

Transports, santé et réchauffement climatique : A la recherche d'une politique optimale

Laure Cabantous¹, Olivier Chanel², et Jean-Christophe Vergnaud³

30 septembre 2009

Proposition soumise dans le cadre du numéro spécial "Environmental policy: lessons from economic theory" de la revue *Economie Internationale*.

Résumé

Les transports sont responsables de nombreuses externalités, parmi lesquelles deux concernent la pollution atmosphérique : les gaz à effet de serre et la pollution locale (particules, NO_x,...). Dans la recherche de politiques optimales de transport, ces deux externalités ont le plus souvent été analysées de manière indépendante. Nous proposons un modèle de décision séquentielle qui prend en compte conjointement ces deux types de pollution et intègre l'irréversibilité des politiques entreprises ainsi que la possibilité d'une réduction progressive des incertitudes par arrivée d'information. Nous trouvons d'une part qu'une analyse conjointe des deux sources d'externalités est nécessaire, et d'autre part que des mesures structurelles – qui réduisent les besoins en transports individuels – sont économiquement plus intéressantes que des mesures technologiques – qui réduisent les émissions de polluants. Nous illustrons l'intérêt d'une analyse jointe des externalités par deux exemples en matière de fiscalité automobile et de politique du logement.

Mots clefs : Réchauffement climatique, modèle de décision en incertitude, irréversibilités, politique de transport

Code JEL : C6, D62, D81, R48

¹ University of Nottingham Business School, Jubilee Campus, Wollaton Road, NG8 1BB, Nottingham, UK, Tél : 44 (0)115 8468486; e-mail : laure.cabantous@nottingham.ac.uk.

² Correspondance : GREQAM-CNRS-IDEP, 2 Rue de la Charité, 13002 Marseille, Tel : 33 (0)4 91 14 07 80; e-mail : chanel@univmed.fr.

³ EUREQua-CNRS, 106-112, Bld de l'Hôpital, 75647 Paris, Cedex 13, Tel : 33 (0)1 55 43 42 29; e-mail : Jean-Christophe.Vergnaud@univ-paris1.fr.

1 Introduction

Au delà de leur vocation première qui est de permettre le déplacement des biens et des personnes, les transports sont responsables de nombreuses nuisances et génèrent de nombreuses externalités (CGP 2001, Infrac-IWW 2004). Ils sont responsables d'effets de congestion, de coupures du territoire et d'accidents de la route. Par ailleurs, ils contribuent à la dégradation de l'environnement sonore, esthétique et atmosphérique (émissions de gaz à effet de serre⁴ et de polluants locaux).

Les impacts des transports en termes de réchauffement climatique global (émissions de gaz à effet de serre ou GES) et de pollution locale de l'air (particules, NO_x,...) sont en particulier sous le feu de l'actualité. Dans les deux cas, les progrès réalisés sur les émissions des sources fixes se sont en effet traduits par une part relative croissante des transports. Ces derniers sont ainsi devenus la première source d'émissions de CO₂ avec 33% des émissions (Citepa, 2008).⁵ Ils sont également le premier émetteur de polluants à effets sanitaires locaux, puisqu'ils sont la première source anthropique d'exposition de la population aux particules avec environ 33 % (Künzli et al., 2000) et la source majoritaire d'émissions de NO_x avec 53% (Secten, 2008).

Ces deux types d'externalités - pollution locale et réchauffement climatique global - bien qu'issues d'une même source, ont le plus souvent été analysées de manière indépendante. Pour des raisons probablement politiques, elles n'ont pas été conjointement prises en compte en vue de la détermination d'une politique de tarification des transports. Par exemple, bien que le Grenelle de l'Environnement préconisait initialement l'instauration d'un système d'écopastille calculé sur les émissions de CO₂ et de particules, sa mise en place s'est finalement fondée uniquement sur les premières.

En outre, jusqu'à présent, la plupart des débats sur les politiques de réduction des émissions de polluants atmosphériques dans les transports n'a pas pris en compte de façon rigoureuse les incertitudes importantes qui existent, tant au niveau scientifique (ampleur du réchauffement climatique) qu'économique (méthode d'évaluation des coûts liés aux externalités) et technique (efficacité des politiques de dépollution). Ainsi, en 2000, les travaux du groupe présidé par M. Boiteux (CGP, 2001) qui visaient à actualiser les valeurs tutélaires des coûts externes pour les transports, ont-ils vu s'opposer le Ministère en charge de l'Environnement et celui des Transports sur la valeur de la tonne de carbone et les coûts sanitaires de la pollution de l'air. Le premier plaidait pour des valeurs beaucoup plus élevées que le second, qui arguait de la grande incertitude des évaluations des externalités pour défendre des valeurs plus basses. Ces valeurs tutélaires ayant vocation à être appliquées dans l'évaluation des projets d'infrastructures, retenir des valeurs élevées favorisait notamment le développement des transports collectifs.

Une appréhension des incertitudes plus systématique et moins guidée par des intérêts particuliers semble ainsi nécessaire. Compte tenu du contexte, il est pertinent d'envisager l'incertitude dans un cadre dynamique. Cela signifie qu'au delà d'une analyse de sensibilité permettant de comprendre dans quelle mesure l'efficacité des politiques est liée aux valeurs retenues, le choix des politiques serait conditionné aux effets d'une arrivée d'information. Les politiques possibles de réduction des émissions de polluants atmosphériques par les transports seraient alors comparées entre elles en tenant compte par exemple, de l'arrivée d'information conduisant à revoir à la hausse les effets néfastes de l'une ou l'autre de ces externalités.

⁴ Les gaz à effet de serre comprennent le CO₂, le CH₄, le N₂O, le CF₄, le C₂F₆ et le SF₆. Ils sont généralement exprimés en équivalent carbone ou en équivalent CO₂ pour les cinq derniers, afin de faciliter le raisonnement.

⁵ Les émissions de CO₂ du secteur des transports ont augmenté de 47% entre 1980 et 2007, alors que sur la même période les émissions de l'ensemble des autres sources diminuaient de 59%.

Dans cet article, nous présentons un modèle d'aide à la décision publique dans le domaine de la politique des transports. Ce modèle a l'avantage de prendre en compte conjointement les deux types de pollution atmosphériques générés par les transports (GES et pollution particulaire que nous retiendrons comme indicateur de la pollution locale). Il intègre également les caractéristiques principales du contexte en matière d'incertitude et d'irréversibilités, permettant ainsi d'envisager l'effet d'une arrivée d'information sur le choix des politiques. Ses principales conclusions sont i) qu'une analyse conjointe des deux sources d'externalités est nécessaire, et ii) que des mesures structurelles permettant de réduire les besoins en transports individuels sont économiquement plus intéressantes que des mesures technologiques de réduction des émissions de polluants.

L'article commence avec une description du contexte décisionnel dans lequel se trouvent les décideurs politiques voulant choisir une politique de réduction des émissions atmosphériques liées au transport. Nous présentons ensuite les hypothèses générales du modèle dans la partie 3. La partie 4 présente les principaux résultats. Nous discutons et illustrons les implications concrètes de ce modèle avant de conclure.

2 Le contexte décisionnel : Incertitude et irréversibilités dans les transports

Le débat sur les politiques de réduction des émissions de polluants atmosphériques par les transports est rendu difficile par l'existence de nombreuses incertitudes. En dépit d'avancées importantes des connaissances sur le réchauffement climatique global et la pollution locale, les effets des émissions de GES et de la pollution particulaire restent en effet caractérisés par la présence d'incertitudes d'ordre scientifique, économique et technologique.

Par ailleurs, ces deux pollutions génèrent des effets d'irréversibilités économiques et/ou écologiques, c'est-à-dire qu'elles entraînent des modifications du système écologiques et/ou économiques telles qu'il est par la suite impossible de revenir à l'état initial. Puisque aucune action ultérieure ne permettra de revenir à la situation de départ, le décideur doit anticiper dès le départ les effets potentiels des politiques qu'il envisage de mener. La présence d'irréversibilités complique donc la prise de décision car elle suggère de se placer dans un cadre dynamique d'arrivée d'information permettant d'intégrer la valeur associée à l'attente d'information (appelée valeur de quasi-option ou valeur d'option informationnelle).

21 Incertitudes

211 Incertitudes scientifiques portant sur les GES

La nature et l'ampleur de l'effet de serre ainsi que les conséquences des émissions de GES font l'objet de nombreuses controverses (voir par exemple Michaels, 2005 ou Singer, 2008).

Incertitudes sur l'ampleur du réchauffement

Afin d'estimer l'ampleur du réchauffement climatique, de nombreux scénarii fondés sur des modèles d'évaluation complexes aux hypothèses diverses (sensibilités climatiques, inertie thermique des océans, bilan net des puits de carbone, etc.) ont été envisagés. Dans tous les cas de figure, il est estimé que le rythme de réchauffement sera plus rapide que tout autre changement connu depuis 10 000 ans (Godard et Henry, 1998).

En dépit de cette certitude, il demeure très difficile d'estimer avec précision l'ampleur du réchauffement de sorte que les études scientifiques donnent le plus souvent une fourchette de valeurs. Par exemple, le quatrième rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) estime qu'en l'absence d'intervention, l'augmentation de la température globale serait comprise entre 1,1 et 6,4° C par rapport à 1990-99 d'ici la fin du 21ème siècle. Il prévoit également que le niveau de la mer augmenterait de 18 à 59 cm (GIEC, 2007). On assisterait en outre à une diminution des précipitations de 15% environ entre les latitudes 30° N-55° N d'une part, et 0°-20° S d'autre part.

Incertitudes sur les conséquences du réchauffement

L'estimation des conséquences d'une élévation du niveau moyen de la température de la planète est elle aussi délicate puisqu'elle fait entrer en jeu de nombreux facteurs, comme le relief, la proximité d'une masse d'eau ou la latitude. S'il existe un relatif consensus sur les effets potentiels du réchauffement (modification de la distribution des températures, augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles et des maladies à vecteur de transmission,...), les études scientifiques ne proposent pas d'estimation précise de ces conséquences. Le décideur public doit ainsi prendre des décisions en s'appuyant sur des rapports scientifiques rigoureux mais qui contiennent des estimations larges des effets du réchauffement. Par exemple, les études scientifiques relatives à la France concluent que le réchauffement moyen entraînera une modification de la pluviométrie variant de -20% à + 50% suivant les endroits et les saisons.

En outre, bien que les études scientifiques s'accordent à dire que ces modifications auront des impacts économiques importants dans les secteurs de l'assurance, du tourisme, de l'agriculture, de la santé,... l'ampleur et le calendrier de ces effets ne sont pas déterminés de façon précise. Le rapport GIEC (2007) chiffre par exemple entre 1 et 5% du PIB le coût socio-économique associé à une augmentation de la température de 4° C. Il évalue le coût économique net actualisé des dommages causés par le changement climatique à 12 \$/tonne de CO₂ en 2005, avec une fourchette de - 3 à 95 \$/tonne de CO₂ (GIEC, 2007).

212 Incertitudes scientifiques portant sur les particules

Les incertitudes scientifiques portant sur les particules sont moins importantes que celles portant sur les GES. Les mécanismes d'action de la pollution particulaire sur la santé et les bâtiments par exemple sont désormais bien connus. Les études scientifiques ont en effet fait émerger deux effets sanitaires majeurs: la morbidité respiratoire et cardio-vasculaire et la mortalité de court terme (Who, 2005).

Cela ne signifie pas pour autant que la pollution particulaire ne soit pas soumise à des incertitudes scientifiques. Les effets en termes de morbidité et de mortalité de long terme, et sur la détermination du nombre d'années de vie perdues par exemple ne sont pas encore bien connus. Il existe aussi des incertitudes concernant la nocivité des particules sur la santé, en fonction de leur source, de leur taille et de leur composition chimique (Hüglin et Gehrig, 2000 ; Samoli et al., 2006), qui contribuent aux incertitudes liées au transfert des fonctions Exposition-Réponse (établies sur certaines zones géographiques) à d'autres zones géographiques pour lesquelles des données spécifiques ne sont pas disponibles.

Enfin, il existe des incertitudes sur l'obtention de l'intégralité des bénéfices attendus d'une mesure technologique particulière (du type filtre à particules par exemple). La composition de la pollution atmosphérique change en permanence (sous l'effet des évolutions technologiques

et des normes de pollution) et les indicateurs mesurés n'en sont qu'un élément que l'on souhaite le plus représentatif.⁶ Du fait de sources communes et étant sujettes aux mêmes conditions météorologiques de dispersion, les mesures des concentrations de nombreux polluants sont fortement corrélées. Par conséquent, il existe un risque d'attribuer à un polluant, du fait notamment qu'il est mieux mesuré, plus d'effets qu'il n'en produit réellement et au contraire, de dissimuler les contributions respectives des autres polluants qui lui sont liés. Ce type d'incertitude disparaît toutefois dans le cas d'une réduction simultanée de toutes les émissions.

213 Incertitudes économiques et technologiques

Au delà des incertitudes scientifiques sur les phénomènes physiques, le décideur public est également confronté et des incertitudes technologiques liées à l'estimation de l'efficacité des mesures de dépollution. S'il est par exemple clair que le développement des véhicules électriques éliminera la pollution locale, le bilan en termes de GES est plus contrasté et dépendra du recours ou non aux énergies fossiles pour produire l'électricité.

Enfin, le décideur public fait face à des incertitudes d'ordre économique lorsqu'il cherche à évaluer les coûts des externalités. Ces incertitudes économiques sont essentiellement d'origine méthodologique. Le décideur a le choix entre différentes méthodes d'évaluation des dommages, entre différentes valeurs monétaires (coût d'un épisode morbide, des arrêts de travail, valeur de la vie humaine, dégradation des bâtiments, impacts sur les cultures...) et différents taux d'actualisation. L'ensemble de ces choix possède des conséquences importantes sur les décisions, si bien que les aspects méthodologiques sont souvent l'enjeu de débats politiques animés, comme l'illustre le débat suscité par le rapport Boiteux sur les valeurs tutélaires. Certaines approches contribuent toutefois à une relative homogénéisation et stabilisation méthodologique, comme par exemple New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies - NewExt, ou Clean Air For Europe - CAFE.

22 Les irréversibilités

Il est courant de distinguer les irréversibilités d'ordre écologique et celles d'ordre économique. **Les irréversibilités écologiques** ne concernent que les émissions de GES. Les émissions actuelles alimentent un stock atmosphérique dont l'épuisement naturel est très lent (50% du CO₂ émis disparaît en 30 ans, 30% en quelques siècles et 20% en quelques millénaires selon Devolder, 2008). Pour limiter le réchauffement climatique à 2°C, il conviendrait de diminuer la masse des émissions mondiales de GES de 50 à 85% (Devolder, 2008) en 2050. A l'échelle humaine, on peut donc considérer que le phénomène est effectivement irréversible, et il convient d'étudier l'ensemble des stratégies possibles à un horizon de 20 à 50 ans. La pollution particulaire, en revanche, n'est pas véritablement une pollution irréversible⁷ - les niveaux moyens de concentrations de particules dans l'air peuvent diminuer assez rapidement (de 90% en quelques jours) - si bien que la régénération naturelle est assez rapide et qu'il n'y a pas de problème de stock.

Les irréversibilités économiques associées aux GES et à la pollution particulaire concernent l'existence de coûts à engager lors de la mise en oeuvre des politiques. Les déplacements sont

⁶ Jusqu'à l'introduction du carburant sans plomb, les teneurs en plomb dans l'atmosphère reconstituaient une bonne mesure de la pollution d'origine automobile. La disparition du plomb n'a pourtant pas entraîné la disparition de cette pollution ni des effets sanitaires associés.

⁷ Toutefois, du point de vue des personnes touchées par la pollution particulaire, elle peut apparaître irréversible au sens où elle peut entraîner un décès prématuré.

étroitement liés aux modes de vie, si bien que la réalisation d'une politique de fond est relativement longue, entraînant de probables coûts irrécupérables.

Ainsi, le réchauffement climatique apparaît-il comme un phénomène très particulier, de nature planétaire (avec les problèmes de coordination en résultant) et d'horizon temporel long (avec le problème associé à l'actualisation). Il fait entrer en jeu des irréversibilités et la possibilité d'une réduction progressive des incertitudes par arrivée d'information. Toutes ces caractéristiques plaident pour un traitement dans le cadre de la théorie économique de la prise de décision en univers incertain avec effet d'irréversibilité (Arrow et Fisher, 1974 ; Freixas et Laffont, 1984 ; Henry, 1974). La pollution particulaire par contre, semble correctement caractérisée, si bien que la relative stabilisation des évaluations économiques des coûts sanitaires permet de considérer ce phénomène comme relativement connu, et donc certain, en comparaison aux GES.

3 Modèle : Une représentation réduite de l'économie des transports

Nous présentons un modèle séquentiel d'aide à la décision, représentation réduite de l'économie des transports, dans lequel le décideur public peut agir sur différentes variables de décision afin de réguler les émissions de polluants (GES et pollution particulaire) par les transports. Le recours à 2 périodes permet d'intégrer les caractéristiques principales en matière d'incertitude et d'irréversibilités. Le modèle permet ainsi d'envisager l'effet d'une arrivée d'information sur le choix des politiques, en prenant en considération les deux grands types de politiques publiques actuellement envisagées dans la plupart des pays : les mesures technologiques et les mesures structurelles.

31 Structure générale du modèle

Afin de prendre en compte l'arrivée d'information et l'existence d'irréversibilités qui caractérisent le réchauffement climatique et la pollution particulaire, le modèle comprend deux périodes $t = 1, 2$. A chacune des deux périodes $t = 1, 2$, le décideur public peut agir sur les 3 variables de décision dont il dispose, à savoir :

- la part des déplacements effectués en véhicule individuel V_t (la part des déplacements réalisés en transport collectif étant logiquement complémentaire $1 - V_t$),
- le taux de réduction des émissions de GES G_t ,
- le taux de réduction de polluants particuliers P_t .

En prenant la part des déplacements effectués en véhicule individuel V_t comme une variable de décision, nous supposons que le décideur public dispose des moyens politiques de choisir le niveau d'équilibre sur le marché du transport. De plus, comme nous travaillons en termes de part de déplacement effectuée en transport individuel ou collectif, nous faisons l'hypothèse qu'il existe un besoin total en déplacement fixé à satisfaire. Considérer que le volume total de km parcourus par individu est fixe représente une hypothèse forte visant à simplifier l'analyse. S'en affranchir aurait nécessité d'introduire une fonction d'utilité collective dépendant du volume total, mais cette sophistication supplémentaire du modèle ne changerait rien aux résultats qualitatifs portant sur l'internalisation optimale de la pollution.

32 Fonction objectif du décideur public

Dans la plupart des pays, le décideur public souhaitant réguler les émissions de polluants

atmosphériques par les transports dispose de deux types de politiques : des politiques dites technologiques, et des politiques dites structurelles.

Les politiques technologiques agissent de façon ciblée sur les taux d'émission des polluants au km parcouru. Il s'agit par exemple de politiques qui visent à améliorer les technologies, comme les filtres à particules ou à NO_x, ou à renouveler le parc par des véhicules moins polluants (véhicule Low-emission ou Zero Emission Level) ou encore qui portent sur la gestion de la circulation (limitations de vitesse). Ces politiques technologiques peuvent être mises en oeuvre de diverses façons, par l'imposition de normes sur les carburants, la fiscalité verte incitative, l'écopastille... Ces mesures sont toutefois limitées car elles ciblent généralement les émissions d'un unique polluant (CO₂, SO₂, particules, NO_x...). De plus, les gains associés aux améliorations technologiques peuvent fort bien être partiellement perdus suite à une augmentation du volume des déplacements individuels par exemple.⁸

Les mesures structurelles, en revanche, agissent sur la quantité de km parcourus en transports routiers individuels et donc sur l'ensemble des externalités. Il s'agit par exemple de politiques visant à développer le covoiturage, à limiter les accès et le stationnement en centre-ville, et à améliorer l'efficacité des transports en commun. Là encore, le décideur public dispose d'une grande liberté sur la façon de mettre en oeuvre ces politiques (péages urbains, développement du réseau de transport public, voies de circulation réservées aux véhicules transportant au moins trois personnes, augmentation des taxes sur l'ensemble des carburants...). Puisque ces politiques agissent sur l'intégralité des émissions, elles sont moins sensibles à l'incertitude que les mesures technologiques.

Afin de rendre compte de l'existence de ces deux types politiques, la fonction objectif du décideur public de notre modèle distingue les coûts associés aux politiques structurelles des coûts associés aux politiques technologiques. Formellement, le décideur public cherche à minimiser les coûts totaux des transports qui se décomposent comme suit :

Coûts totaux = Coûts variables des transports + Coûts de dépollution + Coûts de pollution

- Les coûts variables des transports sont donnés par une fonction $\alpha.V_t + C(1-V_t)$ avec $C(.)$ dérivable et convexe.
- Les coûts de dépollution sont associés aux mesures technologiques, et se décomposent en une partie linéaire $(\beta.G_t + \gamma.P_t)V_t$, représentant les coûts variables et une partie non linéaire $D(G_t) + E(P_t)$ représentant les coûts fixes supposés positifs, croissants et convexes.
- Les coûts de la pollution sont proportionnels à la part des déplacements individuels : $(\theta.(1-G_t) + \phi.(1-P_t))V_t$ où θ (ϕ) représente le coût supplémentaire par unité de polluant GES (particulaire) émis en transport individuel par rapport aux transports collectifs. Nous considérons en effet que les taux d'émission par km.individu parcouru en transports collectifs sont plus faibles que ceux des transports individuels. Par ailleurs nous supposons que quelque soient les valeurs prises par θ et ϕ dans le modèle, on a toujours $\theta \geq \beta$ et $\phi \geq \gamma$ et que par conséquent, il est toujours efficace de faire un minimum d'effort

⁸Les résultats d'une étude de l'Agence Européenne de l'Environnement (2000) sur l'évolution de l'efficacité énergétique dans les transports depuis le début des années 70 sont édifiants. Alors que les moteurs, pour une cylindrée donnée, sont devenus moins gourmands en carburant (une baisse d'environ 30%), la dépense énergétique par km / voyageur transporté en automobile est restée constante ! En effet, pendant cette même période on a observé plus de congestions, moins de passagers par véhicule, une augmentation du poids des véhicules (à gamme donnée), une réduction de la distance moyenne par déplacement.

de dépollution.

Au final, la fonction de coût total que le décideur public doit minimiser en $t=1,2$ est la suivante :

$$CT(V_t; G_t; P_t; \theta; \phi) = \alpha.V_t + C(1-V_t) \\ + (\beta.G_t + \gamma.P_t).V_t + D(G_t) + E(P_t) \\ + (\theta.(1-G_t) + \phi.(1-P_t)).V_t.$$

33 Incertitude et information

Nous prenons en compte le fait que le décideur public doit décider de la politique de réduction des émissions de polluants par les transports alors même qu'il est conscient des incertitudes qui existent sur les conséquences des émissions de ces polluants. Nous avons mentionné précédemment que les principales incertitudes concernaient les valeurs des coûts associés aux émissions en GES et nous concentrons notre analyse sur celles-ci.

Formellement, les espérances des coûts supplémentaires par unité de GES et de polluant particulaire, seront notées respectivement $\bar{\theta}$ et $\bar{\phi}$. Dans le cas des émissions en GES, on suppose que ce coût peut être supérieur ou inférieur (avec équiprobabilité) d'un montant ε .

En outre, comme nous nous intéressons à l'impact de l'anticipation de l'arrivée d'information sur la prise de décision optimale, nous supposons que le décideur public est susceptible d'apprendre la valeur exacte des coûts des émissions de GES entre la période 1 et la période 2. Nous notons $g = 0,1$ l'indicateur de l'arrivée d'information d'une telle information.

34 Irréversibilités et externalités intertemporelles

Afin d'avoir une représentation appropriée de la situation, notre modèle inclut deux types d'irrégularités décisionnelles portant d'une part sur la part des transports collectifs et d'autre part sur les taux de réduction des émissions.

En matière de transports collectifs, une hypothèse pertinente est de considérer que les décisions de développement des transports collectifs doivent être prises longtemps à l'avance et donc qu'il ne sera pas possible en seconde période d'ajuster à la hausse la part des transports collectifs : $1-V_2 \leq 1-V_1$, c'est à dire $V_2 \geq V_1$. Cette hypothèse est extrême mais elle correspond bien à certaines décisions structurelles : développement d'infrastructures lourdes de transports collectifs (tramway, métro), politique de développement urbain avec un habitat plus ou moins dense... Nous noterons $i = 0,1$ l'indicateur de la présence d'une telle contrainte d'irrégularité : $V_2 \in [i.V_1; 1]$. Cette première externalité intertemporelle est induite du fait que les coûts d'investissements en transports collectifs dépendent du niveau atteint par les transports collectifs à la période précédente. L'indicatrice traduit l'existence ($i=1$) ou l'absence ($i=0$) de coûts d'investissements intertemporels.

La seconde irrégularité concerne les choix des taux de réduction des émissions G_2 et P_2 : $G_2 \geq G_1$ et $P_2 \geq P_1$. En effet, ces niveaux d'émission sont généralement fixés par des normes environnementales. L'expérience montre qu'on ne revient jamais en arrière (exemple de la désulfuration du gazole ou de la suppression du plomb dans l'essence) et que les

modifications éventuelles vont toujours dans le sens d'un renforcement des normes, et donc d'une diminution des taux d'émission. Il est donc justifié de faire l'hypothèse que ces normes ne seront pas relâchées à l'avenir. Nous introduisons $c = 0,1$ comme indicateur de la présence de contraintes d'irréversibilités :

$$G_t \in [c.G_{t-1}; 1], P_t \in [c.P_{t-1}; 1], t = 1, 2$$

35 Solution de référence

L'étude de l'effet d'une arrivée d'information se fait en considérant comme situation de référence la solution optimale stationnaire en l'absence d'information. Nous notons $(V^*; G^*, P^*)$ cette solution optimale qui correspond à une situation où (i) les coûts marginaux des transports individuels et collectifs sont égaux; (ii) les coûts marginaux de dépollution sont égaux aux bénéfices marginaux. $(V^*; G^*, P^*)$ est donc la solution du système suivant :

$$\begin{cases} \alpha + \beta.G^* + \gamma.P^* + \bar{\theta}(1 - G^*) + \bar{\phi}(1 - P^*) = C'(1 - V^*) \\ \beta.V^* + D'(G^*) = \bar{\theta}.V^* \\ \gamma.V^* + E'(P^*) = \bar{\phi}.V^* \end{cases}$$

Cette solution optimale stationnaire ne dépend pas de la présence des contraintes d'irréversibilités.

4 Résultats

Nous nous intéressons aux choix séquentiels sur les deux périodes, avec une acquisition d'information entre la période 1 et la période 2.

Afin de simplifier l'exposé des résultats, nous éliminons d'entrée deux cas polaires irréalistes. Le premier est celui dans lequel le décideur public n'engage aucune mesure de dépollution, et pour lequel le coût de la dépollution est nul mais celui de la pollution supplémentaire est maximal. Le second cas que nous éliminons est celui dans lequel le décideur public réduit à zéro la part des transports individuels, et pour lequel le coût de la dépollution est maximal mais celui de la pollution supplémentaire est nul.

Une fois ces deux cas polaires irréalistes éliminés, nous cherchons une solution intermédiaire optimale. Par définition, cette solution optimale permet de minimiser l'ensemble des coûts totaux sur les deux périodes. Il est important de remarquer que les coûts de seconde période peuvent dépendre des décisions prises en première période en présence des contraintes d'irréversibilités $i = 1$ et/ou $c = 1$:

$$J(V_1; G_1; P_1; \theta; \phi; i; c) = \underset{V_2 \in [i.V_1; 1], G_2 \in [c.G_1; 1], P_2 \in [c.P_1; 1]}{\text{Min}} CT(V_2; G_2; P_2; \theta; \phi)$$

Nous noterons $\bar{J}(V_1; G_1; P_1; \bar{\theta}; \bar{\phi}; i; c; g)$ la valeur anticipée des coûts totaux optimaux de seconde période conditionnellement aux choix de première période. Deux situations sont possibles :

- absence d'information ($g = 0$) :

$$\bar{J}(V_1; G_1; P_1; \bar{\theta}; \bar{\phi}; i; c; 0) = J(V_1; G_1; P_1; \bar{\theta}; \bar{\phi}; i; c)$$

- Information sur le réchauffement climatique ($g = 1$) :

$$\bar{J}(V_1; G_1; P_1; \bar{\theta}; \bar{\phi}; i; c; 1) = 1/2. [J(V_1; G_1; P_1; \bar{\theta} + \varepsilon; \bar{\phi}; i; c) + J(V_1; G_1; P_1; \bar{\theta} - \varepsilon; \bar{\phi}; i; c)]$$

Les choix optimaux de première période sont notés $V_1^*(i; c; g)$, $G_1^*(i; c; g)$ et $P_1^*(i; c; g)$. Ces choix optimaux sont la solution du problème de minimisation de l'ensemble des coûts sur les deux périodes :

$$\underset{V_1 \in [0;1], G_1 \in [0;1], P_1 \in [0;1]}{\text{Min}} CT(V_1; G_1; P_1; \bar{\theta}; \bar{\phi}) + \bar{J}(V_1; G_1; P_1; \bar{\theta}; \bar{\phi}; i; c; g)$$

En absence d'information, et bien que nous considérons deux périodes, la solution optimale stationnaire est aussi la solution optimale du problème de minimisation quel que soit l'état des contraintes i et c :

$$\forall i, c \quad V_1^*(i; c; 0) = V^*, G_1^*(i; c; 0) = G^*, P_1^*(i; c; 0) = P^*$$

A l'inverse, l'anticipation d'une information n'a aucun effet en première période en l'absence de contraintes d'irréversibilités ($i = c = 0$). En effet, la fonction valeur de seconde période, $\bar{J}(V_1; G_1; P_1; \bar{\theta}; \bar{\phi}; 0; 0; g)$ est alors indépendante des décisions de première période, et nous avons :

$$\forall g, V_1^*(0; 0; g) = V^*, G_1^*(0; 0; g) = G^*, P_1^*(0; 0; g) = P^*$$

La résolution de ce modèle permet de faire ressortir deux types d'effets : des effets relatifs à l'anticipation de l'information, et des effets relatifs à la présence d'irréversibilité. Nous présentons ci-dessous les résultats associés à ces deux effets.

41 Effets d'une anticipation d'arrivée d'information

Dans les modèles prenant en compte des irréversibilités décisionnelles et l'existence d'une quasi valeur d'option, l'anticipation d'une arrivée d'information conduit en général le décideur à faire des choix plus flexibles (effet irréversibilité).

Du fait de la structure du modèle développé ici, on s'attend à trouver un effet irréversibilité pour les taux de réduction des émissions. Autrement dit, on s'attend à ce que plus de flexibilité conduise à diminuer les taux d'émission par rapport à la situation de référence. L'anticipation d'une arrivée d'information sur le réchauffement climatique conduit à fixer, en période 1 un taux de réduction des émissions de gaz à effet de serre inférieur à celui de la solution stationnaire de référence ($G_1^*(i; c; 1) \leq G_1^*(i; c; 0)$).

L'anticipation d'une arrivée d'information conduit non seulement à des effets irréversibilités directs mais également à des effets supplémentaires, comme le décrit la proposition 1 ci-dessous.

Proposition 1 *Lorsqu'une arrivée d'information est anticipée, il est optimal de réduire la part des transports individuels et les niveaux de réduction des taux d'émission des deux polluants :*

$$\forall i, c \quad (1) V_1^*(i; c; 1) \leq V_1^*(i; c; 0), \quad (2) G_1^*(i; c; 1) \leq G_1^*(i; c; 0), \quad (3) P_1^*(i; c; 1) \leq P_1^*(i; c; 0)$$

Le résultat (2) correspond aux effets irréversibilités directs habituellement rencontrés. Les autres résultats correspondent aux effets supplémentaires et se comprennent simplement. Du fait d'un taux d'émission plus élevé du polluant concerné par l'arrivée d'information, le coût marginal du transport individuel est augmenté par rapport à la situation de référence et il est optimal d'augmenter la part des transports publics (résultat (1)). Ce faisant, l'intérêt économique de la dépollution de l'autre polluant se trouve réduit et il est optimal de limiter aussi le niveau de ses émissions (résultat (3)). La preuve formelle est donnée en annexe.

42 Effets d'irréversibilités et externalités intertemporelles

Les irréversibilités et les coûts d'investissements ont un effet comparable à celui de l'information. En cas d'information, $g = 1$, l'introduction de contraintes d'irréversibilités conduit à réduire simultanément la part de transport individuel et le niveau de réduction des émissions.

Proposition 2 *L'introduction de contraintes d'irréversibilités conduit à une part plus faible des transports individuels et à des niveaux de réduction des taux d'émission moins élevés :*

a) lorsque ces contraintes portent sur la part des transports collectifs :

$$\forall c, (1) V_1^*(1; c; 1) \leq V_1^*(0; c; 1), (2) G_1^*(1; c; 1) \leq G_1^*(0; c; 1), (3) P_1^*(1; c; 1) \leq P_1^*(0; c; 1).$$

(b) lorsque ces contraintes portent sur les taux de réduction des émissions :

$$\forall i (1) V_1^*(i; 1; 1) \leq V_1^*(i; 0; 1), (2) G_1^*(i; 1; 1) \leq G_1^*(i; 0; 1), (3) P_1^*(i; 1; 1) \leq P_1^*(i; 0; 1)$$

Les contraintes d'irréversibilités introduisent un problème de flexibilité.

En seconde période, si l'information reçue indique que les impacts environnementaux se situent dans la fourchette haute, il sera alors optimal de développer les transports publics. La contrainte d'irréversibilité en matière de transports publics impose alors au décideur public de prendre une décision plus flexible en première période, c'est à dire d'augmenter dès la première période la part des transports collectifs (résultat (a-1)). La part des transports individuels étant réduite, l'intérêt économique de la dépollution s'en trouve lui aussi réduit d'où les résultats (a-2) et (a-3).

Les contraintes d'irréversibilités en matière de taux de réduction des émissions posent, quant à elles, un problème lorsque l'information reçue indique que les impacts du réchauffement climatique se situent dans la fourchette basse. Pour gagner en flexibilité et permettre un ajustement à la baisse du taux de réduction des émissions de GES, le décideur public doit réduire ce taux d'émission dès la première période (résultat (b - 2)). Le coût marginal des transports individuels en première période est alors plus élevé, d'où le résultat (b-1) indiquant qu'il faut réduire leur part dans les transports. Et finalement l'intérêt économique de la dépollution s'en trouve lui aussi réduit d'où le résultat (b - 3). La preuve formelle est donnée en annexe.

5 Discussion et deux illustrations

Ces résultats montrent que l'existence d'incertitudes accroît l'intérêt économique des mesures structurelles permettant de réduire les besoins en transports individuels et à l'inverse, réduit l'intérêt des mesures technologiques de réduction des émissions de polluants. Ceci contredit les

arguments des lobbys économiques et industriels, qui préfèrent en général les mesures technologiques à des mesures structurelles menaçant leur importance économique, et utilisent l'incertitude pour argumenter en faveur de scénarii conservateurs et attentistes.

La présence d'irréversibilités accroît elle aussi l'intérêt des mesures structurelles. Toutefois, il ne paraît pas évident que ces irréversibilités soient prises en compte correctement dans les décisions politiques. Le gouvernement français envisage par exemple d'investir dans un important plan de développement des véhicules électriques sans que soient explicitées clairement les irréversibilités qu'un tel plan entraîne en termes de réseau d'approvisionnement et de production d'électricité.

Nous avons supposé dans le modèle, que le décideur public fixait simultanément les taux d'émission des polluants, le dotant d'un haut niveau de rationalité et d'un bon niveau de sophistication dans le traitement des externalités. Dans la pratique, les décisions sont souvent prises de façon moins intégrée; le décideur public ne considérant qu'une seule dimension du problème à la fois. Cette façon de procéder revient à traiter le problème d'optimisation en ne jouant que sur la part des transports individuels (V_t), et l'un des deux taux d'émissions (G_t ou P_t) - l'autre taux étant considéré comme fixé. On peut conjecturer que dans de nombreux cas, cette analyse tronquée conduirait à moins réduire les transports individuels que ce qu'il serait optimal de faire.

En pratique, de telles analyses tronquées induisent des conséquences encore plus graves car les choix respectifs des taux d'émissions ne sont pas aussi indépendants. Par exemple, dans le cas de l'écopastille, l'incitation à l'achat de véhicules diesel ne réduit que modérément les taux d'émission de GES, mais augmente considérablement ceux des polluants locaux. L'encadré 1 quantifie ses conséquences environnementales en termes de coûts externes. Le cas de la maison à 15 Euros, dans l'encadré 2, illustre pour sa part les conséquences économiques et environnementales néfastes d'une analyse partielle d'une politique publique.

Encadré 1 : L'écopastille automobile

L'écopastille, ou bonus malus écologique, instaurée en Italie en 2006 et en France en 2008, assoit une politique fiscale dite "environnementale" sur les seules émissions de CO₂. Ce faisant, elle favorise les véhicules les moins émetteurs (en particulier les diesels) dont les rejets en NO_x ou particules ultrafines sont par ailleurs très défavorables car nocives à la santé. Les gains attendus par la baisse des émissions moyennes de CO₂ peuvent facilement être comparés aux coûts externes attendus par les émissions supplémentaires de particules (et de NO_x), en ignorant les autres coûts externes (accidents, congestion, bruit, effets de coupure dus aux routes,...) qui restent évidemment identiques.

Les émissions moyennes pondérées de la part urbain/non urbain s'élèvent à 0,045 g/véh./km pour les véhicules essence, et à 0,2246 g/véh./km pour les véhicules diesel (Infras-IWW, 2004). Concernant les émissions de CO₂, la moyenne des émissions du parc existant est respectivement évaluée à 165 g/km pour les véhicules essence et 150 g/km pour les véhicules diesel (l'écart est beaucoup plus faible sur les ventes 2007, avec respectivement 153 g/km et 148 g/km; Ademe, 2008).

Le coût externe d'1 kg de PM₁₀ émis, est estimé à 212 euros (Infras IWW, 2004) alors que la tonne de CO₂ y fait l'objet d'une analyse de sensibilité : entre 20 euros (hypothèse basse permettant d'atteindre les objectifs de Kyoto) et 140 euros (hypothèse haute permettant

d'atteindre une réduction de 50% en 2030).

Dès lors, les coûts externes associés au CO₂ et aux particules pour 100 kilomètres parcourus sont de 1,28 € (resp. 3,26 € avec l'hypothèse haute) pour un véhicule essence contre 5,06 € (resp. 6,86 €) pour un véhicule diesel, soit environ 4 (resp. 2) fois moins. Ramené au kilométrage moyen parcouru par un véhicule sur sa durée de vie (200.000 km selon Union Européenne, 2007), cela représente un écart de l'ordre de 7.300 euros, voire 10.200 euros si l'on intègre les émissions de NO_x et qu'on les valorise en suivant Union Européenne (2007).

Ainsi, le système d'écopastille revient à subventionner l'essor - et le développement technologique - de véhicules dont l'empreinte environnementale est deux à quatre fois plus défavorable du fait de ses émissions en polluants locaux (particules), au nom d'un gain de 10% en matière de CO₂.

Finalement, notons que l'Union Européenne (2007) semble aller dans le bon sens en élaborant une proposition de directive pour que les autorités publiques des pays membres - lorsqu'elles achètent des véhicules de transport - prennent en compte non seulement les coûts d'exploitation liés à la consommation d'énergie et aux émissions de CO₂, mais également aux émissions polluantes de (NO_x), d'hydrocarbures non méthaniques et de particules. Cette obligation prendrait effet à compter du 1er janvier 2012... si elle venait à être adoptée.

Encadré 2 : La maison à 15€ par jour

La maison à 15 euros par jour constitue un exemple éclairant d'une absence d'analyse globale des externalités induites en matière de logement. En effet, une maison à un tel prix nécessite la recherche de terrains peu chers en périphérie des bassins d'emploi. On peut donc s'attendre à un déplacement des ménages concernés des centres urbains et banlieues vers les zones périurbaines. Or, les aménageurs territoriaux et les chercheurs en environnement s'accordent sur l'impact négatif de l'étalement urbain qui augmente les trajets domicile - travail (voir par exemple Bartholomew, 2007). Il est donc intéressant d'estimer l'ordre de grandeur des effets externes associés par cette politique en matière d'émissions de particules et de CO₂.

Le véhicule particulier d'un ménage résidant en zone périurbaine parcourt en moyenne 25.300 km/an, contre 13.700 km/an pour un ménage résidant en zone urbaine ou banlieue (moyenne pondérée par les zones de résidence, Insee, 2009). Compte tenu des résultats de l'encadré 1 et de la composition actuelle du parc automobile (50% de véhicules diesels, en constante augmentation selon Ademe, 2008), il est possible d'estimer le coût externe relatif aux émissions atmosphériques : 3.670 euros sur 10 ans (resp. 5.870 avec la borne haute pour la tonne de CO₂). En ajoutant les coûts externes associés aux accidents, au bruit et à la congestion (0,0614 €/par véhicule kilomètre, Infrac IWW, 2004), l'évaluation totale s'élève à 10.800 euros (resp. 13.000 euros) sur 10 ans.

Au delà des effets externes, la dépense privée supplémentaire de l'accédant à une telle maison représente en moyenne 4.570 € sur 10 ans en frais de carburant (Lemaître et Kleinpeter, 2009), auxquels s'ajoutent les effets d'une efficacité énergétique moindre du logement. Ainsi, les dépenses en énergie domestique pondérées par le type de chauffage sont deux fois plus importantes lorsque le logement est individuel (6,7% du budget du ménage) plutôt que collectif (3,34%) (Marcus, 2009), soit environ 6.000 € d'écart sur 10 ans selon Grosmesnil (2002).

Au total, le surcoût associé à une "maison à 15€" en zone périurbaine s'élève à 20 000 euros

sur 10 ans, et est appelé à croître avec la mise en place de la contribution climat-énergie (CCE), fixée à 17€/tonne de CO₂ pour 2010 avec un objectif de 100 € en 2030 (Rapport de la Conférence des experts, 2009). Notons que dans le cadre de la loi de mobilisation pour le logement, le gouvernement français envisage que ce dispositif soit étendu aux appartements, ce qui relativiserait l'analyse ci-dessus.

Ainsi, en matière d'externalités liées aux effets des émissions des transports routiers, les incertitudes diffèrent selon l'objet de l'évaluation : elles sont moindres lorsque la réduction envisagée est globale plutôt que ciblée sur un polluant. Par conséquent, lors de la phase d'internalisation, convient-il de s'interroger sur les effets de la politique choisie : agit-elle sur l'ensemble des externalités (politique structurelle) ou seulement de manière ciblée sur l'une d'entre elles (politique technologique) ?

6 Conclusion

Nous avons analysé le choix d'une politique de réduction des émissions de GES et de polluants locaux liées aux transports dans un modèle de décision séquentielle en situation d'incertitude. Nous avons envisagé deux types de politique, les politiques structurelles agissant sur l'ensemble des émissions, et les politiques technologiques ciblant certains polluants. Nous nous sommes intéressés aux effets de l'arrivée d'information et de l'irréversibilité des politiques entreprises sur la décision optimale. Un des résultats est que la prise en compte des GES limite l'intérêt d'une politique visant à réduire uniquement les émissions locales (particules), et *a contrario*, renforce l'intérêt pour une politique structurelle visant à limiter le transport individuel dans son ensemble. Les pistes futures de recherches pourraient prendre explicitement en compte les incertitudes sur les conséquences des GES et les coûts associés à la pollution particulaire d'une part, ainsi que le problème de l'irréversibilité associé au stockage de ces gaz d'autre part.

7 Références bibliographiques

- Agence Européenne de l'Environnement (2000), adresse Internet : <http://www.eea.eu.int/>, janvier.
- Arrow, K.J., Fisher, A.C. (1974): "Environmental preservation, uncertainty and irreversibility", *Quarterly Journal of Economics*, 88, 312-319.
- Bartholomew K. (2007) "Land use-transportation scenario planning: promise and reality", *Transportation*, 4(4) 397-412.
- Carballes S. (2008) "Les véhicules particuliers en France", Données et références, Avril Département Transports et Mobilité, 40 p.
- CITEPA (2008) "Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France - Séries sectorielles et analyses étendues SECTEN", février, 297 pages.
- Commissariat Général du Plan, 2001, *Transports : choix des investissements et coûts des nuisances*, rapport du Groupe présidé par M. Boiteux, La Documentation française, Paris, Coll. Rapports officiels, 441 p.
- Devolder P. (2008), "Le facteur 4 : origine et pertinence", miméo.
- Freixas, X., Laffont, J-J (1984): "On the Irreversibility Effect", in M.Boyer, R.E. Kihlstrom (eds), *Bayesian models in Economic Theory*, Amsterdam North Holland, 1984, 149-155.
- GIEC (2007) "Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat", Genève, Suisse, 103 p.
- Godard O. et Henry C. (1998), *Les instruments des politiques internationales de*

- l'environnement : la prévention du risque climatique et les mécanismes de permis négociables, in Bureau D., Godard O., Hourcade J.-Ch., Henry Cl., Lipietz A., [1998], Fiscalité et environnement, rapport du CAE, La Documentation Française.
- Grosmesnil O. (2002), "La consommation d'énergie à usage domestique depuis quarante ans", Insee Première n° 845.
- Guesnerie R. (2003), "Kyoto et l'économie de l'effet de serre", La Documentation française, Paris, 265 p.
- Henry, C. (1974): "Investment decisions under uncertainty : the irreversibility effect", American Economic Review, 64, 1006-1012.
- Hüglin C. et R. Gehrig (2000), Contribution du trafic routier aux immissions de PM10 et PM2.5, résumé du rapport Anteil des Strassenverkehrs an den PM10- und PM2.5-Immissionen NFP41/C4, Rapport Nr. 801.683.d, EMPA Dübendorf, 31/07/2000.
- Infras-IWW (2004), External costs of transport, Update study, Report, Zürich / Karlsruhe.
- INSEE (2009), Enquête Nationale Transports et Déplacements 2007-2008, Direction des statistiques démographiques et sociales.
- Künzli N., Kaiser R., Medina S., Studnicka M., Chanel O., Herry M., Horak F., Puybonnieux-Textier V., Quenel P., Schneider J., Seethaler R., Vergnaud J.-C. and Sommer H. (2000), Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment, Lancet, 356:795-801, Sept. 2nd.
- Lemaître E. et M.-A. Kleinpeter, (2009), "Dépenses de carburant automobile des ménages : relations avec la zone de résidence et impacts redistributifs potentiels d'une fiscalité incitative", Études & documents n° 8, Commissariat Général au Développement Durable, juin.
- Marcus V. (2009), "Effet sur les prix et le pouvoir d'achat des ménages", Conférence des experts CCE, 3 juillet 2009.
- Michaels, P. (2005). Shattered Consensus: The True State of Global Warming, Rowman & Littlefield Inc., ISBN 0742549232, 304 p.
- Rapport de la conférence des experts et de la table ronde sur la contribution Climat et Énergie présidées par Michel Rocard, 28/07/2009, 83 p.
- Samoli E., E. Aga, G. Touloumi, K. Nisiotis, B. Forsberg, A. Lefranc, J. Pekkanen, B. Wojtyniak, C. Schindler, E. Niciu, R. Brunstein, M. Dodic Fikfak, J. Schwartz, et K. Katsouyanni (2006) "Short-term effects of nitrogen dioxide on mortality: an analysis within the APHEA project", European Respiratory Journal, 27:6, 1129-1138.
- Singer F. (ed.), (2008) Nature, Not Human Activity, Rules the Climate, The Heartland Institute : Chicago, IL.
- Union Européenne (2007), "Proposition révisée de Directive du Parlement Européen et du Conseil relative à la promotion de véhicules de transport routier propres et économes en énergie", COM(2007) 817 final, décembre, 20p.
- Who (2005), "Health effects of transport-related air pollution", (Eds. M. Krzyzanowski, B. Kuna-Dibbert and J. Schneider) ISBN 92 890 1373 7, 205 p.
- Who (2007), "Health relevance of particulate matter from various sources", Report on a WHO Workshop Bonn, Germany, March 2007, EU/07/5067587, 26 p.

Annexe

Preuve de la proposition 1.

Etape 1 : Propriété des choix de seconde période :

Notons V_2^* , G_2^* et P_2^* les solutions optimales fonctions de $(V_1; G_1; P_1; \theta; \phi; i; c)$ du problème

$$J(V_1; G_1; P_1; \theta; \phi; i; c) = \underset{V_2 \in [i.V_1; 1], G_2 \in [c.G_1; 1], P_2 \in [c.P_1; 1]}{\text{Min}} CT(V_2; G_2; P_2; \theta; \phi).$$

Elles satisfont aux conditions d'optimalité :

$$\begin{aligned} \alpha + \beta.G_2 + \gamma.P_2 + \theta.(1 - G_2) + \phi.(1 - P_2) - C'(1 - V_2) &= 0 \text{ si } V_2 > i.V_1 \text{ ou} \\ \alpha + \beta.G_2 + \gamma.P_2 + \theta.(1 - G_2) + \phi.(1 - P_2) - C'(1 - V_2) &= 0 \text{ si } G_2 = i.V_1 \\ \beta.V_2 + D'(G_2) - \theta.V_2 &= 0 \text{ si } G_2 > c.G_1 \text{ ou } \beta.V_2 + D'(G_2) - \theta.V_2 \geq 0 \text{ si } G_2 = c.G_1 \\ \gamma.V_2 + E'(P_2) - \phi.V_2 &= 0 \text{ si } P_2 > c.P_1 \text{ ou } \gamma.V_2 + E'(P_2) - \phi.V_2 \geq 0 \text{ si } P_2 = c.P_1 \end{aligned}$$

Nous montrons d'abord que les choix optimaux de seconde période sont croissants en fonction des choix V_1 , G_1 et P_1 de première période.

(a) Soit $\bar{V}_1 > V_1$. Supposons par l'absurde que nous n'ayons pas

$$\begin{aligned} V_2^*(\bar{V}_1; G_1; P_1) &= \bar{V}_2^* \geq V_2^*(V_1; G_1; P_1) = V_2^*, \\ G_2^*(\bar{V}_1; G_1; P_1) &= \bar{G}_2^* \geq G_2^*(V_1; G_1; P_1) = G_2^* \\ \text{et } P_2^*(\bar{V}_1; G_1; P_1) &= \bar{P}_2^* \geq P_2^*(V_1; G_1; P_1) = P_2^*. \end{aligned}$$

- Supposons que l'on ait $\bar{V}_2^* < V_2^*$, $\bar{G}_2^* \leq G_2^*$ et $\bar{P}_2^* \leq P_2^*$. Montrons que :

$$\alpha + \beta.\bar{G}_2^* + \gamma.\bar{P}_2^* + \theta.(1 - \bar{G}_2^*) + \phi.(1 - \bar{P}_2^*) - C'(1 - \bar{V}_2^*) < 0$$

Puisque $V_2^* > \bar{V}_2^* \geq \bar{V}_1 > V_1$,

$$\alpha + \beta.G_2 + \gamma.P_2 + \theta.(1 - G_2) + \phi.(1 - P_2) - C'(1 - V_2) = 0$$

Etant donné $\beta \leq \theta$, alors l'hypothèse $\bar{G}_2^* \leq G_2^*$ implique

$$\beta.\bar{G}_2^* + \theta.(1 - \bar{G}_2^*) \leq \beta.G_2^* + \theta.(1 - G_2^*).$$

De même, on a

$$\gamma.\bar{P}_2^* + \phi.(1 - \bar{P}_2^*) \leq \gamma.P_2^* + \phi.(1 - P_2^*).$$

L'hypothèse $\bar{V}_2^* < V_2^*$ implique que $C'(1 - \bar{V}_2^*) > C'(1 - V_2^*)$. Au total, on a

$$\begin{aligned} \alpha + \beta.\bar{G}_2^* + \gamma.\bar{P}_2^* + \theta.(1 - \bar{G}_2^*) + \phi.(1 - \bar{P}_2^*) - C'(1 - \bar{V}_2^*) &< \\ \alpha + \beta.G_2^* + \gamma.P_2^* + \theta.(1 - G_2^*) + \phi.(1 - P_2^*) - C'(1 - V_2^*) &= 0 \end{aligned}$$

ce qui indique que les conditions d'optimalité ne sont pas vérifiées.

- Remarquons que l'on ne peut avoir $\bar{V}_2^* < V_2^*$ et $\bar{G}_2^* > G_2^*$ puisque alors

$$\beta.\bar{V}_2^* + D'(\bar{G}_2^*) - \theta.\bar{V}_2^* > \beta.V_2^* + D'(G_2^*) - \theta.V_2^* \geq 0.$$

Or puisque $\bar{G}_2^* > G_2^* \geq c.G_1$, les conditions d'optimalité imposent $\beta.\bar{V}_2^* + D'(\bar{G}_2^*) - \theta.\bar{V}_2^* = 0$ ce qui contredit l'hypothèse. Par un raisonnement similaire, on peut montrer qu'il n'est pas possible d'avoir $\bar{V}_2^* < V_2^*$, et $\bar{P}_2^* > P_2^*$.

- Remarquons que l'on ne peut non plus avoir $\overline{V}_2 \geq V_2^*$ et $\overline{G}_2 < G_2^*$. On aurait en effet

$$\beta.\overline{V}_2 + D'(\overline{G}_2) - \theta.\overline{V}_2 < \beta.V_2 + D'(G_2) - \theta.V_2.$$

Puisque $\overline{G}_2 \geq c.G_1$, on a $G_2^* > c.G_1$ et les conditions d'optimalité imposent $\beta.V_2 + D'(G_2) - \theta.V_2 = 0$. On a donc $\beta.\overline{V}_2 + D'(\overline{G}_2) - \theta.\overline{V}_2 < 0$ ce qui montre que les conditions d'optimalité ne peuvent être vérifiées. Par un raisonnement similaire, on peut montrer qu'il n'est pas possible d'avoir $\overline{V}_2 \geq V_2^*$ et $\overline{P}_2 < P_2^*$.

Au final, on a nécessairement $\overline{V}_2 \geq V_2^*$, $\overline{G}_2 \geq G_2^*$ et $\overline{P}_2 \geq P_2^*$.

(b) **Soit** $\overline{G}_1 > G_1$. Remarquons tout d'abord que si $G_2^* \geq c.\overline{G}_1$, alors V_2^* , G_2^* et P_2^* satisfont aux conditions d'optimalité dans la situation $(V_1; \overline{G}_1; P_1)$ et par conséquent $\overline{V}_2 = V_2^*$, $\overline{G}_2 = G_2^*$ et $\overline{P}_2 = P_2^*$. Considérons le cas où $c.\overline{G}_1 > G_2^* \geq c.G_1$. Puisque $\overline{G}_2 \geq c.\overline{G}_1$, on a nécessairement $\overline{G}_2 > G_2^*$. Supposons par l'absurde que nous n'ayons pas $\overline{V}_2 \geq V_2^*$, mais plutôt $V_1 \leq \overline{V}_2 < V_2^*$. Puisque $\gamma \leq \phi$, alors

$$\gamma.\overline{V}_2 + E'(P_2^*) - \phi.\overline{V}_2 > \gamma.V_2 + E'(P_2^*) - \phi.V_2$$

et nécessairement $\overline{P}_2 \leq P_2^*$. On aurait donc

$$\begin{aligned} & \alpha.\overline{V}_2 + C(1 - \overline{V}_2) + (\beta - \theta).\overline{G}_2.\overline{V}_2 + (\gamma - \phi).\overline{P}_2.\overline{V}_2 \\ & + D(\overline{G}_2) + E(\overline{P}_2) + (\theta + \phi).\overline{V}_2 \\ & < \alpha.V_2 + C(1 - V_2) + (\beta - \theta).G_2.V_2 + (\gamma - \phi).P_2.V_2 \\ & + D(G_2) + E(P_2) + (\theta + \phi).V_2 \end{aligned}$$

alors que

$$\begin{aligned} & \alpha.V_2 + C(1 - V_2) + (\beta - \theta).G_2.V_2 + (\gamma - \phi).P_2.V_2 \\ & + D(G_2) + E(P_2) + (\theta + \phi).V_2 \\ & < \alpha.\overline{V}_2 + C(1 - \overline{V}_2) + (\beta - \theta).\overline{G}_2.\overline{V}_2 + (\gamma - \phi).\overline{P}_2.\overline{V}_2 \\ & + D(\overline{G}_2) + E(\overline{P}_2) + (\theta + \phi).\overline{V}_2 \end{aligned}$$

ce qui impliquerait après simplification de la somme des 2 inégalités :

$$(\beta - \theta).\overline{G}_2.V_2 + (\beta - \theta).G_2.V_2 < (\beta - \theta).\overline{G}_2.V_2 + (\beta - \theta).G_2.V_2$$

et donc puisque $\beta - \theta \leq 0$,

$$\overline{G}_2.V_2 + G_2.V_2 \geq \overline{G}_2.V_2 + G_2.V_2$$

soit

$$(\overline{G}_2 - G_2)(\overline{V}_2 - V_2) \geq 0$$

ce qui est une contradiction avec $\overline{G}_2 > G_2$ et $\overline{V}_2 < V_2$. Puisque $\overline{V}_2 \geq V_2^*$, on a aussi $\overline{P}_2 \geq P_2^*$ ce qui prouve la croissance des choix de seconde période avec G_1 .

La preuve de la croissance des choix de seconde période avec P_1 est similaire.

Etape 2 : Propriété de la fonction valeur de seconde période. Montrons que les dérivées première de la fonction $J(V_1; G_1; P_1; \theta; \phi; i; c)$ par rapport au choix de première période sont positives. On a :

$$\begin{aligned}\frac{\partial J}{\partial V_1} &= (\alpha + \beta.G_2^* + \gamma.P_2^* + \theta.(1 - G_2^*) + \phi.(1 - P_2^*) - C'(1 - V_2^*)) \frac{\partial V_2^*}{\partial V_1} \\ &\quad + (\beta.V_2^* + D'(G_2^*) - \theta.V_2^*) \frac{\partial G_2^*}{\partial V_1} + (\gamma.V_2^* + E'(P_2^*) - \phi.V_2^*) \frac{\partial P_2^*}{\partial V_1}\end{aligned}$$

Dans le cas où $(\beta.V_2^* + D'(G_2^*) - \theta.V_2^*) > 0$, on a $G_2^* = c.G_1$ et par conséquent $\frac{\partial G_2^*}{\partial V_1} = 0$. Par conséquent, on a toujours

$$(\beta.V_2^* + D'(G_2^*) - \theta.V_2^*) \frac{\partial G_2^*}{\partial V_1} = 0$$

et de même

$$(\gamma.V_2^* + E'(P_2^*) - \phi.V_2^*) \frac{\partial P_2^*}{\partial V_1} = 0.$$

Dans le cas où

$$\alpha + \beta.G_2^* + \gamma.P_2^* + \theta.(1 - G_2^*) + \phi.(1 - P_2^*) - C'(1 - V_2^*) > 0$$

on a $V_2^* = i.V_1$ et par conséquent $\frac{\partial V_2^*}{\partial V_1} = i$. Par conséquent,

$$\frac{\partial J}{\partial V_1} = i.(\alpha + \beta.G_2^* + \gamma.P_2^* + \theta.(1 - G_2^*) + \phi.(1 - P_2^*) - C'(1 - V_2^*)) \geq 0$$

De même on a :

$$\begin{aligned}\frac{\partial J}{\partial G_1} &= (\beta.V_2^* + D'(G_2^*) - \theta.V_2^*)c \geq 0 \\ \frac{\partial J}{\partial P_1} &= (\gamma.V_2^* + E'(P_2^*) - \phi.V_2^*)c \geq 0\end{aligned}$$

Etape 3 : Preuve de la proposition 1 :

Pour $x = V, G, P$ $x_1^*(i; c; 0) = x_2^*(V^*; G^*; P^*; \bar{\theta}; \bar{\phi}; i; c) = x^*$ sont les solutions du problème :

$$\text{Min}_{V_1, G_1, P_1 \in [0; 1]} CT(V_1; G_1; P_1; \bar{\theta}; \bar{\phi}) + \bar{J}(V_1; G_1; P_1; \bar{\theta}; \bar{\phi}; i; c; 0)$$

et satisfont à :

$$\begin{aligned}\alpha + \beta.G^* + \gamma.P^* + \bar{\theta}.(1 - G^*) + \bar{\phi}.(1 - P^*) - C'(1 - V^*) &= 0 \\ \beta.V^* + D'(G^*) - \bar{\theta}.V^* &= 0 \\ \gamma.V^* + E'(P^*) - \bar{\phi}.V^* &= 0\end{aligned}$$

$V_1^*(i; c; 1)$, $G_1^*(i; c; 1)$ et $P_1^*(i; c; 1)$ satisfont aux conditions d'optimalité

$$\begin{aligned}\alpha + \beta.G_1^* + \gamma.P_1^* + \bar{\theta}.(1 - G_1^*) + \bar{\phi}.(1 - P_1^*) - C'(1 - V_1^*) + \frac{\partial \bar{J}}{\partial V_1} &= 0 \\ \beta.V_1^* + D'(G_1^*) - \bar{\theta}.V_1^* + \frac{\partial \bar{J}}{\partial G_1} &= 0 \\ \gamma.V_1^* + E'(P_1^*) - \bar{\phi}.V_1^* + \frac{\partial \bar{J}}{\partial P_1} &= 0\end{aligned}$$

Supposons par l'absurde que la proposition 1 soit fausse.

- Supposons tout d'abord que l'on ait $V_1^*(i; c; 1) = \bar{V}_1^* > V^*$, $G_1^*(i; c; 1) = \bar{G}_1^* \geq G^*$ et

$P_1^*(i; c; 1) = \overline{P_1^*} \geq P^*$. Nécessairement, une des trois valeurs

$$\begin{aligned} \alpha + \beta \cdot \overline{G_1^*} + \gamma \cdot \overline{P_1^*} + \overline{\theta} \cdot (1 - \overline{G_1^*}) + \overline{\phi} \cdot (1 - \overline{P_1^*}) - C'(1 - \overline{V_1^*}) \\ \beta \cdot \overline{V_1^*} + D'(\overline{G_1^*}) - \overline{\theta} \cdot \overline{V_1^*} \\ \gamma \cdot \overline{V_1^*} + E'(\overline{P_1^*}) - \overline{\phi} \cdot \overline{V_1^*} \end{aligned}$$

est strictement positive. Comme nous avons montré que les dérivées premières de \overline{J} étaient positives, l'une des conditions optimales que doivent satisfaire $V_1^*(i; c; 1)$, $G_1^*(i; c; 1)$ et $P_1^*(i; c; 1)$ n'est pas satisfaite.

- Supposons que l'on ait $V_1^*(i; c; 1) = \overline{V_1^*} > V^*$, $G_1^*(i; c; 1) = \overline{G_1^*} < G^*$ et $P_1^*(i; c; 1) = \overline{P_1^*} \geq P^*$. Remarquons tout d'abord que

$$\overline{J}(V^*; \overline{G_1^*}; P^*; \overline{\theta}; \overline{\phi}; i; c; 1) \leq \overline{J}(\overline{V_1^*}; \overline{G_1^*}; \overline{P_1^*}; \overline{\theta}; \overline{\phi}; i; c; 1)$$

De plus, on a

$$\begin{aligned} \frac{\partial CT}{\partial V_1}(\overline{V_1^*}; \overline{G_1^*}; \overline{P_1^*}; \theta; \phi) > 0 \\ \frac{\partial CT}{\partial V_1}(V^*; \overline{G_1^*}; P^*; \theta; \phi) = 0 \end{aligned}$$

et par conséquent, puisque la fonction CT est convexe, on ne peut pas avoir

$$CT(V^*; \overline{G_1^*}; P^*; \theta; \phi) > CT(\overline{V_1^*}; \overline{G_1^*}; \overline{P_1^*}; \theta; \phi)$$

Donc on a

$$\begin{aligned} CT(V^*; \overline{G_1^*}; P^*; \theta; \phi) + \overline{J}(V^*; \overline{G_1^*}; P^*; \overline{\theta}; \overline{\phi}; i; c; 1) \\ \leq CT(\overline{V_1^*}; \overline{G_1^*}; \overline{P_1^*}; \theta; \phi) + \overline{J}(\overline{V_1^*}; \overline{G_1^*}; \overline{P_1^*}; \overline{\theta}; \overline{\phi}; i; c; 1) \end{aligned}$$

ce qui montre que la solution $\overline{V_1^*}; \overline{G_1^*}; \overline{P_1^*}$ n'est pas optimale.

- Pareillement, si l'on suppose que $V_1^*(i; c; 1) = \overline{V_1^*} > V^*$, $G_1^*(i; c; 1) = \overline{G_1^*} < G^*$ et $P_1^*(i; c; 1) = \overline{P_1^*} < P^*$, alors on montre que

$$\begin{aligned} CT(V^*; \overline{G_1^*}; \overline{P_1^*}; \theta; \phi) + \overline{J}(V^*; \overline{G_1^*}; \overline{P_1^*}; \overline{\theta}; \overline{\phi}; i; c; 1) \\ \leq CT(\overline{V_1^*}; \overline{G_1^*}; \overline{P_1^*}; \theta; \phi) + \overline{J}(\overline{V_1^*}; \overline{G_1^*}; \overline{P_1^*}; \overline{\theta}; \overline{\phi}; i; c; 1) \end{aligned}$$

et donc la solution $\overline{V_1^*}; \overline{G_1^*}; \overline{P_1^*}$ n'est pas optimale.

- Supposons que l'on ait $V_1^*(i; c; 1) = \overline{V_1^*} \leq V^*$ et $G_1^*(i; c; 1) = \overline{G_1^*} > G^*$. Ceci est impossible car alors on aurait

$$\beta \cdot \overline{V_1^*} + D'(\overline{G_1^*}) - \overline{\theta} \cdot \overline{V_1^*} > 0$$

et comme par ailleurs $\frac{\partial \overline{J}}{\partial G_1} \geq 0$,

$$\beta \cdot \overline{V_1^*} + D'(\overline{G_1^*}) - \overline{\theta} \cdot \overline{V_1^*} + \frac{\partial \overline{J}}{\partial G_1} > 0$$

De même, il n'est pas possible d'avoir $V_1^*(i; c; 1) = \overline{V_1^*} \leq V^*$ et $P_1^*(i; c; 1) = \overline{P_1^*} > P^*$.

La preuve par l'absurde est complète.

Preuve de la proposition 2.

Nous donnons l'esquisse de la preuve et nous ne considérons que le résultat (a), la preuve du résultat (b) étant similaire.

Partons de la situation de référence $i = c = 0$ et $g = 1$.

On montre que

$$\begin{aligned} V_2^*(V^*; G^*; P^*; \bar{\theta} + \varepsilon; \bar{\phi}; 0; 0) &\leq V^* = V_1^*(0; 0; 1) \leq V_2^*(V^*; G^*; P^*; \bar{\theta} - \varepsilon; \bar{\phi}; 0; 0) \\ G_2^*(V^*; G^*; P^*; \bar{\theta} - \varepsilon; \bar{\phi}; 0; 0) &\leq G^* = G_1^*(0; 0; 1) \\ P_2^*(V^*; G^*; P^*; \bar{\theta} + \varepsilon; \bar{\phi}; 0; 0) &\leq P^* = P_1^*(0; 0; 1) \leq P_2^*(V^*; G^*; P^*; \bar{\theta} - \varepsilon; \bar{\phi}; 0; 0) \end{aligned}$$

Si on introduit $c = 1$, alors pour V^*, G^*, P^* la contrainte devient mordante pour G_2^* en $\bar{\theta} - \varepsilon$ et pour P_2^* en $\bar{\theta} + \varepsilon$. On peut montrer que

$$\begin{aligned} V_2^*(V_1^*; G_1^*; P^*; \bar{\theta} + \varepsilon; \bar{\phi}; 0; 1) &\leq V_1^*(0; 1; 1) \leq V^* \\ G_2^*(V_1^*; G_1^*; P^*; \bar{\theta} - \varepsilon; \bar{\phi}; 0; 1) &= G_1^*(0; 1; 1) \leq G^* \\ P_2^*(V_1^*; G_1^*; P^*; \bar{\theta} + \varepsilon; \bar{\phi}; 0; 1) &= P_1^*(0; 1; 1) \leq P^* \end{aligned}$$

De même si on introduit $i = 1$ (avec $c = 0$), alors pour V^*, G^*, P^* la contrainte devient mordante pour V_2^* en $\bar{\theta} + \varepsilon$. On peut montrer que

$$\begin{aligned} V_2^*(V_1^*; G_1^*; P^*; \bar{\theta} + \varepsilon; \bar{\phi}; 1; 0) &\leq V_1^*(1; 0; 1) \leq V^* \\ G_1^*(1; 0; 1) &\leq G^* \\ P_1^*(1; 0; 1) &\leq P^* \end{aligned}$$

Finalement, si on introduit $i = 1$ (avec $c = 1$), alors pour $V_1^*(0; 1; 1)$, $G_1^*(0; 1; 1)$, $P_1^*(0; 1; 1)$ la contrainte devient mordante pour V_2^* en $\bar{\theta} + \varepsilon$. On peut montrer que

$$\begin{aligned} V_1^*(1; 1; 1) &\leq V_1^*(0; 1; 1) \\ G_1^*(1; 1; 1) &\leq G_1^*(0; 1; 1) \\ P_1^*(1; 1; 1) &\leq P_1^*(0; 1; 1) \end{aligned}$$