RAPPORT SUR L'EXERCICE DE FAISABILITE D'ECRITURE D'UN MODELE MACRO-ECONOMIQUE RACCORDABLE DANS ZOOM

4 Janvier 2001

1 OBJECTIFS

Le but de ce travail est d'utiliser un formalisme permettant une étude détaillée des couplages et rétroactions entre diverses variables dans la modélisation de systèmes complexes, afin de développer des modèles intégrés simplifiés (par rapport aux modèles existant du type Image) permettant d'étudier les couplages entre processus climatiques et réponses économiques.

Nous présentons dans ce rapport intermédiaire les conclusions et résultats d'une première phase du travail consistant en une étude de faisabilité d'intégration d'un modèle macro-économique dans un cadre de modélisation utilisant ce formalisme. En effet, il n'était pas *a priori* évident d'appliquer une méthodologie élaborée pour l'étude de phénomenes physiques à ce type de modèle.

Grâce à ce travail préliminaire, nous sommes en mesure d'aborder la problématique de définition "d'outils intégrés" destinés à accompagner le questionnement pluri-disciplinaire lié aux effets climatiques de l'activité anthropique. Il s'agit en effet d'une véritable problématique dans la mesure où, en physique, la construction d'un modèle est toujours destinée à résoudre ou éclairer un problème bien défini. Or, dans le cadre du GICC, il semble difficile de cerner un ensemble de problèmes biens posés. C'est à cette difficulté primordiale que nous sommes confrontés et que nous allons tenter de dépasser au cours des prochains mois.

2 CONCLUSIONS DE LA PREMIERE PHASE

La première partie de ce travail a consisté à reprendre un modèle développé au Cired, le modèle Imaclim-Proj, et à l'écrire dans le formalisme TEF (Formalisme d'Evolution par Transfert) en utilisant le logiciel Zoom développé par la collaboration Leseth (UPS-Toulouse) et Ramsès du LMD.

Le formalisme TEF procède par découpage et raccordement, c'est-à-dire remplace un modèle global par un ensemble de modèles partiels et éventuellement de variables et relations supplémentaires, équivalent au modèle global. Ce formalisme distingue deux types de variables, des variables d'état associées à des équations d'évolution, et des variables de transfert associées à des processus d'échange entre les sous-systèmes.

Le modèle Imaclim-Proj projette, à un horizon temporel donné, un Tableau Entrées-Sorties (TES) à 6 secteurs (habitat, transport, énergie, pétrole, commerce et secteur composite) en utilisant divers jeux d'hypothèses sur les rythmes et structures de développement. Ce modèle projette deux types d'équilibre (équilibre des prix et équilibre des quantités) qui sont tous deux dépendants de la matrice de Leontieff (matrice technique, ou matrice des consommations intermédiaires). Le facteur déterminant de la projection du TES est la projection de la demande finale de biens et services des ménages qui se fait sur la base d'indicateurs de consommation en volume. On a recours à une fonction logistique pour la projection de la demande finale dans les secteurs de l'énergie, de l'habitat et des transports, le secteur composite étant calculé par reliquat.

Les difficultés rencontrées ont principalement concerné le découpage du modèle existant en un ensemble de processeurs (modèles partiels) séparés, de catégoriser les processus dans les deux classes : processeur de cellule (caractérisant la variation temporelle d'un processus) ou processeur de transfert (caractérisant les interfaces entre cellules). Cela était dû au fait que le modèle de départ est un modèle numérique et compact. D'une part, celui-ci ne considère pas explicitement les trajectoires temporelles des différentes variables et, d'autre part, certains mécanismes de rétroaction étaient masqués. Il s'en est suivi que la séparation entre variables d'état et variables de transfert n'était pas *a priori* automatique.

En outre, le fait de partir d'un modéle déjà résolu, mais n'ayant pas été pensé en termes de découpage-raccordement, a manifestement conduit à une structure plus rigide pour cet exemple. Il pourrait vraisemblablement être re-découpé en éléments plus cohérents du point de vue de l'économie.

Dans sa nouvelle conception, le modèle reprogrammé permet d'obtenir un calibrage identique à celui de la version du CIRED dejà existante.

Mais alors que cette dernière ne donnait que des résultats figés pour l'année de projection, la nouvelle version donne les valeurs pour chaque pas de temps de toutes les variables utilisées (quantités, prix, etc..), permet d'étudier de façon simple et rapide, la dépendance des résultats à une variation de chacune des hypothèses prise séparement. Le calcul de coefficients de rétroaction, qui se fait automatiquement dans le logiciel, complète les possibilités de caractérisation du système (cf paragraphe 3.3).

Enfin, l'interface graphique permet une visualisation des variations temporelles de chaque paramètre. Nous donnons quelques éléments d'appréciation au paragraphe suivant.

Les propriétés d'écriture de processeurs raccordables de ZOOM permettent d'étudier les couplages entre des variables qui, dans les modèles actuellement programmés au CIRED, étaient contenues dans des modules numériquement séparés. Par ailleurs, l'augmentation du nombre de branches peut se faire de façon triviale, de même que l'étude de l'inclusion d'une mesure progressive (par exemple éco-taxe), et enfin l'interconnection de plusieurs modèles identiques mais appliqués à des régions différentes ne pose aucun problème conceptuel.

Il s'en suit qu'il est possible de programmer une description plus élaborée des processus économiques en incluant notamment un modèle technico-économique pour chacune des branches telles que l'énergie, le transport ou l'habitat, ainsi qu'un bouclage macro-économique donnant les variations de paramètres globaux tels que le PIB ou le taux d'emploi, en réponse à la mise en place de politiques climatiques.

Par ailleurs, afin d'intégrer progressivement les mécanismes de limitation des émissions polluantes, comme ceux définis dans le cadre des accords de Kyoto, ces modèles devront être formulés dans un contexte international permettant d'expliciter les échanges entre régions économiques homogènes.

Enfin, pour popuvoir cerner les limites de validité de ces modèles dans le cadre de leur utilisation sur des durées supérieures à 10 ans, il semble nécessaire de procéder à un nouveau découpage des variables de ces modèles en séparant, d'une part, des variables liées à la production technique des biens et services et, d'autre part, celles qui sont principalement dependantes d'hypothèses plus spéculatives à long terme comme, par exemple, les prix du pétrole ou l'évolution des salaires.

3 RESULTATS DE LA PREMIERE PHASE

3.1 Découpage du modèle

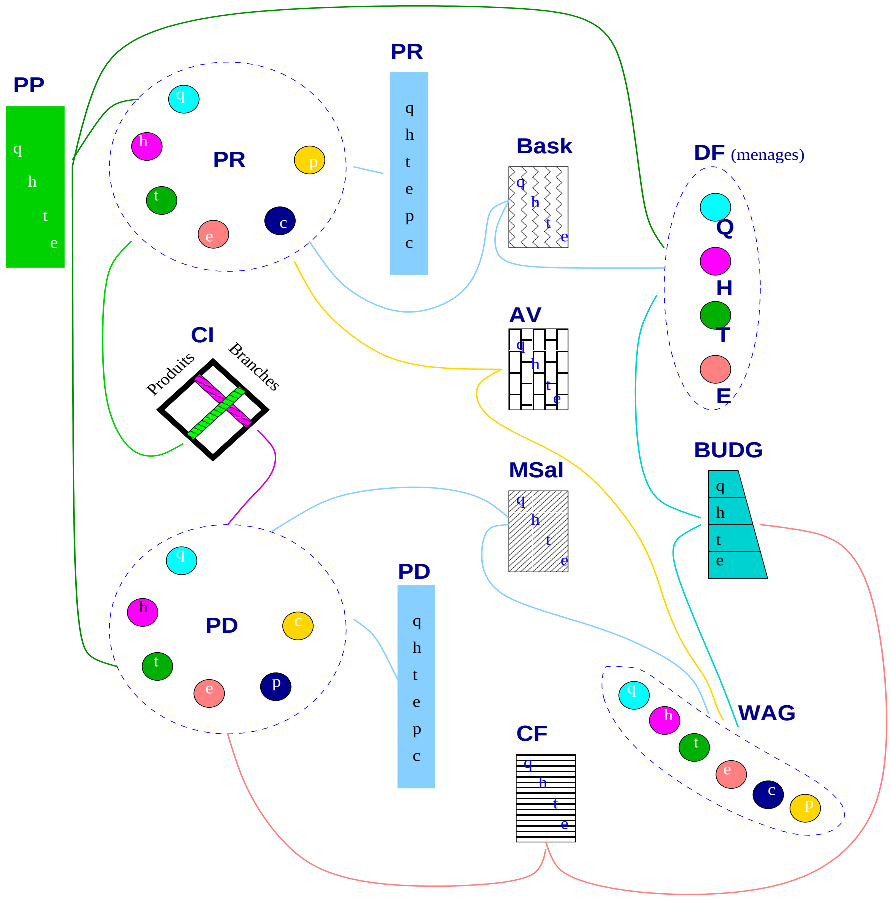

Figure 1: Schéma général de découpage du modèle de projection du TES

La Figure 1 présente le schéma général du découpage du modèle de projection du TES choisi pour cette première phase du travail.

Dans ce schéma, les cellules sont matérialisées par des cercles, les autres boites représentant des transferts. Les différents modèles partiels (processeurs) sont explicités en annexe.

Le secteur productif (PD = Production Distribuée) comporte 6 cellules [1]; les cellules production (q,h,t,e) décrivent l'équilibre emplois-ressources; le produit du commerce est constitué des marges commerciales sur les produits consommés, exportés ou investis; le pétrole est entièrement importé.

L'équilibre des prix (PR) comporte 6 cellules. La formulation des cellules h,t,e,c,p est basée sur l'équilibre des bilans comptables par branche. La croissance du prix du pétrole est

[1] Les productions et les prix sont recopiés dans deux vecteurs (PR et PD, qui sont des transferts) pour des raisons algorithmiques.

fixée de façon exogène. Le prix de la branche composite (q) étant prise comme référence, on calcule sa productivité (cellule CRHOQ).

La matrice des consommations intermédiaires (CI) a été définie comme un transfert;dans ce premier travail, ses coefficients sont considérés comme constants. Ils seront à terme fournis par chaque module technico-économique représentant la branche correspondante.

Le transfert valeur ajoutée (AV) calcule les valeurs ajoutées pour chaque branche, à partir des salaires unitaires, des productivités et des profits.

Le secteur productif est lié aux secteurs de la demande finale (dont seule celle des ménages a été prise en compte dans cette phase) par l'intermédiaire des cinq transferts decrits ci-dessous. Seules quatre branches sont concernées par la denande finale des ménages; il s'agit des branches composite, habitat, transport et énergie (q,h,t,e).

Les prix publics (transfert PP) intègrent les marges commerciales pour fournir les prix hors taxes à la consommation des produits (q,h,t,e).

Le budget des ménages (transfert BUDG) a pour source la masse salariale totale dont l'utilisation par les ménages est hiérarchisée de la façon suivante : les premières dépenses sont allouées à l'énergie, puis à l'habitat, aux transports, et le reliquat aux produits de la branche composite.

Le processeur TBASK donne la répartition résultante (panier) de la consommation des ménages entre les produits des quatre branches (q,h,t,e).

Le transfert masse salariale (MSal) calcule la masse salariale totale en multipliant les salaires unitaires, dont la croissance est fixée de façon exogène (cellules WAG), par les volumes produits.

La demande finale (transfert DF) des ménages est représentée, pour chaque branche, par une fonction logistique dépendant du temps, des prix et des revenus dont les coefficients ont été calibrés à partir des tendances passées (cellules LGSTC et DF en annexe).

Enfin la consommation finale des ménages (CF) est supposée suivre une variation identique à celle de la demande finale (TFOLO), soustraction faite des investissements (FBCF) qui suivent, eux-aussi, le même taux de croissance que la demande.

Nota : les liens du schéma d'ensemble représentent des connections entre cellules et transferts, et n'épuisent pas les inter-relations du modèle. Par exemple, le transfert calculant le budget des ménages est directement influencé par, non pas les salaires unitaires (WAG), mais par la masse salariale (MSal) qui est calculée également par un processeur de transfert. Ces deux transferts étant reliés à une même cellule, chacun des processeurs de transfert a accès aux variables de l'autre. Ce type de relation n'est ainsi présent que de façon indirecte dans le schéma.

3.2 Trajectoires des prix et productions

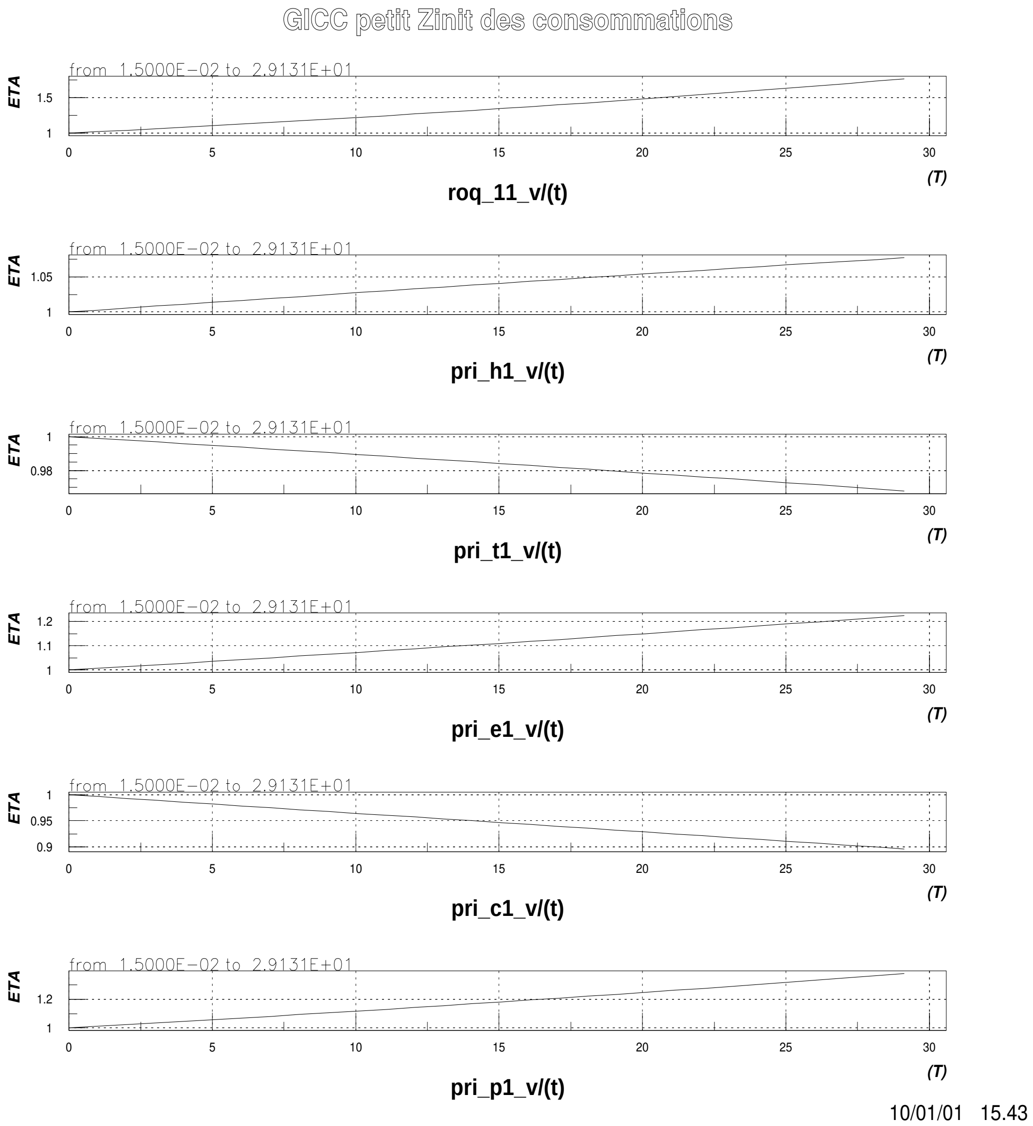

Figure 2: Evolution des prix relatifs par branche et de la productivité de la branche composite

Les figures ci-dessus illustrent quelques unes des trajectoires obtenues dans une simulation de 28ans. La première (fig 2) montre l'évolution des indices de prix ainsi que la productivité du secteur composite. On obtient de même la trajectoire de croissance des volumes produits (fig 3), ainsi que la répartition de la consommation des ménages (fig 4).

On constate que si les prix de l'habitat, de l'énergie et du pétrole - ce dernier exogène - croissent plus vite que les prix de la branche composite, ceux du transport et du commerce diminuent. Le modèle indique une variation quasi linéaire des prix inférieure à 30%, alors que, pour chaque branche, les productions croissent de façon exponentielle.

Pour un quasi doublement des importations de pétrole, la répartition dans la demande des ménages (fig 4) présente des courbes contrastées. Seule la part du composite augmente, de 10%, sur toute la durée de la simulation. La part de l'habitat diminue de moitié, ce qui n'est pas surprenant dans un pays comme la France, déjà très construit et où la croissance

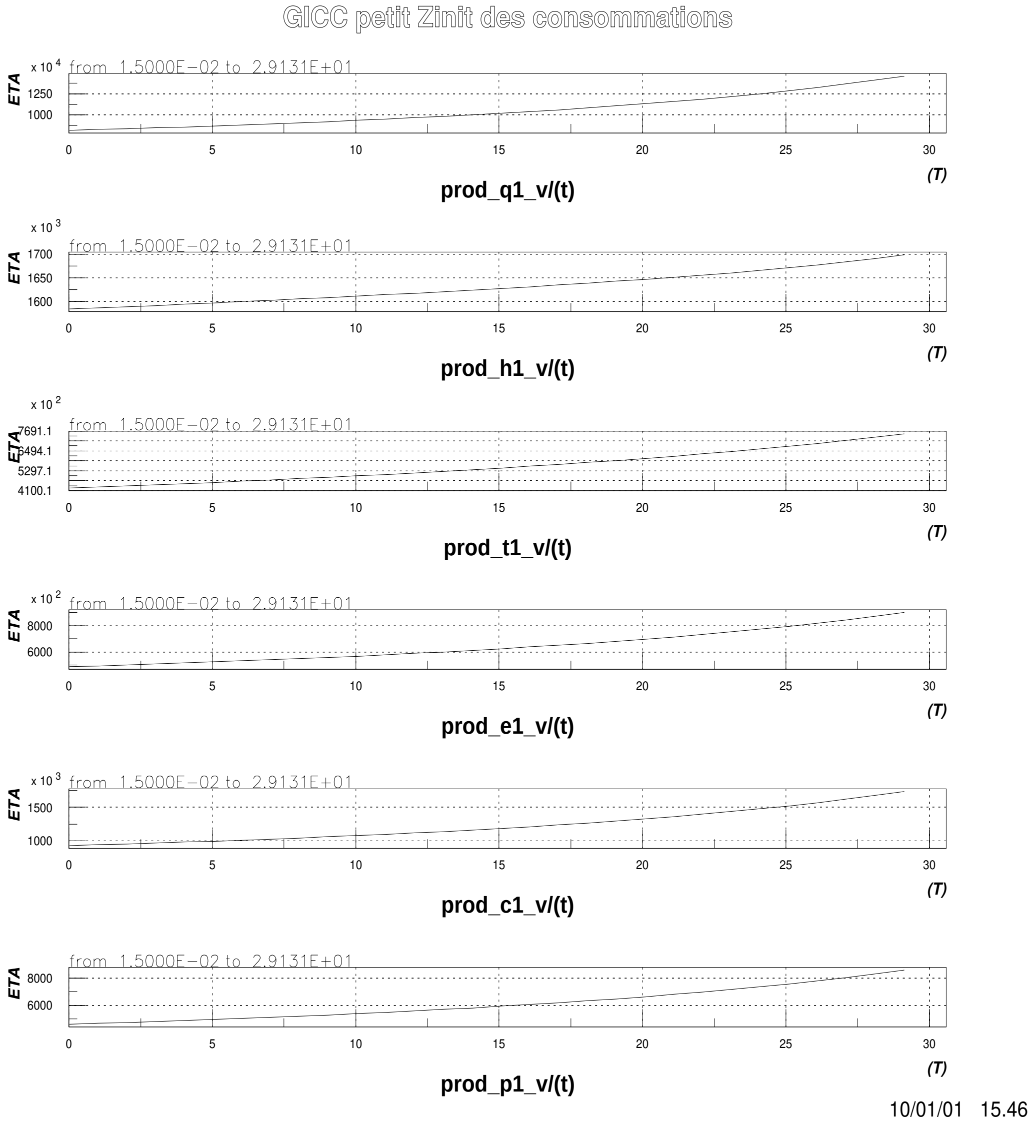

Figure 3: Evolution des productions des branches

démographique est faible. La part des transports commence à croître pendant une douzaine d'années, puis diminue. L'observation de la simple projection à 30 ans fournit une baisse par rapport à l'équilibre initial; ce résultat montre l'intérèt de pouvoir observer des trajectoires simulées pour aider à la compréhension des mécanismes mis en jeu par un modèle. La part de l'énergie diminue faiblement sur les dix premières années et de façon plus importante par la suite.

Cette répartition de la demande a pour conséquence une croissance en volume des 6 branches, forte - quasi-doublement - pour les composites, le pétrole l'énergie et le transport, très faible pour l'habitat.

L'ensemble de ces résultats sur les prix et les productions sont en accord avec la projection obtenue la 28ème année par le modèle Imaclim-Proj d'où nous sommes partis.

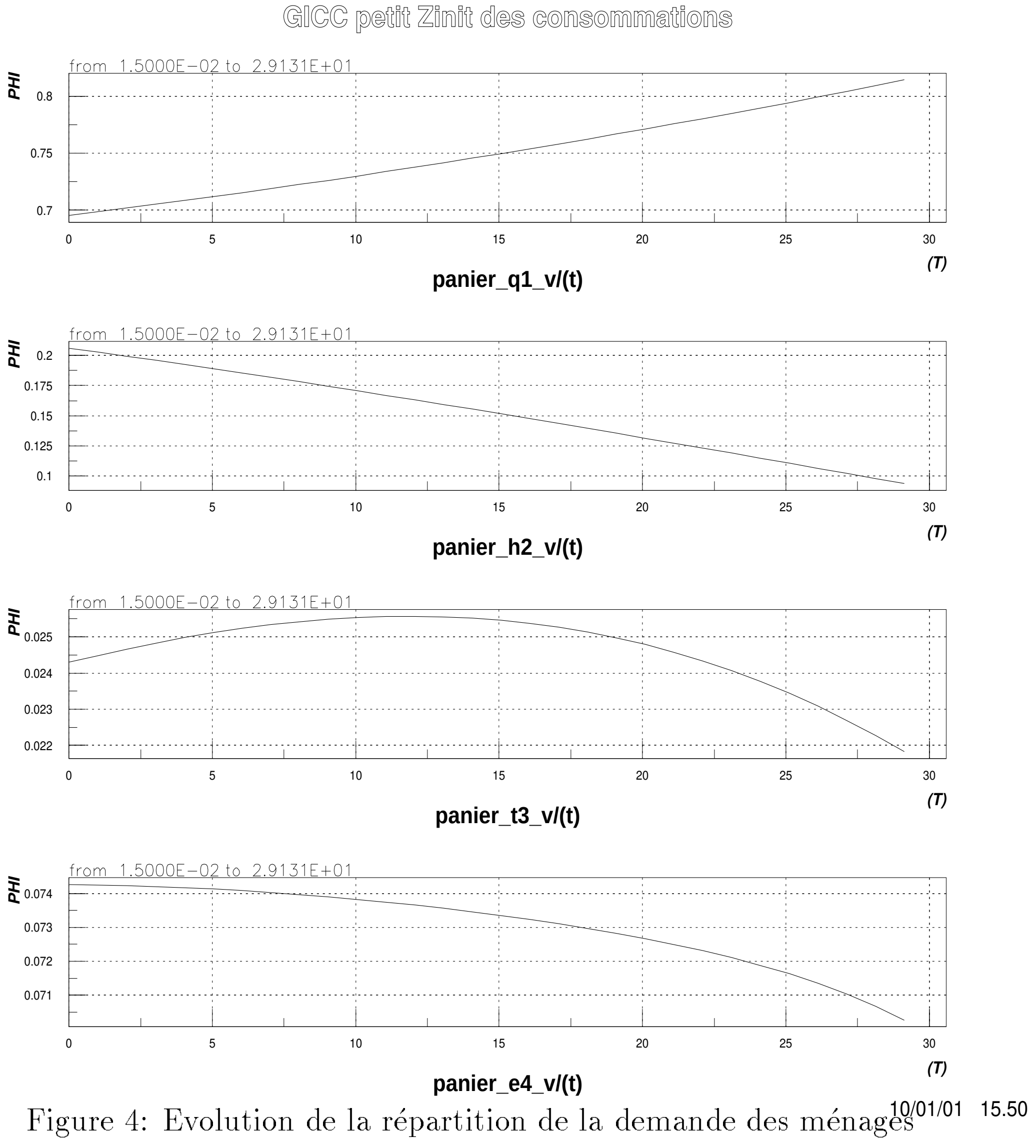

Figure 4: Evolution de la répartition de la demande des ménages

3.3 Gains de rétroaction

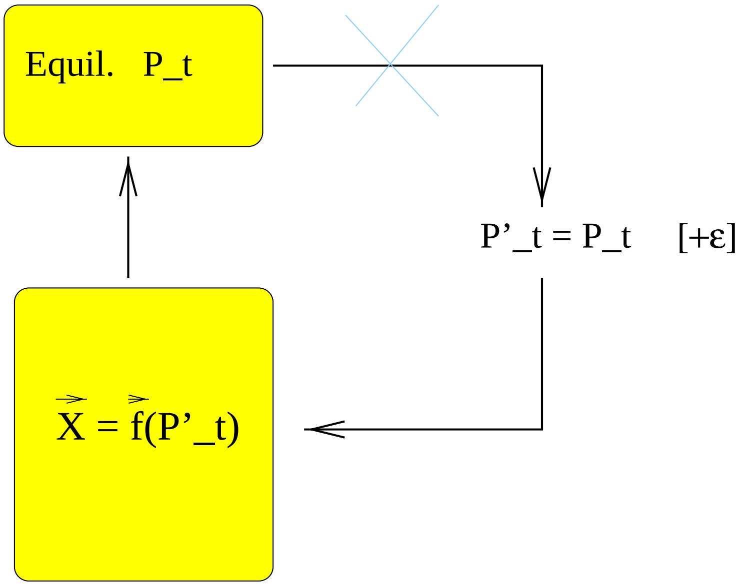

Figure 5: Séparation d'une partie du système pour l'examen d'un gain de rétroaction (prix des transports)

L'utilisation du TEF pour formuler les modèles dynamiques permet aussi une autre possibilité de caractérisation de la dynamique des systèmes par l'étude de gains de rétroaction. Sans entrer dans trop de détails formels, le schéma 5 résume le procédé d'obtention des gains de rétroaction du système sur une grandeur particulière.

Nous avons choisi ici d'étudier la rétroaction du système sur l'indice du prix des transports. Pour cela, la structure du modèle actuel peut être ré-agencée en trois parties (fig. 5) :

1. l'équation d'équilibre du prix du transport (P_t)
2. l'ensemble des équations du reste du système, dont la variable sera symbolisée par $\vec{X}$ et les equations par $\vec{X} = f(\vec{P}'_t)$
3. une équation $P'_t = P_t$ égalant le prix du transport vu par 2 au prix P_t de l'équilibre 1

Le prix du transport fourni par l'équation d'équilibre agit sur le reste du système qui à son tour modifie l'équilibre du prix du transport : c'est ce qu'on appelle une boucle de rétroaction. Le prix P'_T influence les autres prix par l'intermédiaire de la matrice de Leontieff, puis, par voie de conséquence, influe sur la masse salariale, elle-même influençant la demande.

Pour mettre en évidence un gain de rétroaction, il faut comparer ce premier système avec un second dans lequel on ouvre la boucle de rétroaction en remplaçant l'équation $P'_t = P_t$ par $P'_t = Cste$. L'évolution incrémentale de P_t est alors dite "insensible" pour signifier que l'on a, dans ce cas, rendu le sous-système 2 insensible à l'évolution de P_t.

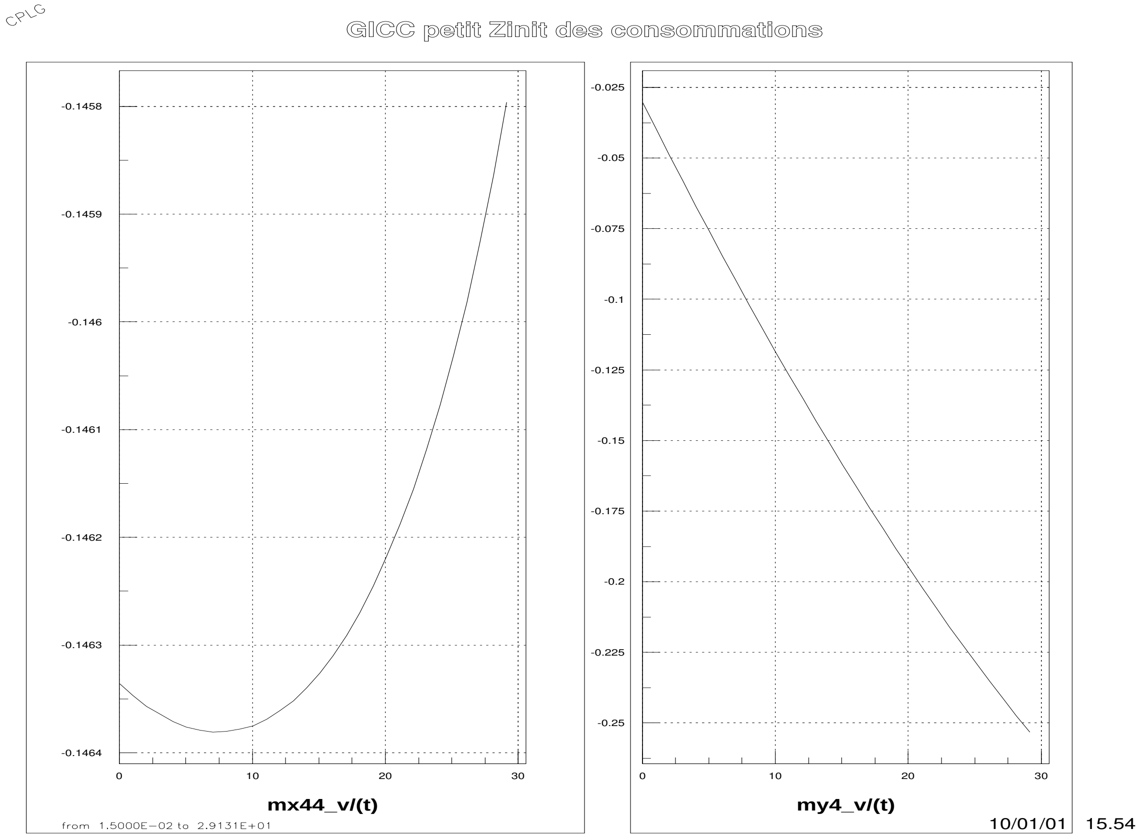

Figure 6: Gain de rétroaction sur le prix des transports(P_t)

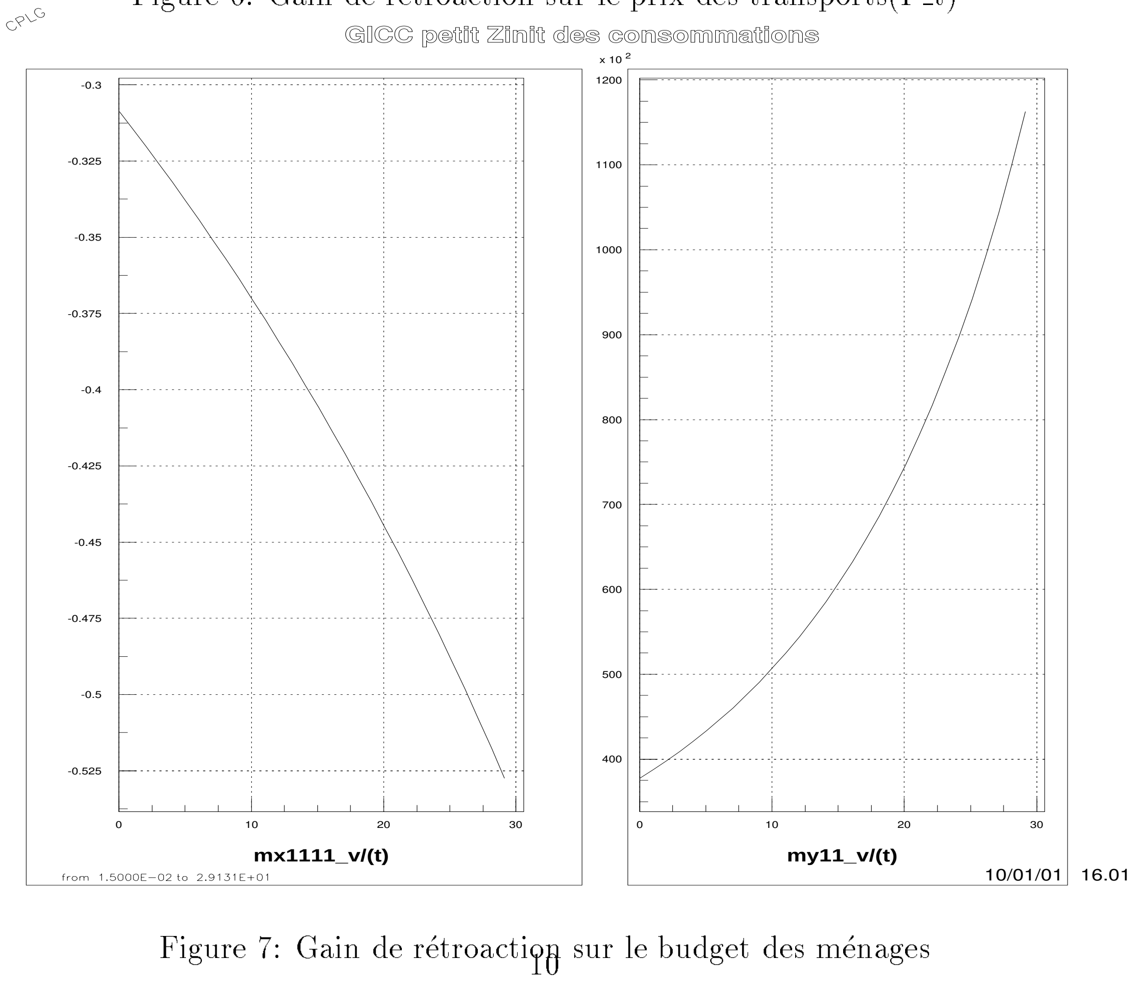

Figure 7: Gain de rétroaction sur le budget des ménages

On peut montrer que les évolutions de ces deux systèmes, dP_t pour le premier (boucle fermée), et $dP_{t,ins}$ pour le système ouvert, sont liées par la relation

$$(1-\gamma)dP_t = dP_{t,ins}$$

Le coefficient γ, qui est appelé "gain de rétroaction", décrit l'effet, sur l'évolution dP_t du prix du transport, de la fermeture de la boucle de rétroaction. La signification du gain de rétroaction γ apparait plus clairement si on considère un troisième système dans lequel l'équation donnant P'_t est perturbée de la façon suivante :

$$P'_t = P_t + \epsilon$$

On peut montrer en effet que le gain de rétroaction n'est pas affecté par une telle perturbation et que l'évolution $dP_{t\epsilon}$ est donnée par

$$(1-\gamma)dP_{t\epsilon} = dP_{t,ins} + \epsilon$$

Ainsi, une perturbation exogène du prix du transport vu par le système 2 (par exemple une taxe) a un impact de $\epsilon/(1-\gamma)$ sur ce prix, du fait des ré-ajustements du système complet.

La courbe de gauche (mx44) de la figure 6 donne les variations de $-\gamma$; celle de droite (my4) les valeurs de $dP_{t,ins}$. Ici, γ est positif et vaut environ 15% par an,

La figure 7 montre de la même manière qu'une perturbation du budget des ménages (ici de la branche composite) se traduirait - toutes influences prises en compte - par une amplification de 50% par an de ce même budget.