

## **Macroéconomie et énergie : les impressions d'un modélisateur**

Paul Zagamé\*

### **Du choc pétrolier à la construction de modèles européens**

Le symbole de l'importance de l'énergie pour la macroéconomie, c'est l'arrêt brutal des Trente Glorieuses lors du premier choc pétrolier; les macroéconomistes ont alors ressenti le besoin de mieux prendre en compte l'énergie dans les modèles, certains étant même spécifiquement dédiés à l'étude des interactions entre énergie et macroéconomie. C'est bien sur ces modèles que je veux ici présenter quelques idées que m'inspire une certaine pratique de la macroéconomie de l'énergie.

Je vais commencer par définir très simplement le fonctionnement d'un modèle macroéconomie énergie : celui-ci s'appuie principalement sur les comportements de deux agents, l'entrepreneur qui maximise son profit et le consommateur qui essaie de tirer le maximum de satisfaction de sa consommation; mais nous devons également compter avec

l'extérieur, qui va sanctionner par des déficits des comportements d'agents incompatibles entre eux, nourrissant l'inflation et, évidemment, avec l'État qui définit les variables de politique économique. Une hausse du prix du pétrole, par exemple, va entraîner des substitutions de facteurs de production et de biens consommés, entraîner une baisse de revenus réels et induire des comportements de sauvegarde : hausse des prix des entrepreneurs, demande de hausse de salaires. Mais les modèles de la macroéconomie de l'énergie, pour être crédibles, doivent être assez compliqués à construire : ils doivent être sectoriels et détaillés, tant le contenu en énergie des divers secteurs est différent, ils doivent s'appuyer sur une analyse fine des fonctions représentant les technologies de production, sur les substitutions à l'œuvre dans les demandes de consommation, et doivent prendre en compte les données internationales, c'est-à-dire s'appuyer sur des modèles d'autres pays. Tout cela nécessite des financements importants.

---

\* SEURECO (cf. biographies p. 79-80).

Bien que dans cette tribune, «d'instinct», nous nous sommes imposés de ne pas citer de noms ni d'ouvrages, je vais faire une exception pour un fonctionnaire européen dont la clairvoyance et la ténacité ont permis qu'une vaste famille de modèles européens de l'énergie voie le jour, parmi lesquels plusieurs grands modèles macroéconomiques de l'énergie; il s'agit de Pierre Valette qui a terminé sa carrière en tant que directeur à la Direction générale de la Recherche. Cette épopée et son utilité sont contées dans : Rossetti D., *The Power of Science: Economic Research and European Decision Making: the case of Energy and Environment Policies* (Peter Lang, 2010).

La Commission européenne, très impliquée dans les programmes de recherche sur l'énergie, a tout de suite compris l'intérêt de financer des modèles centrés sur l'articulation entre l'énergie et l'économie, tant le prix de l'énergie semblait conditionner les évolutions macroéconomiques, tant, réciproquement, la conjoncture mondiale pouvait être déterminante pour le prix de l'énergie. Enfin, ces implications appelaient des études sur la dépendance entre les politiques de l'énergie et les politiques économiques; c'était à la fin des années 1970 et c'est ainsi que le financement de ces recherches a

permis de doter les pays européens d'une capacité d'expertise en termes de modélisation qui pouvait rivaliser avec celle des Américains. De plus, cette action de la Commission s'inscrivait parfaitement dans ce que l'on a appelé plus tard le principe de subsidiarité, puisque l'élaboration d'un système de modèles européens interdépendants profitait d'un coup à l'ensemble des pays européens.

### **L'environnement s'invite au débat en pleine crise de l'emploi**

Mais, depuis, les préoccupations environnementales se sont invitées et ont même pris le pas sur les préoccupations purement énergétiques; et il était bon que l'Europe disposât de cette capacité d'expertise lors des négociations globales sur les politiques climatiques, car une analyse exhaustive des coûts et avantages de telles politiques ne peut se contenter d'une analyse microéconomique, mais doit aussi inclure les conséquences sur la compétitivité, la croissance, l'emploi, le bien-être, bref, ce que l'on appelle les «retours macro»: les investissements nécessités par ces politiques ont des effets d'entraînement (multiplicateurs) que seul peut prendre en compte un modèle macro. Il en est de même des effets de revenus qui suivent les substitutions entraînées par une hausse du prix de l'énergie, et aussi des réactions de sauvegarde de ces revenus (hausse des prix des entreprises, demande d'augmentation des salaires), et enfin des effets sur les productivités entraînés par les substitutions factorielles, tous ces facteurs conditionnant la compétitivité, la croissance et l'emploi.

Ces préoccupations environnementales ont émergé au moment où de nombreux pays affrontaient une crise de l'emploi aiguë et dès lors, la meilleure façon d'assurer la crédibilité de ces nouvelles politiques était de montrer qu'elles ne nuisaient pas à l'emploi. Une littérature importante est apparue sur le double dividende écologie emploi, qui a donné lieu à de nombreux travaux de modélisation. Les modèles macro-énergie appliqués ont confirmé que la taxation de l'énergie dont le produit était

redistribué par un allègement des cotisations sociales à la charge de l'employeur conduisait à une amélioration de l'emploi. Oui, mais cette amélioration n'est pas durable à long terme, car les entreprises vont répercuter dans leurs prix les hausses de coûts, les employés vont chercher à obtenir des hausses de salaires pour sauvegarder leur pouvoir d'achat, cela d'autant plus que la réduction du chômage s'y prête, et tout cela, ne l'oublions pas, dans un contexte où la productivité du travail a diminué en raison des substitutions factorielles: la fin du miracle arrive en raison des hausses de prix et de la perte de compétitivité. Non durable, cette amélioration? Oui, à moins que des innovations apportent des gains de productivité qui contrebalancent les hausses de coûts...

### **Les évaluations des politiques climatiques**

Les modèles macro-énergie ont, par la suite, été beaucoup utilisés pour évaluer en Europe et dans les pays européens les conséquences des réductions des émissions de CO<sub>2</sub>: politiques européennes, détermination du «*Burden Sharing*» (la répartition de l'effort entre les pays) détermination des plans d'action nationaux, calcul du prix du carbone hors ETS, etc. Puis, ils ont été utilisés pour évaluer les conséquences des trajectoires bas carbone, des transitions écologiques dans les pays européens et notamment en France. Les résultats montrent que ces stratégies, qui s'appuient sur des effets prix (taxation du carbone) et des dépenses d'investissement considérables, dans le bâtiment, dans les économies d'énergie, peuvent conduire à des situations favorables en termes d'emploi, mais deux questions doivent nous amener à réfléchir au-delà de ces travaux très pertinents. La première a trait au financement de ces investissements importants, la seconde aux pertes de productivité globale des facteurs qui sont entraînées par ces investissements massifs, en outre créateurs d'emplois. Sur la première, la crise de la Covid-19 et ses conséquences en termes d'attitude face aux déficits ont changé radicalement les points de vue et limité les conséquences de l'absence de

bouclage financier de la plupart des modèles macro-énergie; sur la seconde, se pose clairement de nouveau la question de la nécessité d'accompagner ces politiques de mesures favorables à l'innovation.

### **Les modèles sont-ils adaptés à l'évaluation des politiques renforcées?**

Au cours des travaux effectués par le groupe Quinet sur «La valeur de l'action pour le climat», les modèles ont été soumis à des conditions d'utilisation plus «extrêmes». Il s'agissait de simuler une trajectoire à zéro carbone en 2050, objectif obtenu à l'aide d'une taxe unique; plusieurs modèles ont été utilisés et ils ont tous eu des difficultés à atteindre l'objectif, car le niveau de la taxe s'envolait littéralement à l'approche de l'année terminale, à des niveaux susceptibles de mobiliser les gilets de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. Certes, on peut relativiser ce résultat, la taxe comme unique instrument n'étant ici utilisée que pour «révéler» la valeur du carbone pour l'action; dans la pratique, cette taxe s'accompagnerait de nombreuses autres mesures, notamment règlementaires, qui, elles-mêmes, pourraient être converties en des contributions additives à la valeur carbone; mais ces difficultés à atteindre le zéro carbone incitent à s'interroger à la fois sur l'objectif et sur la pertinence des modèles. L'objectif apparaît extrêmement ambitieux, du moins avec les mécanismes que comportent les modèles. Mais la question qui surgit alors est celle de savoir si ces mécanismes, estimés sur le passé, qui sont des approximations admissibles au voisinage de sentiers peu chahutés, sont toujours valables pour des conditions d'utilisation plus extrêmes comme le zéro carbone? Au fond, ces mécanismes «classiques» des modèles ne doivent-elles pas être «relativisées» pour des situations de vitesses de réduction très importantes; objectif ambitieux, modèles limités, comment mettre un curseur à ce dilemme?

### **Quelques améliorations**

Devant ce qui peut paraître une «impasse», plusieurs solutions peuvent être avancées. La première, déjà pratiquée, consiste à «hybrider» les modèles macro avec des modèles «technico-économiques» qui sont plus précis dans la description des technologies de l'énergie et qui vont peut-être mieux décrire les changements technologiques induits par l'augmentation de la taxe. De fait, les modèles technico-économiques, non bouclés d'un point de vue macroéconomique, offrent de meilleures réponses à la taxe (entendons par là des taxes moins élevées pour des niveaux de réduction donnés mais encore élevés). Oui, mais de quels changements technologiques s'agit-il, de l'accélération de la mise en œuvre des meilleures technologies déjà existantes? S'agit-il de l'apparition de nouvelles technologies induite par l'importance de la contrainte carbone? Les modèles de ce type endogénéisent parfois l'innovation sur l'expérience (*Learning by doing*) ou sur la R&D (*Learning by researching*), mais la première innovation n'est sensible aux stress constitués par l'augmentation élevée de la taxe que de façon indirecte, tandis que la seconde devrait s'appuyer sur une analyse relativement complexe de la décision de recherche. En fait, ces modèles s'appuient plutôt sur une analyse de prospective technologique, ce qui fait de l'hybridation des modèles macro un gain appréciable dans l'évaluation des conséquences macroéconomiques des politiques de l'énergie, mais que l'on peut encore améliorer.

Mais nous n'avons pas encore évoqué la question des modifications de la structure des consommations. Celle-ci obéit logiquement aux fonctions de demande dérivées des fonctions d'utilité, qui déterminent les demandes de biens en fonction de l'évolution des prix relatifs des biens et des revenus, les élasticités prix de la demande jouant un rôle essentiel dans la réduction de la consommation de biens à fort contenu énergétique. Mais là également, se pose la question de savoir si ces élasticités établies par l'économétrie pour des valeurs moyennes de variations des prix reflètent encore la réalité des comportements pour des valeurs plus

extrêmes. De plus, les modèles ne traduisent pas l'évolution de long terme des préférences des consommateurs sous l'influence de la modification des valeurs (montée de la conscience écologique...) et de la modification du style de vie. Plusieurs tentatives ont eu lieu pour rapprocher les choix des consommateurs dans les modèles de procédures plus réalistes de décisions, une hybridation en quelque sorte des phénomènes de consommation, symétrique de celle que nous avons présentée pour la production.

Mais ces améliorations ne doivent pas distraire les modélisateurs des avancées plus fondamentales nécessaires ; l'une est liée à la description, de façon endogène, des déformations de long terme des fonctions de production. Une possibilité nous est offerte par les nouvelles théories de la croissance, qui s'appuient sur un processus de décision de l'innovation plus précis, étendu aux autres actifs de l'innovation que la R&D (Technologies de l'Information et de la Communication, *software*, compétences) et qui, surtout, font de l'innovation un processus collectif, fondé sur les transferts de connaissances ; ces transferts permettent d'envisager des rendements globaux non décroissants pour les efforts d'innovation et autorisent donc la possibilité d'une action sur la croissance de long terme, contrairement aux anciennes théories. Mais l'adaptation de ces théories aux questions énergétiques nécessite encore des travaux pour une meilleure prise en compte des spécificités du progrès technique dans ce domaine. Notons au passage que les répercussions des décisions individuelles d'innovation sur les potentiels de gains collectifs par le biais des externalités de connaissance doivent nous faire apprécier d'un point de vue global ces décisions : c'est-à-dire par leur productivité sociale qui prend en compte non seulement les innovations apparaissant dans l'entreprise ou dans le cas des modèles dans le secteur, mais également celles qui sont induites dans les autres entreprises ou secteurs. Cette productivité sociale apparaît de façon implicite dans les résultats des modèles macro qui prennent en compte ces externalités. Une recherche, financée par le Conseil Français de l'Énergie, a tenté par le passé d'apprécier la

productivité sociale des dépenses de recherche dans le domaine de l'énergie, car les innovations qu'elles entraînent dépassent largement le champ de l'énergie et « ruissellent » sur nombre de secteurs industriels.

### **Vers une utilisation des modèles étendue à la prospective**

Par-delà ces évolutions, je voudrais revenir sur les possibilités d'utilisation de ces modèles, qui bien souvent sont mal perçues parce que peut-être insuffisamment expliquées. Un modèle est composé de variables exogènes portant sur l'environnement international ou la politique économique et calcule des variables endogènes sur la production, la croissance, l'emploi, l'investissement, les importations, les exportations et des variables plus spécifiques (par exemple l'énergie) et cela aussi bien aux niveaux sectoriel que macroéconomique ; ce calcul s'appuie sur les équations du modèle qui représentent des relations de comportement, consommation, investissement... et des relations comptables. À partir de là, une très large gamme d'utilisations peut être envisagée :

- La détermination d'une trajectoire de référence, en projetant les sentiers qui paraissent les plus probables pour les variables exogènes, c'est-à-dire les variables de politiques et de l'environnement international ; ce compte peut être qualifié de « prévisionnel » et il servira de référence pour guider l'action.
- L'évaluation d'une nouvelle politique, qui se fait en modifiant les variables exogènes relatives à cette politique et en comparant les résultats obtenus à ceux d'un compte de référence sans la politique en question : par exemple, l'introduction d'une taxe carbone pour atteindre l'objectif de zéro carbone, comme nous venons de le voir.
- L'évaluation d'événements non prévus sur l'international (par exemple un choc pétrolier) en modifiant les variables exogènes qui s'y rapportent. Tout cela constitue les exercices de modélisation « classiques ».
- Mais on peut aller plus loin dans la confection de scénarios : en décrivant plusieurs trajectoires fondées sur l'incertitude qui frappe

## Macroéconomie et énergie : les impressions d'un modélisateur

certaines variables de politique ou de l'environnement international, mener une analyse de sensibilité qui permette de réfléchir sur différentes éventualités. Cette méthode d'utilisation peut se révéler très féconde pour déterminer les réponses les plus appropriées des firmes, c'est-à-dire la politique qui apparaît la plus robuste à l'égard de tout cet ensemble de possibles. Cette méthode que je viens de décrire permet justement de confectionner différents scénarios à partir de variations de variables stratégiques, qui sont instables ou difficiles à prévoir, et donc de déterminer les stratégies les plus robustes à tous les aléas identifiés. Par exemple, pour une compagnie pétrolière, rechercher la stratégie la plus robuste à des variations importantes du prix du pétrole.

- Il y a une dernière façon d'utiliser les modèles qui va encore plus loin, celle qui consiste à modifier les équations mêmes du modèle, évidemment pas les équations comptables, mais les fonctions de comportement. Ainsi, on peut se livrer à des exercices prospectifs qui répondraient à des interrogations essentielles sur les conséquences de modifications importantes et de façon structurelle des comportements. Plusieurs questions ont déjà fait l'objet de travaux de modélisation de ce type : sur les «*breakthrough*» technologies qui entraînent une modification des équations de demande de facteurs et de prix; sur des scénarios prospectifs post-Covid, dans lesquels ont été drastiquement modifiés les comportements d'épargne et d'offre de travail; de même ont été effectuées des recherches sur les conséquences, pour les politiques environnementales, de la modification des préférences des consommateurs. Ces études permettent de répondre de façon générique aux questions suivantes : quelles sont les conséquences quantitatives de la modification de comportement, d'emploi, d'investissement, d'utilisation des biens intermédiaires, d'épargne, de consommation, de détermination de prix, et cela dans des cadres de cohérence formalisés, au premier rang desquels le cadre comptable. Elles ressortissent davantage à la prospective qu'à la prévision.

Telles sont les impressions que nous ont laissées les différents travaux que nous avons

menés sur la modélisation. De ce fouillis, je voudrais vous inciter à retenir trois idées. La première est liée au message plus ou moins explicite que nous livrent les modèles : toutes les politiques que nous avons énoncées, notamment sur l'environnement, ne produiront des effets bénéfiques durables que si elles sont accompagnées d'efforts pour accroître l'innovation et le progrès technique, car le long terme dépendra de la possibilité de maintenir la compétitivité. La deuxième est un double corollaire de cette idée : il faut mettre en œuvre de telles politiques et il est urgent d'essayer de mieux traduire en termes de modélisation les phénomènes d'émergence de l'innovation. La troisième enfin, c'est que les propriétés de ces modèles les rendent aptes à décrire un vaste ensemble de futurs possibles, susceptibles de faire émerger de nouvelles interrogations autour de stratégies à élaborer.

Et c'est pourquoi, en dépit des immenses progrès d'autres méthodes de traitement de l'information (intelligence artificielle, Big Data, *Learning machine*, etc.), nous pensons que ces modèles auront toujours une utilité.

*SEURECO est une «spin-off» de l'équipe de recherche ERASME qui était commune à l'Université de Paris 1 et à l'École Centrale, spécialisée dans l'analyse des fondements théoriques, la construction et l'utilisation des modèles économiques appliqués, orientée dès le début sur les modèles macroéconomie énergie. Cette équipe a participé à de nombreux contrats de recherche financés par la D.G. Recherche de la Commission européenne, ce qui lui a permis de former de nombreux doctorants et de participer à la construction de plusieurs systèmes de modèles détaillés européens : HERMES en tant que coordonnateur, NEMESIS (coordonnateur), GEM-E3 (participant au réseau). Aujourd'hui, SEURECO poursuit ses travaux autour du système de modèles macro sectoriels détaillés NEMESIS, un modèle pour chaque pays européen, et pour certaines autres zones, de deux façons : par des contrats de recherche, le plus souvent européens, qui visent à améliorer le modèle, à faire progresser ses spécifications, pour tenir compte*

de l'évolution de la théorie et des données disponibles; par des applications de prévisions ou de prospective, d'évaluation des politiques économiques ou d'analyse des conséquences de toute modification de l'environnement international ou des comportements. Sur les contrats de recherche, NEMESIS a réalisé plus de 80 contrats en tant que coordonnateur ou associé, avec des partenaires de recherche européens tels que NTUA (Athènes), l'Université de Maastricht, KUL (Louvain), le bureau du plan belge, etc. Le dernier contrat actuellement en cours de réalisation est «Paris Reinforce», recherche menée par un grand réseau européen autour de l'Accord de Paris.

Les applications du modèle sont très nombreuses, incluant des utilisations purement économiques, des prévisions et des analyses de politiques : l'évaluation des politiques de recherche (tous les programmes européens depuis 2003), de l'énergie et l'environnement. Les références de SEURECO-ERASME sont nombreuses en France, par exemple : le Commissariat à la stratégie et à la prospective, France Stratégie, le ministère de l'Environnement, le ministère de l'Économie, l'ADEME, le Sénat, la Chambre de Commerce et d'Industrie, le Conseil Français de l'Énergie, la Fabrique de l'Industrie, l'IFRAP...

## SUR L'AGENDA DE LA REVUE

### 5 ET 6 OCTOBRE 2020

#### Meet'Up 2020 Greentech

Organisateur : ministère de la Transition écologique  
Lieu : en ligne

### 7 AU 9 OCTOBRE 2020

#### Semaine mondiale de l'énergie : «Connecter les communautés de l'énergie»

Session sur le rôle de l'investissement dans la transition énergétique européenne (09 octobre)  
Organisateur : World Energy Council  
Lieu : en ligne

### 13 ET 14 OCTOBRE 2020

Journées annuelles : «Tranformations»  
Organisateur : EVOLEN  
Lieu : Paris (75), France

### 22 OCTOBRE 2020

Matinée de la Transition énergétique  
**Réseaux électriques à l'ère du renouvelable et du numérique**  
Organisateur : Université de Franche-Comté  
Lieu : Belfort (90), France

### 27 OCTOBRE 2020

Energietag : «Green Recovery in Europe – Energy Future at the Crossroads»  
Organisateur : WEC Allemagne  
Lieu : en ligne

### 3 NOVEMBRE 2020

3<sup>e</sup> édition de la Conférence EnR Entreprises  
**«Consommation énergétique : l'opportunité des énergies renouvelables»**  
Organisateur : Institut Orygeen, Enerplan et France Energie Eolienne  
Lieu : Paris (75), France

### 16 NOVEMBRE 2020

Colloque «CO<sub>2</sub> : déchet ou matière première d'avenir?»  
Organisateur : Fondation de la Maison de la Chimie  
Lieu : Paris (75), France

### 18 NOVEMBRE 2020

Colloque «Green Deal européen : la place du bleu dans le pacte vert»  
Organisateur : Cercle Français de l'Eau  
Lieu : Paris (75), France

### 10 DÉCEMBRE 2020

Sixième conférence : «Évaluation des politiques publiques»  
Organisateurs : AFSE – DG Trésor  
Lieu : Paris (75), France

### 10 DÉCEMBRE 2020

Colloque «L'analyse de cycle de vie, un outil au service des stratégies environnementales»  
Organisateur : ANRT  
Lieu : Montpellier (34), France