



HAL
open science

Macroéconomie des transitions énergétiques Explorations dans le cas français par la mise en oeuvre d'un modèle réduit

Frédéric Gherzi, Adam Poupard, Julien Lefevre

► **To cite this version:**

Frédéric Gherzi, Adam Poupard, Julien Lefevre. Macroéconomie des transitions énergétiques Explorations dans le cas français par la mise en oeuvre d'un modèle réduit. CIREN/SMASH. 2024. hal-04384918

HAL Id: hal-04384918

<https://hal.science/hal-04384918v1>

Submitted on 10 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Macroéconomie des transitions énergétiques

Explorations dans le cas français par la mise en œuvre d'un modèle réduit

Frédéric Gheresi^a, Adam Poupard^b, Julien Lefèvre^c

^a CNRS, CIRED, 45 bis avenue de la Belle Gabrielle, 94736 Nogent-sur-Marne CEDEX.
frederic.ghersi@cnrs.fr

^b Ecole Polytechnique, CIRED, 45 bis avenue de la Belle Gabrielle, 94736 Nogent-sur-Marne CEDEX.

^c AgroParistech, CIRED, 45 bis avenue de la Belle Gabrielle, 94736 Nogent-sur-Marne CEDEX.

9 janvier 2024

Introduction

Parce qu'elle nécessite une forte granularité afin de capturer les influences de solutions techniques diffuses, l'évaluation économique des transitions énergétiques est généralement produite par des modèles de plusieurs centaines, voire milliers d'équations et variables. Cette profusion nuit à la compréhension des mécanismes les plus déterminants en matière de résultats numériques, en particulier macroéconomiques, et prête le flanc à des accusations de 'boîte noire' valant facilement disqualification. La mise en œuvre de modèles réduits, ou maquettes, à des niveaux d'agrégation très supérieurs à ceux des modèles ainsi mis en cause, offre la possibilité de clarifications de ces mécanismes.

L'objectif de ce document est ainsi de croiser, dans un modèle extrêmement ramassé, un certain nombre d'options de modélisations renvoyant explicitement ou non aux grands paradigmes de la théorie économique, afin de mettre en lumière leur influence sur l'évaluation des conséquences macroéconomiques de la transition énergétique. Parmi ces croisements d'options, on identifiera ceux qui correspondent le plus aux modèles ThreeME (ADEME, OFCE) et IMACLIM (CIRED) mis en œuvre pour l'évaluation de la transition énergétique française.

Une première section (Section 1) introduit quatre axes jugés majeurs de différenciation des modélisations macroéconomiques de la transition, et propose quelques interprétations sur la manière dont différentes options, sur chacun de ces axes, devraient influencer l'évaluation. Une seconde

section (Section 2) présente succinctement les modèles mobilisés pour l'exploration numérique de scénarios prospectifs dont les caractéristiques principales sont abordées dans une troisième section (Section 3). Les sections 4 à 7 proposent successivement des évaluations quantitatives de l'influence respective de chacun des quatre axes de différenciation définis en Section 1. Une conclusion synthétise les principaux enseignements de ces explorations en trois propositions.

1. Options de modélisation

Cette première section introduit quatre grandes catégories d'options s'offrant au modélisateur des transitions énergétiques, dont la pratique des auteurs de ce rapport et les simulations rapportées dans sa suite suggèrent l'importance. Deux premières catégories d'options, d'essence macroéconomique, concernent le bouclage, ou 'clôture' (*closure*), investissement-épargne et la dynamique du capital. Deux catégories d'essence microéconomique concernent la substituabilité des facteurs primaires aux consommations d'énergie et les spécifications de marchés.

1.1 Clôture investissement-épargne

Les options de clôture macroéconomique sont des déterminants peu identifiés de l'évaluation de l'impact des transitions énergétiques en économie ouverte. En ignorant les variations de stocks, on peut les exprimer à partir de l'identité comptable investissement-épargne $S = I + B$, où l'on note S l'épargne nationale, I les investissements domestiques et B le commerce net de biens et services (la balance commerciale), dont l'opposé constitue donc l'épargne importée nette. Bien que l'écrasante majorité des modèles considèrent ces trois agrégats comme endogènes, ils ne peuvent piloter le comportement que de deux d'entre eux, et doivent laisser le troisième s'ajuster de manière à respecter l'identité précitée.

L'approche dominante en matière de modélisation multisectorielle, celle dite « d'équilibre général calculable », consiste à prédéfinir un comportement à la balance commerciale B , avec l'intention de contrôler le recours à l'endettement extérieur¹. C'est celle du paradigme néoclassique², qui fixe aussi le taux d'épargne nationale, qu'il soit exogène dans les modèles dits dynamiques récursifs, ou endogène dans les modèles d'optimisation intertemporelle, et laisse donc l'investissement clore l'équilibre. C'est aussi celle de l'option attribuée à Johansen (1960)³, qui fixe plutôt l'effort d'investissement et clôt par le taux d'épargne domestique, supposé piloté par les politiques publiques. Une troisième approche, représentée en France par le modèle IMACLIM-S⁴, consiste à définir des

¹ Comme une part du PIB ou un montant en monnaie constante, auxquels on définit une trajectoire, le plus souvent de convergence vers l'équilibre à moyen terme.

² Employé par les modèles d'évaluation des politiques climatiques EPPA (MIT), AIM (NIES), ENGAGE ou IGEM.

³ Employé par le modèle ENV-LINKAGE de l'OCDE par exemple.

⁴ Ou, à l'étranger, par les modèles GEM-E3, ICES, et REMIND de l'IAMC ou le modèle DART de l'IfW de Kiel. Le cas du modèle ThreeME n'a pas pu être totalement éclairci. Dans ThreeME, la balance commerciale est dictée par les inerties des prix des facteurs, donc du TCER (hypothèse de prix rigide) ; l'effort d'investissement procède de la demande des secteurs, fonction elle-même de l'activité anticipée, avec inerties et substitutions ; l'épargne domestique, enfin, résulte de la somme de l'épargne des ménages, fonction du taux d'emploi et du revenu réel, et du solde budgétaire public, fonction de variations d'assiettes et de taux qui semblent indépendantes de toute contrainte de bouclage. Des variations de stock pourraient enregistrer les déséquilibres liés à l'apparente

comportements d'épargne et d'investissement et à ne pas contraindre l'épargne importée, donc à laisser à cette épargne la possibilité de combler l'écart entre investissement et épargne domestique.

Cette troisième option de clôture ne doit pas être sur-interprétée. Ce n'est bien que de manière 'ex post' c'est-à-dire tous effets d'équilibre général pris en compte, y compris ceux gouvernant la sensibilité des exportations et importations de biens et services aux prix, mais aussi ceux concernant les rétroactions du niveau d'activité sur l'investissement et l'épargne, qu'est déterminé l'équilibre commercial. En dernier ressort, c'est essentiellement par contraste avec l'approche néoclassique d'une 'clôture sur I' ' que l'on peut parler, pour de tels modèles, de 'clôture sur B' ', alors que cette 'clôture sur B' ' modélise des rétroactions et interdépendances ignorées dans le cas d'une 'clôture sur I' ', où la causalité épargne-investissement est effectivement à sens unique.

Point d'importance, la clôture néoclassique présente la caractéristique, comparée aux deux autres options, de 'rabattre' sur le PIB ou la production domestique l'ensemble des conséquences macroéconomiques du choc modélisé, en neutralisant ses conséquences sur l'endettement extérieur et le taux d'épargne — en garantissant, en dernier ressort, le maintien de la structure de cet indicateur central. La clôture sur le taux d'épargne induit quant à elle des évolutions divergentes du PIB et de la consommation des ménages, qui doivent alors systématiquement être rapportées toutes deux. De manière encore plus déterminante, la clôture sur l'excédent commercial induit des variations distinctes du PIB et de l'endettement extérieur, sur lesquelles l'évaluation ne peut faire l'impasse.

1.2 Inventaire perpétuel néoclassique versus 'keynésien'

Les textes fondateurs d'une modélisation de l'accumulation du capital par l'investissement (Ramsey, Solow) proposent des spécifications en temps continu. À partir des années 1960, le développement des puissances de calcul numérique permet la mise en œuvre de modèles multisectoriels en temps discret. Les premières applications retiennent alors des formulations qui envisagent une période de retard entre décision d'investissement et disponibilité du stock de capital :

$$K_{t+1} = (1 - \delta)K_t + I_t \quad (0a)$$

Notamment, le standard de modélisation en équilibre général dynamique récursif qui finit par émerger des applications développées en particulier à la Banque Mondiale, retient cette hypothèse. Le principal effet en est d'exogénéiser le stock de capital disponible à chaque pas de temps de la modélisation, donc de favoriser la modélisation d'un effet d'éviction entre activités économiques confrontées à une dotation en facteur capital finie.

Cependant, les modèles alternatifs néo- ou post-keynésiens formulés en temps discret, tels le modèle ThreeME, font plutôt l'hypothèse d'une transformation instantanée de l'investissement en facteur de production :

$$K_{t+1} = (1 - \delta)K_t + I_{t+1} \quad (0b)$$

surdétermination (comme c'est le cas dans le modèle GEMMES de l'AFD, où leurs évolutions rétroagissent sur les prix des biens et services), mais sont strictement indexées sur la production potentielle — donc ont aussi un comportement propre. Les rapports de simulation du modèle produits dans le cadre de la commission Pisani-Ferry affichent un « contrôle comptable » de l'écart entre PIB à prix courants calculé côté emplois et côté ressources. L'écart approche 0,5% pour certaines années du scénario SNBC3, potentiellement compatible avec une surdétermination du modèle acceptée par un degré raisonnable de convergence de ses spécifications.

Cette alternative présente la caractéristique manifeste d'endogénéiser le stock de capital à chaque pas de temps d'un modèle récursif, donc, a priori, de favoriser l'obtention d'un effet de relance par l'investissement.

1.3 Coûts et bénéfices microéconomiques des opérations de décarbonation

Les coûts macroéconomiques d'une transition énergétique ne peuvent manquer de dépendre, au premier ordre, de l'équilibre entre coûts et bénéfices obtenus de chacune des opérations de décarbonation. Du côté de la demande d'énergie, la modélisation met ainsi en balance hausses de coûts d'intrants non-énergétiques (au premier rang desquels le capital) et baisses des facturations d'énergies carbonées. Dès le second rapport du GIEC (1995), microéconomistes et ingénieurs s'opposent quant à la possibilité d'opérations à coûts négatifs, dites 'sans regret', c'est-à-dire dont les bénéfices surpassent les coûts de mise en œuvre : de telles opérations sont exclues pour les premiers, du fait de l'optimisation des comportements des agents ; elles sont largement répandues pour les seconds, qui comparent les meilleures technologies disponibles à celles effectivement en œuvre dans la société.

Au niveau macroéconomique, cependant, les économistes rejoignent le point de vue des ingénieurs en constatant des gains d'efficacité énergétique indépendants de l'évolution des prix relatifs. Ces gains sont incompatibles avec les fonctions de production couramment utilisées dans les modèles d'équilibre général calculable depuis les premières analyses quantitatives multisectorielles énergie/économie des années 1970. Les modélisateurs les introduisent donc sous forme d'"améliorations autonomes de l'efficacité énergétique" (en anglais, AEEI) opérant de manière analogue aux gains de productivité postulés sur les facteurs primaires travail ou capital (Yates, 1995). Le découplage entre production et consommations d'énergie est dès lors obtenu, pour part, par la pénétration de ces gains, sans aucune contrepartie d'intensification en autres intrants de production.

Les estimations d'AEEI s'échelonnent de 0 à 2% par an selon les régions, les secteurs d'activité, et les niveaux de désagrégation (Antimiani et al., 2015 ; Grubb et al., 1993 ; IPCC, 2014 ; Löschel, 2002). Le paramètre semble devoir suivre une course décroissante puis croissante pour les pays en développement qui doivent encore passer par une phase d'industrialisation avant d'enregistrer des améliorations de l'efficacité des procédés industriels et un nouveau changement structurel vers les activités de service, en moyenne moins énergivores (Schmalensee et al., 1998).

Aucune estimation récente ne semble disponible pour la France. Il faut cependant souligner que les données collectées par la DGEC concernant les potentiels techniques de décarbonation affichent souvent des bilans économiques favorables. Ces données, reprises dans les modèles ThreeME comme IMACLIM, expliquent pour partie leurs évaluations d'une transition à coût négatif.

1.4 Spécifications des marchés

Les spécifications de marchés forment l'un des grands axes de différenciation des modèles macroéconomiques. Le standard d'inspiration néoclassique utilisé par défaut dans les modèles d'équilibre général calculable (MEGC) est celui d'une résolution d'équilibre par l'ajustement libre et instantané des prix. Par opposition à ce standard, tout obstacle à la libre fixation des prix définit une modélisation d'inspiration keynésienne, que l'usage néoclassique désigne comme 'en marchés imparfaits'.

Un cas extrême de spécification keynésienne consiste à fixer le prix d'un marché et à en garantir l'équilibre par l'ajustement des volumes d'offre et/ou de demande. Un continuum de cas intermédiaires entre cet extrême et une spécification néoclassique consiste à modéliser des fluctuations simultanées des prix et des écarts entre offre et demande en volume. On peut schématiser de tels cas intermédiaires comme des spécifications établissant que les prix de marché sont isoélastiques à l'excédent d'offre. Cette schématisation vaut aussi, dans une certaine limite, pour les spécifications dynamiques considérant une inertie à la fixation des prix en liant les prix d'un équilibre à ceux d'un ou de plusieurs équilibres précédents⁵.

Ces options de spécifications valent pour l'ensemble des marchés décrits par un modèle. Les marchés de facteurs primaires, en particulier, sont modélisés imparfaits par les modèles d'inspiration keynésienne. Le déséquilibre entre offre et demande correspond alors au chômage pour le marché du travail, à la sous-utilisation des capacités pour le marché du capital. Le niveau du déséquilibre agit sur le prix d'équilibre du facteur, salaire pour le travail, 'prix de location' ou taux de marge (selon les modèles) pour le capital.

Les marchés des biens peuvent aussi être modélisés imparfaits par la prise en compte de variations de stocks : l'équilibre entre emplois (consommations, exportations) et ressources (production, importations) est obtenu soit par l'accroissement, soit par la diminution d'un stock préexistant. Afin d'éviter des variations de stock univoques, peu soutenables dans le long terme, on peut faire rétroagir le niveau du stock sur le taux de marge prélevé⁶.

Enfin, la balance commerciale elle-même constitue un marché dont les spécifications sont sujettes aux mêmes options. Dans un cadre néoclassique, qu'elle soit définie par clôture ou que son équilibre soit contraint (voir Section 1.1), en l'absence de modélisation de la monnaie c'est l'ajustement du taux de change effectif réel — TCER : le rapport des indices des prix à la consommation et à l'importation — qui permet, par le jeu des élasticités d'importation et d'exportation, de la porter au niveau requis. Cet ajustement s'opère en dernier ressort par celui du ratio des prix des facteurs primaires domestiques aux prix à l'importation. Dans un cadre keynésien, l'ajustement du TCER peut être limité par l'inertie des prix des facteurs primaires, auquel cas le déséquilibre commercial est défini par les évolutions effectives de prix relatifs, et s'impose comme une contrainte d'épargne importée dans la détermination de l'équilibre investissement-épargne.

⁵ Retenues par les modèles macroéconométriques, ces spécifications placent les prix sur un sentier dynamique que des simplifications statiques ne peuvent qu'approcher.

⁶ C'est le cas du modèle GEMMES de l'AFD, voir <https://www.afd.fr/fr/page-programme-de-recherche/gemmes-un-nouvel-outil-de-modelisation-qui-integre-la-transition-energetique>.

2. Modèles mobilisés

Les simulations numériques de cette étude reposent sur la mobilisation du modèle macroéconomique compact KLEM alimenté par des scénarios de prospective énergétique produits par le modèle POLES.

2.1 Le modèle macroéconomique KLEM

KLEM (en anglais pour Capital, Travail, Énergie et 'Matériaux') est un modèle macroéconomique dynamique et récursif, au sens où il représente une succession de projections annuelles liées par une règle d'accumulation du capital sur la base de décisions d'épargne et/ou d'investissement dites « myopes », c'est-à-dire sans anticipation des évolutions des prix relatifs des facteurs et des biens ou des volumes consommés et produits.

KLEM distingue deux secteurs d'activité économique : un secteur agrégeant l'offre d'énergie, qui englobe l'ensemble des activités de production primaire, de transformation et de distribution d'énergie ; un autre secteur regroupant l'ensemble des autres activités de production de biens et services — donc, pour la France, une très forte proportion de l'activité totale.

KLEM est utilisé au CIRED et dans le réseau international de modélisation IMACLIM⁷ comme un outil de prise en main des problématiques de modélisation des transitions énergétiques, précurseur à la mise en œuvre du modèle IMACLIM. Ainsi, comme IMACLIM bien que dans un format beaucoup plus agrégé, KLEM propose une modélisation multisectorielle reposant sur une comptabilité nationale des flux économiques, qui explicite les interactions des secteurs de production via la matrice des entrées-sorties et les marchés de facteurs, le produit des fiscalités indirectes et les dépenses publiques, l'effort d'investissement et le commerce international.

En outre, KLEM partage les deux principales caractéristiques d'IMACLIM⁸ puisqu'il offre, d'une part, la liberté de décisions importantes en matière de modélisation, en fonction de l'horizon temporel des analyses souhaitées et des caractéristiques de l'économie analysée. Ces décisions englobent le choix de spécifications de marchés, de modélisation de barrières à la mobilité des facteurs ou de règles de clôture macroéconomique qui sont au cœur des analyses de la présente étude. D'autre part, KLEM introduit au couplage de modèles à un niveau d'agrégation qui permet de se concentrer sur les différences conceptuelles entre les représentations d'ingénieur et d'économiste des flux d'énergie et de comprendre comment la méthode IMACLIM les comble. La méthode de couplage repose sur un calibrage hybride puis sur un échange d'entrées et de sorties des deux systèmes de modélisation détaillés ci-après (Section 2.3).

Les équations détaillées de l'ensemble des variantes du modèle KLEM-FRA mobilisées pour les explorations numériques des sections 4 à 7 sont présentées en annexe de ce rapport (Annexe B).

⁷ Voir <https://www.centre-cired.fr/imaclim-network/>.

⁸ Voir le manifeste du projet de modélisation IMACLIM à l'adresse <https://www.centre-cired.fr/wp-content/uploads/2021/10/IMACLIM-Manifesto.pdf>

2.2 Le modèle des systèmes énergétiques POLES (source : Enerdata)

POLES is a world energy-economy partial equilibrium simulation model of the energy sector until 2050, with complete modelling from upstream production to final user demand and greenhouse gas emissions.

The simulation process uses year-by-year dynamic recursive modelling with endogenous international energy prices and lagged adjustments of supply and demand by world region.

Well-adapted to forecast the effects of different energy-related issues (energy policies, promotion of renewables and energy efficiency, energy security issues, etc.) as well as climate-related issues (GHG emissions limitations, effort sharing between countries), POLES captures all impacts of the energy system thanks to endogenous fuel prices and national forecasts coherent within the global environment.

Its key features are

- *Long-term (2050) simulation of world energy scenarios / projections and international energy markets.*
- *World energy supply scenarios by main producing country / region with consideration of reserve development and resource constraints (88 producing countries / regions).*
- *Outlook for energy prices at international, national and sectoral levels.*
- *Disaggregation into 15 energy demand sectors with over 40 technologies (power generation, buildings, transport).*
- *EU Member States: Estimates of ETS and Non-ETS splits.*
- *Detailed national / regional energy balances and emissions, integrating primary production, primary demand, transformation & power, losses and final energy demand. 54 consuming countries + 12 regions; including all 28 EU Member States and some neighbouring countries (Norway, Iceland, Switzerland, Turkey).*
- *Full power generation system (and feedback effect on other energies): 30 explicit technologies, load curve simulation with typical days, annual capacity planning and dispatch based on LCOE, centralised and decentralised, renewable energy potentials, Carbon Capture and Storage.*
- *Transformation: explicit technologies for liquids from gas, liquids from coal, biofuels, and hydrogen production.*
- *Impacts of energy prices and tax policies on regional energy systems. National greenhouse gas emissions and abatement strategies.*
- *Energy trade: oil (global pool), gas (bilateral trade from 41 exporters to 14 importing markets), coal (bilateral trade from 26 exporters to 15 importing markets), import needs for solid biomass, liquid biofuels, uranium and electricity.*
- *Costs of national and international GHG abatement scenarios with different regional targets / endowments and flexibility systems.*
- *CO₂ emission marginal abatement cost curves and emissions trading system analysis by region and / or sector, under different market configurations and trading rules.*
- *Technology diffusion under conditions of sectoral demand and inter-technology competition based on relative costs and merit orders.*
- *Endogenous developments in energy technologies, with impacts of public and private investment in R&D and cumulative experience with “learning by doing”.*

2.3 Calibrage de KLEM-FRA et couplage aux projections de POLES pour la France

Le couplage de KLEM-FRA au modèle POLES a pour préalable la construction d'un tableau entrées-sorties (TES) 'hybride' réconciliant données de comptabilité nationale de l'INSEE d'une part, de bilans énergétiques et de prix moyens d'importation et de vente des énergies d'ENERDATA — qui alimente POLES pour les années statistiquement renseignées — d'autre part (voir Annexe A). Le TES ainsi modifié, principale source de données de calibrage de KLEM-FRA, garantit la pertinence du dispositif de son couplage à POLES. Ce couplage consiste en un échange croisé de variables du système énergétique (prix et flux physiques), forcées de POLES dans KLEM-FRA, et de croissance du produit intérieur brut réel calculé par KLEM-FRA, forcé dans POLES comme principal moteur de la croissance des consommations d'énergie.

À chaque étape de l'itération entre les deux modèles, le couplage se traduit pour KLEM-FRA par une exogénéité totale du système énergétique. Les trajectoires de croissance tracées par KLEM-FRA s'articulent donc autour de consommations et d'échanges internationaux d'énergie tirées de POLES donc exogènes, priorisés sur le reste de l'activité économique, ainsi qu'autour d'hypothèses exogènes, déduites de POLES⁹, sur la structure des coûts de l'offre d'énergie (au-delà de sa propre intensité énergétique) et sur les marges spécifiques (écarts des prix à la consommation aux coûts moyens d'approvisionnement, voir Annexe A.1) sur chaque vente d'énergie aux différents agents économiques.

Ces contraintes sur les volumes, les coûts et les prix de l'énergie pèsent sur la croissance économique et la consommation non énergétique, puisqu'une partie des dotations en facteurs primaires de production est allouée à la fourniture d'un certain volume exogène d'énergie et à la substitution à l'énergie dans la production non-énergétique (voir la fonction de production du secteur Annexe B.1), et qu'une partie du produit intérieur brut est attribuée aux dépenses énergétiques des ménages et au solde commercial énergétique.

La poursuite de l'itération entre les deux modèles jusqu'à convergence des données échangées garantit une pleine cohérence entre la macroéconomie décrite par KLEM et le système énergétique décrit par POLES.

Cependant, le nombre des simulations produites pour la présente étude a conduit à renoncer à toute itération, et à limiter le couplage à l'unique insertion, dans KLEM-FRA, des données de scénario de POLES, sans prise en compte des effets en retour. Parmi les scénarios et modèles dont les résultats sont présentés ci-après, tous ceux dessinant une trajectoire de croissance inférieure à celle structurant les scénarios POLES — retenue comme croissance potentielle dans KLEM-FRA comme garantie minimum de cohérence — auront tendance à sous-estimer cette croissance en ne prenant pas en compte ses rétroactions modératrices sur les consommations d'énergie. À l'inverse, toute simulation d'une croissance supérieure à celle structurant les scénarios POLES sera légèrement surévaluée¹⁰.

⁹ Selon une procédure prenant en compte le fait que POLES est un modèle d'équilibre partiel, donc considère implicitement des prix constants pour tous biens et facteurs hormis l'énergie. Su et al. (2022) présentent une version antérieure de cette procédure, légèrement adaptée depuis.

¹⁰ Les consommations d'énergies des entreprises et des ménages de POLES sont forcées en valeur absolue par la procédure de couplage standard développée pour une convergence par itération. Le forçage d'intensités énergétiques dans la production et de parts budgétaires dans la consommation des ménages, testé dans le cadre d'une activité d'enseignement récente, a révélé une faible sensibilité des résultats du modèle à cette alternative. Cette faible sensibilité s'explique par l'alignement de la trajectoire de croissance potentielle de KLEM sur le

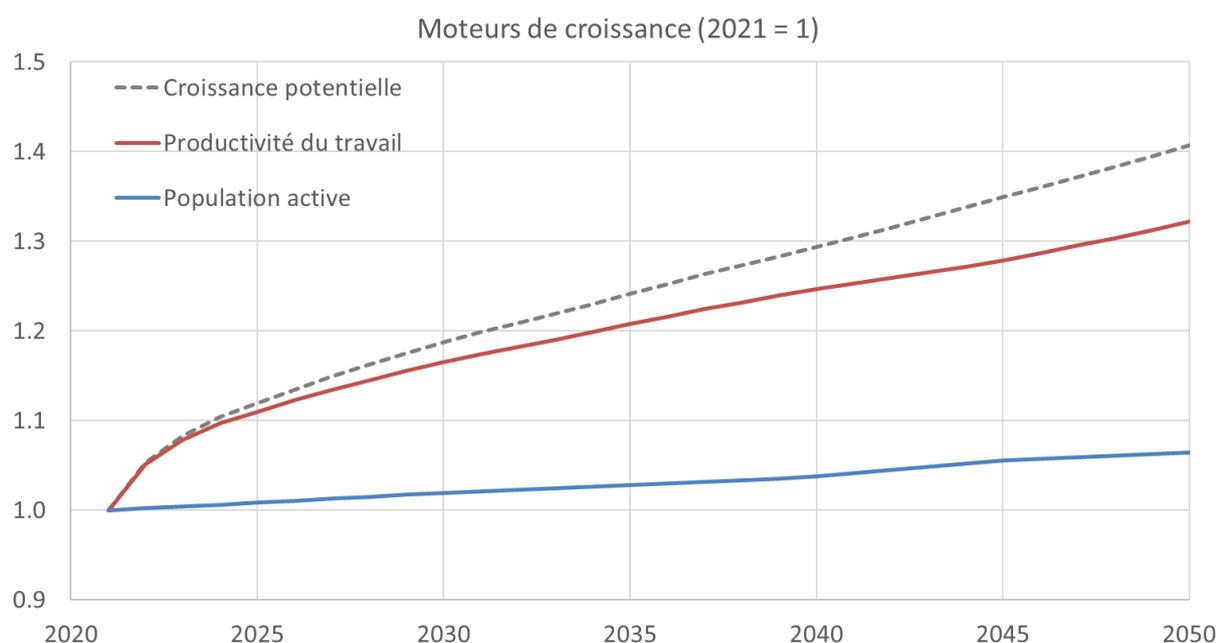
3. Scénarisation

Les explorations numériques des sections 4 à 7 reposent sur la mise en œuvre d'un unique scénario POLES de transition énergétique, pour un ensemble de variantes du modèle KLEM-FRA construites autour des axes de différenciation précédemment introduits (Section 1), soumises à une scénarisation macroéconomique commune.

3.1 Scénarisation macroéconomique

Les moteurs de croissance de KLEM-FRA sont ceux communs à l'écrasante majorité des modèles macroéconomiques multisectoriels : des hypothèses exogènes de démographie de la population active et de productivité du travail (Figure 1). La trajectoire de croissance de la population active retenue est celle des projections EAPEP du Bureau International du Travail (BIT) jusqu'en 2030, prolongée à 2050 par l'application des taux de croissance de la population de 20 à 69 ans du scénario SSP2 du GIEC, de source Nations Unies¹¹.

Figure 1. Moteurs de croissance exogène du modèle KLEM-FRA



Source : BIT et GIEC (population active), POLES (productivité du travail), calculs des auteurs. La croissance potentielle est le produit des deux hypothèses de population active et de productivité du travail.

Celle de productivité du travail est ajustée de manière à ce que, croisée à la projection de population active et sous hypothèse d'un taux de chômage constant, elle définisse une croissance potentielle

scénario de croissance structurant les projections de POLES, par le poids limité de l'énergie dans l'activité, et par l'impact contenu des variantes de modélisation sur l'activité et les revenus projetés.

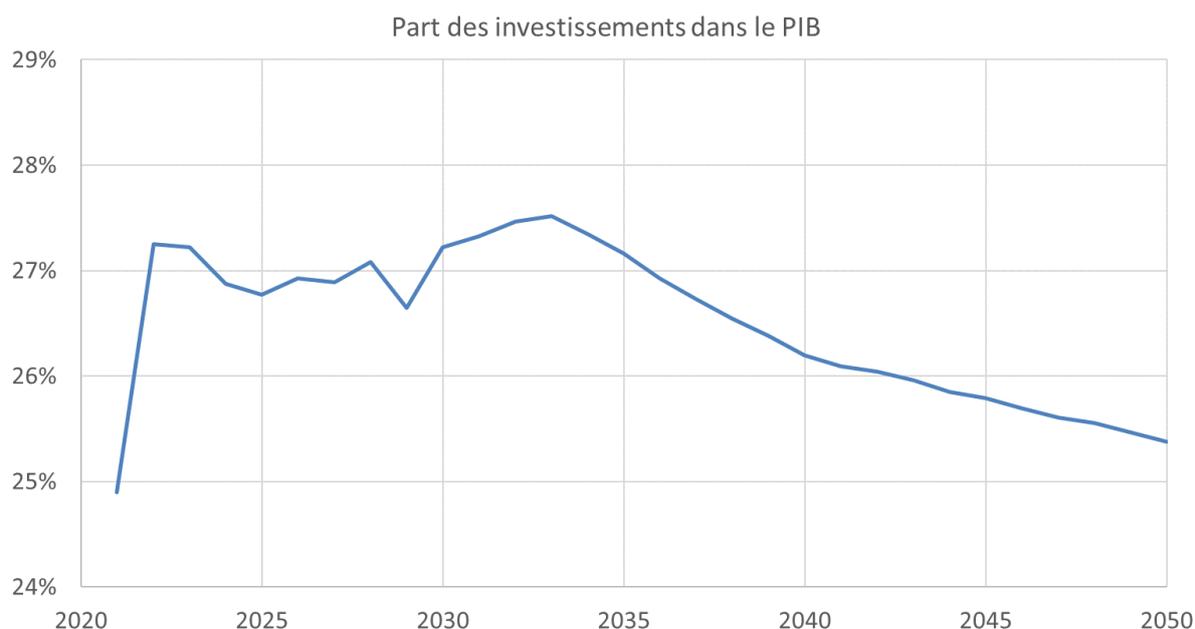
¹¹ Cette utilisation de sources internationales s'explique par l'utilisation du générateur de modèles KLEM développé dans le cadre du réseau IMACLIM. Une source directe INSEE aurait été préférable, bien que très probablement sans aucune influence sur les résultats qualitatifs de l'étude.

identique à la croissance effective sous-tendant la modélisation POLES pour la France. Cet alignement permet de limiter les conséquences de l'absence d'itération entre les modélisations KLEM et POLES (voir Section 2.3).

Outre ces deux paramètres structurants, KLEM-FRA construit ses projections autour d'hypothèses de taux d'épargne nationale, de déficit commercial et/ou d'effort d'investissement, mobilisées par paires selon les variantes de clôture (voir Section 1.1). Dans l'ensemble des variantes du modèle pour lesquelles ils sont exogènes, le taux d'épargne nationale et le niveau du déficit commercial sont supposés constants sur tout l'horizon de projection à leurs valeurs de 2021 (respectivement 23% et -1,9% du PIB).

Lorsqu'il est exogène, l'effort d'investissement reflète lui-aussi son niveau de 2021 (24,9% du PIB), mais augmenté d'une estimation, construite sur les projections du modèle POLES, de l'effort incrémental d'investissement lié à la transition (voir Section 3.2). La trajectoire qui en résulte est en moyenne 1,7 points, et jusqu'à 2,6 points (2033, 2034) supérieure à l'effort d'investissement de 24,9% de 2021 (Figure 2).

Figure 2. Effort d'investissement avec incrément dû à la transition



Source : calculs des auteurs sur projection EnerGREEN-NZE du modèle POLES-ENERDATA. L'exercice suppose un effort d'investissement marqué dès 2022, première année de simulation, qui contredit sans doute l'observation.

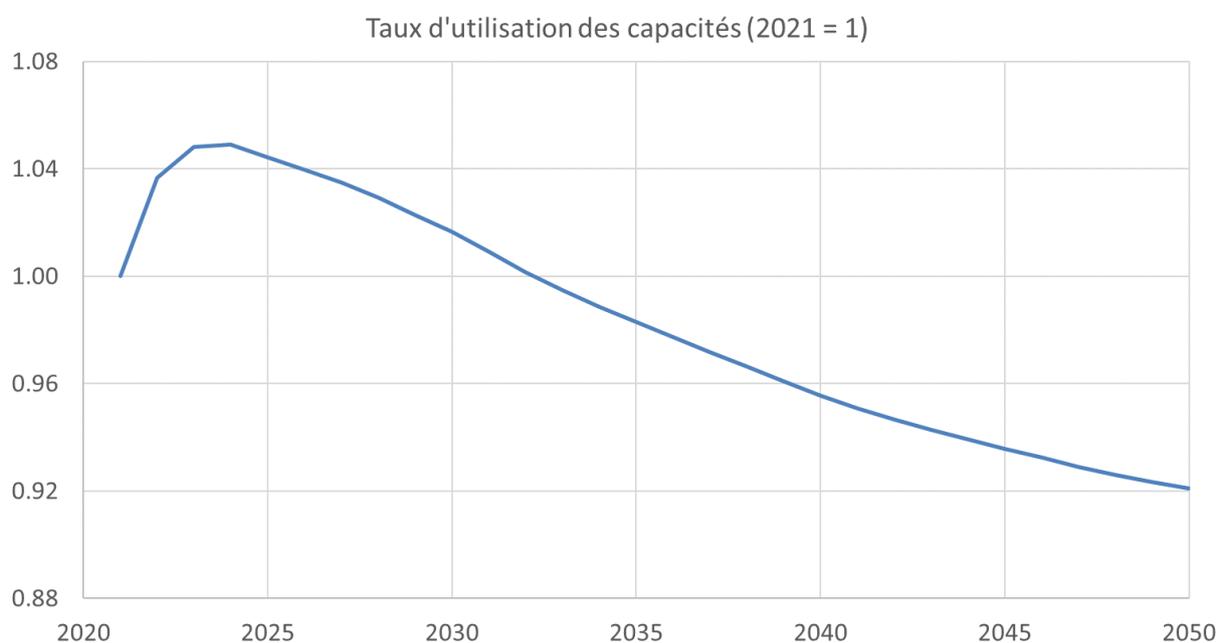
Une dernière dimension de scénarisation de KLEM-FRA concerne son comportement macroéconomique et plus précisément sa capacité à développer une trajectoire de croissance stabilisée au sens du modèle de Solow, c'est-à-dire caractérisée par des prix relatifs constants à l'exception du salaire, qui reflète strictement les gains de productivité, et des volumes produits, échangés et consommés croissant à la vitesse définie par les gains de productivité et de population active — celle du potentiel de croissance.

Pour explorer sa capacité à produire une telle trajectoire, on soumet au modèle un scénario énergétique fictif de prix constants et de consommations et échanges indexés sur la croissance

potentielle (voir Figure 1). Hors correction, le modèle développe une croissance inférieure à la croissance potentielle sur le court terme, mais supérieure sur le long terme. Ce décalage est causé par la variabilité du taux de croissance annuel du potentiel, qui diminue tout au long de la trajectoire, et par le volume du stock initial de capital¹².

Pour aligner la trajectoire effective de stock de capital sur celle de la croissance potentielle, on introduit une hypothèse de variation du taux d'utilisation des capacités et on calcule quelle trajectoire de taux d'utilisation est compatible avec le développement d'une croissance stabilisée¹³. La trajectoire obtenue (Figure 3) est identique pour l'ensemble des variantes de clôture et de spécifications de marchés explorées ci-après. Elle est maintenue telle quelle pour les explorations de valeurs alternatives d'AEI dans le cadre de scénarios de transition, puisque construite sur un scénario énergétique tendanciel où toute perturbation de productivité de l'énergie est à écarter.

Figure 3. Utilisation des capacités compatible avec un régime de croissance stabilisé



Source : modélisation KLEM-FRA.

En revanche, elle doit être mise à jour lorsque le modèle est recalibré sur une hypothèse d'inventaire perpétuel 'keynésien' (voir Section 7), de manière à éviter un biais de comparaison entre les deux méthodes d'inventaire.

¹² Le stock de capital de l'année de calibrage de KLEM-FRA, 2021, est calibré de manière à ce que l'investissement en volume de 2021 (la FBCF INSEE divisée par un prix dérivé, selon le standard MEGC, d'une normalisation du prix de production du bien non-énergétique) garantisse une croissance du stock de capital identique à la croissance potentielle moyenne sur les années 2021-2035, étant donné le taux de dépréciation retenu.

¹³ Par simple extension du modèle à une variable additionnelle, le taux d'utilisation des capacités, et à une contrainte additionnelle, celle d'une production de bien non-énergétique croissant à la vitesse du potentiel. On pourrait de fait substituer à cette hypothèse une même contrainte sur la croissance de tout autre volume consommé ou échangé endogène au modèle.

3.2 Scénarisation énergétique

Le sentier de transition énergétique posé comme contrainte à l'ensemble des simulations produites par KLEM-FRA est caractérisé à partir du scénario EnerGREEN produit par la société Enerdata par la mise en œuvre du modèle POLES. Le scénario EnerGREEN, le plus ambitieux des scénarios de l'éventail EnerFuture (Figure 4), est retenu dans sa variante 'NZE' compatible avec l'engagement 'zéro émissions nettes' de la France à l'horizon 2050.

Figure 4. Description des scénarios EnerFuture d'Enerdata

EnerBase	EnerBlue	EnerGreen
<p>Climate and energy policies</p> <ul style="list-style-type: none"> Limited and delayed efforts to mitigate GHG emissions Policies lacking climate ambition, not compatible with NDC targets <p>Energy demand</p> <ul style="list-style-type: none"> Limited improvements in energy efficiency High demand growth in developing countries, stable in OECD <p>Energy supply</p> <ul style="list-style-type: none"> Fossil fuels remain heavily dominant Minor renewables development due to lack of support Fossil fuel prices increase in a context of moderate demand growth <p>CO2 emissions</p> <ul style="list-style-type: none"> CO₂ emissions continue increasing by 2050 in emerging economies, but are slightly curbed in OECD <p><i>EnerBase leads to a temperature increase above 3°C</i></p>	<p>Climate and energy policies</p> <ul style="list-style-type: none"> Reinforced GHG emissions mitigation efforts Climate policies based on new NDC objectives* <p>Energy demand</p> <ul style="list-style-type: none"> Demand growth controlled through energy efficiency and sufficiency Consumption increasing moderately in non-OECD and decreasing in OECD countries <p>Energy supply</p> <ul style="list-style-type: none"> Fossil fuel share on a slow decreasing trend due to significant move towards renewables Slowly increasing international fuel prices, reflecting lower demand <p>CO2 emissions</p> <ul style="list-style-type: none"> In developing countries, CO₂ emissions peak around 2030 and fall afterwards. Meanwhile they are largely decreasing in OECD <p><i>EnerBlue leads to a temperature increase between 2°C and 2.5°C.</i></p>	<p>Climate and energy policies</p> <ul style="list-style-type: none"> Ambitious GHG emissions budget, in line with Paris Agreement goals Very stringent climate policies, in line with ambitious new NDCs <p>Energy demand</p> <ul style="list-style-type: none"> Significant energy efficiency improvements Implementation of substantial energy sufficiency measures Energy demand decreases globally <p>Energy supply</p> <ul style="list-style-type: none"> Fossil fuel supply strongly decreases Renewables account for majority of primary energy demand Fuel prices driven down by collapsing demand <p>CO2 emissions</p> <ul style="list-style-type: none"> CO₂ emissions are down to extremely low levels globally <p><i>EnerGreen explores a world in which temperature increase is limited to below 2°C.</i></p>

Source : Enerdata.

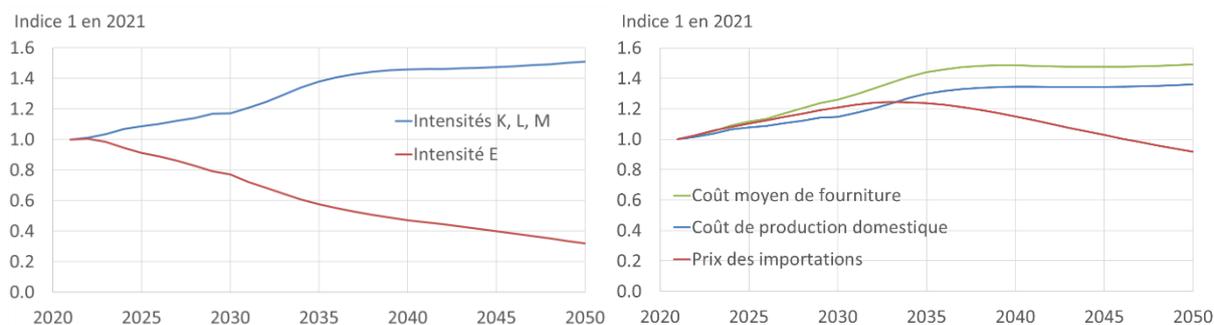
Les projections détaillées de prix et de flux énergétiques produites par POLES sont agrégées en un jeu de onze séries temporelles comprenant cinq trajectoires de consommation et de commerce international sous-tendues par cinq trajectoires de prix de marché, et une trajectoire de taux additionnel de prélèvement sur les dépenses énergétiques. Les cinq flux énergétiques sont ceux des importations, des transformations par le secteur d'offre énergétique lui-même (raffinage, production électrique), des consommations du secteur non-énergétique et des ménages, et des exportations (voir Annexe A le format des données KLEM).

Les trajectoires de prix et de taux additionnels de prélèvement sont traitées afin de révéler quelles variations des intensités en facteur de la production agrégée d'énergie et quelles variations de marges spécifiques¹⁴ sur les ventes de cette production elles supposent. L'intensité en intrant énergétique

¹⁴ Écart au coût moyen propre à la tarification de chacune des 3 consommations domestiques et des exportations d'énergie (voir Annexe A). Ces écarts se justifient à la fois par la variété des mix énergétiques sous-jacents,

(pour la transformation) est explicitement renseignée, mais les trois autres facteurs de production y compris le capital sont supposés évoluer homothétiquement (Figure 5)¹⁵. À prix constants, l'intensification en capital de la production domestique et sa substitution croissante aux importations dans l'offre, induisent une hausse soutenue du coût moyen de fourniture de 2020 à 2040, qui plafonne à environ +50% jusqu'en 2050.

Figure 5. Trajectoires d'intrants, de coûts et prix de l'énergie d'un scénario 'NZE'



Source : calculs des auteurs sur les données du scénario EnerGREEN-NZE du modèle POLES-ENERDATA. Le coût moyen de fourniture progresse plus rapidement que les coûts de production et d'importation du fait de la réduction significative de la part des importations, et du fort écart entre prix moyens d'importation (composées en majorité d'énergies primaires) et prix moyens de production (composées plus largement d'énergies transformées).

Sur le plan macroéconomique, le scénario EnerGREEN-NZE se traduit dans un premier temps par une hausse du poids dans le PIB des dépenses énergétiques des entreprises et des ménages, due notamment à une hausse significative de fiscalité qui suppose une levée du moratoire imposé par la crise des Gilets Jaunes (Le relatif maintien des dépenses énergétiques des entreprises tient à une forte hausse des prix, qui compense un découplage marqué entre production (PIB réel) et consommations d'énergie. Selon l'usage et pour les raisons précédemment invoquées (voir Section 1.3), on fait l'hypothèse qu'une certaine proportion de ce découplage est permis par un progrès technique tendanciel à coût nul. Cette proportion est appliquée au découplage observé chaque année de 2022 à 2050. Elle est portée à 33%, de manière à induire un gain d'efficacité moyen de 0,81% par an, qui semble une hypothèse recevable pour une économie développée de structure relativement stable comme la France (voir Section 1.3).

Figure 6). Après un plateau entre 2030 et 2035 pour les entreprises, et dès 2027 pour les ménages, les poids diminuent et atteignent en 2050, pour le premier, un niveau (4,5%) proche de son niveau initial (4,3%) ; pour le second, un niveau (3,4%) 0,9 points inférieur.

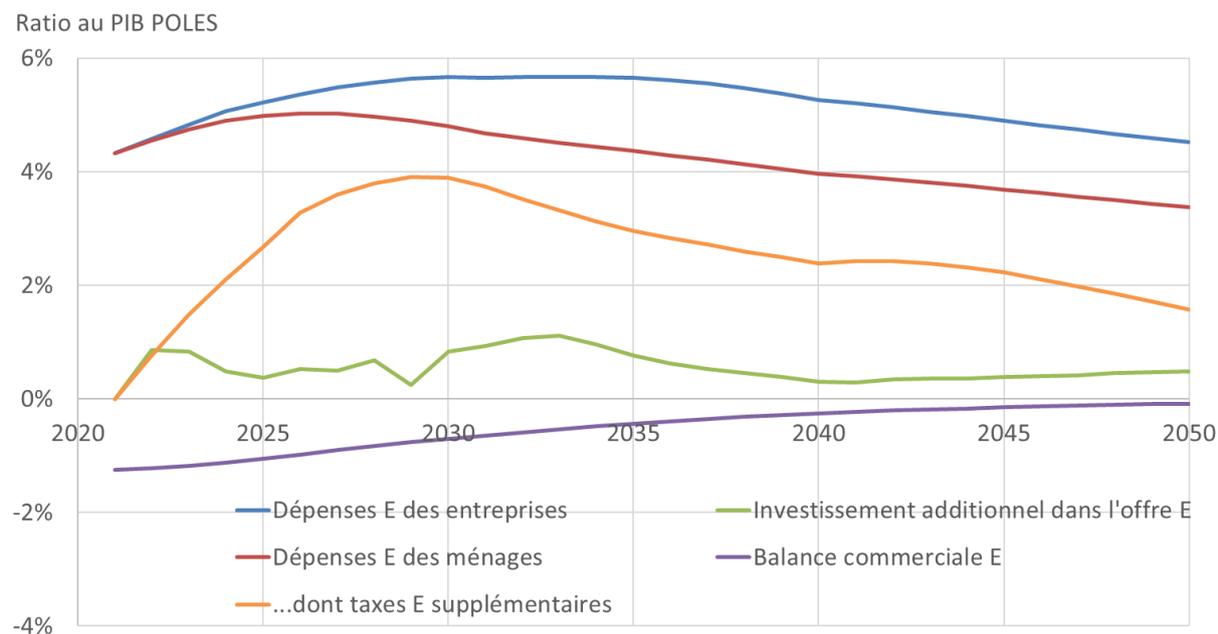
Le relatif maintien des dépenses énergétiques des entreprises tient à une forte hausse des prix, qui compense un découplage marqué entre production (PIB réel) et consommations d'énergie. Selon l'usage et pour les raisons précédemment invoquées (voir Section 1.3), on fait l'hypothèse qu'une certaine proportion de ce découplage est permis par un progrès technique tendanciel à coût nul. Cette proportion est appliquée au découplage observé chaque année de 2022 à 2050. Elle est portée à 33%,

explicite dans POLES donc capturée par les prix moyennés, et par de fortes variations de tarification des énergies de réseau (gaz et électricité) selon les consommateurs.

¹⁵ Cette simplification est notamment due à l'absence de représentation des investissements de raffinage et de réseaux de transport et distribution dans le modèle POLES.

de manière à induire un gain d'efficacité moyen de 0,81% par an, qui semble une hypothèse recevable pour une économie développée de structure relativement stable comme la France (voir Section 1.3).

Figure 6. Caractérisation macroéconomique du scénario EnerGREEN-NZE



Source : scénario EnerGreen-NZE, modèle POLES-ENERDATA, traitements des auteurs. « E » pour « énergétique ». Les dépenses des entreprises sont celles du secteur non-énergétique uniquement (consommations finales au sens du bilan énergétique).

La pression sur l'investissement d'offre précédemment décrite en termes d'intensité se traduit par un besoin incrémental agrégé de 0,5 points de PIB en moyenne sur l'horizon de projection, culminant à 1,1 points de PIB au début des années 2030 (en 2032 et 2033). L'effort d'investissement côté demande, le complémentaire de cet investissement d'offre dans le profil d'incrément présenté plus haut (Figure 2), résulte d'une prise d'hypothèse fruste : un surcroît de 1,5 points de PIB de 2022 à 2035, déclinant linéairement jusqu'à s'annuler en 2050.

Enfin, la balance commerciale énergétique s'améliore tendanciellement depuis son niveau de -1,2% du PIB en 2021 jusqu'à un quasi équilibre (-0,1%) en 2050.

En résumé, les modalités d'importation du scénario EnerGREEN-NZE dans KLEM-FRA sont les suivantes :

Les volumes sous-jacents aux dépenses des entreprises et ménages (y compris ceux des intrants dans la transformation, non représentés). Le relatif maintien des dépenses énergétiques des entreprises tient à une forte hausse des prix, qui compense un découplage marqué entre production (PIB réel) et consommations d'énergie. Selon l'usage et pour les raisons précédemment invoquées (voir Section 1.3), on fait l'hypothèse qu'une certaine proportion de ce découplage est permis par un progrès technique tendanciel à coût nul. Cette proportion est appliquée au découplage observé chaque année de 2022 à 2050. Elle est portée à 33%, de manière à induire un gain d'efficacité moyen de 0,81% par an, qui semble une hypothèse recevable pour une économie développée de structure relativement stable comme la France (voir Section 1.3).

- (1) Figure 6) sont forcés tels quels dans KLEM-FRA.
- (2) Les prix auxquels ces volumes sont tarifés sont construits sur les hypothèses d'intensités de facteurs KLEM (Figure 5) et de marges spécifiques déduites de POLES,
- (3) ... augmentées de la taxation supplémentaire des flux énergétiques appliquée de manière uniforme (ad valorem) à ces flux.
- (4) Les quatre composantes KLEM de la balance énergétique (flux d'importation et d'exportation agrégés, prix moyens auxquels chaque flux est tarifé) sont, elles-aussi, forcées telles quelles dans KLEM-FRA.
- (5) Les coûts en valeur ajoutée du découplage marqué entre croissance potentielle et consommations d'énergies des entreprises envisagé par POLES sont limités par une amélioration autonome de l'efficacité énergétique (AEEI) construite sur l'hypothèse que 33% des gains de productivité énergétique agrégés de la projection POLES sont à coût nul.
- (6) L'incrément d'investissement d'offre complété d'une hypothèse fruste d'incrément côté demande est traduit en une hausse de l'effort d'investissement en points de PIB pour les clôtures qui spécifient cet effort.

3.3 Écart à la croissance potentielle

Les trajectoires de croissance produites par les différents paramétrages et variantes de KLEM-FRA seront systématiquement comparées à la croissance potentielle résultant des hypothèses directrices de population active et de productivité du travail (Section 3.1), utilisée à la manière d'un scénario central.

On peut supposer que tout modèle établissant que la transition EnerGREEN-NZE induit un dépassement du potentiel de croissance aura aussi tendance à évaluer positivement le coût macroéconomique du passage d'un scénario de transition moins ambitieux qu'EnerGREEN-NZE, à ce scénario EnerGREEN-NZE. Cette hypothèse pourra être confortée lors de travaux futurs par la modélisation d'autres scénarios POLES, en particulier le scénario EnerGREEN-B2C, où la décarbonation de l'économie française est en ligne avec les objectifs de sa deuxième Stratégie Nationale Bas Carbone.

4. Influence de clôtures alternatives en marchés parfaits

La modélisation et la scénarisation décrites dans les sections qui précèdent sont mises en œuvre, dans un premier temps, pour évaluer l'influence sur l'évaluation de trois variantes de clôture du modèle KLEM : une clôture néoclassique, qui correspond à un financement de l'investissement de transition par éviction d'autres investissements ; une clôture Johansen, qui suppose plutôt un financement par hausse de l'épargne nationale donc éviction de la consommation des ménages (la dépense publique étant supposée mobiliser une part constante du PIB¹⁶) ; une clôture sur la balance commerciale, enfin, qui suppose un financement de l'incrément d'investissement par une hausse de l'épargne importée nette.

4.1 Conséquences macroéconomiques

Sous clôture néoclassique, comme précédemment introduit, l'investissement nécessaire à la transition tend à réduire tous autres types d'investissement, le total d'investissement disponible étant défini par les épargnes nationale et importée indépendamment fixées soit en valeur, soit en proportion de l'activité. 'L'effet d'éviction' joue à plein. Cependant, les réductions d'importations d'énergies induisent une tendance au désendettement extérieur qui se traduit immédiatement, sous hypothèse d'un marché des changes parfait, par une appréciation du taux de change effectif réel (TCER). Cette hausse cause à la fois des hausses d'importations et des baisses d'exportations de biens et services non-énergétiques, qui conduisent au maintien de l'équilibre de la balance commerciale. Mais elle améliore aussi le pouvoir d'achat des ménages en réduisant le coût réel de leurs importations.

La résultante de ces deux forces contraires dépend des valeurs relatives des élasticités de substitution gouvernant, d'une part, le surcroît de valeur ajoutée nécessaire à la réduction des consommations d'énergie dans la production non-énergétique ; d'autre part, les échanges commerciaux. Une analyse de sensibilité sommaire (non reproduite ici) révèle toutefois que l'effet de premier ordre, négatif, de la hausse du coût moyen de fourniture d'énergie (voir Figure 5) domine cette résultante d'une manière très robuste aux incertitudes de paramétrage. En conséquence, la transition financée par éviction d'autres dépenses d'investissement induit une trajectoire de croissance significativement inférieure au potentiel réalisé hors variations du système énergétique (Figure 7, panneau gauche). En 2050, l'écart de PIB réel constaté est de 6,1%.

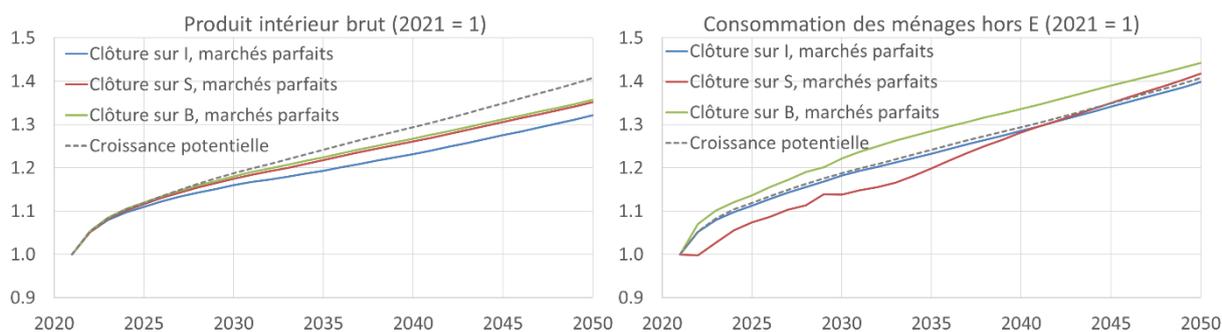
Sous clôture Johansen, l'amélioration de la balance énergétique induit une appréciation similaire du TCER donc une amélioration du pouvoir d'achat des ménages, mais l'effet d'éviction sur l'investissement est contourné en ajustant l'effort d'investissement aux besoins de la transition. En conséquence, l'épargne domestique, qui clôt l'équilibre, augmente afin de financer le surcroît d'investissement. L'activité économique est supérieure et n'échoue plus qu'à 4,0% de son potentiel en 2050 (Figure 7, panneau gauche). Elle se réoriente vers l'investissement au détriment de la consommation (Figure 7, panneau droit). Cependant, l'accumulation du capital s'opère à un rythme accéléré compatible avec la transition, et l'économie conserve la capacité à restaurer des niveaux de consommation élevés une fois le pic d'investissement passé.

La clôture sur le déficit commercial permet elle-aussi de spécifier le surcroît d'investissement comme un effort additionnel, donc d'atténuer l'effet de la transition sur la croissance : le PIB réel n'est que

¹⁶ Voir Annexe B Equation (8).

3,1% sous son potentiel en 2050. Le financement de cet effort additionnel est assuré par un surcroît d'épargne importée plutôt que par un ajustement de la consommation des ménages ; cette dernière progresse dès lors plus vite que la croissance potentielle grâce aux économies d'énergie. Le revers de cette performance réside dans l'accumulation d'une dette extérieure (non représentée Figure 7) d'un montant cumulé non actualisé de 1 475 milliards d'euros 2021 d'ici 2050, soit un supplément d'endettement extérieur de 43 points de PIB à cet horizon.

Figure 7. Options de clôture et évaluation macroéconomique en marchés parfaits



Source : simulations KLEM-FRA alimentées par le scénario Energreen-NZE du modèle POLES-ENERDATA (voir Section 3). Le PIB est déflaté d'un indice des prix de Fisher chaîné spécifique. Le volume de consommation des ménages hors E(nergie) est modélisé agrégé, donc ne nécessite pas de déflateur.

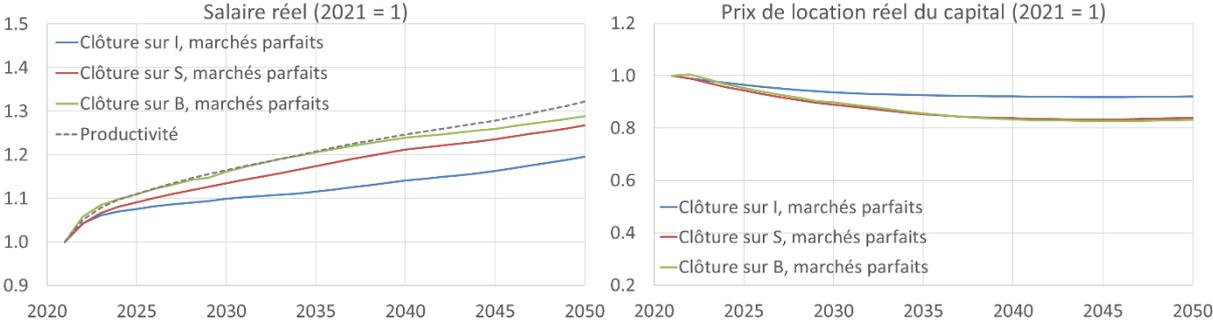
4.2 Conséquences sur les prix relatifs

Les hypothèses de marchés parfaits supposent de libres ajustements de prix relatifs — trop rarement communiqués dans les études publiées du fait des conséquences qu'ils peuvent avoir en matière d'acceptation des réformes. Ces variations permettent d'anticiper et d'interpréter les résultats obtenus lorsque des imperfections de marchés sont introduites.

On observe ainsi que la clôture la moins favorable à l'activité, celle sur *I*, est aussi celle qui induit le plus fort décrochage du salaire réel par rapport aux gains de productivité (Figure 8, panneau gauche). Cette contre-performance est à la fois induite par la relative abondance du facteur travail dans un régime de croissance inférieur au potentiel, et nécessaire pour compenser le niveau relativement élevé du prix de location du capital consécutif à l'effet d'éviction (Figure 8, panneau droit), afin de garantir le maintien d'un taux de change effectif réel permettant l'équilibre de la balance commerciale.

En comparaison, les clôtures permettant de limiter l'effet d'éviction sur le capital productif, que le surcroît d'investissement soit financé par un endettement domestique ou importé, induisent une meilleure progression du salaire réel. En particulier, en cas de recours à l'endettement extérieur (clôture sur *B*), les gains de salaire réel parviennent à se maintenir au niveau de ceux de productivité jusqu'en 2040, puis ne décrochent progressivement que de quelques points (progression 1,2% inférieure à celle de la productivité en 2050). Cette plus forte hausse est notamment permise par la pression à la baisse sur le prix de location du capital que produit la plus grande disponibilité de capital en l'absence d'effet d'éviction.

Figure 8. Options de clôture et prix des facteurs en marchés parfaits



Source et lecture : voir Figure 7 ci-dessus. Le salaire w et le prix de location du capital r sont rapportés déflatés de l'IPC (voir Annexe B).

5. Introduction d’hypothèses de rigidité des prix

Les analyses en marchés parfaits qui précèdent reposent sur l’hypothèse dite ‘*flexprice*’ (Robinson, 1988) d’une flexibilité totale des prix permettant une concordance exacte entre demande et offre sur l’ensemble des marchés : ceux des facteurs primaires, qui voient les dotations en capital (stock de capital) et en travail (population active) entièrement mobilisées par les deux secteurs productifs, grâce au libre ajustement du prix de location du capital et des salaires ; ceux des biens et services produits, dont la totalité des volumes importés et produits sont consommés ou exportés aux prix d’équilibres ; ceux des échanges internationaux enfin, dont le solde s’ajuste aux hypothèses prises (clôture sur I ou S) ou aux nécessités de financement de l’effort d’investissement (clôture sur B) par le libre ajustement du taux de change effectif réel¹⁷.

On peut substituer à chacune de ces hypothèses de prix flexibles le cas polaire d’une hypothèse de prix fixe (*fixprice*), encore que la définition d’une telle fixité puisse être délicate en l’absence de modélisation de monnaie ou même d’inflation monétaire (par inertie des dynamiques de prix comme dans les modèles néo-keynésiens). On peut aussi très simplement explorer un continuum de spécifications de prix rigides (*sticky prices*) en introduisant une corrélation entre déséquilibres offre/demande et prix, dans un sens ‘correctif’ — les prix augmentent lorsque la demande outrepassa l’offre, diminuent dans le cas inverse — garantissant le maintien de l’existence et l’unicité d’un équilibre.

Nous choisissons de développer des simulations avec prix fortement rigides, assez proches de simulations *fixprice*, plus représentatives des options retenues par les modèles d’inspiration keynésienne. Nous n’explorons ici des spécifications alternatives que dans le cas des marchés des facteurs primaires et de l’équilibre commercial¹⁸. Chacune des trois rigidités des prix est testée successivement, indépendamment des deux autres, c’est-à-dire sous hypothèse que tous les autres prix sont parfaitement flexibles.

5.1 Rigidité des salaires

Pour modéliser une rigidité des salaires, nous substituons à la condition d’équilibre du marché du travail une ‘courbe salaire-chômage’ (*wage curve*, suivant Blanchflower et Oswald, 2005) qui spécifie une corrélation positive entre taux d’emploi de la population active et salaire réel¹⁹. Dans le cadre dynamique de KLEM-FRA, il est fait l’hypothèse qu’une stabilité de l’emploi est corrélée à une progression du salaire réel au même rythme que la productivité du travail.

La section précédente a rapporté que la transition, pour les paramétrages retenus jusqu’ici et dans l’hypothèse de marchés parfaits, induisait un découplage entre productivité du travail et salaires, du fait des hausses de coûts de production impulsées par les exigences de décarbonation. En conséquence, la possibilité d’un ajustement du niveau d’emploi débouche sur une hausse du chômage,

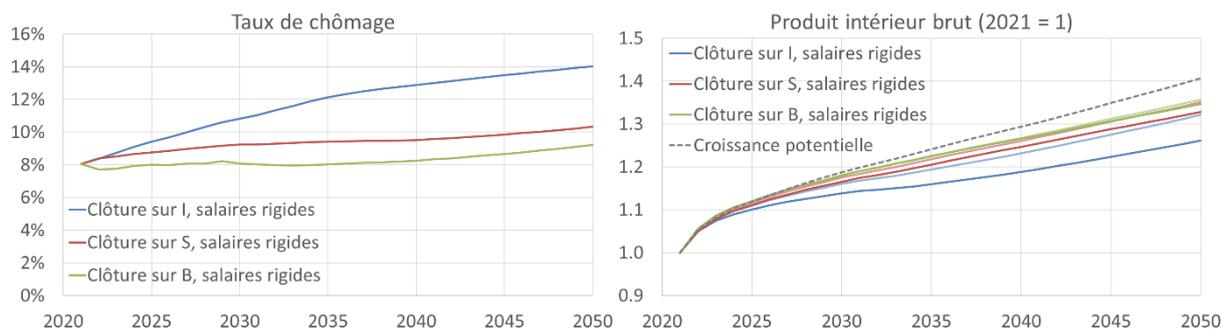
¹⁷ Le taux de change effectif réel est défini par les modèles multisectoriels comme le ratio des indices des prix à la consommation et à l’importation.

¹⁸ Certains modèles, en particulier de tradition keynésienne, supposent des spécifications de prix rigides pour les marchés de biens, en endogénéisant des variations de stocks dont les volumes rétroagissent sur un taux de marge appliqué aux coûts de production pour former les prix (cas du modèle GEMMES de l’AFD).

¹⁹ Voir l’équation (19) et sa variante (19b), Annexe B.

d'autant plus forte que le retard de progression des salaires était marqué (Figure 9, panneau gauche). Ainsi, le modèle avec effet d'éviction (clôture sur *I*) induit une hausse continue, bien que progressivement ralentie, qui mène le taux à 14% en 2050 ; celui avec financement par l'épargne domestique (clôture sur *S*) développe une trajectoire plus contenue dans la période où l'effort incrémental d'investissement est soutenu (jusqu'en 2040, voir Figure 2), mais qui s'accélère légèrement au-delà pour atteindre 10,3% en 2050 ; enfin, le financement de l'effort par l'endettement extérieur permet de stabiliser l'emploi jusqu'en 2040, et de limiter le taux atteint en 2050 à 9,2%.

Figure 9. Options de clôture et évaluation macroéconomique avec salaires rigides



Source et lecture : voir Figure 7. Les trajectoires de PIB estompées sont celles obtenues en marchés parfaits, construites sur l'hypothèse d'un taux de chômage constant à 8,1%.

De manière attendue, ces pertes d'emplois trahissent des pertes d'activité, en comparaison des simulations en marchés parfaits, qui atteignent en 2050 4,5% en cas de financement par éviction, 1,7% en cas de financement par l'épargne domestique et 0,8% en cas de financement par l'épargne importée. Les PIB atteints en 2050 sont alors respectivement 10,3%, 5,6% et 4,3% en deçà du potentiel atteint en régime stabilisé. Dans le cas d'un financement par l'épargne importée, la progression de l'endettement extérieur est quasiment la même que sous hypothèse de marchés parfaits : 1 474 milliards d'euros 2021, qui constituent désormais 44% du PIB de 2050.

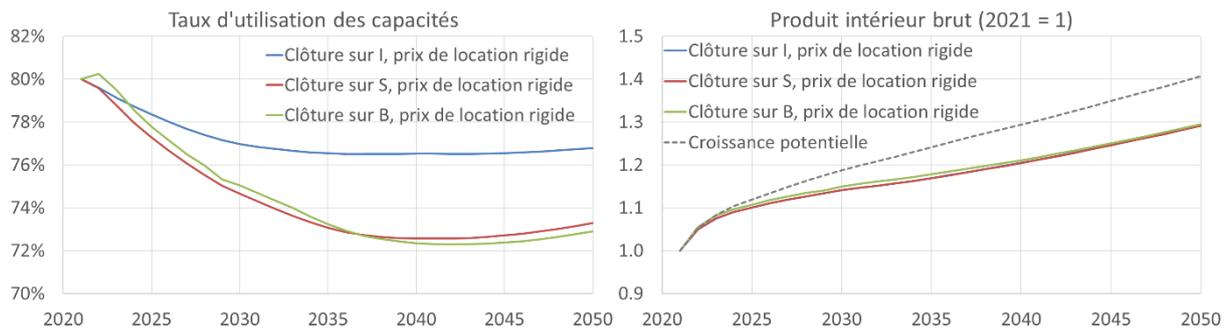
5.2 Rigidité du prix de location du capital

Par facilité²⁰, KLEM repose sur une représentation néoclassique du marché du capital : une libre allocation du stock disponible à chaque pas de temps en fonction de la demande des deux secteurs productifs, exogène (imposée par POLES) pour le secteur de production d'énergie et induite par les variations du 'prix de location' r relativement aux prix des autres intrants pour le secteur de production de tous les autres biens et services. En marchés parfaits, r s'ajuste de manière à ce que la demande du secteur non-énergétique épuise le stock disponible une fois couvert le besoin du secteur énergétique. Le fonctionnement de ce marché est de fait identique à celui du travail, si ce n'est que la dotation en capital procède de l'accumulation de l'investissement, donc est endogène à la dynamique de croissance, alors que la trajectoire de population active est donnée.

²⁰ Et contrairement à la majorité des versions du modèle IMACLIM, qui adoptent une modélisation bien mieux adaptée au court-terme des dynamiques du capital productif (mobilité limitée au flux d'investissement, distinction des stocks d'infrastructures et de logement, rémunération par 'mark-up pricing').

À fins de comparaison, et faute d'une meilleure hypothèse de caractérisation des imperfections de marché du capital dans un tel cadre néoclassique, on évalue l'influence de rigidités du marché du capital d'une manière inspirée de celle retenue pour le marché du travail : on introduit une 'rental price curve' qui lie prix réel de location du capital (r déflaté de l'indice des prix à la consommation) et taux d'utilisation des capacités ; on suppose comme pour l'emploi une élasticité de -10% du prix réel au taux d'inutilisation. Cependant on retient un taux d'utilisation des capacités de 80% à l'année de calibrage conformément à la norme — distinct, donc, du taux d'emploi de $1 - 8,1\% = 91,9\%$.

Figure 10. Clôtures et évaluation macroéconomique avec rémunération du capital rigide

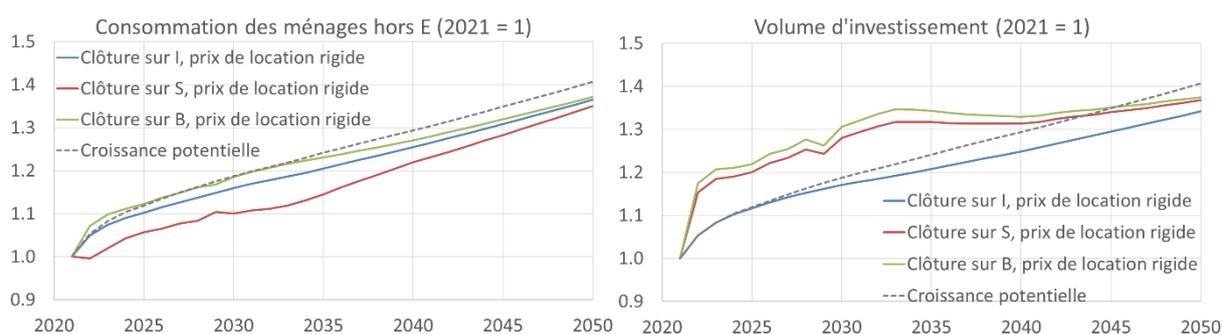


Source et lecture : voir Figure 7. La trajectoire de PIB produite par le modèle avec clôture sur I est indiscernable de celle produite avec clôture sur S .

Comme pour l'emploi, les taux d'utilisation des capacités calculés sous cette hypothèse de prix de location rigide reflètent bien les variations de prix de location obtenues dans l'hypothèse de marchés parfaits (voir Figure 8). Ils diminuent d'environ 4 points en cas d'effet d'éviction (clôture sur I), soutenus par la relative rareté du facteur capital, et de 4 points supplémentaires en l'absence d'effet d'éviction, que le surcroît d'investissement soit financé par l'épargne domestique ou l'épargne importée (Figure 10, panneau gauche).

Si les baisses de taux d'utilisation ont bien pour conséquence des baisses d'activité, l'imperfection du marché du capital, telle que modélisée, a aussi la conséquence inattendue de diminuer très significativement l'influence de l'option de clôture retenue — au point de rendre graphiquement indiscernables les trajectoires avec clôture sur I et sur S (Figure 10, panneau droit). Les clôtures conservent pourtant une influence déterminante sur la composition du PIB, comme le révèlent les trajectoires contrastées de consommation où d'investissement qu'elles induisent (Figure 11). Les raisons de cette singularité de comportement, si tant est qu'elle est prouvée robuste au paramétrage, restent à étudier.

Figure 11. Consommation et investissement avec rémunération du capital rigide



Source et lecture : voir Figure 7. Comme la consommation des ménages hors E(nergie), l'investissement n'immobilise que l'agrégat de biens et services non-énergétiques et le calcul de sa trajectoire en volume ne nécessite donc pas de déflateur.

5.3 Rigidité du taux de change effectif réel

À la différence du taux d'emploi ou d'utilisation des capacités, la balance commerciale comme son ratio au PIB peuvent prendre aussi bien des valeurs positives que négatives. Une spécification similaire à celles utilisées pour les marchés du travail et du capital n'est donc pas souhaitable pour représenter une rigidité du TCER. On se résout à tester plutôt le cas polaire d'une fixité du TCER, c'est-à-dire du ratio des indices de prix de la consommation des ménages (IPC) et des biens et services importés (IPM)²¹.

Autre différence en comparaison des deux marchés qui précèdent, la balance des biens et services est l'une des trois options de clôture analysées, et ne peut donc pas être contrainte par une fixité du TCER lorsque son ajustement doit clore l'équilibre comptable. On ne peut donc tester l'influence d'une hypothèse de fixité du TCER que dans les modèles avec clôture sur *I* et sur *S*.

Comme pour les marchés du travail et du capital, on commence par observer le déséquilibre induit par l'hypothèse de rigidité (en l'espèce fixité) des prix. Pour les deux options de clôture, il s'agit d'une nette amélioration de la balance des biens et services (Figure 12, panneau gauche), bien au-delà de la réduction de déficit d'environ un point de PIB attendue des économies d'énergies importées (voir Section 3.2). Cette performance tient à la définition du TCER, qui englobe les évolutions des prix de l'énergie consommée consommations de biens énergétiques. Parce que ces prix progressent très rapidement, le maintien du TCER réclame un ajustement à la baisse du ratio des rémunérations des facteurs primaires aux prix d'importation.

Le fait que les deux clôtures produisent des trajectoires de déficit puis d'excédent commercial quasiment identiques tient à ce que les importations et exportations de biens non-énergétiques, qui constituent une proportion de plus en plus écrasante des échanges, sont sensibles au TCER mais selon des trajectoires indexées sur la production domestique de ce bien²². En effet, la performance commerciale très similaire des deux clôtures a des conséquences très différentes en matière d'activité (Figure 12, panneau droit). Dans le cas d'une clôture sur *I*, le développement d'un excédent commercial se fait au prix d'une réduction des importations d'épargne, donc de l'investissement, donc

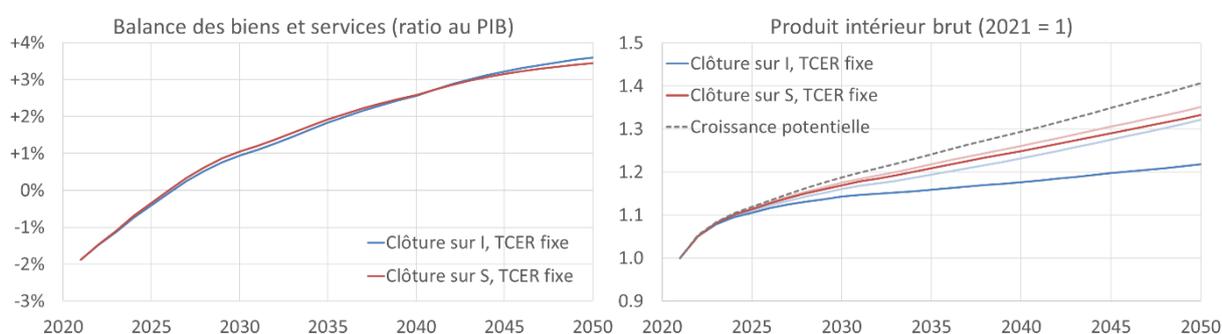
²¹ Voir Annexe B la contrainte de TCER par l'équation (13c) et les définitions des indices par les équations (35) et (36).

²² Voir Annexe B.3 les équations (10) et (11).

de l'accumulation de capital, ce qui ralentit très significativement la croissance. Par contraste, dans le cas d'une clôture sur S , les dépenses d'investissement sont garanties et la croissance ne souffre que de la perte modérée de pouvoir d'achat que constitue le maintien du TCER, en comparaison de la hausse de TCER qu'autorise le maintien du déficit. Mais c'est alors l'épargne domestique qui compense la réduction de l'épargne importée, au détriment de la consommation des ménages, qui ne progresse que de 20% sur tout l'horizon.

Encore faut-il mettre en perspective ces mauvaises performances d'activité ou de consommation avec les réductions massives d'endettement extérieur qui l'accompagnent : 3 122 milliards d'euros 2021 d'excédent (ou 101% du PIB atteint en 2050) en comparaison de la trajectoire avec TCER flexible dans le premier cas ; 3 271 milliards d'euros 2021 (ou 98% du PIB atteint en 2050) dans le second.

Figure 12. Évaluation macroéconomique avec TCER fixe



Source et lecture : voir Figure 7. Le ratio de la balance des biens et services au PIB est calculé à prix courants. Les trajectoires de PIB estompées sont celles obtenues pour un TCER flexible permettant la stabilité du déficit commercial.

6. Influence de variations des coûts techniques de décarbonation

En préambule à cette troisième section d'exploration, il faut constater qu'aucune des simulations qui précèdent ne voient l'activité dépasser son potentiel de croissance — donc ne calcule un coût macroéconomique négatif à la transition.

Particulièrement, les analyses sous hypothèses de prix rigides ne font qu'amplifier les coûts de la transition calculés en marchés parfaits, parce que les variations de prix relatifs induites par la transition en marchés parfaits sont 'mal' orientées : les salaires réels d'équilibre progressent moins vite que la productivité, donc supposer leur rigidité conduit à limiter le creusement de cet écart mais au prix de destructions d'emplois ; la rémunération du capital progresse moins vite que les prix à la consommation entraînés à la hausse par les prix de l'énergie, et donc la supposer rigide conduit pareillement à limiter la baisse de rémunération réelle, au prix de sous-utilisations des capacités.

Ces évolutions néfastes des prix d'équilibres sont inscrites dans les coûts microéconomiques supposés aux opérations de décarbonation, trop élevés pour que la réduction de déficit commercial parvienne à les compenser. L'un des déterminants majeurs de ces coûts est la quantité d'intrants non-énergétiques qu'il est nécessaire de substituer aux consommations d'énergie de l'appareil productif afin de maintenir la production. Dans KLEM-FRA, cette quantité est gouvernée par les élasticités de substitution de la fonction de production non-énergétique d'une part, et par l'hypothèse d'amélioration autonome de l'efficacité énergétique (AEEI en anglais) de cette production d'autre part (voir Sections 1.3).

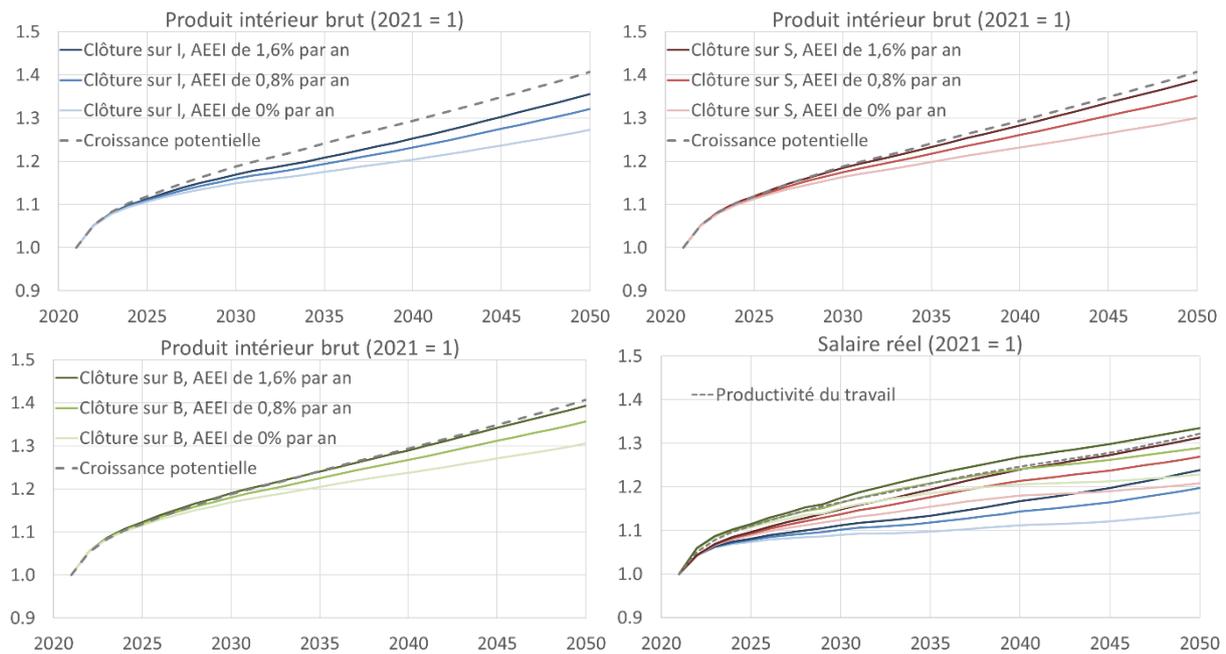
Comme indiqué lors de la description de la scénarisation énergétique qui les sous-tend (Section 3.2), les simulations des sections qui précèdent font l'hypothèse d'une amélioration autonome de l'efficacité énergétique (AEEI) de 0,81% par an en moyenne. La trajectoire exacte suivie est construite sur l'hypothèse que 33% du découplage entre PIB réel et consommations d'énergie finale des entreprises projeté chaque année par le modèle POLES est à coût nul. On teste dans ce qui suit l'hypothèse beaucoup plus optimiste que 66% du découplage est à coût nul, ce qui suppose le doublement du gain d'efficacité moyen, porté à 1,62% par an donc dans la partie très haute de la fourchette d'estimations disponibles. On teste aussi l'hypothèse beaucoup plus pessimiste d'absence d'AEEI, afin de borner l'analyse par le bas.

6.1 Dans l'hypothèse de marchés parfaits

Les variantes de clôture affichent des sensibilités semblables de leurs projections d'activité à l'hypothèse d'AEEI (Figure 13). Le doublement du taux moyen induit en 2050 des projections de PIB 2,6% à 2,7% supérieures selon les clôtures. Son annulation, légèrement plus conséquente, réduit les projections centrales de 3,6% à 3,8%.

Dans le cas d'un doublement du taux d'AEEI, la clôture la plus favorable à l'activité, celle d'un financement par l'épargne importée, dépasse enfin le potentiel de croissance sur les premières années de projection et jusqu'en 2034, donc sur la période où le surcroît d'investissement est au plus haut (voir Figure 2 p.10). Après 2035, la diminution de l'effort d'investissement provoque un léger ralentissement qui finit par mener le PIB 0,9% sous son potentiel en 2050. Par construction, cette performance est atteinte sans modification de la trajectoire d'endettement extérieur mesuré en points de PIB.

Figure 13. Influence du potentiel sans regret sur l'évaluation macroéconomique

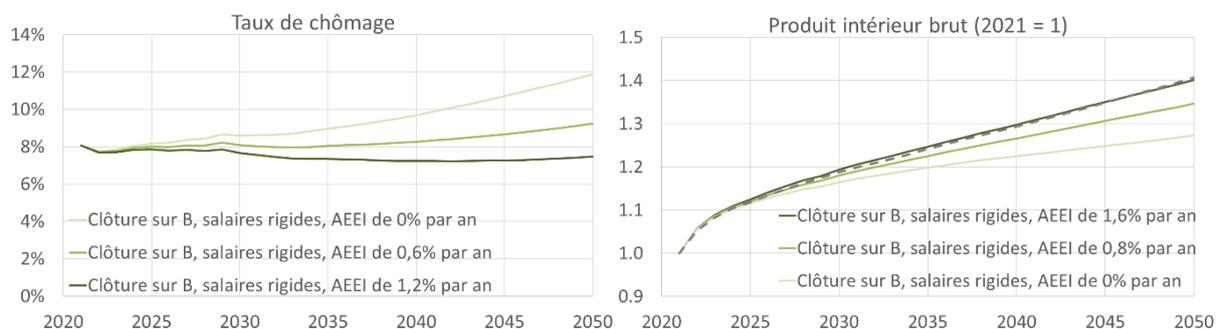


Source et lecture : voir Figure 7 p.17. Les taux d'AEEI sont les taux annuels moyens de 2021 à 2050. Les légendes des trois panneaux qui en sont dotés s'appliquent au panneau inférieur droit.

En outre, le niveau d'activité soutenu crée une pression suffisante sur le marché du travail pour que le salaire réel progresse plus rapidement que la productivité, sur tout l'horizon de projection (Figure 13, panneau inférieur droit). Cette progression ouvre la voie à des créations d'emploi dans le modèle avec salaires rigides précédemment introduit (section 5.1).

6.2 Avec rigidité des salaires

On limite l'exploration de l'influence de salaires rigides pour d'autres valeurs d'AEEI à la clôture sur B, qui seule affiche des progressions de salaire réel supérieures à celle de la productivité du travail lorsque l'AEEI est de 1,6% par an. Dans ce cas particulier, l'impact sur l'emploi est dans le sens attendu : celui d'une diminution du taux de chômage qui atteint presque 1 point en 2040, et encore plus d'un demi-point en 2050.



Les emplois correspondants alimentent un surcroît de croissance sur tout l'horizon de projection. Le PIB projeté en 2050 est 0,5% supérieur au niveau atteint avec flexibilité des salaires. Il est encore 0,4% inférieur au PIB potentiel en 2050, mais au terme d'une trajectoire supérieure au potentiel jusqu'en 2046.

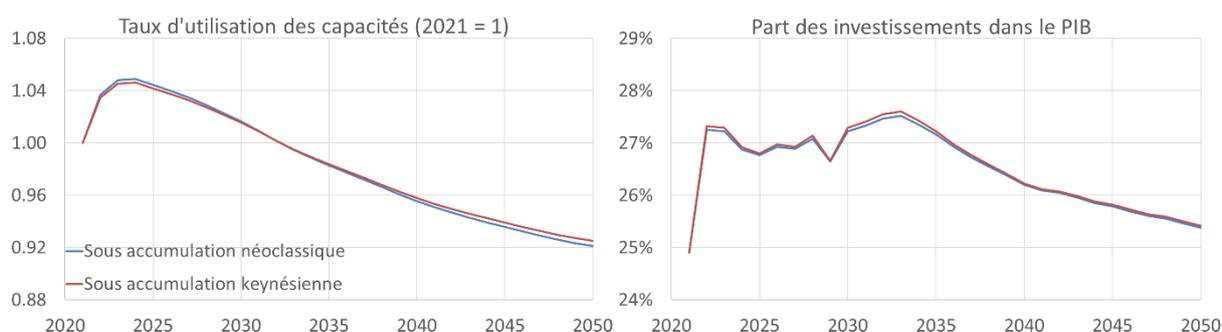
Ces simulations confirment le rôle majeur de l'équilibre coûts/bénéfices microéconomique des opérations de décarbonation à la fois dans la détermination des coûts macroéconomiques, et dans l'influence qualitative qu'ont sur ces coûts d'éventuelles rigidités de prix.

7. Mise en œuvre d'une accumulation 'keynésienne'

On modifie enfin la règle d'accumulation du capital de KLEM-FRA afin d'endogénéiser le stock de capital productif de chaque pas de temps, selon l'usage des modélisations d'inspiration keynésienne (voir Section 1.2)²³.

Cette modification majeure suppose une mise à jour du calibrage du modèle concernant le stock initial de capital K_0 et la trajectoire d'utilisation du stock de capital compatible avec une trajectoire de croissance stabilisée sous hypothèse de constance de l'effort d'investissement (voir Section 3.1), afin de conserver les propriétés de calibrage imposées au modèle avec accumulation néoclassique. L'utilisation du capital ainsi recalculée affiche une trajectoire légèrement moins accentuée que celle induite par l'accumulation néoclassique grâce au bénéfice de l'instantanéité, qui permet d'anticiper d'un an la croissance du stock de capital induite par un même volume d'investissement croissant à la vitesse du potentiel (Figure 14, panneau gauche).

Figure 14. Paramétrages des accumulations néoclassique et keynésienne



Source : modélisation KLEM-FRA. La légende du panneau gauche s'applique au panneau droit.

Le changement de règle d'accumulation réclame aussi de modifier les calculs de surcroît d'effort d'investissement menés à partir des projections de consommations et de prix de l'énergie du scénario EnerGREEN-NZE de POLES. La trajectoire d'effort d'investissement est cependant virtuellement inchangée (Figure 14, panneau droit).

7.1 Toutes choses égales par ailleurs

Le modèle ainsi modifié et recalibré, mis en œuvre pour les trois variantes de clôture explorées en marchés parfaits, produit des trajectoires de croissance extrêmement proches de celles obtenues sous accumulation néoclassique (Section 3.3), avec des écarts de PIB réel en 2050 inférieurs à 1 pour mille²⁴. Cette concordance tient aussi en cas de rigidité des salaires, bien que l'écart soit augmenté par les possibilités de variation du niveau d'emploi : pour une variante avec clôture sur B et AEEI de 1,6% par

²³ Voir aussi Annexe B.5, équations (22) et (22c), la contrainte statique néoclassique et son alternative keynésienne.

²⁴ Les résultats détaillés de ces simulations, non présentés du fait de cette proximité, sont disponibles auprès des auteurs.

an (celle de la Section 6.2), il atteint 0,2% en faveur du modèle à accumulation keynésienne, reflétant un écart de taux de chômage de 0,2 points.

Il apparaît donc que la règle d'accumulation keynésienne est sans influence notable sur les résultats des évaluations de KLEM-FRA toutes choses égales par ailleurs.

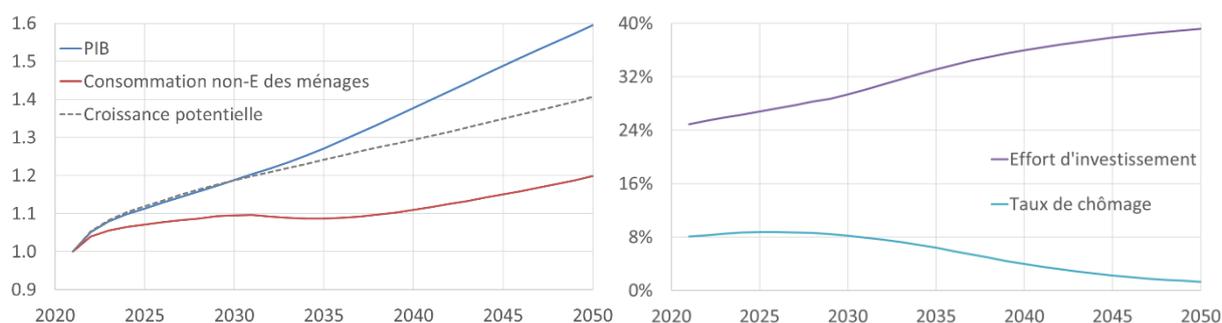
7.2 Avec forçage d'un choc d'investissement

Cependant, l'intérêt d'une endogénéisation du stock de capital tient à la possibilité qu'elle paraît ouvrir de stimuler la croissance par la demande d'investissement. Dans les modèles keynésiens, l'investissement est ainsi défini par les demandes des secteurs productifs, elles-mêmes dictées par des anticipations imparfaites souvent indexées sur la croissance potentielle, et influencées par l'évolution du taux d'intérêt explicitement modélisé, généralement peu sensible aux volumes empruntés (hypothèse proche d'un 'fixprice').

La neutralité à la monnaie de KLEM-FRA, héritée de son ancrage dans le paradigme MEGC, rend malaisée la reproduction de cette dernière caractéristique faute de définition d'un prix fixe²⁵. On peut cependant facilement substituer à l'hypothèse d'un effort d'investissement celle d'une trajectoire d'investissement en volume. On teste ainsi un choc d'investissement sous forme de la contrainte que le volume des immobilisations progresse à la même vitesse que le PIB réel, augmentée du surcroît d'investissement de transition tel que précédemment évalué en points de PIB (Section 3.1).

Afin de faciliter l'interprétation des résultats, on introduit cette contrainte dans le modèle avec clôture sur S en lieu et place de la trajectoire d'investissement, donc en conservant la contrainte d'un déficit de biens et services constant²⁶. On considère en outre une rigidité des salaires, afin de faciliter l'effet relance par la possibilité de créations d'emplois, et on conserve encore l'hypothèse favorable d'AEEI à 1,6% par an, dont on a vu qu'elle était en mesure de faire basculer l'évaluation.

Figure 15. Choc d'investissement sous accumulation keynésienne et salaires rigides



Source : simulations KLEM-FRA dans une variante avec accumulation keynésienne du capital, salaires rigides et clôture sur S , alimentées par le scénario EnerGREEN-NZE du modèle POLES-ENERDATA (voir Section 3).

²⁵ On a ainsi vu que le prix de location réel du capital était décroissant même dans les simulations où la rareté du capital est un frein à la croissance (Figure 8, graphique de droite).

²⁶ La contrainte de croissance de I est donc substituée à l'équation (14b) qui prévaut dans les version du modèle à clôture sur S mises en œuvre jusqu'à ce point. Elle n'est pas spécifiée dans l'Annexe de description de KLEM-FRA afin de faire l'économie de l'introduction de l'indice des prix du PIB nécessaire au calcul de sa croissance.

Conformément aux attentes, l'influence du choc d'investissement caractérisé plus haut dans le cadre de modélisation ainsi défini est massive puisqu'elle permet à la croissance de largement dépasser son potentiel, jusqu'à le dominer de 13,7% en 2050 (Figure 15, panneau gauche). Cette performance est obtenue notamment grâce à des créations d'emploi qui réduisent drastiquement le taux de chômage, qui n'est plus que de 1,3% en 2050 (Figure 15, panneau droit).

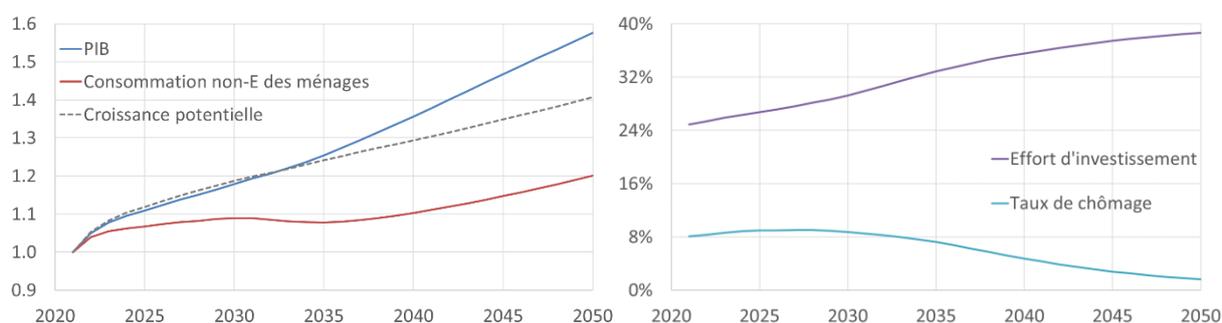
Cependant « l'effet relance » n'est pas pleinement observé : le choc d'investissement, pourtant défini en volume et non en part du PIB, ne parvient pas à entraîner la croissance au point de stabiliser son poids dans le PIB, donc d'obtenir un gain d'activité sans déformation notable de la structure de l'économie. Au contraire, ce poids est contraint d'augmenter tout au long de la trajectoire et finit par approcher le taux considérable de 40%. La conséquence immédiate de cette hausse de l'effort d'investissement, dans le cadre de clôture sur B retenu pour cette exploration, est une hausse du taux d'épargne domestique — d'un nombre de points de PIB strictement identique à la hausse de l'effort d'investissement par la contrainte de clôture puisque le déficit commercial est fixé constant. Le surcroît d'épargne domestique est obtenu au détriment de la consommation des ménages, qui croît très en-deçà du potentiel de l'économie et connaît même une période de légère récession entre 2031 et 2035 (Figure 15, panneau gauche).

7.3 Forçage d'un choc d'investissement sous accumulation néoclassique

Outre leurs caractéristiques propres, on souhaite encore déterminer dans quelle mesure les résultats obtenus sous accumulation keynésienne sont le fruit spécifique de cette hypothèse. Pour ce faire, on rétablit dans un modèle identique au précédent (clôture sur S , volume d'investissement indexé sur la croissance effective augmentée du surcroît estimé nécessaire à la transition) la règle d'accumulation néoclassique.

Les trajectoires produites (Figure 16) sont très semblables à celles obtenues avec accumulation keynésienne (Figure 15). Tout au plus, un retard de croissance à l'origine, dû au décalage d'un an de la transformation de l'effort d'investissement en capital, persiste tout au long de la trajectoire de PIB, qui finit malgré tout 12% au-dessus de son potentiel.

Figure 16. Choc d'investissement sous accumulation néoclassique et salaires rigides



Source : simulations KLEM-FRA dans une variante avec accumulation néoclassique du capital, salaires rigides et clôture sur S , alimentées par le scénario EnerGREEN-NZE du modèle POLES-ENERDATA (voir Section 3).

Conclusion

Les explorations numériques présentées dans les sections qui précèdent débouchent sur un ensemble de conclusions que l'on peut structurer en trois propositions.

Les modalités macroéconomiques de financement des investissements nécessaires à la transition déterminent l'impact de la transition sur l'activité économique (PIB), la consommation des ménages et l'endettement extérieur.

L'hypothèse d'un financement par éviction d'autres investissements productifs, parce qu'elle opère au détriment de l'accumulation du capital productif, est la plus nuisible à l'activité, et en conséquence, sur le long terme, à la consommation des ménages (Figure 7 p.17). Par contraste, les deux hypothèses polaires d'un financement par l'épargne domestique et par l'épargne importée préservent l'accumulation de capital productif donc débouchent sur des pertes d'activité moindre. Cependant leur performance est au prix, pour la première, d'une moindre consommation des ménages sur la période du principal effort (jusqu'en 2040), une part plus élevée du revenu national devant être épargné ; pour la seconde, d'un surcroît d'endettement extérieur susceptible d'atteindre plusieurs dizaines de points de PIB en 2050.

Les options de clôture explorées sont 'polaires' au sens où elles affectent la totalité du financement des investissements de transition à une source plutôt qu'à une autre. Cependant la maquette KLEM-FRA mise en œuvre pour ces travaux est à même d'explorer différentes modalités de répartition, par simple ajustement des hypothèses de prolongation des taux d'épargne ou de déficit commercial, ou en limitant l'incrément d'effort d'investissement postulé, selon les options de clôture. Il est probable en effet que l'effort national sera en fait réparti sur les trois sources disponibles, et la question se pose des mécanismes de cette répartition et de la capacité de la puissance publique à l'orienter — ainsi d'ailleurs que des indicateurs susceptibles de lui fixer un objectif, donc de mettre en balance les variations d'activité, de consommation et d'endettement extérieur induites.

La prise en compte de rigidités des prix agit comme un multiplicateur des évaluations produites en marchés parfaits, dans un sens qui dépend de l'impact de premier ordre de la transition sur les prix relatifs.

Dès lors que la transition est supposée contraindre à un changement technique 'suffisamment' coûteux — c'est-à-dire dont les coûts d'investissement lissés sur la durée de vie des équipements dépassent 'assez' les réductions de facture énergétique qu'ils permettent —, elle provoque des pertes d'activité qui induisent des ajustements à la baisse du salaire réel comme du prix réel de location du capital. Supposer une rigidité de ces ajustements à la baisse conduit à dégrader le niveau d'équilibre des marchés donc à détruire des emplois ou à réduire le taux d'utilisation des capacités productives, ce qui aggrave les pertes d'activité. À l'inverse, un coût d'ensemble du changement technique nécessaire à la transition 'suffisamment' faible pour faire pression à la hausse sur les rémunérations réelles des facteurs, conduit à des créations d'emploi et des hausses de taux d'utilisation des capacités donc à des gains d'activité.

Le point de bascule entre tendances à la baisse et à la hausse de l'utilisation des facteurs n'est pas celui d'un coût technique agrégé nul : les gains macroéconomiques de l'amélioration de la balance commerciale par la réduction des importations d'énergie sont aussi à prendre en compte. Ils donnent une marge de manœuvre qui explique pourquoi deux tiers de gains d'efficacité énergétique à coût nul

(et donc un tiers à coûts positifs) peuvent suffire à faire basculer l'évaluation (simulations de la Section 6).

Ce dernier ordre de grandeur dépend de toute évidence de la sensibilité relative du commerce international et des choix d'intrants du producteur aux prix. Le temps imparti aux travaux présentés ici n'a pas permis de mener les analyses de sensibilité qui permettraient de cerner de quelle manière. De futurs travaux pourront aborder cette question, dont on peut aussi supposer qu'elle influence aussi les conséquences comparées des options de financement par l'épargne domestique et par l'épargne importée sur le niveau d'activité.

Une troisième proposition déduite des explorations de ce rapport est de portée strictement technique, et moins conclusive. **Le choix de modéliser une accumulation d'inspiration keynésienne plutôt que néoclassique, semble sans influence significative sur les résultats de l'évaluation.** Par 'accumulation d'inspiration keynésienne' on entend l'hypothèse, standard des modélisations néo-keynésienne et post-keynésienne, que l'investissement d'une année donnée augmente le stock de capital de cette même année plutôt que celui de l'année qui suit. La conclusion que cette hypothèse est neutre ne tient évidemment que dans les limites des tests effectués. On s'attendait pourtant à ce que l'endogénéisation du stock de capital favorise l'obtention d'un effet de relance keynésienne, par la levée de la contrainte sur le stock de capital, en particulier en présence de rigidités des prix du travail. Un choc d'investissement produit en effet une relance dans le sens d'une hausse de l'activité et de l'emploi (Section 7.2). Cependant, les contraintes d'équilibre macroéconomique persistent, et la relance n'est possible qu'au prix d'une hausse de l'effort d'investissement, au nécessaire détriment soit de la consommation, soit du déficit commercial. En outre, le même choc d'investissement produit un effet tout à fait similaire dans un modèle à accumulation néoclassique (Section 7.3).

L'intention de cette exploration méthodologique était d'établir un continuum de variantes de KLEM-FRA couvrant le spectre des options disponibles depuis le paradigme néoclassique jusqu'à une modélisation aux propriétés néo-keynésiennes du type de celle du modèle d'évaluation ThreeME. De ce point de vue, les travaux réalisés sont en l'état inachevés. Ils appellent à être poursuivis, dans deux directions pour le moins : d'une part, une levée de l'hypothèse de demandes marshalliennes, du côté de la production de biens et services non-énergétiques, au profit de trajectoires exogènes de coefficients techniques librement manipulables à fins d'analyses de sensibilité ; d'autre part, l'introduction d'inerties dynamiques des prix permettant d'obtenir du modèle des comportements potentiellement impossibles à approcher par la mise en œuvre de prix rigides dans des cadres statiques. La définition de ces travaux futurs bénéficierait beaucoup d'une collaboration avec les équipes ThreeME de l'ADEME ou de l'OFCE, afin de clarifier certaines mécaniques du modèle — en particulier la question de sa clôture mais aussi celle demeurée en filigrane des analyses qui précèdent du lien entre taux d'intérêt et 'tarification' du capital dans la structure de coût des producteurs— et aussi de bénéficier de mises en forme spécifiques des résultats de sa modélisation.

Annexe A. Tableau entrées-sorties hybride INSEE/ENERDATA

A.1 Présentation du TES hybride et des flux énergétiques sous-jacents

Le TES de l'année 2021 résultant de la procédure d'hybridation introduite en section 2.3 et documentée ci-après (section A.2) s'organise comme suit (Tableau 1).

Tableau 1. Tableau Entrées-Sorties hybride au format KLEM, France 2021.

Milliards EUR	Non-E	E	C	G	I	X	Emplois
Non-E	2 074	62	1 155	663	623	731	5 308
E	108	23	108	-	-	21	260
L	1 254	31					
T1	44	3					
K	832	53					
M	747	52					
MS non-E	-	21					
MS E	-	-37					
MS C	-	32					
MS X	-	-16					
T2	249	35					
Ressources	5 308	260					

Sources : INSEE, ENERDATA, calculs des auteurs (voir section A.2 ci-dessous).

Du côté des ressources (colonnes), l'offre de biens et services non-énergétiques (non-E) ou de biens énergétiques (E) émane de consommations intermédiaires (intrants de non-E et E) ; de coûts du travail L ; de coûts du capital (excédent brut d'exploitation) K ; de taxes à la production T1 ; d'importations M ; de marges spécifiques MS sur les différentes factures domestiques et à l'exportation, et d'impôts et subventions sur produits T2. Les marges spécifiques sur les utilisations de l'énergie (dans la production non-E et E, dans la consommation des ménages C, dans les exportations X), ajout original de la méthode de modélisation KLEM-IMACLIM du CIRED au cadre standard de la comptabilité nationale, sont une conséquence majeure de l'hybridation des données de calibrage et une caractéristique saillante de KLEM. Pour chaque utilisation de l'énergie, elles représentent la différence entre les ventes aux prix observés et les ventes au prix moyen des ressources (une moyenne des prix à la production et à l'importation) augmentée des impôts et subventions sur produits — par construction, leur somme est donc nulle. Elles permettent de modéliser des prix spécifiques à chaque agent économique représenté dans KLEM, c'est-à-dire de contourner les conséquences indésirables du standard MEGC de normalisation des prix de production explorées par Combet et al. (2014). Toutes les marges spécifiques des utilisations du bien non-énergétique sont nulles, en l'absence d'un 'compte satellite' de flux physiques sous-jacents aux flux économiques qui pourrait nécessiter une tarification spécifique aux agents.

Du côté des emplois, les biens produits ou importés contribuent aux productions non-E et E, sont consommés par les ménages (C) et les administrations publiques (G), immobilisés en investissement (I) ou exportés (X). En ce qui concerne l'énergie, la correspondance avec les agrégats du bilan énergétique est la suivante. La consommation d'énergie du secteur non énergétique (dépense de 78

milliards d'euros) correspond au total de consommation finale d'énergie net de la consommation des ménages (C, 108 milliards), qui couvre les consommations d'énergie du secteur résidentiel et une part des consommations de produits raffinés pour le transport — celle dont les dépenses sont directement acquittées par les ménages. La consommation d'énergie du secteur de l'énergie (dépenses de 23 milliards) englobe tous les flux commerciaux entre les entreprises du secteur de l'énergie, en particulier ceux concernant les intrants de gaz naturel dans la production d'électricité.

Par convention de comptabilité nationale, la consommation de biens énergétiques par les administrations publiques est nulle. Les investissements en biens énergétiques sont également nuls, une fois les variations de stocks annulées par la mise en œuvre d'une méthode de Leontief. Les exportations (X) et les importations (M) sont d'un périmètre proche à leurs homologues en volume du bilan énergétique. Le prix de chaque usage énergétique est spécifique grâce aux marges spécifiques MS (voir ci-dessus). Il est à noter que le volume de production d'énergie qui équilibre la consommation intérieure et le commerce net est un mélange d'énergie primaire et transformée. Ce double comptage, du point de vue d'un ingénieur énergétique, est une caractéristique standard du cadre de comptabilité nationale.

A.2 Procédure de construction du TES hybride

Les **emplois et importations énergétiques** du TES hybride sont reconstruits à partir des prix et quantités décrits par POLES, eux-mêmes calibrés sur les statistiques ENERDATA. Ils permettent de définir le total des emplois, et donc des ressources énergétiques.

Milliards EUR	Non-E	E	C	G	I	X	Emplois
Non-E	2 074	62	1 155	663	623	731	5 308
E	108	23	108	-	-	21	260
L	1 254	31					
T1	44	3					
K	832	53					
M	747	52					
MS non-E	-	21					
MS E	-	-37					
MS C	-	32					
MS X	-	-16					
T2	249	35					
Ressources	5 308	260					

Le solde des **ressources énergétiques** est distribué entre consommations de facteurs et taxes selon la structure de coût du secteur DE (Industries extractives, énergie, eau, gestion des déchets et dépollution) du TES INSEE 2021.

Milliards EUR	Non-E	E	C	G	I	X	Emplois
Non-E	2 074	62	1 155	663	623	731	5 308
E	108	23	108	-	-	21	260
L	1 254	31					
T1	44	3					
K	832	53					
M	747	52					
MS non-E	-	21					
MS E	-	-37					
MS C	-	32					
MS X	-	-16					
T2	249	35					
Ressources	5 308	260					

Des **marges spécifiques**, de somme nulle, sont ajustées afin de garantir des prix spécifiques à chacun des emplois énergétiques. Cette procédure est d'autant plus nécessaire que le niveau d'agrégation de KLEM suppose des consommations d'énergie très hétérogènes, donc aux prix d'autant plus spécifiques à chaque emploi.

Milliards EUR	Non-E	E	C	G	I	X	Emplois
Non-E	2 074	62	1 155	663	623	731	5 308
E	108	23	108	-	-	21	260
L	1 254	31					
T1	44	3					
K	832	53					
M	747	52					
MS non-E	-	21					
MS E	-	-37					
MS C	-	32					
MS X	-	-16					
T2	249	35					
Ressources	5 308	260					

Les données non-énergétiques sont déduites des totaux du TES INSEE par soustraction des données énergétiques, poste par poste.

Milliards EUR	Non-E	E	C	G	I	X	Emplois
Non-E	2 074	62	1 155	663	623	731	5 308
E	108	23	108	-	-	21	260
L	1 254	31					
T1	44	3					
K	832	53					
M	747	52					
MS non-E	-	21					
MS E	-	-37					
MS C	-	32					
MS X	-	-16					
T2	249	35					
Ressources	5 308	260					

Annexe B. Formulaire KLEM-FRA

Cette annexe présente l'ensemble des équations statiques de toutes les versions du modèle KLEM-FRA mobilisées dans les Sections 4 à 7. Ces équations s'appliquent à chaque pas de temps de la mise en œuvre du modèle depuis son année de calibrage, 2021, jusqu'à son horizon de projection 2050.

La présentation s'ouvre sur un tableau synthétisant les notations du modèle, et qui discrimine les 46 variables objets de sa résolution quelles que soient ses variantes. Le nombre d'équations correspond au nombre de variables, condition nécessaire (bien que non suffisante) à l'existence et l'unicité d'une solution : les équations (3), (21), (23), (28), (29), (31) et (34) couvrent à la fois les secteurs énergétique et non-énergétique et donc deux variables chacune, pour un total de 14 variables scalaires ; l'équation (30) définit les prix de la matrice entrées-sorties à deux secteurs et donc 4 variables scalaires. Les $36 - 8 = 28$ autres équations du modèle couvrent une variable chacune. Les notations spécifiques aux biens énergétiques sont indicées d'un E , tandis que celles spécifiques aux biens et services non énergétiques sont indicées d'un Q .

Certaines équations font l'objet d'alternatives signalées par des lettres minuscules.

Tableau 2. Notations KLEM-FRA

Notation	Description	Statut à chaque pas de temps
L	Dotation en travail	1 paramètre de source BIT et SSP2 du Giec.
K	Dotation en capital	1 paramètre calibré en 2021 sur les données d'investissement et de croissance potentielle puis projeté par la mécanique de l'inventaire perpétuel (voir ci-dessus).
ϕ_L	Productivité du travail (indice 1 en 2021)	1 paramètre déduit du ratio des projections de PIB réel de POLES et de dotation en travail (voir ci-dessus).
ϕ_E	Productivité de l'énergie dans la production non-énergétique (indice 1 en 2021)	1 paramètre déduit des projections de POLES (voir Section 2.3).
τ_K	Taux d'utilisation du stock de capital (indice 1 en 2021).	1 paramètre dont la trajectoire est calibrée pour qu'un effort d'investissement constant à sa valeur de 2021 produise un scénario de croissance stabilisé en l'absence de variations des prix énergétiques, et lorsque les volumes énergétiques croissent comme la croissance potentielle (voir Section 3.1).
L_i	Volume de travail dans la production du bien i	2 variables
K_i	Stock de capital dans la production du bien i	2 variables
KL	Agrégat de capital et de travail (valeur ajoutée) mobilisé dans la production du bien non-énergétique	1 variable
KLE	Agrégat de valeur ajoutée KL et d'énergie $\alpha_{EQ}Y_Q$ mobilisé pour la production du bien non-énergétique	1 variable
C_i	Consommation du bien i par les ménages	1 variable C_Q , 1 paramètre C_E tiré de POLES
G_Q	Consommation publique du bien Q (non-E)	1 variable
I_Q	Immobilisation du bien Q (non-E)	1 variable
X_i	Exportations du bien i	1 variable X_Q , 1 paramètre X_E tiré de POLES
M_i	Importations du bien i	1 variable M_Q , 1 paramètre M_E tiré de POLES
Y_i	Production du bien i	2 variables
S_i	Offre totale du bien i	2 variables
α_{ij}	Intensité en bien i du bien j	3 variables $\alpha_{QQ}, \alpha_{EQ}, \alpha_{EE}$, 1 paramètre α_{QE} tiré de POLES
λ_i	Intensité en travail du bien i	1 variable λ_Q , 1 paramètre λ_E tiré de POLES
κ_i	Intensité en capital du bien i	1 variable κ_Q , 1 paramètre κ_E tiré de POLES
w	Salaire	1 variable
r	Prix de location du capital	1 variable

Notation	Description	Statut à chaque pas de temps
p_{KL}	Prix de la valeur ajoutée KL dans la production du bien Q	1 variable
p_{KLE}	Prix de l'agrégat KLE dans la production du bien Q	1 variable
p_{Y_i}	Prix de production du bien i	2 variables
p_{S_i}	Prix moyen de l'offre du bien i	2 variables
p_{ij}	Prix du bien i utilisé dans la production du bien j	4 variables
p_{C_i}	Prix du bien i pour les ménages	2 variables
p_{GQ}	Prix du bien Q pour les administrations publiques	1 variable
p_{IQ}	Prix du bien Q pour l'investissement	1 variable
p_{X_i}	Prix du bien i à l'exportation	1 variable p_{X_Q} , 1 paramètre p_{X_E} tiré de POLES
p_{M_i}	Prix du bien i à l'importation	1 paramètre p_{M_Q} prix du numéraire M_Q 1 paramètre p_{M_E} tiré de POLES
IPC	Indice des prix à la consommation (méthode de Fisher chaînée)	1 variable
IPM	Indice des prix à l'importation (méthode de Fisher chaînée)	1 variable
u	Taux de chômage	1 variable
PIB	Produit Intérieur Brut	1 variable
R	Revenu consommé des ménages	1 variable
B	Balance des biens et services à prix courants	1 variable
α_{KL}	Coefficient de K_Q dans la fonction CES définissant KL_Q	1 paramètre calibré en 2021
β_{KL}	Coefficient de L_Q dans la fonction CES définissant KL_Q	1 paramètre calibré en 2021
σ_{KL}	Elasticité de substitution de K_Q et L_Q dans KL_Q	1 paramètre, voir Tableau 3
α_{KLE}	Coefficient de KL dans la fonction CES définissant KLE	1 paramètre calibré en 2021
β_{KLE}	Coefficient de $\alpha_{EQ} Y_Q$ dans la fonction CES définissant KLE	1 paramètre calibré en 2021
σ_{KLE}	Elasticité de substitution de KL et $\alpha_{EQ} Y_Q$ dans KLE	1 paramètre de source Koesler et Schymura, 2015.
α_Y	Coefficient de KLE dans la fonction CES définissant Y_Q	1 paramètre calibré en 2021
β_Y	Coefficient de $\alpha_{QQ} Y_Q$ dans la fonction CES définissant Y_Q	1 paramètre calibré en 2021
σ_Y	Elasticité de substitution de KLE et $\alpha_{QQ} Y_Q$ dans Y_Q	1 paramètre de valeur 0,77 inspiré de Koesler et Schymura, 2015.

Notation	Description	Statut à chaque pas de temps
σ_w	Élasticité du salaire réel au taux de chômage	1 paramètre de valeur 0,1 inspiré de Blanchflower et Oswald, 2005.
σ_S	Élasticité aux prix relatifs de la part des importations dans le total des ressources non énergétiques	1 paramètre de valeur 0,6 inspiré de Koesler et Schymura, 2015.
σ_X	Élasticité aux prix relatifs des exportations du bien non-énergétique	1 paramètre de valeur 1.
δ	Taux de dépréciation du stock du capital	1 paramètre de valeur 0,04.
s_G	Ratio des dépenses publiques au PIB	1 paramètre calibré en 2021.
s_I	Ratio de l'investissement au PIB	1 paramètre calibré en 2021.
τ_{ST_i}	Taux de taxe sur les ventes de biens i	2 paramètres calibrés en 2021.
τ_{Y_i}	Taux d'impôt à la production du bien i	2 variables.
$\tau_{MS_{ij}}$	Marges spécifiques sur les ventes du bien i à la production du bien j	2 paramètres $\tau_{MS_{Q_i}}$ calibrés en 2021 (nuls), 2 paramètres $\tau_{MS_{E_i}}$ de dynamiques déduites de POLES.
τ_{MSC_i}	Marges spécifiques sur le bien i vendu aux ménages	1 paramètre τ_{MSC_Q} calibré en 2021 (nul), 1 paramètre τ_{MSC_E} de dynamique déduite de POLES.
τ_{MSX_i}	Marges spécifiques sur l'exportation du bien i	1 paramètre τ_{MSX_Q} calibré en 2021 (nul), 1 variable τ_{MSX_E}

B.1 Production

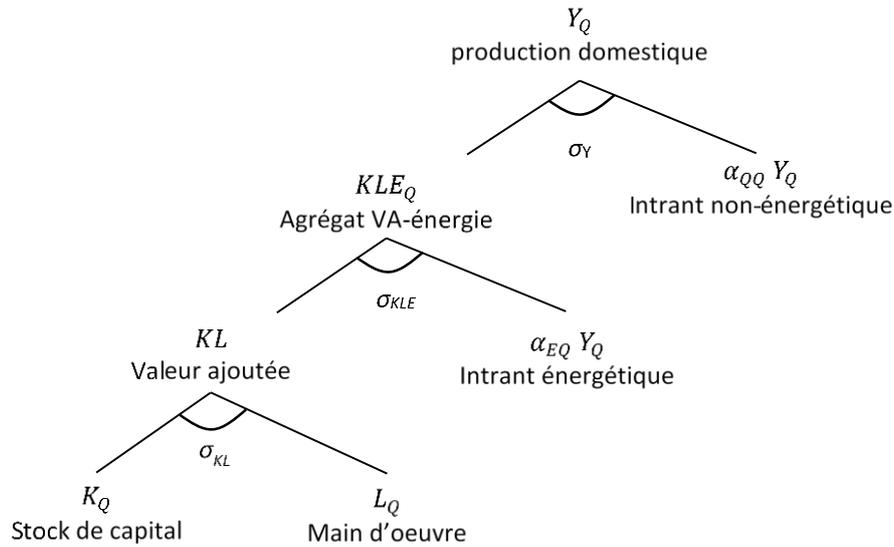
La production du bien énergétique procède de consommations d'énergies exogènes $\alpha_{EE} Y_E$, directement tirées de POLES (Equation (3) ci-dessous), ainsi que de consommations d'autres facteurs dictées par des coefficients techniques α_{QE} (biens et services non-énergétiques), λ_E (travail) et κ_E (capital) dont les évolutions sont déduites des projections de prix de marché de POLES — qui sont donc exogènes au modèle, spécifiques à chaque scénario modélisé dans POLES.

La production du bien non-énergétique mobilise des facteurs entre lesquels des arbitrages sont opérés afin de minimiser les coûts. Ces arbitrages sont organisés selon une structure en nids (Figure 17). Au pied de cette structure, capital et travail sont substituables avec une élasticité instantanée σ_{KL} , constante sur tout l'horizon de projection (Tableau 3), pour former un agrégat KL . La quantité de travail mobilisée L_Q est cependant augmentée d'un facteur de productivité ϕ_L : $KL = (\alpha_{KL} K_Q^{\rho_{KL}} + \beta_{KL} (\phi_L L_Q)^{\rho_{KL}})^{\frac{1}{\rho_{KL}}}$, avec ici comme par ailleurs $\rho_i = \frac{\sigma_i - 1}{\sigma_i}$. Ainsi, la minimisation des coûts confrontée aux prix r et w induit :

$$L_Q = \frac{1}{\phi_L} \left(\frac{\phi_L \beta_{KL}}{w} \right)^{\sigma_{KL}} \left(\alpha_{KL}^{\sigma_{KL}} r^{1-\sigma_{KL}} + \beta_{KL}^{\sigma_{KL}} \left(\frac{w}{\phi_L} \right)^{1-\sigma_{KL}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{KL}}} KL \quad (1)$$

$$K_Q = \left(\frac{\alpha_{KL}}{r} \right)^{\sigma_{KL}} \left(\alpha_{KL}^{\sigma_{KL}} r^{1-\sigma_{KL}} + \beta_{KL}^{\sigma_{KL}} \left(\frac{w}{\phi_L} \right)^{1-\sigma_{KL}} \right)^{\frac{1}{\rho_{KL}}} KL \quad (2)$$

Figure 17. Structure de production du bien non-énergétique



Les notations σ désignent les élasticités d'arbitrage spécifiques à chaque nœud de la structure.

Le facteur agrégé KL (valeur ajoutée) et l'énergie $\alpha_{EQ} Y_Q$ s'arbitrent à nouveau avec une élasticité de substitution σ_{KLE} constante pour former un agrégat KLE . Cependant, $\alpha_{EQ} Y_Q$, à l'image de $\alpha_{EE} Y_E$, est imposé à un niveau exogène A_Q par le modèle *bottom-up* POLES couplé :

$$\alpha_{Ei} Y_i = A_i \quad (3)$$

Tableau 3. Élasticités de la production et du commerce de biens et services non-énergétiques

Elasticité	Notation	Valeur
Substitution entre capital K_Q et travail L_Q	σ_{KL}	0.4200 ^a
Substitution entre valeur ajoutée KL et énergie $\alpha_{EQ} Y_Q$	σ_{KLE}	0.3518 ^a
Substitution entre agrégat KLE et non-énergie $\alpha_{QQ} Y_Q$	σ_Y	0.6678 ^b
Substitution entre production domestique Y_Q et production importée M_Q	σ_M	2.0000 ^c
Elasticité-prix de la part des exportations X_Q dans les emplois totaux S_Q	σ_X	1.0000

^a Elasticités estimées par Van der Werf (2008) sur séries temporelles pour l'ensemble de l'économie française.

^b Moyenne des élasticités calculées par Okagawa et Ban (2008) pour plusieurs secteurs d'activité pondérées par les contributions de ces secteurs à la production non-énergétique française.

^c Inspiré par les élasticités d'Armington des secteurs non-énergétiques du modèle GTAP (Hertel et al., 2008).

En conséquence, KL se déduit de KLE , dont on maintient (malgré le forçage de $\alpha_{EQ} Y_Q$) qu'il s'agit d'un agrégat suivant une fonction CES, avec prise en compte de gains de productivité de l'énergie (*autonomous energy efficiency improvement*, voir Section 1.3) au travers d'un facteur ϕ_E (indice 1 en

2021) : $KLE = \left(\alpha_{KLE} KL^{\rho_{KLE}} + \beta_{KLE} (\phi_E \alpha_{EQ} Y_Q)^{\rho_{KLE}} \right)^{\frac{1}{\rho_{KLE}}}$, ce qui induit :

$$KL = \left(\frac{KLE^{\rho_{KLE}}}{\alpha_{KLE}} - \frac{\beta_{KLE}}{\alpha_{KLE}} (\phi_E \alpha_{EQ} Y_Q)^{\rho_{KLE}} \right)^{\frac{1}{\rho_{KLE}}} \quad (4)$$

Enfin, l'agrégat KLE et l'intrant non-énergétique $\alpha_{QQ} Y_Q$ sont substituables selon une élasticité σ_Y constante, pour former la production intérieure Y_Q . Étant donnés leurs prix p_{KLE} et p_{QQ} , la minimisation des coûts induit :

$$KLE = \left(\frac{\alpha_Y}{p_{KLE}} \right)^{\sigma_Y} \left(\alpha_Y^{\sigma_Y} p_{KLE}^{1-\sigma_Y} + \beta_Y^{\sigma_Y} p_{QQ}^{1-\sigma_Y} \right)^{-\frac{1}{\rho_Y}} Y_Q \quad (5)$$

$$\alpha_{QQ} Y_Q = \left(\frac{\beta_Y}{p_{QQ}} \right)^{\sigma_Y} \left(\alpha_Y^{\sigma_Y} p_{KLE}^{1-\sigma_Y} + \beta_Y^{\sigma_Y} p_{QQ}^{1-\sigma_Y} \right)^{-\frac{1}{\rho_Y}} Y_Q \quad (6)$$

B.2 Consommations finales

La consommation d'énergie des ménages C_E est exogène, dictée par POLES (la convergence par itération des modélisations POLES et KLEM garantirait la cohérence avec le niveau de revenu des ménages). La consommation des ménages de biens et services non-énergétiques C_Q s'ajuste de manière à épuiser le budget de consommation R :

$$\sum_{i=E,Q} p_{C_i} C_i = R \quad (7)$$

Les dépenses publiques $p_{G_Q} G_Q$ sont une part constante s_G du PIB (les dépenses publiques en biens énergétiques sont nulles, par convention en comptabilité nationale) :

$$p_{G_Q} G_Q = s_G PIB \quad (8)$$

Le PIB est lui-même défini du côté des dépenses :

$$PIB = \sum_{i=E,Q} p_{C_i} C_i + p_{G_Q} G_Q + p_{I_Q} I_Q + \sum_{i=E,Q} p_{X_i} X_i - \sum_{i=E,Q} p_{M_i} M_i \quad (9)$$

B.3 Commerce international

Les importations et exportations d'énergies sont exogènes, directement tirées du modèle POLES (la convergence par itération des modélisations POLES et KLEM garantirait la cohérence avec la production et la demande intérieure).

Les biens et services non-énergétiques importés M_Q sont imparfaitement substituables à la production domestique Y_Q pour constituer l'offre S_Q , suivant l'hypothèse d'Armington (1969) c'est-à-dire avec une élasticité de substitution σ_S constante :

$$M_Q = \left(\frac{\beta_S}{p_{M_Q}} \right)^{\sigma_S} \left(\alpha_S^{\sigma_S} p_{Y_Q}^{1-\sigma_S} + \beta_S^{\sigma_S} p_{M_Q}^{1-\sigma_S} \right)^{-\frac{1}{\rho_S}} S_Q \quad (10)$$

Les exportations de biens et services non-énergétiques X_Q mobilisent une fraction de l'offre S_Q élastique aux termes de l'échange (ratio des prix à l'exportation et à l'importation) selon un coefficient σ_X :

$$\frac{X_Q}{S_Q} = A_X \left(\frac{p_{X_Q}}{p_{M_Q}} \right)^{\sigma_X} \quad (11)$$

avec A_X une constante calibrée en 2021.

La balance des biens et services est définie comme la différence entre exportations et importations à prix courants :

$$B = \sum_{i=E,Q} p_{X_i} X_i - \sum_{i=E,Q} p_{M_i} M_i \quad (12)$$

B.4 Clôture investissement-épargne

La clôture néoclassique repose sur une hypothèse de ratio au PIB s_B de la balance des biens et services supposé constant de 2022 à 2050 au niveau de 2021 (-1,9%) :

$$B = s_B PIB \quad (13)$$

Elle exogénéise aussi le comportement d'épargne nationale, défini comme un taux s_D du PIB lui-aussi maintenu constant à sa valeur de 2021 (23,0%) :

$$p_{I_Q} I_Q + B = s_D PIB \quad (14)$$

La clôture de Johansen substitue à ce comportement d'épargne nationale une contrainte sur les dépenses d'investissement $p_{I_Q} I_Q$, qui mobilisent une fraction exogène s_I du PIB (l'investissement en biens énergétiques est nul, voir Annexe A) :

$$p_{I_Q} I_Q = s_I PIB \quad (14b)$$

La clôture sur la balance commerciale retient quant à elle les contraintes (14) et (14b) — on repose ici (14) comme une alternative de (13) afin de faciliter la description des variantes :

$$p_{I_Q} I_Q + B = s_D PIB \quad (13b)$$

Enfin, une hypothèse de fixité du taux de change effectif réel (TCER) peut être considérée comme une alternative de prix fixe (*fixprice*) à celle de prix flexible (*flexprice*) sous-jacente à l'objectif de déficit commercial. Suivant la définition du TCER communément utilisée dans les modèles multisectoriels, on peut poser cette fixité comme une égalité de l'indice des prix à la consommation et de l'indice des prix d'importation, puisque ces deux indices sont normés à 1 à l'année de calibrage.

$$IPC = IPM \quad (13c)$$

B.5 Équilibres des marchés

L'équilibre offre/demande sur le marché des biens et services non-énergétiques s'écrit :

$$S_Q = \sum_{j=E,Q} \alpha_{Qj} Y_j + C_Q + G_Q + I_Q + X_Q \quad (15)$$

Celui sur le marché de l'énergie est plus simplement :

$$S_E = \sum_{j=E,Q} \alpha_{Ej} Y_j + C_E + X_E \quad (16)$$

Les importations et la production domestique de bien énergétique sont supposées commensurables, de sorte que l'offre de bien énergétique résulte de leur somme :

$$S_E = Y_E + M_E \quad (17)$$

Pour les biens et services non-énergétiques, l'hypothèse d'Armington interdit de poser une telle somme et impose, par minimisation des coûts de S_Q :

$$Y_Q = \left(\frac{\alpha_S}{p_{Y_Q}} \right)^{\sigma_S} \left(\alpha_S^{\sigma_S} p_{Y_Q}^{1-\sigma_S} + \beta_S^{\sigma_S} p_{M_Q}^{1-\sigma_S} \right)^{-\frac{1}{\rho_S}} S_Q \quad (18)$$

Le marché du travail est modélisé parfait par l'exogénéisation du taux de chômage u maintenu constant au taux A_u observé en 2021 (8,1%) :

$$u = A_u \quad (19)$$

Alternativement, des rigidités des salaires réels empêchent la pleine utilisation du facteur travail. Une courbe salaire-chômage (Blanchflower et Oswald, 2005) décrit alors la corrélation entre salaire réel et taux de chômage d'équilibre, liés par une élasticité σ_{wu} . À chaque année de projection, le niveau de salaire réel $\frac{w}{IPC}$ compatible avec le taux de chômage observé à l'année de calibrage 2021 est défini comme le salaire moyen observé en 2021, multiplié par les gains de productivité du travail ϕ_L :

$$\frac{w}{IPC} = \phi_L A_w u^{\sigma_{wu}} \quad (19b)$$

avec A_w une constante calibrée en 2021.

Le taux de chômage est trivialement défini comme la dotation en travail inemployée :

$$u = 1 - \frac{\sum_{i=E,Q} L_i}{L} \quad (20)$$

Pour chaque secteur, la consommation de travail et la production sont liées via l'intensité en travail :

$$L_i = \lambda_i Y_i \quad (21)$$

Lorsque le marché des capitaux est supposé parfait, les demandes des deux productions épuisent la dotation en capital K , ajustée d'une trajectoire exogène de taux d'utilisation des capacités τ_K afin de garantir au modèle des propriétés de croissance équilibrée (voir Section 3.1) :

$$\sum_{i=E,Q} K_i = \tau_K K \quad (22)$$

Alternativement, à l'instar de la courbe salaire-chômage utilisée pour spécifier une rigidité du salaire réel, une relation d'isoélasticité entre prix de location réel du capital et taux d'utilisation du stock est spécifiée :

$$\frac{r}{IPC} = A_r B_r^{-\sigma_r} \left(\frac{\tau_K K - \sum_i K_i}{\tau_K K} \right)^{\sigma_r} \quad (22b)$$

où A_r et B_r sont respectivement les valeurs de calibrage de r et de la part non-utilisée du stock de capital, supposée égale à 20%.

Autre alternative, dans les variantes à accumulation keynésienne, la dotation exogène (celle héritée de l'année précédente après dépréciation au taux constant de 4%) est augmentée de l'investissement de l'année en cours :

$$\sum_{i=E,Q} K_i = \tau_K (K + I_Q) \quad (22c)$$

De même que pour le travail, le capital mobilisé par chaque secteur et sa production sont liés via l'intensité en capital :

$$K_i = \kappa_i Y_i \quad (23)$$

B.6 Prix à la production et à la consommation

Les paiements des facteurs primaires w le salaire et r le prix de la location du capital sont communs aux deux secteurs. Ils s'ajustent en fonction de leurs équilibres de marché.

KL étant un agrégat CES de K_Q et L_Q , le prix p_{KL} de l'agrégat KL est une fonction connue, dérivée de la minimisation des coûts, des prix r et w et de l'élasticité de substitution des deux intrants σ_{KL} :

$$p_{KL} = \left(\alpha_{KL}^{\sigma_{KL}} r^{1-\sigma_{KL}} + \beta_{KL}^{\sigma_{KL}} \left(\frac{w}{\phi_L} \right)^{1-\sigma_{KL}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{KL}}} \quad (24)$$

Contrairement à p_{KL} , p_{KLE} le prix de l'agrégat KLE spécifique à la production non énergétique ne peut être défini en fonction des prix p_{KL} et p_{EQ} et de l'élasticité de substitution des deux inputs σ_{KLE} , car la fixation de $\alpha_{EQ} Y_Q$ court-circuite le programme de minimisation des coûts. Par conséquent, p_{KLE} est plutôt déduit de l'équation comptable simple :

$$p_{KLE} KLE = p_{KL} KL + p_{EQ} \alpha_{EQ} Y_Q \quad (25)$$

Le prix à la production du bien non énergétique p_{YQ} est lui aussi une fonction des prix de l'agrégat KLE et de l'intrant non énergétique à la production $\alpha_{QQ} Y_Q$, à laquelle s'ajoutent une taxe τ_{YQ} *ad valorem* ainsi qu'une rente d'exploitation des ressources naturelles (terres agricoles, forêts, ressource halieutique, gisements non énergétiques) à taux (*mark-up*) constant τ_{RQ} :

$$p_{YQ} (1 - \tau_{YQ} - \tau_{RQ}) = (\alpha_Y^{\sigma_Y} p_{KLE}^{1-\sigma_Y} + \beta_Y^{\sigma_Y} p_{QQ}^{1-\sigma_Y})^{\frac{\rho_Y-1}{\rho_Y}} \quad (26)$$

Pour le bien énergétique, le prix au producteur est simplement la somme des coûts de production augmentés des impôts à la production et de la rente pétrolière et gazière (nulle pour la France) :

$$p_{YE} = p_{QE} \alpha_{QE} + p_{EE} \alpha_{EE} + w \lambda_E + r \kappa_E + \tau_{RE} p_{YE} + \tau_{YE} p_{YE} \quad (27)$$

Les taxes à la production τ_{Y_i} sont ajustées afin de restituer à chacun des secteurs ses paiements de fiscalité énergétique au-delà du taux moyen en vigueur à l'année de calibrage (2021) :

$$(\tau_{ST_E} - A_\tau) p_{Ei} \alpha_{Ei} Y_i + (\tau_{Y_i} - B_\tau) p_{Yi} Y_i = 0 \quad (28)$$

avec A_τ et B_τ les taux des deux taxations en 2021.

Les prix d'importation des deux biens sont exogènes : p_{MQ} est constant car le bien non-énergétique importé est le numéraire du modèle ; p_{ME} suit une trajectoire exogène tirée de POLES.

Le prix d'offre moyen d'un bien i , p_{S_i} découle de l'équation comptable :

$$p_{S_i} S_i = p_{Y_i} Y_i + p_{M_i} M_i \quad (29)$$

En ce qui concerne les prix d'achat, le prix du bien i comme intrant dans la production du bien j , $p_{i,j}$, est égal au prix de l'offre du bien i augmenté des marges spécifiques aux producteurs $\tau_{MS_{ij}}$ et des taxes à la vente τ_{ST_i} :

$$p_{ij} = p_{S_i} (1 + \tau_{MS_{ij}}) (1 + \tau_{ST_i}) \quad (30)$$

Les prix de vente aux ménages et aux administrations publiques, les prix des biens d'investissement et des exportations sont construits de manière similaire, en abandonnant les marges spécifiques inutiles lorsque l'énergie n'est pas concernée (consommation publique, investissement, voir Annexe A), ainsi que les taxes sur les ventes à l'exportation :

$$p_{C_i} = p_{S_i} (1 + \tau_{MSC_i}) (1 + \tau_{ST_i}) \quad (31)$$

$$p_{G_Q} = p_{S_Q} (1 + \tau_{ST_i}) \quad (32)$$

$$p_{I_Q} = p_{S_Q} (1 + \tau_{ST_i}) \quad (33)$$

$$p_{X_i} = p_{S_i} (1 + \tau_{MSX_i}) \quad (34)$$

Dans le cas du bien énergétique, la marge spécifique aux exportations τ_{MSX_E} s'ajuste de manière endogène pour tenir compte de la prescription exogène p_{X_E} .

Les indices des prix à la consommation et à l'importation IPC et IPM sont calculés comme des indices chaînés, c'est-à-dire d'une année (indiquée $t - 1$ ci-dessous) à la suivante (indiquée t ci-dessous), selon la formule de Fisher :

$$IPC_t = IPC_{t-1} \sqrt{\frac{\sum p_{C_i,t} C_{i,t-1} \sum p_{C_i,t} C_{i,t}}{\sum p_{C_i,t-1} C_{i,t-1} \sum p_{C_i,t-1} C_{i,t}}} \quad (35)$$

$$IPM_t = IPM_{t-1} \sqrt{\frac{\sum p_{M_i,t} M_{i,t-1} \sum p_{M_i,t} M_{i,t}}{\sum p_{M_i,t-1} M_{i,t-1} \sum p_{M_i,t-1} M_{i,t}}} \quad (36)$$

Bibliographie

- Antimiani, A., Costantini, V., & Paglialunga, E. (2015). The sensitivity of climate-economy CGE models to energy-related elasticity parameters: Implications for climate policy design. *Economic Modelling*, 51, 38-52.
- Armington, P. (1969). A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production. *IMF Staff Papers* 16, 159-178.
- Blanchflower, D. G., Oswald, A. J. (2005). *The wage curve reloaded*. Working Paper 11338, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, 46 p.
- Combet, E., Gherzi, F., Lefèvre, J., Le Treut, G. (2014). *Construction of hybrid Input-Output tables for E3 CGE model calibration and consequences on energy policy analysis*. GTAP resource #4524, Global Trade Analysis Program, Purdue University, 27 p.
- Grubb, M., Edmonds, J., ten Brink, P., Morrison, M. (1993). The costs of limiting fossil-fuel CO2 emissions: a survey and analysis. *Annual Review of Energy and the Environment* 18(1), 397-478.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Johansen, L. (1960). *A multi-sectoral study of economic growth*. North-Holland, Amsterdam, 117 p.
- Koesler et Schymura, 2015
- Löschel, A. (2002). Technological change in economic models of environmental policy: a survey. *Ecological Economics* 43 (2-3), 105-126.
- Okagawa, A., Ban, K. (2008). *Estimation of substitution elasticities for CGE models*. Discussion Papers in Economics and Business 08-16, Graduate School of Economics and Osaka School of International Public Policy (OSIPP), Osaka University, Osaka, Japan.
- Robinson, S. (1988). Multisectoral Models. In Chenery, H., Srinivasan, T. N. (eds.), *Handbook of Development Economics, Volume II*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 886-947.
- Schmalensee, R., Stoker, T. M., Judson, R. A. (1998). World carbon dioxide emissions: 1950–2050. *Review of Economics and Statistics* 80 (1), 15-27.
- Su, X., Gherzi, F., Teng, F., Meicong, L. (2022). [The economic impact of a deep decarbonisation pathway for China: a hybrid model analysis through bottom-up and top-down linking](#). *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 27, 11.
- Van der Werf, E. (2008). Production functions for climate policy modelling: An empirical analysis. *Energy Economics* 30 (6), 2964-2979.
- Yates, A. M. (1995). [Autonomous energy efficiency improvements: relevance, use, and empirical basis for global climate change policy analysis](#). Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology.

Table des matières

Introduction.....	1
1. Options de modélisation	2
1.1 Clôture investissement-épargne	2
1.2 Inventaire perpétuel néoclassique versus ‘keynésien’	3
1.3 Coûts et bénéfices microéconomiques des opérations de décarbonation	4
1.4 Spécifications des marchés	4
2. Modèles mobilisés	6
2.1 Le modèle macroéconomique KLEM	6
2.2 Le modèle des systèmes énergétiques POLES (source : Enerdata)	7
2.3 Calibrage de KLEM-FRA et couplage aux projections de POLES pour la France	8
3. Scénarisation.....	9
3.1 Scénarisation macroéconomique	9
3.2 Scénarisation énergétique	12
3.3 Écart à la croissance potentielle	15
4. Influence de clôtures alternatives en marchés parfaits.....	16
4.1 Conséquences macroéconomiques	16
4.2 Conséquences sur les prix relatifs.....	17
5. Introduction d’hypothèses de rigidité des prix.....	19
5.1 Rigidité des salaires.....	19
5.2 Rigidité du prix de location du capital.....	20
5.3 Rigidité du taux de change effectif réel	22
6. Influence de variations des coûts techniques de décarbonation	24
6.1 Dans l’hypothèse de marchés parfaits.....	24
6.2 Avec rigidité des salaires.....	25
7. Mise en œuvre d’une accumulation ‘keynésienne’	27
7.1 Toutes choses égales par ailleurs.....	27
7.2 Avec forçage d’un choc d’investissement.....	28
7.3 Forçage d’un choc d’investissement sous accumulation néoclassique	29
Conclusion	30
Annexe A. Tableau entrées-sorties hybride INSEE/ENERDATA	32
A.1 Présentation du TES hybride et des flux énergétiques sous-jacents	32
A.2 Procédure de construction du TES hybride.....	34

Annexe B. Formulaire KLEM-FRA.....	36
B.1 Production.....	39
B.2 Consommations finales.....	41
B.3 Commerce international.....	41
B.4 Clôture investissement-épargne.....	42
B.5 Équilibres des marchés.....	42
B.6 Prix à la production et à la consommation.....	44
Bibliographie.....	46