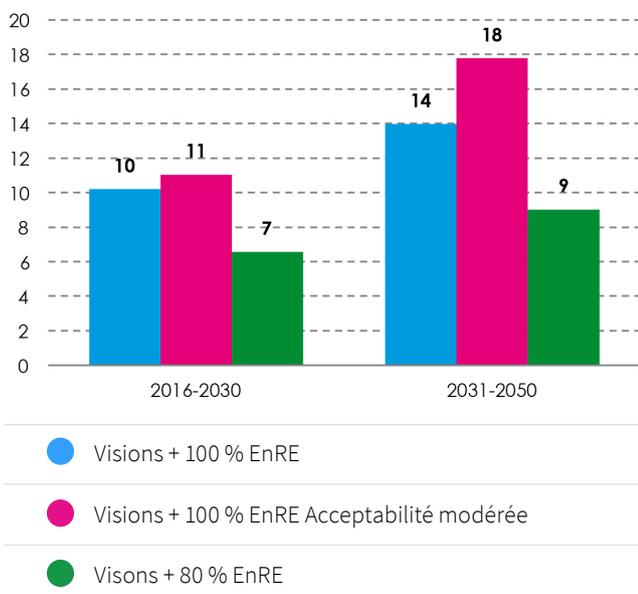
Des investissements renforcés dans le secteur électrique

Les trois variantes conduisent à une augmentation de l'investissement dans la filière électrique par rapport au Tendanciel. Les variantes visant un taux de pénétration des EnRE de 100 % conduisent sans surprise à des volumes d'investissement plus élevés que la variante « Visions + 80 %

EnRE ». Par ailleurs, la variante dite « Visions + 100 % EnRE Acceptabilité modérée » nécessite un niveau d'investissement total supérieur à la variante « Visions +100 % EnRE », en raison de la plus forte pénétration de filières EnR coûteuses : éolien en mer, EmR et PV sur toitures.

Investissement annuels moyens dans le secteur électrique par période - Écart au tendanciel¹⁴ en milliards d'euros 2010

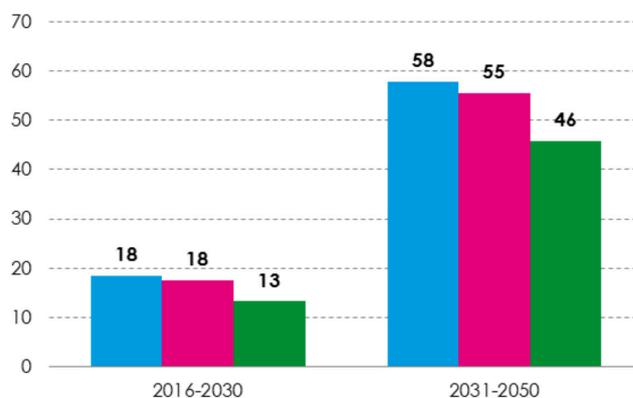
source ThreeME 2016



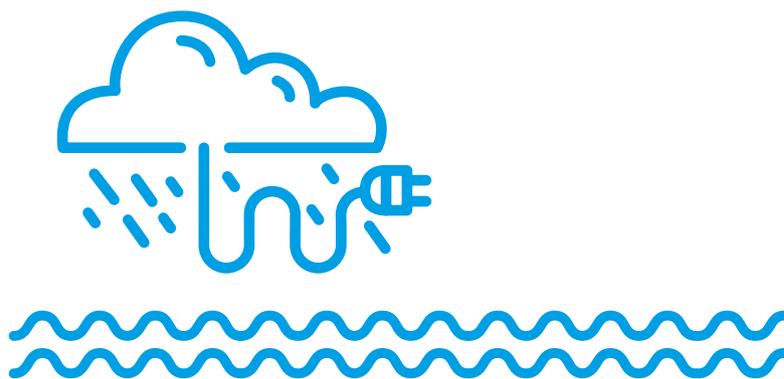
Le surinvestissement électrique représente 30 % du surinvestissement total généré par la transition énergétique dans la variante « Visions + 100 % EnRE » ; 38 % dans la variante « Visions + 100 % EnRE Acceptabilité modérée » et 25 % dans la variante « Visions + 80 % EnRE ».

Investissement totaux annuels moyens par période - Écart au tendanciel en milliards d'euros 2010

source ThreeME 2016



La transition énergétique générerait une hausse globale de l'investissement, tous secteurs confondus, de l'ordre de 13 à 18 milliards selon les variantes entre 2016 et 2030, puis entre 46 et 58 milliards entre 2031 et 2050 (incluant les investissements induits et non les seuls investissements directement liés à la mise en œuvre de la transition énergétique). Cela représente une augmentation moyenne de 7 à 9 % de la FBCF sur la période 2016-2050 par rapport au Tendanciel.



¹⁴. Sous l'hypothèse du grand carénage des centrales existantes, et du remplacement des centrales de seconde génération par des EPR au-delà de leur période de prolongement.

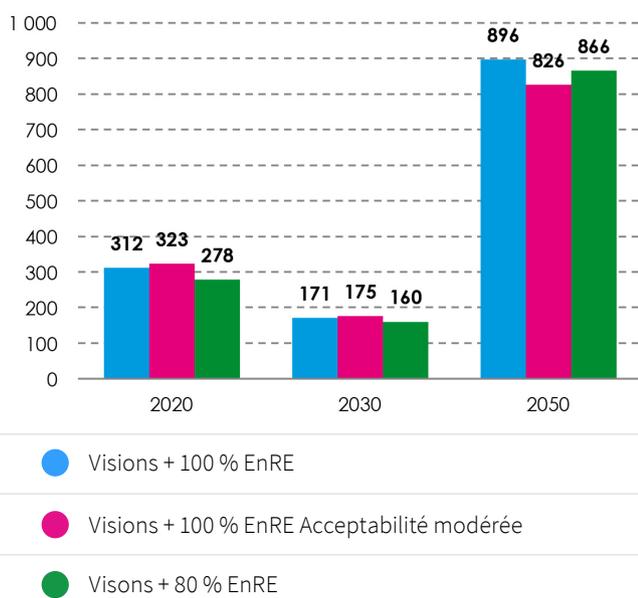


Un effet positif sur l'emploi et un transfert intersectoriel important de l'activité

Pour les trois variantes, le nombre total d'emplois en 2050 dans l'économie française est supérieur au Tendancier, avec 830 000 à 900 000 emplois supplémentaires.

Emploi - Rapport au tendancier en milliers d'emplois

source ThreeME 2016

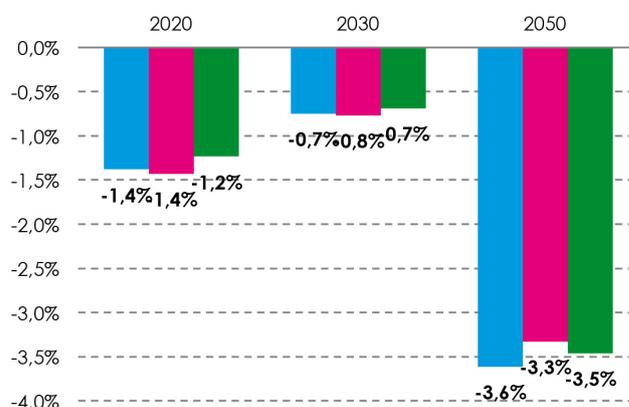


Ces gains s'expliquent pour partie par les effets directs d'un regain d'investissements dans l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, et également par les effets d'entraînement indirects et induits du regain d'activité économique occasionné par la mise en place d'un scénario de transition énergétique avec des taux élevés de pénétration des EnRE. Les mesures soutenant l'activité dans l'efficacité énergétique et les EnR mènent ainsi à une hausse des

commandes pour les sous-traitants de ces secteurs (construction, transport, etc.). De plus, la réduction de la facture énergétique des ménages et l'amélioration du solde de la balance commerciale conduisent à des créations d'emplois significatives dans l'ensemble de l'économie, par rapport au Tendancier.

Taux de chômage - Écart au tendancier en points de pourcentage de la population active

source ThreeME 2016



La structure multisectorielle du modèle ThreeME permet également d'examiner l'impact en emplois de la diminution de la demande d'énergie et de l'extension des filières renouvelables à l'échelon sectoriel. L'examen des créations et destructions d'emplois par rapport au Tendancier révèle que les principaux gains liés au déploiement d'un scénario de transition énergétique incluant un mix 100 % EnRE seraient dans les services, la construction et le transport, quand les secteurs de l'industrie automobile, du nucléaire et des combustibles fossiles verraient leurs emplois réduits.

L'impact direct et indirect des investissements dans les filières renouvelables et dans l'efficacité énergétique entraîne une augmentation de l'activité dans l'ensemble de l'économie. Les emplois créés par cet effet d'entraînement sont qualifiés d'emplois induits. Le secteur tertiaire représente près de 80 % de l'économie française. En conséquence, il est celui qui bénéficie le plus des effets d'entraînement induits par ce regain d'activité économique occasionné par la mise en place d'un scénario de transition énergétique incluant un mix 100 % EnRE.

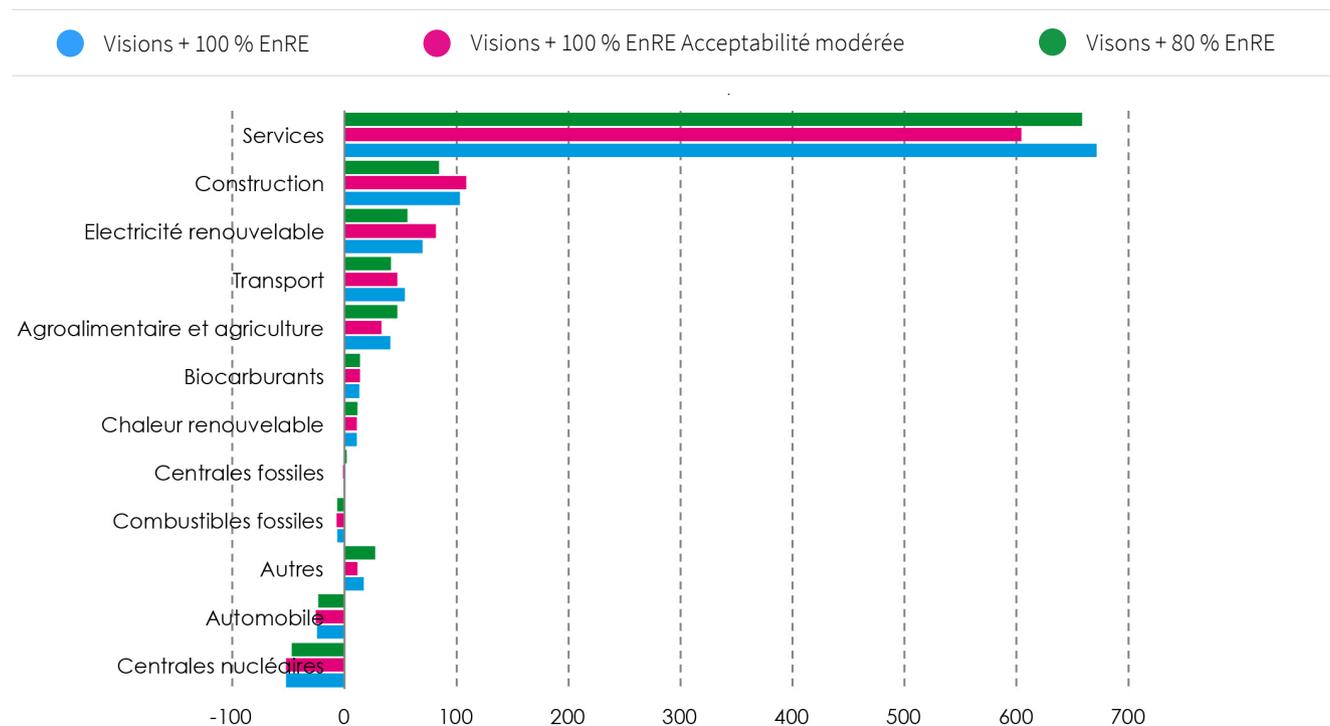
L'impact sur l'emploi dans les filières renouvelables traduit une création d'emplois directs, c'est-à-dire provenant de l'extension de l'activité dans ces filières elles-mêmes. Le transfert du transport voyageur vers les modes collectifs

(ferroviaires et routiers) conduit, en revanche, à une diminution de la demande de véhicules particuliers, et donc à une réduction de l'activité et du nombre d'emplois dans le secteur automobile.

La filière construction voit son activité augmenter, d'une part, en raison de la rénovation énergétique du parc de logements existants, et d'autre part, parce que les nouvelles capacités de production d'énergie renouvelable doivent être installées, ce qui implique un recours au secteur de la construction. On parle alors d'emplois indirects¹⁵. Le même type de lien entre biocarburants et agriculture contribue aux créations d'emplois dans le secteur agricole.

Évolution sectorielle de l'emploi¹⁶ - Écart au tendanciel en milliers d'emplois

source ThreeME 2016

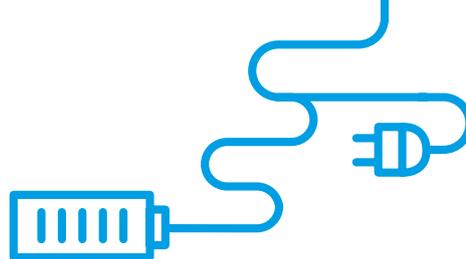


¹⁵ La distinction entre emplois directs et emplois indirects relève ici d'une approche de branche. Les acteurs de la branche construction intervenant sur l'installation d'EnRE sont donc considérés comme des sous-traitants de la branche EnRE et les emplois associés comme indirects. Cette approche diffère d'une approche filière, appliquée notamment dans l'étude ADEME « Marchés et emplois liés à l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables », qui aboutit à comptabiliser comme emplois directs, l'ensemble des emplois associés au produit ou

service final de chaque étape de la chaîne de valeur, et comme emplois indirects, les emplois associés aux consommations intermédiaires intervenant dans la production de chacun de ces produits et services finaux.

¹⁶ Le secteur Électricité renouvelable rassemble les macro-filières éolien terrestre et en mer, solaire PV et thermodynamique, hydraulique et EmR, et autres. Le secteur Autres rassemble quant à lui l'ensemble des industries non automobiles (verre, céramique, papier, chimie, plastiques, métallurgie et autres).





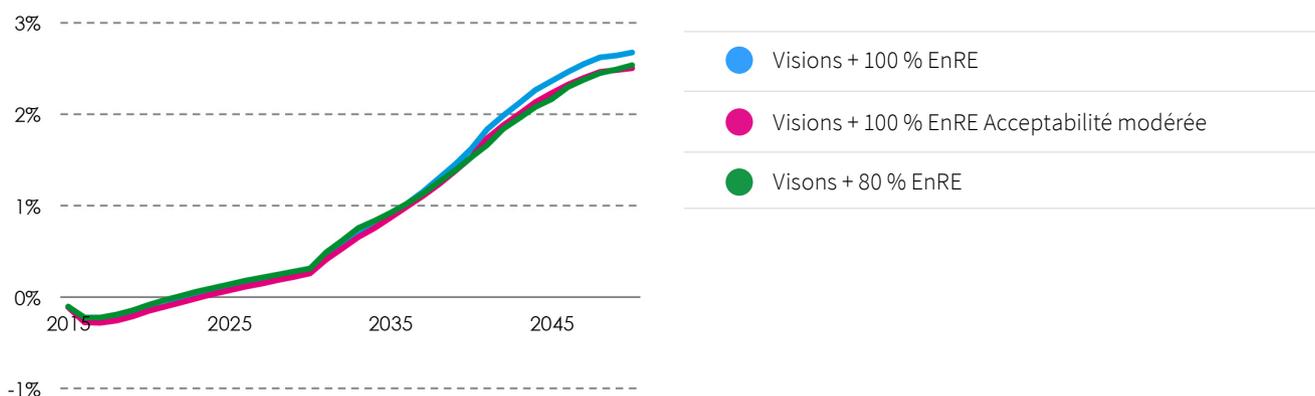
Une diminution du déficit de la balance commerciale

Enfin, la diminution de la consommation d'énergie ainsi que la substitution d'une production domestique d'EnR aux énergies fossiles importées (notamment via l'augmentation de la part des véhicules électriques et hybrides rechargeables à 1/3 du parc, et l'augmentation des biocarburants pour ce

qui concerne le pétrole ; via la production de biogaz et la méthanation pour ce qui concerne le gaz naturel) permet une amélioration de la balance commerciale de plus de 2,5 points de PIB. On notera que les résultats des trois variantes sont à nouveau remarquablement similaires.

Balance commerciale - Écart au tendanciel en points de PIB

source ThreeME 2016



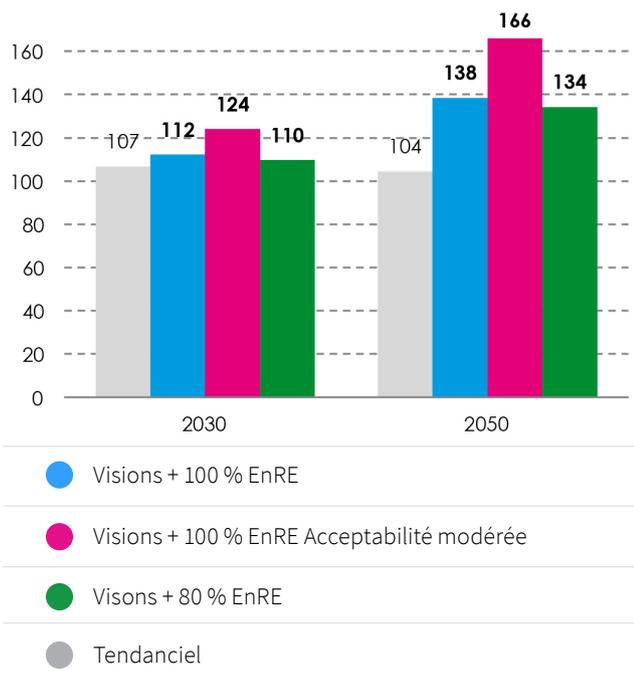
Une réduction de la facture énergétique des ménages et une augmentation du revenu disponible

Le prix de l'électricité augmente différemment dans chacune des variantes- le coût de production de l'électricité plus élevé de la variante « Visions +100 % EnRE Acceptabilité modérée » conduit à un prix de l'électricité pour l'utilisateur final supérieur de 20 % à celui de la variante « Visions +

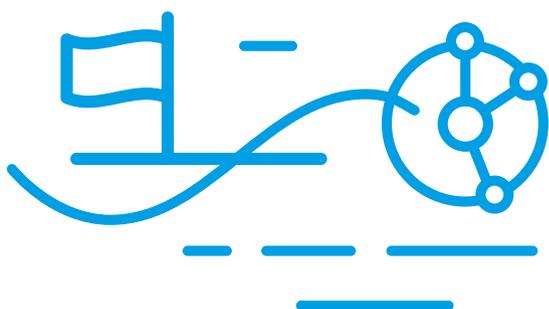
100 % EnRE ». Inversement, la plus faible pénétration des renouvelables dans la variante « Visions + 80 % EnRE » conduit à un niveau de prix de l'électricité légèrement plus faible, inférieur de 3 % au prix atteint dans la variante « Visions + 100 % EnRE ».

Prix de l'électricité (TTC) - Indice 100 en 2010

source ThreeME 2016

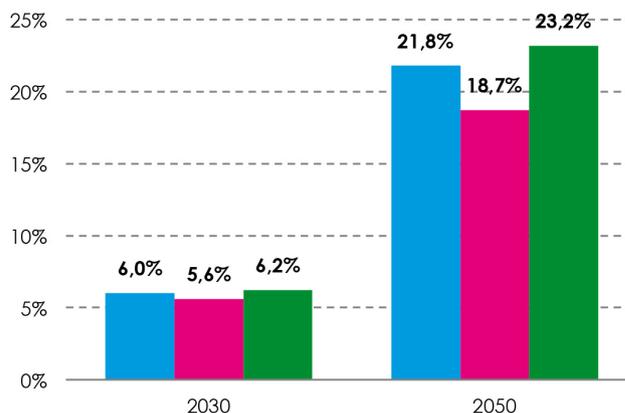


La part de la taxe intérieure de consommation dans le prix de l'électricité croît progressivement entre 2016 et 2030 de manière à ce que les cibles de demande énergétique soient atteintes. Elle s'élève à approximativement 6 % dans les 3 variantes en 2030 et varie entre 19 % et 23 % selon les variantes en 2050. Elle est inversement proportionnelle au coût moyen de production.



Part de la taxe intérieure de consommation dans le prix de l'électricité TTC

source ThreeME 2016



Les trois variantes conduisent à une réduction marquée de la facture énergétique totale des ménages – incluant la taxation énergétique–, de 67 à 27 ou 28 milliards d'euros (constants 2010) entre 2010 et 2050.

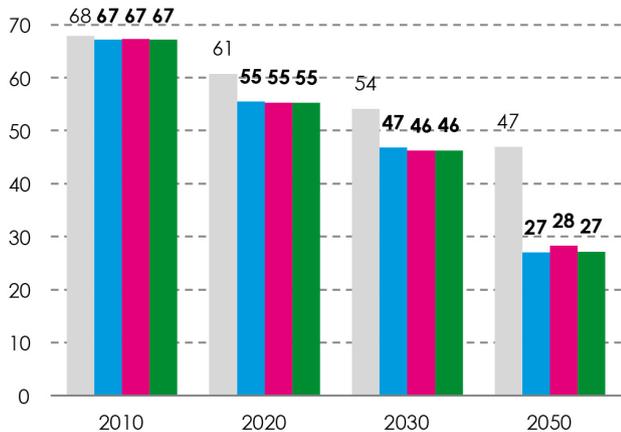
L'essentiel de cette diminution est attribuable à la réduction de la consommation finale d'énergie – dont l'électricité ne constitue que 41 % à l'horizon 2050, ce qui explique pourquoi les différences dans le niveau du prix de l'électricité n'impliquent qu'une faible différence sur la facture énergétique totale observée dans les trois variantes

De plus, la réduction des dépenses contraintes d'énergie, combinée au regain d'activité conduit à une augmentation du revenu disponible des ménages, net de la facture énergétique et de la charge de la dette des investissements d'efficacité énergétique, qui, en 2050, pour la variante « Visions + 100 % EnRE » est supérieure de 255 milliards d'euros (constants 2010) à sa valeur tendancielle..



Facture énergétique des ménages en milliards d'euros 2010

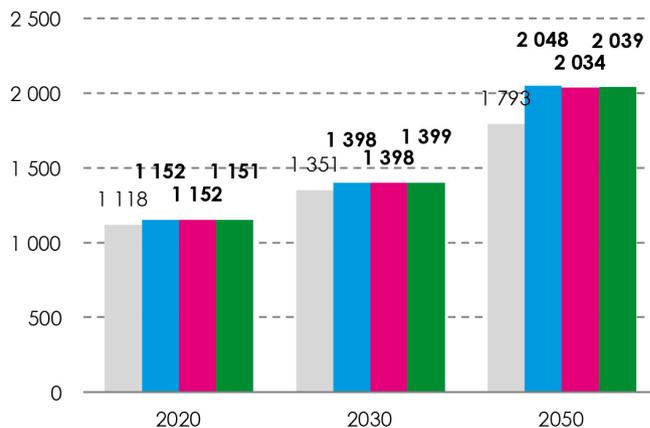
source ThreeME 2016



- Visions + 100 % EnRE
- Visions + 100 % EnRE Acceptabilité modérée

Revenu disponible des ménages (hors énergie et dépenses liées à l'efficacité énergétique) - Milliards d'euros 2010

source ThreeME 2016

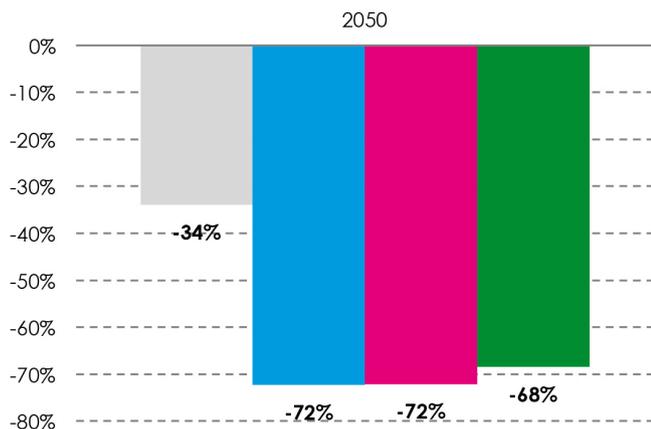


- Visions + 80 % EnRE
- Tendanciel

Une réduction importante des émissions de CO₂

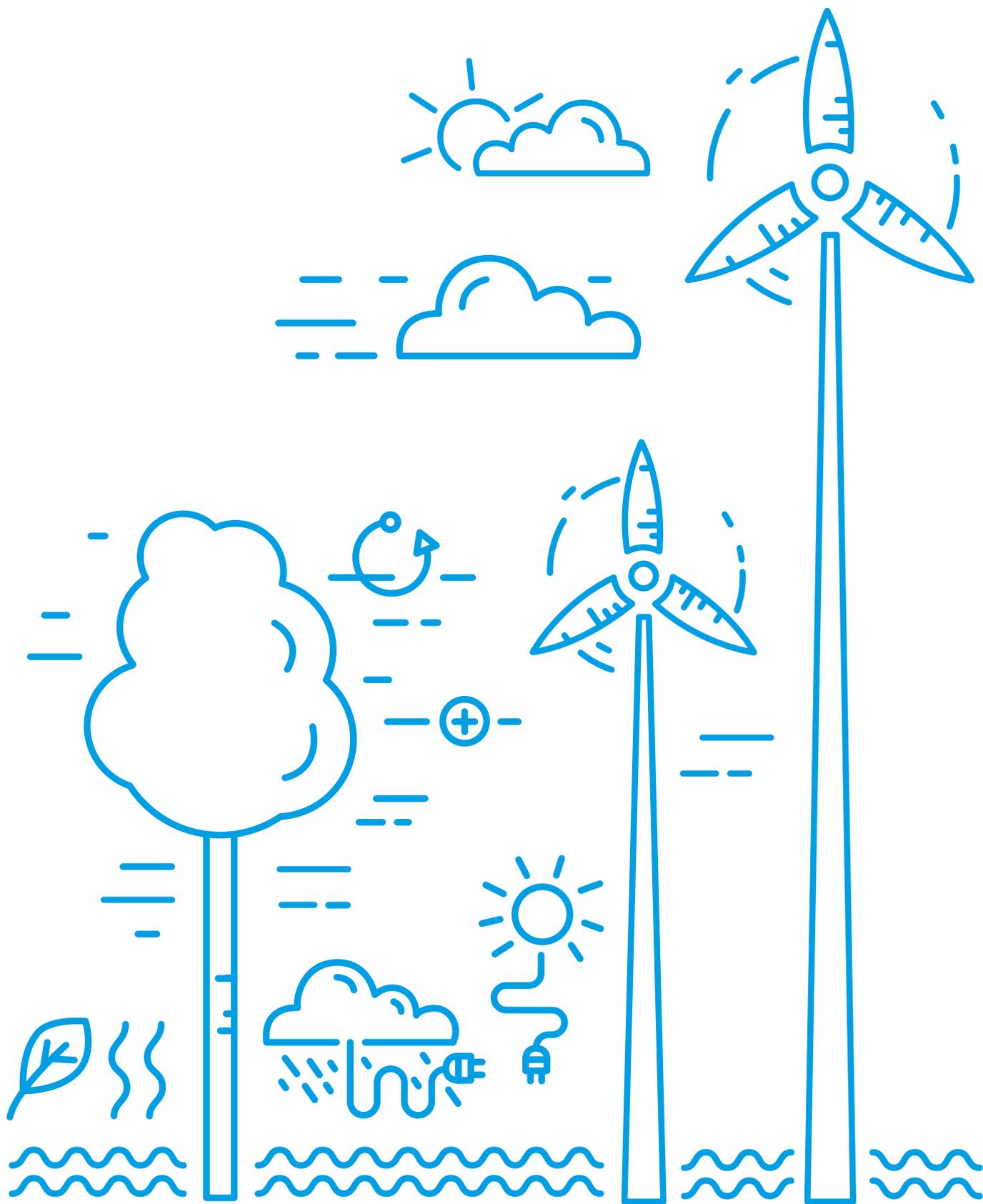
Baisse des émissions de CO₂ entre 2016 et 2050 en %

source ThreeME 2016



Les émissions de CO₂ diminuent respectivement de 72 % et 68 % dans les variantes 100 % EnRE et la variante 80 % EnRE, sur la période 2016-2050. Sachant que les émissions de CO₂ ont déjà diminué de 18 % par rapport à 1990, l'objectif du facteur 4 est atteint dans la variante 80 % EnRE et dépassé dans les autres.

- Visions + 100 % EnRE
- Visions + 100 % EnRE Acceptabilité modérée
- Visions + 80 % EnRE
- Tendanciel





CONCLUSIONS

La présente évaluation macro-économique d'un scénario de transition énergétique ambitieux, c'est-à-dire une division par 2 de la consommation finale d'énergie, compatible avec les objectifs de la LTECV pour 2050, combinée à un taux de pénétration des énergies renouvelables dans le mix électrique de 80 % à 100 %, montre un effet positif sur la croissance et l'emploi tout en augmentant le revenu disponible des français. Les impacts expansionnistes de la transition énergétique l'emportent sur ses effets récessifs. En 2050, dans le cadre d'une trajectoire de transition énergétique dite « Visions + 100 % EnRE », le PIB français serait de 3.9 % supérieur à celui du Tendancier, et l'économie française serait enrichie de près de 900 000 emplois. Ces effets expansionnistes sont par ailleurs probablement sous-estimés en raison d'hypothèses très conservatrices en termes de structuration des filières EnR françaises – avec une propension à importer constante à horizon 2050.

Trois variantes ont été étudiées, toutes basées sur un mix énergétique ambitieux, et se différenciant uniquement sur le vecteur électrique par le taux d'énergie renouvelable et leurs conditions de déploiement. Les résultats sont remarquablement similaires d'une variante à l'autre (avec un impact sur le PIB à l'horizon 2050 s'établissant entre 3,6 et 3,9 points), notamment parce que le niveau de la demande en énergie, par vecteur et par usage, est identique. Les mesures adoptées pour atteindre les cibles de consommation finale ont ainsi une incidence comparable sur le niveau de l'activité pour les trois variantes, et pour cause, les 4/5 des gains de PIB observés seraient dus aux investissements dans l'efficacité énergétique et seraient indépendants de la modification du mix.

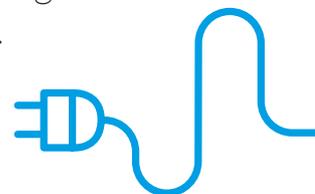
Passer d'un mix électrique de 80 % EnR à 100 % EnR n'aurait pas d'effet substantiel sur le niveau de la facture énergétique des ménages ou le PIB et

conduirait à une légère augmentation du nombre d'emplois totaux (les emplois perdus dans la filière nucléaire sont compensés par les créations d'emplois dans la construction et la production d'électricité renouvelable). Cela impliquerait également une augmentation des besoins d'investissement du secteur électrique d'environ 4 Mds€/an (un écart moyen par rapport au Tendancier de 12 Mds€/an en moyenne sur la période 2016-2050 pour la variante « Visions + 100 % EnRE », contre 8 Mds€/an pour la variante « Visions + 80 % EnRE ») nécessitant d'augmenter les capacités de financements. Le prix de l'électricité pour les consommateurs finaux, serait pour sa part en hausse de 3 %. En revanche, la décarbonation complète du système électrique, en portant la part EnR de l'énergie finale consommée de 69 % à 77 %, aboutirait à une plus forte réduction des émissions de CO₂ françaises, allant au-delà de l'objectif facteur 4, et à une indépendance énergétique accrue.

L'exercice montre par ailleurs que des contraintes fortes d'implantation sur les filières EnRE les moins coûteuses (éolien terrestre et PV au sol), aboutissant à développer du PV en toiture, des

énergies marines et de l'éolien en mer pour atteindre un mix électrique 100 % EnR, mèneraient à une augmentation plus importante du prix de l'électricité pour les consommateurs finaux (+28 points par rapport à la variante « Visions + 100 % EnRE » en 2050) ainsi que des besoins en investissements annuels plus importants (+15 Mds€/an par rapport au Tendancier sur la période 2016-2050). Les effets négatifs sur l'activité ne sont pas compensés par les gains d'emplois dans la construction et la production d'électricité renouvelable : on aboutit à un gain de PIB plus faible que pour les deux autres variantes. Ceci souligne l'importance de travailler à l'intégration territoriale des projets d'EnR.

Ces conclusions, en cohérence avec celles de l'étude « Mix élec 100 % EnR », invitent à promouvoir un système énergétique plus durable sur la base d'une analyse globale, prenant en compte l'ensemble des vecteurs, leurs possibles synergies et les retombées associées en termes d'émissions de gaz à effet de serre, de croissance, d'emploi, de revenu disponible des ménages et d'indépendance énergétique.





ANNEXES - DESCRIPTION DU MODÈLE THREEME

Pour apprécier les effets macroéconomiques des scénarios de transition énergétique, l'ADEME a utilisé le modèle ThreeME¹⁷, (Modèle Macroéconomique Multisectoriel d'Evaluation des politiques Energétiques et Environnementales) qu'elle a conjointement développé depuis 2008 avec l'Observatoire Français des Conjonctures Economiques (OFCE) et le centre hollandais de recherche scientifique appliquée (TNO, Netherlands Organization for Applied Scientific Research)¹⁸.

Il s'agit d'un modèle néo-keynésien du type « Offre Globale - Demande globale » comparable aux modèles couramment utilisés par les instituts de prévision conjoncturelle, comme EMOD de l'OFCE ou MESANGE de l'INSEE, à cette différence près qu'il est multisectoriel.

Un modèle multisectoriel néo-keynésien

ThreeME comporte 24 secteurs de production et 17 sous-secteurs énergétiques. C'est un modèle en économie ouverte. La variation des importations et des exportations de chaque

bien dépend des distorsions de prix relatifs entre les tarifs domestiques et étrangers. Pour simplifier, on suppose que les taux de change sont fixes.

¹⁷. G. Callonnec, G. Landa, P. Maillet, F. Reynes, Y. Yeddir Tamsamani. *A full description of the Three-ME model: Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy*, OFCE, 2013.
<http://www.ofce.sciences-po.fr/pdf/documents/ThreeME/doc1.pdf>

¹⁸. *A full description of the Three-ME model: Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy*, OFCE, 2013

Une approche multisectorielle nécessaire

Il est ainsi possible de faire apparaître les effets d'un transfert d'activité d'une branche à l'autre :

- ➔ **Sur l'emploi**, puisque les secteurs de production n'ont pas tous la même intensité en main d'œuvre
- ➔ **Sur la consommation énergétique**, puisqu'ils n'ont pas tous la même intensité énergétique
- ➔ **Sur la balance commerciale**, puisqu'ils n'ont pas tous la même propension à importer et à exporter.

Par exemple, une hausse des énergies renouvelables au détriment des centrales thermiques à flamme entraîne une augmentation de l'emploi - les premières étant plus intensives en main d'œuvre que les secondes - et une diminution des importations de combustibles fossiles.

De possibles arbitrages énergétiques

Pour modéliser les choix énergétiques des agents, 17 sous-secteurs énergétiques ont été identifiés.

Les entreprises réalisent des arbitrages énergétiques :

- ➔ Elles substituent du capital à l'énergie lorsque son prix relatif augmente.
- ➔ Elles peuvent substituer les sources d'énergies les unes aux autres.
- ➔ Il existe un progrès technique endogène (l'efficacité énergétique s'améliore lorsque les prix relatifs de l'énergie augmentent).
Les ménages font un choix entre investissements permettant des économies d'énergie ou non Parmi 3 classes de logements

Or la modification du contenu en emploi de l'économie exerce une influence directe sur la consommation et donc sur la demande, tout comme l'évolution du déficit extérieur. Toutes choses égales par ailleurs, leur variation se répercute sur le produit intérieur brut (le PIB) puisque cet agrégat est égal à la somme de la consommation C, de l'investissement I, des variations de stocks ΔS et du solde de la balance commerciale (X-M).

$$\text{PIB} = C + I + \Delta S + (X - M)$$

Si l'on admet que la demande n'est pas sans influence sur la production (voir infra), il est essentiel de modéliser finement l'influence des transferts sectoriels sur l'emploi et la balance commerciale, faute de quoi, le modélisateur s'expose à des biais de perspectives conséquents.

et de voitures.

- ➔ Leurs parts de marché varient en fonction de l'évolution des coûts d'usage (amortissement du prix d'achat, net des aides, et consommation d'énergie).
- ➔ Le taux de pénétration des véhicules électriques est supposé exogène.

Par ailleurs, ThreeME tient compte de l'effet de sobriété induit par la variation des prix : les ménages réduisent leurs dépenses de chauffage et de carburant lorsque les prix augmentent et inversement.

Le modèle ThreeME a la particularité d'être un modèle hybride : les investissements des agents (les flux) entraînent



une modification des parcs de véhicules et immobiliers (les stocks). La nature de ces parcs détermine directement la consommation d'énergie.

Contrairement aux purs modèles d'offre (d'inspiration néoclassique) les modèles néo-keynésiens comme ThreeME prennent en compte les effets rétroactifs de la variation de

la demande (consommation, investissement et balance commerciale) sur l'offre (la somme des valeurs ajoutées) et vice versa. Un modèle multisectoriel néo-keynésien peut donc faire apparaître, avec de moindres biais de prospective, l'influence de la transition énergétique sur la demande, et évaluer en retour son impact sur l'activité économique.

Une interaction dynamique entre l'offre et la demande

Les modèles néo-keynésiens font apparaître l'interaction dynamique qui existe entre l'offre et la demande:

➔ En admettant l'existence d'un financement par création monétaire (ce qui est une réalité depuis l'invention de la monnaie fiduciaire et scripturale)

➔ En postulant un ajustement lent des prix (cette approche est appropriée lorsque les agents sont en situation d'information imparfaite et/ou de concurrence oligopolistique).

Un effet d'éviction limité grâce à la création monétaire

L'une des grandes différences qui distingue les modèles Offre - Demande (néo-keynésien, en équilibre dynamique), des modèles d'Offre (walrassien, en équilibre statique) porte sur l'effet d'éviction entre investissements (voir encadré 1).

Dans ThreeME, les investissements ne sont pas seulement financés par l'épargne (autofinancement et crédit obligataire) mais aussi grâce au crédit bancaire, qui est une forme de création monétaire. Les crédits font les dépôts. Le financement d'un investissement par emprunt bancaire n'entraîne pas de hausse des taux d'intérêts sur le marché obligataire (sous réserve que la Banque centrale maintienne ses taux directeurs inchangés). La variation de la quantité de capital n'est donc pas bornée a priori¹⁹. Ainsi l'effet d'éviction entre investissements est limité.

Ex La hausse des investissements de rénovation énergétique des ménages ne débouche pas sur une baisse équivalente de leurs dépenses par ailleurs. Celles-ci diminuent d'un montant égal à la hausse des annuités de la dette induite par les travaux, moins la baisse des factures énergétiques obtenues.

Dans les modèles néo-keynésiens comme ThreeME, la hausse de L'investissement peut contrebalancer la « perte sèche » induite par l'instauration d'une taxe. En effet, dans les modèles d'offre purs, la hausse de la fiscalité entraîne une augmentation mécanique du prix des produits ou des facteurs qui y sont assujettis. Elle incite les agents à réaliser des investissements de substitution. Mais cela ne provoque pas une augmentation globale de la demande, puisque l'effet d'éviction est total. Or ces investissements sont a priori moins

¹⁹. L'épargne est fonction du revenu disponible des ménages, qui lui-même dépend du taux de croissance tendanciel de l'économie, qui à l'équilibre, est égal à la somme de deux facteurs exogènes : les gains de productivité et la croissance démographique



rentables que ceux auxquels ils se substituent, faute de quoi il n'aurait pas été nécessaire d'instaurer une taxe. Cela affecte négativement la demande et la croissance ; à moins que la taxe n'induisse une diminution des importations, soit parce qu'elle frappe essentiellement des produits importés, comme les combustibles fossiles par exemple, soit parce que le recyclage des recettes permet à l'Etat de réduire une taxe encore plus

distorsive, comme les cotisations employeurs, par exemple (voir encadré 1). Mais dans cas, le coût de la taxe est en partie supporté par le reste du monde. Dans le modèle ThreeME l'instauration d'une taxe énergétique est non seulement compensée par l'amélioration de la balance commerciale mais aussi par une hausse globale de la FBCF²⁰.

Encadré 1 : Les modèles d'offre, la perte sèche et le double dividende

Dans un modèle d'offre de type walrassien, l'investissement est exclusivement financé par l'épargne disponible. On suppose que les taux d'intérêt s'ajustent instantanément pour équilibrer ces deux variables (si une branche augmente ses investissements, les taux d'intérêts s'élèvent jusqu'à ce que l'investissement global des autres secteurs diminue du même montant). Donc, pour un niveau d'épargne donné, il n'est pas possible d'augmenter l'investissement d'une branche sans diminuer ceux des autres. L'effet d'éviction est total, sauf si la hausse des taux entraîne une entrée de capitaux en provenance de l'extérieur. On comprend pourquoi, d'après les néoclassiques, une relance par l'investissement public est inopérante. Cette hypothèse a une influence majeure sur l'estimation macroéconomique des effets de la lutte contre le réchauffement climatique.

C'est l'une des conditions de la validité de la loi de Jean Baptiste Say (1760) selon laquelle l'offre crée sa propre demande. En effet, si l'épargne, qui est égale aux revenus non consommés par les ménages et les profits non redistribués des entreprises, est entièrement mobilisée pour financer l'investissement, alors l'ensemble des revenus générés au cours du processus de production sont soit consommés, soit investis. L'offre est donc égale à la demande. L'épargne n'est

pas une fuite.

Grâce à ce postulat, les entreprises n'ont pas de problème de débouchés. Elles produisent donc au maximum de leurs capacités qui dépendent à la fois de la quantité de capital, de ressources naturelles, d'énergie et de main d'œuvre disponible. Grâce à la flexibilité des prix qui permet d'écouler les stocks non désirés, et grâce à la flexibilité des salaires qui permet de résorber le chômage, l'économie est systématiquement à l'équilibre de plein emploi. Le chômage est inexistant ou volontaire.

L'évolution de l'offre est donc prédéterminée par la variation de la quantité de facteurs de production disponible et de leur gain de productivité. Or la hausse de la quantité de capital dépend du montant de l'épargne, qui elle-même, à l'équilibre, varie comme les revenus, autrement dit l'offre. Elle aussi est prédéterminée. En revanche, la quantité de travail dépend de la croissance démographique, qui est exogène. L'équilibre est donc statique²¹. IL n'y a pas de variation endogène. Les fluctuations conjoncturelles ne s'écartent du taux de croissance tendanciel (égal à la somme des gains de productivité et du taux de croissance démographique) qu'en cas d'interventions intempestives de l'Etat ou de chocs →

20. La Formation brute de capital fixe en comptabilité nationale est égale à la somme des investissements.

21. De ce point de vue, il serait possible de faire abstraction des termes $\Delta S + (X - M)$ dans l'équation du PIB pour écrire simplement $PIB = C + I$ d'où $PIB - C = I$ et par conséquent $E = I$ l'épargne finance l'investissement. C'est la condition de validité de la loi de Jean Baptiste Say.



exogènes : progrès technologiques, catastrophe naturelle etc. Il suffit de contester le postulat selon lequel l'investissement et l'épargne ne dépendent que des seuls taux d'intérêt pour obtenir une dynamique endogène, influencée par le niveau de la demande anticipée, susceptible de générer une hausse durable du niveau du PIB à long terme.

L'instauration d'une taxe sur les combustibles entraîne alors une augmentation mécanique des prix. Le renchérissement du coût de l'énergie incite les agents à réaliser des investissements dans l'efficacité énergétique. Mais cela ne provoque pas une augmentation globale de la FBCF, puisque l'effet d'éviction est total. Or ces investissements sont a priori moins rentables que ceux auxquels ils se substituent, faute de quoi il n'aurait pas été nécessaire d'instaurer une taxe carbone. Le regain d'efficacité énergétique induit donc une baisse des profits et une hausse des prix qui débouche à la fois sur une diminution de la consommation réelle mais aussi sur une baisse de l'épargne et donc de l'investissement. Cela provoque une baisse de la demande et donc une chute de la production et des échanges.

A l'inverse, la redistribution des recettes fiscales aux entreprises, sous la forme d'une baisse des charges, peut favoriser leur croissance et compenser le déclin des secteurs frappés par la taxe. En effet, si la taxe carbone finance une baisse des cotisations employeurs des entreprises et /ou une baisse des taxes sur le capital, alors l'augmentation de la demande de travail et de capital peut compenser l'effet récessif d'une moindre utilisation de l'énergie. Cela n'est valable que si la taxe carbone se substitue à une taxe encore plus distorsive, de sorte que la quantité de facteur de production disponible à coût unitaire constant augmente.

A défaut, si la quantité de facteur de production disponible à bas coût est plus faible, en économie fermée, et a fortiori à l'échelle planétaire, les pertes des uns ne sont pas entièrement compensées par le gain des autres. On considère que les agents accusent une « perte sèche »²². En ce cas, toutes choses égales par ailleurs, l'instauration d'une taxe,

même redistribuée, se solde par une hausse des prix et une diminution du pouvoir d'achat.

A l'équilibre en concurrence pure et parfaite, il serait illusoire d'essayer de compenser une perte sèche par une politique budgétaire expansive, puisqu'au mieux, il existerait un effet d'éviction entre l'investissement public et l'investissement privé. L'épargne serait drainée par l'Etat au détriment des entreprises.

En économie ouverte, les modèles en équilibre statique nous enseignent qu'une taxe énergétique n'entraîne pas systématiquement une récession dans l'Etat qui l'instaure, si :

- Les importations d'énergies diminuent
- Les exportations augmentent grâce à la baisse des charges qui pèsent sur le travail et la compétitivité externe des entreprises

En ce cas le PIB augmente d'un montant égal à l'excédent de la balance commerciale moins la perte sèche. Cependant le PIB des partenaires commerciaux de l'économie considérée diminuera d'un montant équivalent à l'excédent de la balance commerciale. Si bien que le solde mondial restera négatif.

Fondamentalement, les modèles en équilibre statique opposent la prospérité économique globale au respect de l'environnement. Et pour cause, cette approche repose sur la conviction que l'activité économique dépend de la quantité de facteurs de production disponibles. Or la lutte contre le changement climatique implique obligatoirement une diminution du volume utilisé d'énergie fossile.

Cette analyse repose sur une logique de jeu non coopératif, à somme négative. Les économistes qui utilisent ces modèles parviennent à justifier la lutte contre le réchauffement en faisant valoir que les coûts de l'inaction seraient dans le futur bien plus élevés que les coûts d'une intervention précoce. Les politiques sont donc placés devant le choix cruel d'une cure

22. Théoriquement, une perte sèche peut provoquer une augmentation des pressions inflationnistes, une baisse des salaires réels et une réduction de l'offre de travail.

d'austérité immédiate, avec les effets récessifs identifiés plus haut, ou d'une crise climatique et énergétique dans un futur plus ou moins bien déterminé, aux effets potentiellement dramatiques. Lorsque l'on songe au fait que nul n'a avantage à prendre l'initiative le premier (sauf cas particuliers évoqués ci-dessus), et qu'une action isolée est inutile, on comprend à l'aune de ce discours, pourquoi l'intervention des Etats est lente et limitée.

En bref, le raisonnement en équilibre statique obéit systématiquement à une logique sacrificielle. Il oppose la préservation des équilibres écologiques de long terme à la maximisation de la prospérité économique à court et moyen terme.

L'effet multiplicateur

Dans un modèle néo-keynésien, l'investissement et donc l'offre de crédit, n'est pas prédéterminé par les sommes épargnées par les agents, il dépend de la rentabilité attendue des projets (cf. théorie de la Valeur Actuelle Nette)²³. Or celle-ci dépend de la demande anticipée (et/ou des gains d'économies d'énergies attendus dans le cas des investissements d'efficacité énergétique) et du coût de financement. Le stock de capital varie donc de façon endogène.

En retour, l'investissement influence la production (à court terme, la production de biens d'équipement augmente et à long terme, la quantité de capital productif s'accroît) et donc l'emploi.

La diminution du chômage débouche sur une augmentation de la consommation, ce qui rétroagit sur la demande anticipée. Il est donc possible de modéliser ainsi l'existence de cercles vertueux expansifs ou a contrario des cercles récessifs cumulatifs (cf. théorie du multiplicateur).

Dans ce schéma, une hausse de l'épargne des ménages n'entraîne pas une hausse de l'investissement (qui résulterait de la seule baisse des taux) mais une chute de la consommation, qui provoque une augmentation de la variation des stocks non désirée et/ou une contraction de la production et de l'emploi, qui restreint à nouveau la demande

et l'investissement.

A contrario, une augmentation de l'offre de monnaie (de crédit) via une baisse des taux d'intérêt décidée par la Banque centrale, entraîne une hausse de l'investissement, de la production, de l'emploi et donc de la demande anticipée, qui rétroagit positivement sur l'offre et accessoirement l'épargne. « La monnaie n'est pas neutre ». Il existe toujours une égalité comptable entre l'épargne et l'investissement mais celle-ci résulte non pas d'une fluctuation des taux d'intérêt mais d'une variation du PIB.

En bref, en équilibre général dynamique, lorsque l'offre de crédit (la création monétaire) est endogène et/ou lorsque la concurrence est imparfaite, les entreprises sont confrontées à un problème de débouchés (l'épargne est une fuite). Dans une telle situation d'incertitude, la production n'est pas déterminée par la quantité de facteurs disponibles (l'utilisation totale des facteurs de production), mais par la demande anticipée. Ce n'est pas seulement l'offre qui crée sa propre demande, l'inverse est également vrai. Dans ce cadre, il peut y avoir un équilibre de sous-emploi et des crises cumulatives. Ceci explique pourquoi les conjoncturistes utilisent des modèles néo-keynésiens. Ce sont les seuls capables de reproduire des fluctuations conjoncturelles réalistes. →

23. D'après la théorie de la Valeur Actuelle Nette, un investissement I est rentable si la somme des cash flows CF anticipés actualisés est supérieure au montant investi, autrement dit si la VAN est supérieure à zéro. $VAN = \sum \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I$. A l'équilibre $= \sum \frac{CF_t}{(1+r)^t}$. Les cash flows dépendent des ventes et donc de la demande anticipée. r est le coût moyen pondéré du capital qui dépend également des taux d'intérêt. On voit que les sommes investies ne dépendent pas seulement du coût du capital. Les taux d'intérêts ne peuvent plus équilibrer l'épargne et l'investissement,

si l'on suppose que ces deux variables dépendent aussi de l'évolution des revenus. En équilibre dynamique, soit les taux d'intérêt équilibrent l'offre et la demande de monnaie, soit ils sont fixés par la banque centrale et l'offre de monnaie s'ajuste instantanément à la demande de monnaie. Cette différence est importante puisqu'en pareil cas, il n'y a plus d'équilibre économique instantané entre l'offre potentielle et la demande anticipée.



Une relative viscosité des prix à court terme

Théoriquement, en cas de choc récessif, et pour un stock de capital donné, une parfaite flexibilité des prix, qui équilibrerait spontanément l'offre et la demande de biens, permettrait aux entreprises d'écouler les stocks non désirés et de rétablir l'équilibre de la balance commerciale afin de maintenir le niveau de leur production.

Là encore, la flexibilité des prix permet de maintenir l'équilibre de plein emploi si et seulement si elle n'a pas d'incidence négative sur l'investissement. C'est le cas dans les modèles d'offre pur où l'investissement ne dépend pas de la demande mais seulement de l'épargne²⁴. Ce n'est pas le cas, dans un modèle néo-keynésien. La déflation provoque une contraction de la valeur de la production. Ainsi pour des annuités inchangées, la baisse des prix entraîne une hausse du ratio charge de la dette sur chiffre d'affaire, autrement dit une augmentation des coûts unitaires du capital. Elle augmente le temps de retour des investissements réalisés dans le passé. Elle rend plus difficile l'amortissement des coûts fixes. La déflation accroît le volume de la dette²⁵. Elle réduit la rentabilité du capital et les profits, tout comme la capacité d'autofinancement des entreprises qui est une composante majeure de l'épargne. Si l'on considère que l'investissement dépend de la rentabilité du capital (autrement dit du volume de recettes attendues et du coût réel du capital), une baisse des prix entraînera une chute de l'investissement et donc une nouvelle baisse de la demande. Pour compenser la diminution des profits, les entreprises pourraient être tentées de réduire davantage les salaires. Mais si le pouvoir d'achat des ménages baisse, la consommation s'effondre, ce qui limite d'autant la production. Dans ce cadre, seul un regain de compétitivité à l'extérieur et une hausse des exportations pourrait relancer l'activité. Mais ce phénomène ne peut advenir qu'en système de change fixe, et si nos partenaires commerciaux eux-mêmes sont épargnés par la déflation.

Quoi qu'il en soit, en situation de concurrence imparfaite, les oligopoles, pour maximiser leurs profits, ont intérêt à ajuster les quantités produites aux variations de la demande,

plutôt que leurs prix (Robinson, Chamberlin, 1933²⁶). C'est pourquoi, les modèles néo-keynésiens supposent que les entreprises appliquent une marge, plus ou moins flexible, à des coûts unitaires de production (théorie du mark up, Okun, 1981²⁷). Dans ce cadre, les prix n'ajustent pas instantanément la demande à l'offre.

Les salaires ne s'ajustent pas spontanément pour équilibrer l'offre et la demande de travail. Cela reviendrait à considérer que plus les salaires sont élevés et plus nombreux sont les individus à proposer leur service sur le marché. A l'inverse, la baisse des rémunérations entraînerait une chute de l'offre de travail volontaire. Cette approche néglige le fait que la grande majorité des personnes en âge de travailler sont obligées de le faire pour subvenir à leurs besoins, quel que soit le salaire moyen proposé. C'est pourquoi on postule que la variation de l'offre de travail dépend à la fois d'un taux de flexion (lorsque le chômage augmente, certaines personnes découragées se retirent du marché de l'emploi) mais aussi de la croissance démographique. La variation des salaires dépend à la fois de l'inflation, des gains de productivité et de l'évolution du chômage (courbe Wage Setting) voire du niveau du chômage (Théorie de la courbe de Philipps)²⁸ puisque celui-ci n'est pas sans incidence sur le pouvoir de négociations des partenaires sociaux.

Dans les modèles néo-keynésiens, les taux d'intérêt n'équilibrent pas instantanément l'épargne et l'investissement, puisque ces deux variables dépendent non seulement de la rémunération du capital mais aussi des revenus attendus. On suppose donc pour simplifier que les taux d'intérêt sont fixés par la banque centrale en fonction des évolutions du taux d'inflation et du taux de chômage (règle de Taylor). Ils influencent la demande d'investissement (puisque les entreprises déterminent le niveau désiré de leur capital en fonction de la demande anticipée et compte tenu de la distorsion de prix relatifs entre capital et travail, pour minimiser leurs coûts et maximiser leurs profits) et l'on suppose que l'offre de crédit s'y ajuste spontanément.

24. L'équilibre walrassien n'est vérifié que si il existe une flexibilité concomitante des taux d'intérêt, qui équilibrent l'épargne et l'investissement ; des prix sur le marché des biens et services et des salaires sur le marché du travail qui permettent d'équilibrer instantanément l'offre et la demande.

25. En change flexible, la déflation peut provoquer une appréciation de la monnaie qui peut contrebalancer le poids de la dette libellée en devise étrangère.

26. J. Robinson, *The Economics of Imperfect Competition*, London: Mac Millan, 1933.

E.J. Chamberlain, *The Theory of Monopolistic Competition*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press. 1933.

27. A. Okun, *Prices and quantities: a macroeconomic Analysis*, Oxford, Basil Blackwell. 1981.

28. Reynès, F., 2010 *The Phillips curve as a more general model than the Wage Setting curve* OFCE Working paper, n°28.

Le double dividende de la fiscalité environnementale

Dans ce cadre théorique, il est possible de montrer que l'instauration d'une taxe environnementale génère un double dividende écologique et économique : la perte sèche évoquée plus haut peut être non seulement compensée par une amélioration de la balance commerciale et/ou une baisse des charges qui pèsent sur le travail ou le capital, financée par les recettes de taxes ; mais aussi par les gains macroéconomiques induit par une éventuelle augmentation de la demande.

Sachant que les investissements d'efficacité énergétique, induits par la fiscalité environnementale des entreprises comme des ménages, sont essentiellement financés à crédit, ils ne se substituent pas intégralement aux autres. La substitution capital énergie débouche donc sur une augmentation globale des investissements en général (la formation brut de capital fixe, FBCF) puisque l'effet d'éviction est partiel. La demande croît et les débouchés des entreprises se développent : la demande influence l'offre.

Cela entraîne une hausse de la production (sous l'effet à la fois de l'augmentation du stock de capital productif et de l'augmentation des ventes des fournisseurs de biens d'équipement) et une diminution des importations d'énergie, qui génère une hausse de l'emploi et donc de la consommation : l'offre influence la demande.

Une spirale expansive s'enclenche à court terme. Toutefois, à long terme, le remboursement de la dette induite par le financement de l'investissement exerce un effet récessif sur l'économie (la masse monétaire se contracte).

Si la somme des revenus directs générés par l'investissement et si les revenus indirects induits par l'effet multiplicateur sur l'emploi et l'évolution de la balance commerciale couvrent la charge de la dette, alors la hausse du PIB sera durable. A l'inverse, si les investissements ne sont pas rentables (les VAN sont négatives) et si leurs pertes ne sont pas compensées par ailleurs par les effets d'entraînement positifs qu'ils ont exercés sur le reste de l'économie, alors la baisse du PIB sera durable.

Ex L'instauration d'une taxe carbone incite les consommateurs à privilégier les modes de transports les moins carbonés : comme par exemple délaissé la route au bénéfice du rail. L'usage des automobiles diminue mais la consommation de transports collectifs augmente. Or le contenu en emploi des chemins de fer est supérieur à celui du trafic routier. Cela entraîne une contraction du chômage qui rétroagit aussi positivement sur la demande. Dans un modèle d'offre, cet effet aurait été au moins en partie compensé par une diminution tendancielle du taux de profit, qui aurait réduit le taux d'épargne et donc l'investissement, si bien que la demande serait restée stable. Dans le cas d'un modèle offre demande, où l'épargne ne finance pas l'investissement, les créations d'emplois liées au transfert d'activité des secteurs énergivores vers les secteurs sobres exercent un effet multiplicateur positif sur l'économie.

En théorie, à l'équilibre de plein emploi, les modèles néo-keynésiens retrouvent des propriétés néoclassiques. Le sentier de croissance devient parfaitement stable. Le taux de croissance du PIB revient au niveau qu'était le sien avant l'intervention de l'Etat. Mais le niveau du PIB est supérieur.



Cas de la transition énergétique

La transition énergétique implique non seulement l'instauration d'une contribution climat énergie, la réalisation d'investissement d'efficacité énergétique mais aussi une modification du mix énergétique.

Le raisonnement appliqué aux investissements d'efficacité énergétique ne vaut pas pour les investissements liés à la modification du mix. En effet, pour une demande donnée et un instant t , l'augmentation de la puissance installée d'énergie renouvelable sera au moins partiellement compensée par une diminution de la puissance installée des énergies non renouvelables. La hausse des investissements dans les filières vertes devrait donc s'accompagner d'une diminution des investissements dans les énergies carbonées (le raisonnement est aussi valable entre les divers modes de transport). Il existe donc un effet de substitution conséquent, indépendamment du mode de financement de ces équipements. Le regain d'investissement dans les énergies renouvelables ne devrait donc pas exercer un fort effet d'entraînement à court et moyen terme, sauf si la propension à importer les biens d'équipements dans les secteurs de production d'énergie renouvelable est inférieure à la propension à importer les biens d'équipements dans les secteurs de production d'énergie non renouvelable. Ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

En revanche, la substitution des énergies renouvelables aux autres devrait augmenter le contenu en emploi de la branche et déboucher sur une baisse sensible de nos importations de combustibles fossiles. Cela devrait avoir un effet expansif.

Néanmoins, la hausse du prix de l'énergie qui pourrait en résulter, au moins à court et moyen terme, pourrait exercer un impact récessif sur l'activité, essentiellement via une baisse de la compétitivité externe et interne car les entreprises devraient répercuter cette hausse sur leur prix de vente. Cela pourrait donc contrebalancer au moins en partie l'effet expansif lié à la variation de l'emploi et des importations de fossiles. Cela dit au niveau macroéconomique, les coûts des uns sont les gains des autres. Toutes les recettes liées à la production

d'énergie renouvelable seront redistribuées aux agents (et en définitive aux ménages) via les dépenses du secteur (salaires, consommations intermédiaires, investissement, dividendes) sauf celles qui serviront à l'achat de biens importés et une partie de la charge de la dette (qui sert au refinancement des banques auprès de la Banque Centrale). L'augmentation de la production d'énergie renouvelable et du coût de l'énergie ne devrait donc pas affecter négativement le revenu disponible moyen des ménages net de leur facture énergétique, sauf si la propension à importer et le coût du capital des filières vertes sont supérieurs au secteur des énergies non renouvelables.

Si les effets expansifs l'emportent sur les effets récessifs et que la somme cumulée des gains de PIB couvre le remboursement des annuités de l'emprunt, alors le niveau du PIB restera durablement supérieur à ce qu'il aurait été en l'absence de transition. A l'inverse, si les effets récessifs l'emportent sur les effets expansifs, les entreprises devront augmenter leurs prix et l'Etat devra augmenter les taxes pour rembourser leurs dettes respectives, ce qui affectera négativement et durablement la demande.

En définitive, les effets macroéconomiques de la transition énergétique vont dépendre

- ➔ De l'**effet de la baisse de la demande d'énergie** sur la balance commerciale
- ➔ De la **réduction** de production d'énergie
- ➔ Des **effets de la hausse du coût unitaire** de production des entreprises sur les prix et la demande interne et externe
- ➔ Des **modalités de la redistribution** des recettes fiscales environnementales
- ➔ De la **modification du taux de profit** dans l'économie si elle a une incidence sur l'offre de crédit et donc la quantité de capital disponible, (ce qui n'est pas le cas dans la version de ThreeME utilisée actuellement).

- ➔ De la **variation de l'emploi**
- ➔ Et de la **modification de la propension** à importer/exporter des diverses filières

La calibration du modèle

Pour faire correctement la part des choses entre les effets récessifs et les impacts expansifs à l'œuvre, il est essentiel de calibrer soigneusement le modèle.

Le modèle est calibré sur plusieurs bases de données :

- ➔ **Tous les paramètres et variables** des équations macroéconomiques sont calibrés sur les tableaux de la comptabilité nationale (TES et TEE) de l'INSEE à l'année de base²⁹.
- ➔ **Les dépenses des ménages** sont calibrées sur les données INSEE.

- ➔ De **l'influence des prix de l'énergie** sur les investissements d'efficacité énergétique et leur rentabilité.

- ➔ **Les coûts et le nombre des travaux de rénovation** sur la base OPEN (le prix induit du saut de classe est égal à 264€/m²).
- ➔ **Les prix et parts des différentes classes de véhicules** sur données du Car labelling de l'ADEME³⁰.
- ➔ **Les consommations d'énergies** du secteur du transport sur les Comptes des Transports³¹
- ➔ **Les consommations d'énergies et les émissions de CO₂** de l'industrie sur les données du CEREN.
- ➔ Toutes les variables sont paramétrées sur l'année 2006.

Comptabilisation des emplois dans le modèle ThreeME

Les emplois sont affectés aux divers secteurs selon les règles en vigueur dans la comptabilité nationale :

- ➔ Ainsi, **les emplois liés à l'exploitation de l'équipement** sont affectés au secteur concerné. (maintenance des éoliennes, production d'électricité éolienne)
- ➔ **Les emplois liés à l'investissement** (FBCF, formation brut de capital fixe, comme la construction de l'éolienne) sont imputés aux fabricants du bien d'équipement.

- ➔ **En comptabilité nationale** (dans le TES 2006) seuls les secteurs : agricole (en l'occurrence la sylviculture), automobile, autres industries (la métallurgie, fabrication de biens d'équipements, etc.) Bâtiment Travaux Publics et services marchands satisfont les besoins de FBCF des autres secteurs. L'emploi induit par les investissements d'une branche va donc dépendre de leurs montants et de l'intensité en emploi de son fournisseur. Les contenus en emplois des branches sont donnés de l'INSEE. Nous n'avons formulé aucune hypothèse sur ce point.

29. http://www.insee.fr/themes/comptes-nationaux/default.asp?page=archives/archives_cnat_annu.htm

30. <http://carlabelling.ademe.fr/>

31. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-densemble/1924/874/ensemble-comptes-transports.html>



➔ **Pour l'installation**, le traitement est différencié selon les secteurs :

- si le fournisseur installe lui-même l'équipement au profit de l'exploitant (ex : la branche métallurgie fabrique livre et installe une turbine pour la branche énergie), les emplois liés à l'installation seront imputés au fabricant de bien d'équipement et non à la branche énergie car en comptabilité l'exploitant inscrit la totalité de la dépense (frais d'installation inclus) dans ses dépenses d'investissement (son poste FBCF). Ceci explique pourquoi il y a très peu d'emplois dans les réseaux de chaleur, on les retrouve dans le BTP.

- En revanche, si la branche installe elle-même les équipements, alors les emplois lui seront imputés car l'opération sera inscrite comme une dépense salariale interne. Elle est donc comptabilisée comme une dépense de maintenance et d'exploitation. (c'est l'une des raisons pour lesquelles, en comptabilité nationale, la FBCF de la branche électricité est très faible en 2006.) Les créations d'emplois liés à l'augmentation du nombre d'installation vont donc dépendre de l'intensité en emplois de l'exploitant (et des gains de productivité du travail).

- **Pour les énergies renouvelables électriques**, pour plus de clarté, les dépenses d'installation sont inscrites en dépenses de maintenance plutôt qu'en dépenses d'investissement. Ainsi tous les emplois liés à l'installation (panneaux PV et éolienne) sont affectés aux sous-secteurs énergétiques, (autrement dit pour ThreeME, un installateur de panneaux photovoltaïques n'est pas un couvreur zingueur, l'emploi est comptabilisé dans la branche énergie et non plus dans le bâtiment). Nous avons réduit le montant initial des investissements des secteurs ENR en conséquence, de sorte que l'emploi induit chez les fabricants d'équipement n'augmente pas en parallèle. Il n'y a donc pas de double compte.

➔ Pour les frais de raccordement, de distribution et de réseau dans la branche électricité,

- les emplois liés au raccordement des nouvelles installations au réseau sont affectés au sous-secteur bénéficiaire. (ex : le raccordement d'un panneau solaire au réseau est un coût pour le sous-secteur solaire, et les emplois correspondants lui sont affectés)

- les emplois liés à l'entretien du réseau sont ventilés entre les différents sous-secteurs au prorata de la part de leur production dans celle de la branche.

- pour l'électricité, les marges commerciales (et les emplois liés à la distribution) sont ventilées entre les différents sous-secteurs au prorata de la part de leur production dans celle de la branche.

➔ Pour les frais de distribution et de réseau pour la chaleur et de combustibles gazeux et les produits pétroliers,

- Lorsque la distribution est assurée par le secteur transport de marchandises et la branche commerce (ex des stations-services des grandes surfaces commerciales), les emplois liés à la distribution sont comptabilisés dans ces secteurs. La ventilation est donnée par la comptabilité nationale.

En bref :

➔ Les emplois liés à la fabrication des biens d'équipements ne sont pas comptabilisés dans la branche énergie.

➔ Les emplois liés à l'installation des biens d'équipements ne sont pas comptabilisés dans la branche énergie sauf si elle procède elle-même à l'installation.

➔ Les emplois liés aux frais de distribution et d'entretien du réseau assurés par des prestataires extérieurs ne sont pas comptabilisés dans la branche énergie.

AUTEURS

Le pilotage de l'évaluation macro-économique a été réalisé par l'ADEME. La modélisation des retombées macro-économiques a été réalisée par l'OFCE.

ÉVALUATION MACRO-ÉCONOMIQUE

Gaël Callonnec

Économiste au Service Économie et Prospective, de l'ADEME

Guilain Cals

Économiste au Service Réseaux et Energies Renouvelable, de l'ADEME

Marie-Laure Nauleau

Économiste au Service Économie et Prospective, de l'ADEME

Aurélien Saussay

Économiste à l'OFCE

Fredéric Reynes

Économiste à l'OFCE

Gissela Landa

Économiste à l'OFCE

Paul Malliet

Économiste à l'OFCE



L'OFCE est un organisme indépendant de prévision, de recherche et d'évaluation des politiques publiques, accueilli en son sein par la Fondation nationale des sciences politiques. « Mettre au service du débat public en économie les fruits de la rigueur scientifique et de l'indépendance universitaire », telle est la mission de l'OFCE qu'il remplit en conduisant des travaux théoriques et empiriques, en participant aux réseaux scientifiques internationaux, en assurant une présence régulière dans les médias et en coopérant étroitement avec les pouvoirs publics français et européens. L'OFCE couvre la majeure partie des champs de l'analyse économique : la macroéconomie, la croissance, les systèmes de protection sociale, la fiscalité, les politiques de l'emploi ou encore le développement soutenable, la concurrence, l'innovation et la régulation.



L'ADEME EN BREF

L'ADEME est l'opérateur de l'État pour accompagner la transition écologique et énergétique. C'est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) placé sous tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'ADEME met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre, et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

www.ademe.fr

