Croissance et environnement dans le modèle à générations imbriquées : analyse dynamique et évaluation de politiques publiques

Fabien Prieur

UNIVERSITE DE LA MEDITERRANEE - AIX-MARSEILLE II
FACULTE DE SCIENCES ECONOMIQUES

thèse pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Aix-Marseille II
Groupement de Recherche en Economie Quantitative d'Aix-Marseille

présentée et soutenue publiquement
par
Fabien Prieur

le 23 octobre 2006

CROISSANCE ET ENVIRONNEMENT DANS LE MODELE A GENERATIONS IMBRIQUEES :
Analyse Dynamique et Evaluation de Politiques Publiques

Directeurs de thèse :

Alain Venditti, Directeur de Recherche CNRS, GREQAM.
Mabel Tidball, Chargée de Recherche INRA, LAMETA.

Membres du jury :

Rapporteurs :
Gilles Rotillon, Professeur à l'Université Paris X, EconomiX.
Katheline Schubert, Professeur à l'Université Paris I, EUREQua.
Examinateurs :
Carine Nourry, Professeur à l'Université Aix-Marseille II, GREQAM.
Pierre Pestieau, Professeur à l'Université de Liège, CORE.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance à l'égard de mes deux directeurs de thèse : Monsieur le Professeur Alain Venditti qui m'a toujours témoigné sa confiance et sans qui ce travail n'aurait pu être mené à son terme ; Madame le Professeur Mabel Tidball, qui m'a constamment soutenu et transmis son enthousiasme, pour ses conseils avisés.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord aux Professeurs Gilles Rotillon et Katheline Schubert pour l'attention qu'ils ont accordée à cette recherche, ainsi que pour m'avoir fait l'honneur de rapporter cette thèse.

Je remercie tout particulièrement les Professeurs Carine Nourry et Pierre Pestieau pour leurs nombreuses remarques et suggestions et je leur suis très reconnaissant d'avoir accepté de prendre part à ce jury.

Je voudrais également remercier tous les participants aux "Rencontres de l'Environnement" et j'ai une pensée pour le Professeur Philippe Michel sans qui je n'aurais pu côtoyer aussi facilement les meilleurs spécialistes de l'Economie de l'Environnement. J'adresse toute ma gratitude à Messieurs les Professeurs Thierry Bréchet, Pierre-André Jouvet et Stéphane Lambrecht avec qui j'ai pu établir une collaboration constructive et, je le souhaite, durable.

J'aimerais adresser ma profonde reconnaissance à tous les membres du GREQAM et, plus particulièrement, aux participants du séminaire Macroéconomie savamment orchestré par Monsieur le Professeur Alain Venditti. Je remercie aussi les membres de l'INRA-LAMETA, et en particulier Monsieur Robert Lifran, qui m'ont fait l'honneur de m'accueillir dans leur unité de recherche.

Je suis très reconnaissant à Messieurs les Professeurs Charles Figuières, avec qui j'ai eu le plaisir de travailler sur des thèmes différents de ceux de la thèse, et Alain Jean-Marie, pour sa contribution à ce travail.

Mes remerciements vont également aux membres du CORE pour les échanges constructifs qui ont rythmé mon séjour dans ce laboratoire.

Enfin, je dédie cette thèse à ma famille et je remercie tout particulièrement Anne pour son soutien moral.

Table des matières

Introduction générale

Dans le contexte d'une économie mondiale en pleine expansion, la question de savoir si une croissance économique soutenue est compatible avec la préservation de l'environnement demeure, plus que jamais, d'actualité. Cette préoccupation renvoie à la notion de développement durable qui se situe aujourd'hui au coeur du débat politique, économique et social. Selon le rapport Brundtland [1987], *"le développement durable est celui qui répond au besoin du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins"*. Bien qu'étant très générale, cette définition préconise de léguer aux générations futures un environnement au minimum préservé afin que celles-ci, censées être plus riches et disposer de moyens de lutte contre la pollution plus efficaces, bénéficient des conditions nécessaires à la satisfaction de leurs besoins.

Depuis le sommet de la terre à Rio (1992), un consensus s'est créé autour du constat selon lequel un développement économique non contrôlé est susceptible de causer des dégradations environnementales irrémédiables : réchauffement climatique et ses conséquences, destruction de la couche d'ozone, disparition d'espèces végétales et animales. Si l'on considère plus précisément le problème du réchauffement climatique, le niveau élevé de la croissance mondiale, stimulée par l'explosion de l'activité dans les pays émergents comme la Chine ou l'Inde, et la consommation de ressources énergétiques, source d'émissions polluantes, en perpétuelle augmentation témoignent de l'urgence d'en appeler à une collaboration des différents pays, qu'ils soient industrialisés ou en voie de développement, pour le maintien d'un environnement sauvegardé.

Cette prise de conscience internationale s'est concrétisée par la signature du protocole de Kyoto (1997) pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES dont le CO_2, CH_4, CFC). Dans le cadre de cet accord, les pays signataires se sont engagés à réduire leurs émissions à l'horizon 2012. Par exemple, l'union européenne a l'obligation de diminuer ses rejets de gaz à effet de serre de 8% sur la base de ses émissions de l'année 1990. Le protocole de Kyoto constitue un premier pas vers une coopération plus étendue des nations pour la gestion des problèmes environnementaux. Cependant, ces accords semblent, à bien des égards, insuffisants[1]. D'abord, certains pays n'ont pas ratifié cet accord. Ainsi, les Etats-unis, responsables de 30 à 35 % du total des émissions de GES, ne comptent pas parmi les pays signataires de même que la Chine, pourtant classée au second rang des pollueurs mondiaux, est exemptée de la première phase du protocole. Ensuite, selon l'avis de nombreux experts, les efforts consentis sont trop parcimonieux alors qu'il aurait été nécessaire d'allouer des quotas d'émission plus restrictifs pour enrayer la tendance observée d'un réchauffement climatique.

Deux raisons au moins peuvent justifier la frilosité des participants aux négocia-

[1] La convention cadre sur le changement climatique, créée à Rio, reconnaît que : *"the exact impact of the Kyoto Protocol on global greenhouse gases emissions is difficult to quantify, yet it represents a first step"* (UNFCCC, 2005).

tions. Il existe encore une incertitude concernant la part de responsabilité de l'activité humaine dans le processus de réchauffement. Certains imputent la hausse importante des températures, lors du siècle dernier, à l'homme tandis que d'autres affirment que ce phénomène est naturel et survient de manière cyclique. La réticence des pays à s'engager peut également s'expliquer par la crainte de voir leur croissance pénalisée par trop en raison d'une régulation contraignante de certains secteurs d'activité.

Laissant aux climatologues le soin d'évaluer les répercussions de l'activité humaine sur le climat et aux biologistes, l'étude de l'évolution d'écosystèmes soumis à une pollution d'origine humaine, le rôle des économistes consiste plus particulièrement à répondre aux questions suivantes, qui les occupent depuis déjà plusieurs décennies :

- Quelles sont les conditions d'une croissance respectueuse de l'environnement ?
- Quel rôle peuvent jouer les pouvoirs publics pour atteindre cet objectif ?
- Quelles recommandations doit-on formuler pour garantir la performance des instruments de régulation ?
- Ou encore, pour reprendre l'exemple du protocole de Kyoto (1997), comment faire en sorte que les permis à polluer, instrument central dans ce dispositif, parviennent à satisfaire des objectifs environnementaux raisonnables sans pour autant compromettre les perspectives de croissance des économies polluantes ?

Une fois énumérées les questions d'intérêt, il convient de déterminer le cadre d'analyse le plus approprié à leur traitement. L'économie de l'environnement est certainement la discipline qui emploie la plus grande variété d'outils à disposition des économistes. Parmi les approches possibles, les instruments fournis par la théorie de la croissance ont connu un succès ininterrompu depuis plus de trois décennies. Ce cadre d'analyse se révèle en fait particulièrement adapté aux problématiques environnementales énoncées plus haut dans la mesure où il permet de retranscrire la relation dynamique qui existe entre la sphère économique et la sphère environnementale. Si l'activité humaine (production, consommation) affecte l'environnement par le biais de l'utilisation de ressources naturelles ou de l'émission de polluants, l'environnement exerce à son tour un effet sur l'économie de par son influence non seulement sur l'activité productive, en tant que facteur de production ou qu'externalité, mais aussi, sur le bien-être des agents qui consomment des services environnementaux.

Historiquement, deux grandes catégories d'études ont contribué au développement de la littérature introduisant la dimension environnementale dans les modèles de croissance. La première s'est focalisée sur le problème de l'exploitation de ressources naturelles épuisables (voir notamment Nordhaus [1973], Solow [1974] ou Dasgupta et Heal [1974]) afin de s'élever contre les conclusions extrêmes du club de Rome qui recommandaient une croissance nulle comme ultime remède à la dégradation de l'environnement. La seconde catégorie s'intéresse plutôt aux problématiques liées à la pollution, généralement présentée comme une autre limite potentielle à la croissance économique (voir les travaux fondateurs de Keeler *et al.* [1971], Forster [1973] ou Brock [1977]). Ce dernier champ de recherche a connu le développement le plus spectaculaire. Il existe aujourd'hui une littérature foisonnante qui aborde les questions posées précédemment et, notre travail s'inscrit pleinement dans la lignée des articles qui la composent.

La thèse comporte quatre chapitres. Le premier chapitre est précisément consacré à une revue des travaux étudiant la relation entre croissance et environnement, les conditions d'une croissance durable et le rôle de la politique environnementale. Les trois chapitres suivants constituent les contributions originales de la thèse.

Le chapitre I est un survol de la littérature sur la relation entre croissance et environnement. Il est possible de scinder les travaux en fonction du type de modélisation employé :

- modèles de croissance (exogène) néoclassique *à la* Ramsey [1928], Cass [1965], Koopmans [1965],
- modèles de croissance endogène (dont Romer [1986], Lucas [1988] ou Rebelo [1991]),
- modèles à générations imbriquées *à la* Allais [1947], Samuelson [1958], Diamond [1965].

L'introduction de l'environnement dans le modèle de croissance néoclassique donne un premier aperçu des tensions qui existent entre croissance et environnement. La pollution est généralement modélisée comme un produit fatal de la production (Keeler *et al.* [1971], Forster [1973])[2]. Elle peut être appréhendée en tant que flux ou bien en tant que stock et constitue, dans quasiment tous les cas, une source de désutilité pour les agents. Le résultat principal de ce pan de littérature stipule que l'intégration de la dimension environnementale dans le modèle de croissance optimale se traduit par un effet de niveau. L'économie converge vers un état de long terme caractérisé par une moindre accumulation de capital et une baisse de la consommation relativement à la règle d'or modifiée. Cette propriété s'explique par la pression exercée par les dommages environnementaux sur la sphère économique. Celle-ci se manifeste par une diminution de l'incitation à investir donc du capital accumulé. Le second constat concerne le rôle des pouvoirs publics dont l'intervention est indispensable pour internaliser les externalités environnementales qui opèrent au niveau de l'économie décentralisée. En fait, les firmes ne se préoccupent pas des répercussions de leur activité sur le bien-être des agents via la pollution qu'elles émettent et, l'économie présente des niveaux de production, de capital et de consommation stationnaires supérieurs à ceux de l'optimum social (Forster [1973], Van der Ploeg et Withagen [1991]).

[2]Mais, certaines études considèrent qu'elle est un input de la technologie (Brock [1977], Tavhonen et Kuuluvainen [1993]) ou qu'elle provient de la consommation (Mäler [1974], Beltratti [1995a]).

Par contre, l'introduction de préoccupations environnementales n'affecte pas la croissance de long terme puisque le taux de croissance est entièrement déterminé par des variables exogènes : croissance de la population, progrès technique exogène. Le recours aux instruments fournis par la théorie de la croissance endogène permet précisément d'approfondir cette analyse.

Une première lecture de l'effet de ces préoccupations sur le taux de croissance économique aboutit à une conclusion plutôt pessimiste quant à la relation entre croissance et environnement. La croissance équilibrée n'est plus la règle dès qu'on intègre la pollution et les dommages qu'elle occasionne aux agents (Withagen [1995], Michel et Rotillon [1995]). Plusieurs solutions ont été proposées afin de remédier à cette limite. Parmi les arguments les plus fréquemment invoqués, figurent l'engagement dans des activités de dépollution (Gradus et Smulders [1993], Michel et Rotillon [1995]) et la recherche de technologies moins polluantes (Musu [1995], Bovenberg et Smulders [1995]). La promotion de ces activités nécessite là encore une intervention des pouvoirs publics, seule capable de conduire l'économie sur la voie d'une croissance respectueuse de l'environnement (Mohtadi [1996], Gradus et Smulders [1996]). Ces résultats confirment donc qu'une croissance soutenue et durable est possible à condition de disjoindre le moteur de la croissance du processus d'accumulation de la pollution. De plus, un certain nombre de travaux montrent qu'une réforme de la politique environnementale (hausse de la taxe sur les émissions) ne constitue pas nécessairement un frein à la croissance. Elle peut même procurer un double dividende, au sens d'une hausse simultanée du taux de croissance et de la qualité de l'environnement, quand l'environnement entre dans la production en tant qu'externalité positive (Bovenberg et Smulders [1996]) ou bien quand l'instrument de régulation vient suppléer un régime de taxes à l'origine de distorsions (Bovenberg et de Mooij [1997]).

L'intérêt du modèle de croissance à générations imbriquées, relativement aux modèles avec agent à durée de vie infinie, est de saisir la dimension intergénérationnelle omniprésente dès qu'il est question d'environnement. Typiquement, l'équilibre concurrentiel est inefficace en raison de l'incapacité des agents à mesurer les répercussions de long terme de leurs décisions. Les travaux qui composent cette littérature offrent alors un éventail assez large, et une comparaison de la performance, des moyens dont dispose le régulateur pour internaliser les effets intergénérationnels. En fait, il apparaît que les instruments de marché, taxes et permis à polluer, permettent de décentraliser l'optimum social (Michel [1993], Beltratti [1995b], Ono [1996] ou Jouvet *et al.* [2002a])[3]. Toutefois, le succès de l'intervention publique exige qu'elle relève de la compétence d'une sorte de planificateur immortel plutôt que de celle d'un gouvernement à horizon

[3]même si des recommandations spécifiques s'imposent pour garantir l'efficacité d'une régulation par les permis (Jouvet *et al.* [2005]).

de vie fini (John *et al.* [1995]). De même, si ces systèmes promeuvent une certaine efficience économique, ils ne sont pas pour autant garants du respect de l'équité intergénérationnelle (Howarth et Norgaard [1992]). Il est également important de noter que l'analyse de l'effet d'une réforme de la politique environnementale sur la croissance, par exemple pour l'instrument permis, conduit à des résultats assez éloignés de ceux des études précédentes, pour la croissance endogène. Généralement, il existe un dilemme entre accumulation de capital et réduction de la pollution (Jouvet *et al.* [2002b]) et, dans certains cas, une politique plus sévère peut même avoir des répercussions contraires à celles escomptées en provoquant une baisse du capital et une hausse de la pollution stationnaires (Ono [2002]).

La dernière partie du chapitre I traite d'une problématique sensiblement différente de celles exposées jusqu'à présent. Les études composant se pan de la littérature s'intéressent toujours à la relation entre croissance et environnement. Leur objectif réside plus précisément dans la détermination des fondements théoriques de la courbe de Kuznets environnementale (CKE). Cette relation en forme de U inversé, liant la concentration de certains polluants au revenu par tête, a été détectée par de nombreuses études empiriques (dont Grossman et Krueger [1993], [1995]) au début des années 90[4]. L'apport de la théorie de la croissance consiste à montrer que des changements de régime relatifs soit à une activité de dépollution soit, à l'adoption de technologies moins polluantes sont à l'origine de l'émergence d'une telle relation (John et Pecchenino [1994], Selden et Song [1995], Stokey [1998]). Ces contributions délivrent ainsi une vision optimiste de la relation entre croissance et environnement puisque l'obtention d'une telle courbe suppose qu'à partir d'un certain niveau de revenu, la croissance s'accompagnera d'une baisse de la pollution. Cependant, une double caution doit être apposée aux résultats de ces travaux. D'abord, les modèles de croissance qui génèrent la CKE, en ignorant une partie de l'interaction entre croissance et environnement, se placent dans des conditions prédisposant à son existence. Ensuite et surtout, il demeure une controverse, dans les disciplines empiriques, à propos de la validité et de l'existence même d'une telle relation (Perman et Stern [2003]). Dès lors, l'obtention de la CKE n'est pas forcément une propriété désirable pour les modèles considérés (Stern [2003]).

La synthèse de la littérature survolée dans le premier chapitre nous a permis de repérer deux pistes de recherche, fortement liées, insuffisamment explorées jusqu'alors.

[4]L'intuition qui sous-tend son existence est la suivante. Dans les premiers stades de l'industrialisation, la pollution croît rapidement parce que d'une part, la priorité est donnée à l'accumulation de richesse et que d'autre part, les agents se préoccupent plus de leur emploi et de leur revenu que de la qualité de l'air ou de l'eau (Dasgupta *et al.* [2002]). Dans les stades plus avancés de développement, au fur et à mesure que les revenus augmentent, les individus accordent plus de valeur à l'environnement et, cela justifie la mise en place, par les autorités compétentes, d'une régulation de la pollution de nature à permettre sa baisse effective.

Le second chapitre est d'abord consacré à une évaluation des répercussions de l'irréversibilité potentielle de la pollution sur la relation entre croissance et environnement. Ensuite, la problématique que nous aborderons dans les deux chapitres suivants concerne la performance d'une régulation de la pollution grâce à un système de permis à polluer.

Avant d'entrer plus en détail dans le contenu de ces trois chapitres, il est important d'émettre une remarque ayant trait au cadre d'analyse retenu dans l'ensemble de nos travaux. Les outils fournis par la théorie de la croissance semblent incontournables et indispensables pour répondre aux questions que nous venons de soulever. De manière schématique, il est possible de classer les modèles qu'offre cette théorie en deux catégories : les modèles avec agent à durée de vie infinie et les modèles à générations imbriquées. Les travaux qui emploient le premier type de modèle, en supposant que la durée de vie de l'agent coïncide avec celle de l'environnement, se focalisent forcément sur la dimension intragénérationnelle de problèmes liés à la pollution. Ce faisant, ils ignorent la dimension intergénérationnelle qui se situe pourtant au coeur des problématiques environnementales : les décisions actuelles affectent non seulement l'environnement dont bénéficient les générations présentes mais aussi, celui dont hériteront les générations futures. Selon Solow [1986], le modèle à générations imbriquées est le cadre conceptuel le plus à même de rendre compte de l'aspect intergénérationnel inhérent aux problèmes de pollution. Cette observation a forgé notre choix de recourir au modèle à générations imbriquées avec pollution comme cadre d'analyse commun à tous nos travaux. Notre conviction a par ailleurs été renforcée par le constat selon lequel la plupart des études apparentées à nos recherches utilisent ce type de modélisation.

La première piste de recherche, objet du second chapitre, se fonde sur la mise en garde, émise par de nombreux auteurs (dont Arrow *et al.* [1995] et Dasgupta et Mäler [2002]), contre toute interprétation hâtive de la CKE. Selon Dasgupta et Mäler [2002] : *"The moral that would appear to have been drawn from the finding (of the environmental Kuznets curve) is that resource degradation is reversible : degrade all that you want now, Earth can be relied upon to rejuvenate it later if you require it. The presumption is false. Nature's non convexities are frequently a manifestation of positive feedback processes, which in turn often means the presence of ecological thresholds. But if a large damage were to be inflicted on an ecosystem whose ability to function is conditional on it being above some threshold level, the consequence would be irreversible ... the relationship embodied in the EKC has to be rejected"*. Ainsi, la notion même de courbe de Kuznets environnementale doit être rejetée dès le moment où l'on admet que l'activité humaine est susceptible de provoquer des dommages environnementaux irréversibles. Comme nous l'avons signalé, plusieurs études ont tenté d'apporter une explication théorique de l'existence de la CKE mais, force est de constater qu'aucune n'intègre la possibilité d'une irréversibilité de la pollution.

Notre objectif consiste précisément à généraliser le cadre d'analyse d'un des modèles fondateurs de cette littérature, à savoir, John et Pecchenino [1994]. Dans un modèle à générations imbriquées avec pollution, ces auteurs démontrent l'existence d'une CKE à partir d'un changement de régime, lors de la dynamique de transition, affectant une activité de dépollution. Le mécanisme central, gouvernant la logique de leur modèle, repose sur un arbitrage entre épargne en capital physique et investissement dans la dépollution. En fonction des niveaux de richesse et de qualité de l'environnement, qui déterminent respectivement le poids des contraintes financière et environnementale pesant sur les agents privés, ceux-ci décident d'investir ou pas dans la dépollution. Cette décision influence en retour à la fois l'accumulation du capital physique et naturel[5]. Nous modifions ce cadre d'analyse en renonçant à l'hypothèse d'une assimilation naturelle de la pollution à taux constant au profit d'une fonction d'assimilation ayant une forme de U inversé (introduite notamment par Forster [1975] ou Tavhonen et Withagen [1996]). L'irréversibilité se caractérise alors par le fait que la capacité de régénération naturelle est définitivement annihilée au delà d'un certain seuil de dommage. Dans ce contexte, nous nous efforçons de répondre à la question de savoir en quoi la possible extinction du processus naturel de régénération peut remettre en cause l'émergence de la CKE.

Nous montrons d'abord qu'il existe une multiplicité d'équilibres aux propriétés diamétralement opposées. Certains exhibent une qualité de l'environnement élevée tandis que d'autres présentent un environnement irrémédiablement dégradé. Une synthèse des propriétés des équilibres montre que les solutions associées à un niveau de pollution irréversible constituent des trappes de pauvreté à la fois économiques et écologiques. Ainsi, en l'absence de régulation, l'économie polluante, potentiellement soumise au risque d'irréversibilité, peut connaître un processus de développement la conduisant vers un état de long terme aux caractéristiques médiocres. Ce premier résultat contribue à la littérature sur les trappes de pauvreté (voir Azariadis et Stachurski [2005] pour un survol). En effet, nous proposons un autre facteur explicatif de l'apparition de trappes, à savoir, l'existence d'un effet de seuil jouant au niveau de la loi de régénération de la nature.

L'analyse dynamique corrobore ensuite notre intuition selon laquelle la CKE n'est

[5]et implique l'existence de deux phases de développement distinctes. Dans la première (pour un niveau de richesse bas et un environnement élevé), les agents privilégient leur consommation au détriment des activités de dépollution et la croissance économique s'associe à une dégradation de l'environnement. Une fois que l'économie atteint un niveau suffisant de richesse et/ou subit un dommage environnemental important, les agents sont incités à engager des dépenses de dépollution. Dans cette seconde phase, la croissance s'accompagne finalement d'une amélioration de la qualité de l'environnement. La synthèse de ces deux phases permet alors d'observer l'équivalent de la courbe de Kuznets environnementale.

plus la règle quand on tient compte de l'irréversibilité. Nous repérons au contraire une sorte de courbe de Kuznets dégénérée représentant la trajectoire de convergence vers une trappe. L'explication de l'émergence de cette relation est la suivante. Lors des phases de développement où les agents n'ont pas suffisamment d'incitations à dépolluer, la croissance s'accompagne d'une dégradation de l'environnement. Mais, il est vraisemblable que le passif environnemental accumulé soit tel que le seuil critique de dommage soit dépassé. Dès lors, une fois que l'économie s'engage dans une activité de dépollution, cet effort ne suffit pas à la prémunir contre la convergence vers la trappe. L'effondrement de la qualité de l'environnement provoque en retour une phase de récession économique car les agents sont contraints de consacrer, en vain, toujours plus de ressources à la dépollution au détriment de l'épargne. Ce second résultat fait écho à la mise en garde de Dasgupta et Mäler [2002] et contredit sérieusement le message délivré par la CKE : dès qu'on admet la potentielle irréversibilité des dommages environnementaux, il est erroné voire dangereux de penser qu'il sera toujours possible de faire marche arrière du point de vue des dégradations passées causées à l'environnement.

Le troisième chapitre constitue un prolongement naturel de l'étude précédente. Dans le chapitre II, nous avons notamment montré qu'une issue possible du développement économique, en l'absence de contrôle de la pollution mais en présence d'irréversibilité, était l'accession, à long terme, à une trappe de pauvreté économique et écologique. Si une interprétation quelque peu hâtive de la CKE a pu conduire certains auteurs (dont Beckerman [1992], Panayotou [1993] ou Bartlett [1994]) à bannir toute forme de régulation de la pollution, coupable d'entraver une croissance économique *in fine* salvatrice, ce résultat nous incite plutôt à clamer la nécessité d'une intervention des pouvoirs publics pour la gestion des problèmes de pollution. Nous développons encore le modèle initial en introduisant à présent un système de régulation de la pollution basé sur l'instauration d'un marché de permis à polluer. La problématique de ce chapitre se décline alors selon deux préoccupations. Nous cherchons dans un premier temps à savoir si une telle intervention est susceptible de protéger l'économie de la survenue d'un état de long terme ayant les caractéristiques d'une trappe. Dans un second temps, nous tentons plus globalement de mesurer l'effet d'une régulation par les permis sur le développement de l'économie polluante. Il existe une littérature importante sur les effets d'une réforme de la politique environnementale sur la croissance (Bovenberg et Smulders [1995], [1996], Bovenberg et de Mooij [1997], Jouvet *et al.* [2002b], Ono [2002], [2003]). Il sera par conséquent très intéressant de situer nos résultats par rapport aux contributions antérieures sur le sujet.

Dans ce cadre d'analyse, l'économie polluante est potentiellement sujette au risque d'atteindre deux trappes de nature différente. Le première trappe correspond aux équilibres stationnaires qui présentent un niveau de richesse bas et une concentration du polluant supérieure au seuil d'irréversibilité et, en lesquels l'économie peut se stabiliser. La seconde s'apparente à une sorte de trappe "asymptotique" dans la mesure où elle coïncide avec un sentier de (dé)croissance marqué par une hausse ininterrompue de la pollution accompagnée d'une érosion continue du niveau de richesse. Il apparaît qu'il existe un niveau critique pour les émissions en deçà duquel la convergence vers une trappe "stationnaire" est possible. *A contrario*, choisir un quota global d'émission supérieur à ce seuil est suffisant pour exclure l'existence même de ce type de trappe. De plus, offrir aux firmes polluantes le quota le plus bas au delà du seuil empêche aussi que l'économie soit piégée par la trappe "asymptotique" pourvu qu'elle évolue, à l'instant initial, dans un environnement sauvegardé.

Cette partie de l'étude a permis de répondre à la première question en isolant les conditions sous lesquelles une régulation par les permis garantit l'absence de trappes. Nous nous focalisons ensuite, à la manière de Jouvet *et al.* [2002b] ou Ono [2002], sur l'analyse de l'effet du choix du quota d'émission sur les propriétés des autres équilibres du modèle.

Il existe deux types d'équilibres avec pollution "réversible" qui se distinguent seulement par la décision des agents d'investir, ou pas, dans la dépollution. Un renforcement de la politique environnementale (baisse du quota) implique une évolution du rapport de force entre les contraintes financière et environnementale auxquelles sont confrontés les agents[6]. Connaître l'impact de la baisse du quota sur l'équilibre se résume à déterminer laquelle des deux contraintes l'emporte suite au renforcement. A la solution contrainte (dépollution nulle), la baisse du quota se traduit par une réduction de la pollution mais, cet effort est réalisé au détriment de l'accumulation de capital. Autrement dit, une politique plus sévère pénalise la croissance économique. Par contre, à l'équilibre intérieur (dépollution opérante), si un renforcement du système de permis promeut une réduction de la pollution, il stimule également l'accumulation de richesses. Dès lors, une réforme ambitieuse de la politique environnementale procure un double bénéfice à l'économie qui la met en oeuvre. Ce résultat d'existence d'un double dividende est à rapprocher de la conclusion des travaux qui, dans le cadre des modèles avec agent à durée de vie infinie, étudient l'effet d'une réforme du système de taxe (Bovenberg et Smulders [1995], [1996]). Cependant, contrairement à ces contributions, nous pouvons noter qu'il ne repose pas sur l'hypothèse discutable d'existence d'une externalité environnementale forte dans la production.

Dans le chapitre IV, nous appréhendons le problème de la performance de l'instru-

[6]la contrainte financière réside dans le fait que l'agent dispose d'une dotation en ressources finie, et dépendante du quota, à allouer à ses deux postes de dépenses : épargne et dépollution. La contrainte environnementale provient, quant à elle, de la désutilité occasionnée par la pollution dont la dynamique est également affectée par le choix du quota.

ment permis sous un angle assez différent de celui considéré précédemment. Nous avons noté, au cours du survol de la littérature, que la majorité des travaux qui concluent à l'efficacité de l'instrument permis pour décentraliser l'optimum social n'abordent pas le problème posé par la définition de la norme initiale de pollution (Beltratti [1995b], Jouvet *et al.* [2002a], Jouvet *et al.* [2005]). Ces études supposent implicitement que les décideurs publics sont parfaitement capables de choisir le meilleur quota d'émission, à distribuer aux pollueurs, au vu d'un objectif déterminé. Or, si l'on se réfère aux engagements pris par les pays signataires dans le cadre du protocole de Kyoto (1997), il ne fait aucun doute que les efforts consentis, en matière de réduction des émissions de GES, sont insuffisants. Plusieurs études récentes (dont Hoel [2005], Kolstad [2005], Yu [2005]) développent même une liste d'arguments, parmi lesquels figure l'existence de contraintes politiques, expliquant l'inefficacité de ce type de processus de négociation. Partant de ce constat, nous proposons un modèle à générations imbriquées dans lequel les émissions polluantes des firmes sont contrôlées par un système de permis[7]. Nous supposons, en toute généralité, que l'économie nationale se voit imposer un quota d'émission exogène, défini par exemple à l'échelle supranationale, qui n'a aucune raison de correspondre à son propre besoin d'émission. Dans cette situation, la question se pose de savoir si la régulation de la pollution par les permis et la réalisation de l'optimum de premier rang sont toujours compatibles.

Dans un monde sans contrainte, le quota d'émission offert à l'économie coïncide avec la cible de pollution définie par l'optimum social (hypothèse implicite des contributions de Jouvet *et al.* [2002a] et Jouvet *et al.* [2005]). Dans ce contexte, nous montrons que, pour atteindre l'allocation de la règle d'or modifiée, il suffit de redistribuer la rente environnementale, procurée par la vente de permis aux firmes, entre les générations de manière à influencer les décisions de consommation et d'investissement. L'instrument de redistribution se substitue aux transferts forfaitaires classiques du modèle de Diamond [1965] afin d'obtenir, à long terme, le niveau de capital de la règle d'or.

Dans le cas plus vraisemblable où le quota est trop "laxiste", sachant que la gouvernement s'engage à offrir un volume équivalent de permis à polluer sur le marché, nous démontrons malgré tout qu'il est possible d'atteindre l'optimum de premier rang. Pour ce faire, il faut autoriser les ménages à participer au marché des permis au même titre que les firmes polluantes. L'achat de permis par les ménages, pour un motif d'épargne, permet en fait de différer leur utilisation, et les émissions qui l'accompagnent, dans le temps. La seule participation des ménages au marché ne garantit pas pour autant un niveau d'émission optimal. Ils prennent la pollution comme donnée et sont par conséquent soumis à des externalités environnementales à la fois intra- et intergéné-

[7]Nous simplifions l'analyse en revenant à l'hypothèse d'une assimilation à taux constant de la pollution.

rationnelles. Dès lors, nous supposons la mise en place d'une agence de gestion de la dotation totale en permis de l'économie. En choisissant le montant de permis à épargner pour le compte des ménages, sa décision revient finalement à répartir le quota de permis entre les deux types de demandeurs (firmes et ménages) en fonction de l'usage qu'ils en ont (production *versus* épargne) et des répercussions environnementales de cet usage (pollution immédiate *versus* pollution différée). Cette agence joue, dans une certaine mesure, un rôle proche de celui d'un planificateur bienveillant qui ne s'intéresserait qu'aux variables environnementales. Il est donc clair que son choix ne s'identifie pas à la condition d'optimalité pour le niveau d'émission. Cependant, là encore, la politique de redistribution de la rente joue un rôle central. Elle a pour finalité d'influencer la décision de l'agence lorsque celle-ci accorde insuffisamment d'importance aux générations futures.

En résumé, nos travaux de recherche sont motivés par la volonté d'appréhender les problématiques environnementales d'importance. De ce fait, nous nous efforçons d'apporter des éléments de réponse aux questions concernant non seulement la compatibilité des objectifs de croissance économique et de préservation de l'environnement mais également, le rôle et les modalités de l'intervention des pouvoirs publics pour la gestion des problèmes de pollution.

D'abord, nous montrons que la prise en compte de la potentielle irréversibilité des dommages environnementaux amène à reconsidérer les prédictions ayant trait à la relation entre croissance et environnement. En effet, un développement économique non régulé peut conduire une économie polluante vers une trappe de pauvreté et ce, malgré une activité de dépollution menée par les agents privés. De plus, les fondements théoriques de l'émergence de la CKE, et en particulier de la seconde phase où la croissance est censée s'accompagner d'une baisse de la pollution, sont clairement remis en cause. Un changement de régime relatif à l'activité de dépollution se révèle insuffisant pour guider l'économie vers un sentier de croissance respectueux de l'environnement. On assiste plutôt à un effondrement de l'environnement, résultant de l'accumulation des dommages passés provoqués par l'activité humaine, qui entraîne en retour un appauvrissement de l'économie.

Ce constat justifie ensuite que l'on s'intéresse au rôle de la politique environnementale. Nous démontrons alors qu'une régulation par les permis est une politique publique performante, à condition de respecter des règles précises pour la fixation du quota global d'émission, du point de vue de sa capacité à protéger l'économie de la convergence vers une trappe. Un fois placé dans le contexte d'absence de trappes, nous montrons également qu'une régulation de la pollution par les permis ne constitue pas nécessairement un frein à la croissance. Une réforme du système de permis peut même engendrer un double dividende. Ce résultat n'avait été vérifié jusqu'alors que pour l'instrument de la taxe sous l'hypothèse controversée de l'existence d'une externalité environnementale de production.

Enfin, nous mettons l'accent sur la principale difficulté inhérente à la régulation de la pollution par un système de permis, à savoir, la définition de la norme (ou quota) initiale de pollution. Tous les travaux qui concluent à l'efficacité de cet instrument pour réaliser l'optimum social ignorent ce problème en supposant que le régulateur est parfaitement apte à choisir le meilleur quota au vu d'un objectif précis. Nous nous écartons de ce cadre d'analyse en admettant, au contraire, que le quota de permis s'impose à l'économie de manière exogène et qu'il ne correspond pas *a priori* à son objectif d'émission. Dans le cas où le quota est "laxiste", nous proposons de faire participer les ménages au marché des permis, pour un motif d'épargne, et de confier la gestion de la dotation en permis de l'économie à une agence environnementale. Ce faisant, nous montrons qu'il est possible de dépasser la rigidité du système de permis et même d'atteindre l'optimum de long terme par le recours à une politique de discrimination par les prix des intervenants sur le marché des permis.

Chapitre 1

La relation entre croissance et environnement

1.1 Introduction

Les problématiques environnementales se sont développées, dans les modèles de croissance, au cours des années 1970 suite au scénario pessimiste du club de Rome (Meadows *et al.* [1972]) qui prédisait l'épuisement des ressources minérales terrestres. Le message délivré préconisait même une croissance nulle comme seul remède à la détérioration de l'environnement causée par le développement économique. En réponse à ces conclusions alarmistes, la théorie de la croissance s'est tout d'abord concentrée sur le problème de l'exploitation des ressources épuisables, comme les combustibles fossiles (voir notamment Nordhaus [1973], Solow [1974], Heal [1976] et Dasgupta et Heal [1974], [1979]). La contribution principale de ces travaux consiste à montrer qu'il est possible de maintenir une croissance positive, malgré la contrainte imposée par la finitude des stocks de ressources, en s'appuyant sur les notions de ressource non essentielle à la production, de technologie de substitution (*backstop technologies*) ou encore en soulignant le rôle du progrès technique. Parallèlement à cette préoccupation globale de la gestion des ressources naturelles, un intérêt croissant s'est porté sur une autre limite potentielle à la croissance : la dégradation de l'environnement occasionnée par l'homme. Cette considération se fonde sur le rôle de la nature, qui fait office de puit absorbant les déchets et polluants produits par l'activité économique. Comme le résument parfaitement Brock et Taylor [2004] : *"When the environment's ability to dissipate or absorb wastes is exceeded, environmental quality falls... Growth may be limited because reductions in environmental quality calls forth more intensive clean up or abatement efforts that lower the return to investment, or more apocalyptically, growth may be limited when humans do such damage to the ecosystem that it deteriorates beyond repair and settles on a new lower, less productive steady state"*.

Cette nouvelle préoccupation a conduit au développement de travaux qui se sont focalisés sur l'étude de la relation entre croissance économique et environnement (ou pollution) à partir du modèle de croissance néoclassique *à la* Ramsey [1928], Cass [1965], Koopmans [1965], avec les articles fondateurs de Keeler, Spence et Zeckhauser [1971], Forster [1973], Mäler [1974], Gruver [1976], Brock [1977], Becker [1982], Heal [1982] et plus récemment, de Van der Ploeg et Withagen [1991]. La seconde section de ce chapitre est consacrée à l'exposé de ces références. L'accent sera plus particulièrement mis sur la manière dont ces travaux introduisent la dimension environnementale dans la modélisation[1] et sur l'impact de l'approche retenue sur le comportement de l'économie

[1]Intégrer l'environnement dans les modèles de croissance soulève en fait un grand nombre d'interrogations parmi lesquelles : la pollution peut-elle être envisagée comme un produit joint ou comme un produit fatal de la production ? provient-elle plutôt de la consommation ? Cette variable agit-elle en tant que flux ou bien en tant que stock ? Lorsqu'on modélise un stock, quelle est sa dynamique d'accumulation ? Les externalités qui en découlent affectent-elles la production, les préférences ou les

polluante. Le premier enseignement que l'on peut tirer de ces études réside dans le fait qu'intégrer des préoccupations environnementales dans le modèle de croissance optimale conduit à l'émergence d'états de long terme caractérisés par des niveaux de consommation et de capital inférieurs à ceux de la règle d'or modifiée. Le second repose sur la nécessité d'une intervention des pouvoirs publics destinée à internaliser les externalités environnementales qui opèrent au niveau de l'économie décentralisée. Dans ces modèles, l'intégration de l'environnement se traduit donc par un effet de niveau mais n'affecte pas la croissance de long terme de l'économie puisque le taux de croissance est déterminé de manière exogène par la croissance des facteurs non reproductibles comme le travail (il est également possible d'introduire du progrès technique exogène). Cette propriété du modèle de croissance néoclassique constitue une limite majeure de cette approche lorsqu'on cherche à appréhender le problème de la compatibilité des objectifs de croissance économique et de préservation de la qualité de l'environnement et, plus largement, du développement durable.

Ce constat justifie de recourir aux instruments fournis par la théorie de la croissance endogène (Romer [1986], [1989], [1990], Lucas [1988], Barro [1990], Rebelo [1991], Grossman et Helpman [1991] et Aghion et Howitt [1992]). Ainsi, les années 1990 ont correspondu à l'avènement d'une littérature environnementale employant les modèles de croissance endogène sous l'impulsion notamment de Gradus et Smulders [1993], Bovenberg et Smulders [1995], Michel et Rotillon [1995], Musu et Lines [1995] et Withagen [1995]. La revue de ces travaux constitue le coeur de la troisième section. Ces auteurs se posent la question de savoir si une croissance soutenue et respectueuse de l'environnement est possible. Autrement dit, le principe est de déterminer les conditions sous lesquelles la poursuite simultanée des deux objectifs, *a priori* contradictoires, que sont la croissance et la protection de l'environnement, est réalisable. D'après ces travaux, il apparaît que la croissance ne s'accompagne pas nécessairement d'une dégradation de l'environnement à condition que l'économie s'engage dans des activités de dépollution ou dans la recherche de technologie moins polluantes. Ces études délivrent donc un message plutôt optimiste, quant à la relation entre croissance et environnement, qui rompt avec la vision initiale selon laquelle la détérioration de l'environnement serait un frein inéluctable à la croissance. Une nouvelle fois, l'accent est mis sur le rôle de la politique environnementale comme un moyen de promouvoir ces activités et de garantir un développement durable.

Il est important de noter que la littérature précédemment citée, de par les outils théoriques qu'elle utilise, suppose que la durée de vie de l'agent économique coïncide avec la durée de vie de l'environnement. Par conséquent, elle se focalise nécessairement sur l'aspect intragénérationnel des questions environnementales et laisse de côté la di-

deux à la fois ? L'économie a-t-elle la possibilité de s'engager dans des activités de dépollution ?

mension intergénérationnelle. Or, ce choix constitue une autre source de débat quant à la modélisation pertinente. En effet, la plupart des problèmes environnementaux proviennent de l'incapacité des agents, à durée de vie finie, à mesurer les répercussions de leurs décisions sur le long terme. L'omniprésence de cette dimension intergénérationnelle justifie, selon Solow [1986], le recours au modèle à générations imbriquées (*à la* Allais [1947], Samuelson [1958], Diamond [1965] ou *à la* Blanchard et Fisher [1989]).

Les premières contributions à cette littérature ont essentiellement utilisé le modèle à générations imbriquées afin d'appréhender le problème de la gestion des ressources naturelles (Kemp et Long [1980], Howarth [1991], Mourmouras [1991], [1993]). Dans la quatrième section, notre intérêt se porte plutôt sur les travaux dont la problématique a trait au contrôle de la pollution (Howarth et Noorgard [1992], Michel [1993], John et Pecchenino [1994], John *et al.* [1995], Ono [2003] ou Jouvet, Michel et Rotillon [2005]). Le cadre d'analyse fourni par l'hypothèse de cycle de vie est complémentaire de celui postulant l'agent à durée de vie infinie. En particulier, il se révèle utile dans l'optique d'une discussion sur le rôle et les modalités de la politique environnementale. Les travaux constituant cette littérature offrent ainsi une revue détaillée (et une analyse comparative de l'efficacité) des différents instruments (de marché) de régulation de la pollution : taxes, droits de propriété sur l'environnement et permis négociables.

Au delà de cette discussion autour du cadre conceptuel le mieux adapté, une littérature plus récente se focalise sur l'analyse de la relation entre croissance et qualité de l'environnement lors des différentes phases du développement économique (sur la dynamique de transition). La finalité de ces travaux est d'expliquer, notamment à partir des outils fournis par la théorie de la croissance (John et Pecchenino [1994], Selden et Song [1995], Stokey [1998]), un fait stylisé décelé par plusieurs études empiriques. Au début des années 90, ces travaux économétriques (dont Grossman et Krueger [1993], [1995]) ont, en effet, détecté une relation en forme de U inversé liant la concentration de certains polluants au revenu par tête des pays. La section 5 se concentre sur les développements (dans les disciplines empiriques et surtout théoriques) réalisés autour de cette relation communément nommée courbe de Kuznets environnementale. Nous verrons que la notion d'irréversibilité des dommages environnementaux limite grandement la portée du concept de courbe de Kuznets environnementale. En outre, les critiques formulées à l'encontre de cette relation touchent indirectement la théorie de la croissance et, notamment, les travaux qui se sont évertués à expliquer son émergence.

Enfin, la dernière section est consacrée à la synthèse de la revue de littérature et conclut sur les perspectives de recherche qui ont déterminé les orientations de la thèse.

1.2 Modalités de l'introduction de la dimension environnementale : la croissance néoclassique

Dans cette section, notre volonté est de mettre l'accent sur les différentes manières d'intégrer l'environnement dans la modélisation et sur les conséquences du choix de modélisation sur les résultats. Dans cette optique, nous nous servons du support fourni par la littérature analysant la relation entre croissance et environnement à partir du modèle de croissance néoclassique. Nous séparons les études sur la base de la manière dont elles introduisent la pollution. L'origine des émissions peut être imputée à la production avec la distinction entre produit fatal (point 1.2.1) et produit joint (point 1.2.2) de la production ou à la consommation (point 1.2.3).

1.2.1 La pollution : un produit fatal de la production

Un modèle avec polluant flux

L'étude de Van der Ploeg et Withagen [1991] offre une revue quasi exhaustive des extensions relatives à l'introduction de la dimension environnementale dans le modèle de Ramsey [1928], Cass [1965], Koopmans [1965]. Dans leur modèle, il existe un unique secteur de production dans lequel est produit un bien homogène $Y(t)$ destiné à la consommation $C(t)$ et à l'investissement des ménages. Les firmes utilisent une technologie à rendements constants dans le capital $K(t)$ et le travail $L(t)$ (la taille de la population est normalisée à 1). En termes intensifs, la fonction de production est croissante concave dans le capital : $Y(t) = F(K(t))$ avec $F_K > 0$ et $F_{KK} < 0$. La production génère un flux d'émission $E(t) = \alpha Y(t)$ avec $\alpha \in (0, 1)$ le ratio émissions/output. Les émissions polluantes $E(t)$ constituent un produit fatal du processus de production. Elles sont perçues comme un "mal" public affectant le bien-être des agents. La fonction d'utilité $U(C(t), E(t))$ est concave, croissante dans la consommation ($U_C > 0$, $U_{CC} < 0$ et $\lim_{C \to 0} U(C, E) = +\infty$) et décroissante dans le flux de pollution ($U_E < 0$, $U_{EE} < 0$). La contrainte de ressource de l'économie s'écrit : $\dot{K}(t) = F(K(t)) - C(t) - \delta K(t)$ où $\delta < 1$ représente le taux de dépréciation du capital. Dans ce contexte, le problème du planificateur social consiste à choisir l'allocation des ressources entre consommation et investissement de manière à maximiser la somme actualisée des utilités instantanées[2] sous la contrainte de ressources de l'économie. Formellement, le programme d'optimi-

[2] Cette fonction de bien-être social correspond au critère utilitariste escompté (voir Schubert et Zagamé [1998] pour une analyse détaillée des différents critères existants). C'est le critère retenu dans l'ensemble des travaux que nous exposons à quelques exceptions près que nous préciserons. De même, par souci de clarté, nous avons procédé à une homogénéisation des notations et nous signalerons, le cas échéant, l'introduction de nouvelles variables.

sation s'écrit :

$$\max_{\{C(t)\}_{t=0}^{\infty}} \int_0^{\infty} U(C(t), E(t)) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{K}(t) = F(K(t)) - C(t) - \delta K(t) \\ E(t) = \alpha F(K(t)) \\ K(0) = K_0 \text{ donné} \end{cases}$$

avec $\rho \in (0,1)$ le taux d'escompte social.

La résolution de ce problème, sous l'hypothèse de la séparabilité de la fonction d'utilité ($U_{CE} = 0$), permet d'obtenir le système dynamique dans le plan (K, C) qui se compose de la règle de Keynes-Ramsey,

$$\dot{C} = \left(F_K \left(1 + \alpha \frac{U_E}{U_C} \right) - \delta - \rho \right) \sigma(C) C \tag{1.1}$$

où $\sigma(C) = -\frac{U_C}{CU_{CC}} > 0$ est l'élasticité intertemporelle de substitution de la consommation, et de l'équation d'accumulation du capital.

Un état stationnaire est solution du système suivant :

$$U_C = -\frac{\alpha F_K U_E}{F_K - \delta - \rho} \tag{1.2}$$

$$C = F(K) - \delta K \tag{1.3}$$

L'équation (1.2) traduit simplement l'égalisation du bénéfice marginal d'un accroissement de la consommation à son coût marginal (terme de droite). Ce dernier est mesuré par le dommage causé par une hausse des émissions consécutive à une hausse de la production destinée à répondre à l'augmentation de la consommation. Cette condition définit une relation décroissante entre capital et consommation, $C = h(K)$ avec $h'(K) < 0$, qui coupe l'axe des abscisse lorsque $F_K = \delta + \rho$. L'équation (1.3) définit une seconde relation d'équilibre, $C = g(K)$ croissante. Sous ces conditions, il est possible de conclure à l'existence d'une unique solution stationnaire ayant les propriétés du point selle.

La comparaison de cette solution avec l'état stationnaire du modèle de Ramsey [1928] révèle immédiatement que la prise en compte des préoccupations environnementales conduit l'économie vers des niveaux stationnaires de consommation, de capital et de production inférieurs à ceux de la règle d'or modifiée[3]. Ce résultat provient de

[3]Dans le modèle de Ramsey (avec actualisation), le système dynamique est la donnée des équations suivantes

$$\dot{C} = (F_K - \delta - \rho)\sigma(C)C$$

$$\dot{K} = F(K) - C - \delta K$$

et, l'état stationnaire est solution du système composé de l'équation $F_K = \rho + \delta$ et de la condition (1.3).

l'effet négatif qu'exerce la pollution sur le rendement du capital. A l'optimum social, la prise en compte de l'externalité de pollution réduit l'incitation à investir puisque l'accumulation du capital s'accompagne d'un accroissement du dommage causé par la pollution.

Van der Ploeg et Withagen [1991] s'intéressent ensuite au problème de l'économie décentralisée. Les agents privés, firmes et ménages, n'intègrent pas les effets de leurs décisions sur l'environnement et prennent la pollution comme donnée. Le problème de l'agent représentatif consiste simplement à maximiser la somme actualisée des utilités instantanées sous sa contrainte de ressources :

$$\max_{\{C(t)\}} \int_0^{+\infty} U(C(t), E(t)) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{K}(t) = r(t)K(t) - C(t) \\ K(0) = K_0 \text{ donné} \end{cases}$$

avec $r(t)$ le taux d'intérêt.

Ce programme est associé à la règle de Keynes-Ramsey : $\dot{C}(t) = (r(t) - \rho)\sigma(C(t))C(t)$. Les firmes choisissent le niveau de capital $K(t)$ qui maximise leurs profits $\pi(t) = F(K(t)) - r(t)K(t) - \delta K(t)$ étant donné le prix du capital et, on obtient la condition usuelle d'égalisation du prix du facteur à sa productivité marginale : $r(t) = F_K - \delta$. La dynamique de l'économie concurrentielle s'écrit finalement :

$$\dot{C} = (F_K - \delta - \rho)\sigma(C)C \tag{1.4}$$
$$\dot{K} = F(K) - C - \delta K$$

Ce système permet de définir une solution stationnaire identique à celle de la règle d'or modifiée. Ainsi, puisque les agents ignorent les dommages occasionnés par la pollution, l'état stationnaire se caractérise par des niveaux de capital, de consommation mais aussi, de pollution trop élevés relativement à ceux de l'optimum social.

Afin de rétablir l'optimalité de la solution décentralisée, les auteurs proposent d'introduire un système fiscal composé d'une taxe $\tau(t)$ sur les émissions polluantes et d'un transfert forfaitaires aux firmes $T(t)$. Le problème des firmes devient $\max_{K(t)} \pi_\tau(t) = F(K(t)) - r(t)K(t) - \delta K(t) - \tau(t)\alpha F(K(t)) + T(t)$. Et, on obtient à l'équilibre une nouvelle dynamique économique influencée par la taxe : $\dot{C}(t) = (F'(K(t))(1 - \alpha\tau(t)) - \delta - \rho)\sigma(C(t))C(t)$. Il suffit alors, pour internaliser le dommage causé par la pollution, de fixer la taxe pigouvienne au niveau $\tau = -U_E/U_C$. Cette taxe, qui s'établit au niveau du coût social de la pollution, mesuré par le ratio de la désutilité marginale de la pollution sur l'utilité marginale de la consommation, garantit l'optimalité de l'équilibre décentralisé.

Nous présentons ensuite plusieurs références qui introduisent un instrument de "lutte" contre la pollution : les activités de dépollution.

Le contrôle de la pollution

La régulation des émissions : Forster [1973] introduit la possibilité, pour l'économie, de consacrer une fraction de ses ressources à des dépenses de dépollution $D(t)$ permettant de réduire le flux net de pollution $E(t)$. Les émissions polluantes, produit fatal de la production, sont définies par : $E(t) = E(Y(t)), D(t))$ avec $E_Y > 0$ et $E_D < 0$ et $\lim_{D \to 0} E_D = -\infty$. Cette condition limite permet d'exclure l'étude de la solution de coin $D = 0$. Le reste de la modélisation est similaire au cadre d'analyse retenu par Van der Ploeg et Withagen [1991], exception faite de la contrainte de ressources de l'économie qui devient : $\dot{K}(t) = F(K(t)) - C(t) - D(t) - \delta K(t)$. Dans ce contexte, il est important de noter que l'accumulation de capital n'agit plus de manière unilatérale sur le niveau d'émission. En effet, si elle a tendance à stimuler la production, ce qui tend à accroître les émissions, elle implique également que l'économie dispose de relativement plus de ressources à allouer à l'activité de dépollution.

L'analyse de la solution centralisée fait apparaître un nouvel arbitrage entre consommation, investissement et dépense de dépollution. Cet arbitrage n'existe pas à l'équilibre concurrentiel dans la mesure où les agents privés n'ont aucune incitation à dépolluer. Par conséquent, l'auteur confirme le résultat de supériorité des niveaux de consommation, de capital et d'émission relativement à leurs équivalents à l'optimum social.

Agir sur un polluant stock : Keeler, Spence et Zeckhauser [1971] sont historiquement les premiers à s'intéresser à un problème de croissance optimale avec pollution. A la différence des études précédentes, les auteurs considèrent le dommage causé par un polluant stock $P(t)$ qui s'accumule au gré des émissions polluantes et, dont une partie est assimilée, à chaque instant, par la nature : $\dot{P}(t) = E(t) - \mu P(t)$. La variable $\mu \in]0, 1[$ représente le taux naturel d'absorption de la pollution et les émissions s'expriment toujours comme une fraction de la production (ici $\alpha = 1$) : $E(t) = Y(t)$. La pollution est, au même titre que la consommation, un argument de la fonction d'utilité des agents $U(C(t), P(t))$ (avec $U_c > 0$, $U_P < 0$, U_{cc}, $U_{PP} < 0$ et $U_{cP} < 0$). L'évolution de la pollution peut être maîtrisée en consacrant une partie des ressources à des dépenses de dépollution $D(t)$. Les rendements dans les dépenses de dépollution sont supposés constants et la dynamique d'accumulation de la pollution est donnée par : $\dot{P}(t) = F(K(t)) - \gamma D(t) - \mu P(t)$ avec $\gamma \in]0, 1]$ un paramètre d'efficacité de l'activité de dépollution. D'après cette formulation, la dépollution peut s'interpréter comme un moyen de réduire les émissions (les émissions nettes s'établissent alors au niveau $E(t) = F(K(t)) - \gamma D(t))$ ou bien comme un moyen d'améliorer la qualité de l'environnement.

A partir de l'analyse des conditions nécessaires d'optimalité, les auteurs identifient l'existence de deux régimes distincts selon que l'activité de dépollution est opérante

$(D > 0)$ ou pas $(D = 0)$. De plus, il apparaît que la solution associée à une dépollution nulle (le *Murky Golden Age Equilibrium*) se caractérise par des niveaux de production, de consommation, de capital mais aussi, de pollution supérieurs à ceux de la solution intérieure (le *Golden Age Equilibrium*). Les auteurs ne discutent pas, en toute généralité, des conditions sous lesquelles l'économie, à partir d'une situation initiale (K_0, P_0) quelconque, va converger vers l'une ou l'autre de ces solutions de long terme.

Van der Ploeg et Withagen [1991] envisagent également la possibilité de limiter l'accumulation d'un stock de pollution grâce à des dépenses de dépollution. Toutefois, contrairement à l'étude précédente, ils supposent que cette activité agit directement sur le stock par le biais de son influence sur la capacité de régénération de l'environnement. Autrement dit, ils considèrent la dynamique d'évolution de la pollution suivante : $\dot{P}(t) = \alpha F(K(t)) - \mu(D(t))P(t)$ avec $\mu'(D(t)) > 0$. L'étude de ce modèle conduit à des conclusions qualitativement identiques à celles du modèle avec polluant flux.

Interaction entre pollution et ressource naturelle

Les travaux plus récents d'Ayong le Kama [2001] et Wirl [2003] présentent l'intérêt de proposer des modèles de croissance optimale dans lesquels les émissions polluantes ne sont pas dommageables en tant que telles mais, affectent plutôt l'utilité des agents en raison de la dégradation qu'elles causent à une ressource naturelle $Z(t)$.

Ayong le Kama [2001] cherche d'abord à déterminer, dans un modèle de croissance avec ressource renouvelable et pollution, les conditions d'existence et de stabilité de l'état stationnaire. Dans cet article, l'auteur recourt à la dynamique suivante pour la ressource : $\dot{Z}(t) = N(Z(t)) - E(t))$. Où $Z(t)$ suit une loi de croissance $N()$ ayant les propriétés de la loi logistique (à savoir, croissante puis décroissante et concave) et, est affectée par le flux de pollution résultant de la production du bien final $E(t) = \alpha F(K(t), Z(t))$. L'introduction de $Z(t)$ dans la fonction de production représente un externalité environnementale positive traduisant l'idée que le bien environnemental améliore les possibilités de production. L'utilité instantanée $U(C(t), Z(t))$ est croissante, concave dans ses deux arguments que sont la consommation et l'environnement. L'accumulation du capital est donnée par : $\dot{K}(t) = F(K(t), Z(t)) - C(t)$. Dans ce cadre, il apparaît que l'état stationnaire est un point selle si le niveau de ressource à long terme est tel que sa loi de croissance est sur sa phase décroissante $N_Z \leq 0$ ou bien sur sa phase croissante mais, dans ce cas, il faut que la dérivée de cette fonction soit relativement importante et supérieure au taux d'escompte social $N_Z > \rho$. Ce résultat souligne le rôle du taux d'escompte sur la propriété de stabilité de l'équilibre. Dès lors, l'auteur s'intéresse au problème non actualisé en suivant l'approche de Ramsey [1928] et en prenant comme point de référence (*bliss point*) le niveau d'utilité de la règle d'or "verte" définie par Beltratti, Chichilniski et Heal [1995][4][5]. Dans ce contexte, l'unique état stationnaire est nécessairement stable.

Wirl [2003] reprend le modèle d'Ayong le Kama [2001] avec critère utilitariste escompté afin de compléter l'analyse des propriétés de l'état stationnaire en insistant sur deux résultats passés sous silence, à savoir, la possibilité d'émergence d'équilibres multiples et de cycles limites.

Nous nous focalisons à présent sur une seconde catégorie d'études qui intègre la pollution comme un produit joint de la production.

1.2.2 La pollution : un produit joint de la production

Les émissions, un input nécessaire à la production

Brock [1977] propose un modèle où la production du bien final emploie une technologie à deux facteurs de production, le capital et les émissions : $Y(t) = F(K(t), E(t))$ avec $F_E > 0$, $F_{EE} < 0$, $F_{KE} > 0$ et $F(K(t), 0) = 0$. Les émissions polluantes constituent donc un input nécessaire à la production[6]. L'objectif de ce travail est de rendre compte d'un phénomène ignoré par les études précédentes, à savoir, la possibilité de substitution entre les émissions polluantes et les autres facteurs de production. Les émissions contribuent à l'accumulation d'un stock de polluant selon l'équation suivante : $\dot{P}(t) = E(t) - \mu P(t)$. Elles deviennent finalement une variable de décision pour le planificateur dont l'objectif s'écrit

$$\max_{\{C(t),E(t)\}_{t=0}^{\infty}} \int_0^{\infty} U(C(t), P(t)) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{K}(t) = F(K(t), E(t)) - C(t) \\ \dot{P}(t) = E(t) - \mu P(t) \\ K(0), P(0) \text{ donnés} \end{cases}$$

[4]Dans l'esprit de Michel [1990], l'auteur justifie l'analyse de ce cas par le fait qu'il n'y a pas d'argument véritable en faveur de l'actualisation d'un problème d'optimisation intertemporel puisque cela revient à considérer une dictature du présent. Le critère non escompté reflète au contraire la notion d'équité intergénérationnelle.

[5]La règle d'or "verte" correspond à l'allocation des ressources fournissant le niveau maximum d'utilité indéfiniment soutenable. Formellement, ce niveau est calculé par la maximisation de l'utilité sous la double contrainte d'un niveau de capital et d'un stock d'environnement stationnaires :

$$\max_{C,K,Z} U(C, Z)$$

$$s.c \begin{cases} \dot{K} = 0 \\ \dot{Z} = 0 \end{cases}$$

[6]L'exemple classique est la consommation de ressources énergétiques conduisant à l'émission de gaz à effet de serre.

Les propriétés de l'équilibre sont déterminées par deux conditions sur la technologie et les préférences. L'existence d'un état stationnaire requiert d'imposer une borne inférieure à la productivité marginale du capital, évaluée dans un voisinage de 0, exactement égale au taux d'escompte : $\lim_{K \to 0} F_K(K, E) > \rho \; \forall E$. L'unicité (et la stabilité) de cette solution repose sur l'effet de la pollution sur l'utilité marginale de la consommation U_{CP}. La condition $U_{CP} \leq 0$[7] garantit l'unicité et la stabilité de l'équilibre. Par contre, si l'inégalité est renversée, soit $U_{CP} > 0$, alors il est possible d'obtenir des équilibres multiples et des cycles limites.

En l'absence de régulation de la pollution, le respect des conditions d'Inada pour l'input émission supposerait le choix, par les firmes, d'un niveau de pollution infini puisque $\lim_{E \to +\infty} F_E = 0$. Une manière de contourner ce cas extrême, afin de pouvoir étudier l'équilibre concurrentiel, consiste à remplacer cette condition par l'hypothèse suivante $\forall K \geq 0$, $\exists \hat{E} < +\infty$ tel que $\lim_{E \to \hat{E}} F_E = 0$. Sous cette hypothèse, on s'assure du fait que, pour tout niveau de capital, il existe un niveau fini d'émission $\hat{E} = \hat{E}(K)$ au delà duquel accroître encore les émissions n'est pas profitable aux firmes.

A l'équilibre comme à l'optimum, les niveaux stationnaires de capital et de consommation sont déterminés respectivement par les deux équations suivantes : $F_K(K, E) = \rho$ et $F(K, E) = C$. Or, il est possible de montrer que si les firmes exploitent les émissions jusqu'à la borne supérieure $\hat{E}$, l'internalisation de l'externalité de pollution conduit le planificateur à choisir un niveau d'émission inférieur à $\hat{E}$. Sachant que $F_{KE} > 0$ et $F_E > 0$, une implication immédiate de cette décision réside dans le fait que les niveaux de consommation, de capital et de pollution, à l'optimum, sont en deçà des niveaux d'équilibre. Ce modèle aboutit donc à un résultat similaire à celui qui émerge des analyses qui introduisent la pollution comme un produit fatal de la production.

Les émissions dégradent l'environnement

Tahvonen et Kuuluvainen [1993] développent une extension du modèle de Brock [1977] consistant à lier le problème du contrôle de la pollution à celui de la gestion d'une ressource naturelle. Pour ce faire, ils considèrent une ressource renouvelable $Z(t)$ dont une partie $H(t)$ est extraite et utilisée comme input dans la production. Cette ressource possède sa propre loi de croissance affectée par le polluant stock : $\dot{Z}(t) = N(Z(t), P(t)) - H(t)$ avec $N()$ croissante concave en $Z(t)$, décroissante concave en $P(t)$ et $N_{ZP} < 0$. La fonction de production s'écrit à présent $Y(t) = F(K(t), E(t), H(t))$. Les préférences sont inchangées et ne dépendent pas de la ressource naturelle.

[7] Michel et Rotillon [1995] traduisent cette inégalité par un effet de dégoût exercé par la pollution sur la consommation. L'hypothèse alternative $U_{CP} > 0$ revient à supposer l'existence d'un effet de compensation : les agents compensent une hausse de la pollution par une hausse de la consommation afin de maintenir un niveau d'utilité constant. Nous reviendrons en détail sur leur modèle dans la section consacrée à la croissance endogène.

Dans ce contexte, l'étude de la solution centralisée révèle le rôle central (renforcé) joué par le taux d'escompte social ρ. Les conditions $\lim_{K\to 0} F_K(K,E,H) > \rho\ \forall E$, $\forall H$ et $\lim_{Z\to 0} N_Z(Z,P) > \rho\ \forall P$ garantissent l'existence d'un état stationnaire. En outre, l'unicité de l'état stationnaire exige que le taux d'escompte soit suffisamment bas et ce, indépendamment des conditions sur la dérivée croisée U_{CP}. Autrement dit, le poids accordé au futur dans l'objectif social doit être important afin de garantir l'existence d'une trajectoire de convergence vers la solution de long terme.

Les auteurs s'intéressent ensuite au comportement de l'économie décentralisée soumise à un système de taxe. En présence d'externalités[8], l'équilibre concurrentiel est inefficace et se caractérise par un niveau trop élevé de pollution et une sur-exploitation de la ressource. Afin de remédier à ces insuffisances, ils proposent un système combinant une taxe $\tau(t)$ sur les émissions polluantes $E(t)$ et une taxe $q(t)$ sur l'extraction de la ressource $H(t)$. La recette procurée par ces taxes est reversée sous forme d'un transfert forfaitaire $T(t)$ aux consommateurs. Le problème de l'agent représentatif (qui prend la pollution comme une donnée),

$$\max_{\{C(t)\}} \int_0^{+\infty} U(C(t)), P(t)) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c\ \dot{K}(t) = r(t)K(t) - C(t) + T(t)$$

est associé à deux conditions du premier ordre $U'(C(t)) = \varepsilon(t)$ et $\dot{\varepsilon}(t) = (\rho - r(t))\varepsilon(t)$ avec $\varepsilon(t)$ la variable adjointe du capital[9]. La maximisation des profits,

$$\max_{K(t),E(t),H(t)} \pi(t) = F(K(t), E(t), H(t)) - r(t)K(t) - \tau(t)E(t) - q(t)H(t)$$

donne les trois conditions suivantes : $r(t) = F_K$, $\tau(t) = F_E$ et $q(t) = F_H$.

Les auteurs montrent qu'il est possible de décentraliser l'optimum en fixant les taxes sur les émissions et le prélèvement de la ressource aux niveaux suivants : $\tau(t) = -\psi(t)/\lambda(t)$ et $q(t) = \varphi(t)/\lambda(t)$ avec $\lambda(t) > 0$, $\psi(t) < 0$ et $\varphi(t) > 0$ les prix fictifs associés respectivement au capital, au stock de pollution et à la ressource à l'optimum social[10]. Les firmes supportent ainsi le véritable coût associé à leur activité productive.

[8]Il existe deux types d'externalités. La première est relative au dommage causé par la pollution sur le bien-être des agents. La seconde a trait à l'exploitation de la ressource naturelle commune.

[9]La manipulation de ces deux conditions donne évidemment la règle de Keynes-Ramsey.

[10]Le problème du planificateur est associé à six conditions d'optimalité :

$$\begin{cases} U_C = \lambda \\ \dot{\lambda} = (\rho - F_K)\lambda \\ \lambda F_E + \psi = 0 \\ \lambda F_H - \varphi = 0 \\ \dot{\psi} = (\rho - \mu)\psi + G_P\varphi \\ \dot{\varphi} = (\rho + G_Z)\varphi \end{cases}$$

En procédant de la sorte, on internalise le dommage occasionné par la pollution et on assure une gestion optimale de la ressource.

L'ensemble des travaux exposés présentent une caractéristique commune qui consiste à imputer à la sphère productive la responsabilité des émissions polluantes. Parallèlement à cette vision, d'autres études, minoritaires, considèrent plutôt que les émissions polluantes ont pour origine la consommation des ménages. Notons qu'il est rare de modéliser les émissions polluantes comme une fonction de la consommation. Or, cette approche semble plutôt pertinente si l'on se réfère à l'exemple des émissions de CO_2, dont on sait qu'une part non négligeable provient de la consommation d'énergie des agents privés (moyens de transport, chauffage). De même, aucune étude, à notre connaissance, ne traite simultanément des deux sources de pollution, à savoir, la consommation et la production.

1.2.3 La pollution provient de la consommation

Beltratti [1995a], étudie, à la manière de Mäler [1974] ou de Heal [1982], la croissance d'une économie polluante dans laquelle la consommation des ménages est la source des émissions polluantes : $E(t) = C(t)$. Les émissions favorisent l'accumulation d'un stock de polluant. L'économie a la possibilité d'agir sur la pollution en allouant une partie de ses ressources à la dépollution. L'évolution du stock est donc donnée, à chaque instant, par l'équation dynamique suivante : $\dot{P}(t) = C(t) - \mu(P(t), D(t))$ où $\mu()$ représente la fonction d'assimilation de la pollution croissante et concave dans chacun des ses arguments. Le reste de la modélisation est conforme aux études précédentes. En particulier, les préférences portent sur la consommation et la pollution et sont représentée par une fonction d'utilité $U(C(t)), P(t))$ aux propriétés classiques.

L'étude de la solution centralisée révèle que le niveau de capital (et la production) stationnaire s'établit au niveau de la règle d'or modifiée défini par : $F_K = \delta + \rho$. Ce résultat souligne l'originalité de ce cadre d'analyse qui dissocie les processus d'accumulation du capital et de la pollution : il n'y a aucune raison de pénaliser l'accumulation du capital car l'utilisation de celui-ci n'est plus directement responsable des émissions polluantes. Par contre, la consommation stationnaire est affectée par l'introduction des préoccupations environnementales puisqu'il existe à présent un arbitrage explicite entre consommation et pollution (décrit par la condition d'optimalité $(\rho + \mu_P)U_C = -(1 + \mu_D)U_P$) et qu'une partie des ressources est allouée aux dépenses de dépollution ($F(K) - \delta K = C + D$). En outre, il apparaît que l'écart entre le niveau de consommation optimal et celui de la règle d'or est d'autant plus grand que les pré-

Le principe consiste donc à fixer les taxes de telle sorte que ces conditions d'optimalité soient vérifiées à l'équilibre concurrentiel.

férences pour l'environnement sont importantes et que la "productivité" de l'activité de dépollution est forte.

1.2.4 Résumé

Les travaux présentés, dans cette section, donne un premier aperçu de l'impact de l'introduction de l'environnement dans les modèles de croissance. Celle-ci se traduit généralement par un effet de niveau selon lequel l'économie polluante converge vers un état stationnaire caractérisé par une moindre accumulation de capital (excepté Beltratti [1995a]) et une baisse de la consommation relativement au cadre de référence de la règle d'or modifiée. Ce résultat s'explique par les pressions exercées par la sphère environnementale sur la sphère économique et, plus particulièrement, sur l'incitation à investir. Nous avons fait l'exposé de modèles volontairement simplifiés en ignorant notamment la croissance de la population ou le progrès technique. Stokey [1998] introduit, par exemple, un progrès technique exogène permettant une croissance continue de la production : $Y(t) = \exp^{gt} F(K(t))$ avec $g > 0$. Notre choix s'explique par le fait que ce type d'approche ne modifie en rien le résultat général car le taux de croissance est déterminé de manière exogène et reste indépendant des paramètres environnementaux.

Dès lors, lorsque l'on s'intéresse à la question de la compatibilité entre les objectifs de croissance économique et de préservation de l'environnement et, à la problématique du développement durable, il est préférable de recourir aux outils offerts par la théorie de la croissance endogène.

1.3 Préoccupations environnementales et perspectives de croissance d'une économie polluante : la croissance endogène

La théorie de la croissance endogène regroupe plusieurs formalisations qui ont toutes en commun d'employer des technologies à rendements d'échelle constants dans les facteurs accumulables (capital physique, capital humain). Ces modélisations présentent une grande diversité et une grande richesse. Les rendements constants au niveau social proviennent d'externalités positives dans la production : effet d'apprentissage (Romer [1986]), effet des dépenses publiques (Barro [1990]). Les rendements peuvent être également constants au niveau privé et la croissance passe alors par l'accumulation de capital humain (Lucas [1988]). La croissance peut aussi résulter d'innovations technologiques se traduisant par une hausse de la variété des biens intermédiaires de production (Romer [1990]) ou de consommation (Grossman et Helpman [1991]).

Nous présentons d'abord, à partir du modèle de croissance endogène le plus rudimentaire, un résultat pessimiste quant à la compatibilité des objectifs de croissance et de préservation de l'environnement. Nous détaillons ensuite les solutions proposées afin de dépasser la limite à la croissance qu'induit la dégradation de l'environnement. La problématique du développement durable se situe en toile de fond de cette section. Nous délivrons également quelques réflexions concernant non seulement les moyens de réguler la pollution mais aussi, l'effet de la politique environnementale sur les conditions de la croissance économique. Nous concluons enfin cette section par une synthèse articulée autour d'une discussion sur la relation entre les notions de durabilité et d'équité intergénérationnelle.

La littérature liant environnement et croissance endogène présente une variété, au niveau des cadres d'analyse employés, pour le moins importante. Dans cette partie, nous faisons le choix de concentrer notre exposé sur les modèles exhibant un processus de croissance en volume plutôt que qualitative[11]. Ce positionnement se justifie par notre volonté d'illustrer l'interaction et les tensions existantes entre l'accumulation des deux stocks distincts que sont le capital physique et le capital naturel (pollution ou environnement).

1.3.1 La préservation de l'environnement : un obstacle à la croissance

Le problème posé

Withagen [1995] se pose la question de savoir quel est l'effet de la prise en compte de l'environnement (pollution) sur le comportement de l'économie dans une extension du modèle AK de Rebelo [1991]. La production du bien final est homogène de degré 1, au niveau social, dans le capital $K(t)$ (qui représente une mesure assez large de tous les facteurs reproductibles) : $Y(t) = AK(t)$. La croissance n'est pas intentionnelle puisque les rendements constants proviennent, par exemple, d'un effet d'apprentissage *à la* Romer [1986], qui est une externalité pour les agents économiques. L'auteur introduit une variable de pollution $P(t)$ qui s'accumule avec les émissions polluantes $E(t)$ directement liées au processus de production ($E(t) = BK(t)$ avec B une constante positive). Il émet l'hypothèse standard selon laquelle la nature assimile une fraction constante μ du stock de pollution à chaque période. La dynamique du stock s'écrit donc : $\dot{P}(t) = BK(t) - \mu P(t)$. Les préférences des ménages portent sur la consommation mais, les agents souffrent également de la pollution : $U(C(t), P(t)) = \ln C(t) - \frac{1}{2}P(t)^2$.

[11] voir notamment les contributions de Elbasha et Roe [1996], Aghion et Howitt [1998], Grimaud [1999] ou Grimaud et Ricci [2004] dans cette littérature.

Dans ce cadre d'analyse, l'optimum social est défini par :

$$\max_{\{C(t)\}_{t=0}^{\infty}} \int_0^{\infty} (\ln(C(t)) - \frac{1}{2}P(t)^2) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{K}(t) = (A-\delta)K(t) - C(t) \\ \dot{P}(t) = BK(t) - \mu P(t) \\ K(0), P(0) \text{ donnés} \end{cases}$$

Ce problème est associé à un système dynamique composé des équations d'accumulation du capital et de la pollution et des deux équations suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} &= (\rho + \delta - A)\lambda + B\eta \\ \dot{\eta} &= (\rho + \mu)\eta - P \end{aligned}$$

avec $\lambda(=1/C)$ et η les variables adjointes respectivement du capital et de la pollution.

Il est possible de montrer que ce système admet comme unique solution de long terme un état stationnaire stable au sens du point selle. Cette conclusion contraste clairement avec les propriétés du modèle de Rebelo [1991] dans lequel il existe un sentier de croissance équilibrée où toutes les variables croissent au même taux constant : $g = \dot{C}/C = \dot{K}/K = \dot{Y}/Y = A - \delta - \rho$. Le fait que l'économie connaisse un taux de croissance asymptotiquement nul s'explique par l'existence d'une externalité de pollution. Dans ce modèle, il n'existe pas de "contre-poids" à la pollution, l'accumulation de capital se traduit par une hausse continue du stock de pollution donc du dommage subi par les ménages. En retour, cela tend à décourager l'investissement car le ralentissement de la croissance est le seul moyen de juguler ce dommage. L'externalité de pollution exerce donc un effet négatif sur le rendement du capital qui provoque une diminution de l'incitation à investir jusqu'à l'état stationnaire où elle s'annule.

Ainsi, l'introduction de l'environnement ne se traduit pas seulement par un effet de niveau mais, implique au contraire que la croissance équilibrée n'est plus la règle.

Contraste entre optimum et équilibre concurrentiel

Michel et Rotillon [1995] fournissent une généralisation de l'étude précédente consistant d'abord à considérer, dans la version centralisée, une fonction d'utilité non séparable $U(C(t), P(t))$ croissante et concave dans la consommation, décroissante et concave dans la pollution[12]. Ce choix relève de la volonté d'analyser l'impact des préférences des agents sur les conditions de la croissance équilibrée. En fait, Il apparaît que l'analyse des propriétés de la solution optimale repose sur le signe de la dérivée croisée U_{CP}. Dès que la pollution est associée à un effet de dégoût ($U_{CP} \leq 0$), la dynamique converge

[12]Le reste de la modélisation est identique à celle retenue par Withagen [1995], exception faite du recours à l'hypothèse simplificatrice d'absence de dépréciation du capital.

vers un état stationnaire (point selle). Autrement dit, le poids de l'externalité de pollution (qui passe par les préférences) dépasse celui de l'externalité d'apprentissage (qui passe par la production) ce qui exclut la croissance de long terme. Ce résultat provient une nouvelle fois de l'effet négatif de l'externalité de pollution sur le rendement du capital et l'incitation à investir. Par contre, lorsque la pollution est associée à un effet de compensation ($U_{CP} > 0$), il est possible que l'économie converge, à l'optimum, vers un sentier de croissance équilibrée non durable puisqu'il implique une pollution indéfiniment croissante. L'hypothèse $U_{CP} > 0$ revient à supposer l'existence d'un effet de compensation : les agents compensent le désagrément causé par une hausse de la pollution en augmentant leur consommation (raisonnement à niveau d'utilité constant).

Les auteurs proposent ensuite une version décentralisée du modèle afin de comparer les propriétés de l'équilibre concurrentiel à celles de l'optimum social. La production est soumise à un effet d'apprentissage *à la* Arrow [1962] : la production d'une firme i s'écrit $Y_i(t) = F(K_i(t), X(t)L_i(t))$ ($F()$ homogène de degré 1) où $X(t)$ représente un stock de connaissance accumulé au cours du processus de production. A la manière de Romer [1989], les auteurs supposent $X(t) = a\sum_i K_i(t)$ avec $a > 0$. Au niveau agrégé, sachant que les firmes sont identiques, on retrouve donc une technologie à rendements constants dans le capital : $Y(t) = F(K(t), aK(t)L) = K(t)F(1, aL) = AK(t)$. Dans ce contexte, les agents privés sont confrontés à deux types d'externalités : une externalité positive d'apprentissage et une externalité négative de pollution. A l'équilibre concurrentiel, la dynamique est décrite par les équations suivantes : $q^d(t) = U_C(C(t), P(t))$ et $\dot{q}^d(t) = (\rho - r(t))q^d(t)$ avec $q^d(t)$[13] la variable adjointe du capital et $r(t)$ le taux d'intérêt. L'équilibre se caractérise, à long terme, par une croissance soutenue de la production, de la consommation, du capital et de la pollution. Les conditions d'optimalité de la solution centralisée s'écrivent : $q^o(t) = U_C(C(t), P(t))$, $\dot{q}^o(t) = (\rho - A)q^o(t) + B\lambda^o(t)$ et $\dot{\lambda}^o(t) = (\rho + \mu)\lambda^o(t) + U_P(C(t), P(t))$ où $q^o(t)$ et $\lambda^o(t)$ représentent respectivement les prix fictifs du capital et de la pollution.

L'équilibre concurrentiel et la solution optimale ayant des propriétés qualitatives très différentes (dans le cas $U_{CP} \leq 0$), Michel et Rotillon [1995] s'interrogent à propos du type d'intervention publique susceptible de restaurer l'optimalité de la solution décentralisée. Si l'on considère le cas sans pollution ($B = 0$, $U(C(t), P(t)) = U(C(t))$), alors la politique optimale est claire, il faut subventionner le rendement de l'investissement au taux $s(t)$ (à partir d'une taxe forfaitaire $\theta(t)$ sur le revenu) de manière à internaliser l'effet d'apprentissage en incitant les agents à investir davantage. La contrainte de ressources des agents devient $\dot{K}(t) = (1 + s(t))r(t)K(t) - C(t) - \theta(t)$ et on obtient $\dot{q}^d(t) = (\rho - (1 + s(t))r(t))q^d(t)$. Le niveau optimal de la subvention[14] s'élève

[13] L'indice "d" vaut pour la solution décentralisée tandis que l'indice "o" vaudra pour l'optimum.

[14] celui qui vérifie que la dynamique du prix fictif du capital, à l'équilibre, s'identifie à son équivalent à l'optimum.

alors à $s(t) = (A - r(t))/r(t)$.

Par contre, dès qu'on tient compte du dommage créé par l'accumulation de capital, la subvention optimale devient $s(t) = (A - r(t))/r(t) - B\lambda^o(t)/r(t)q^o(t)$. Autrement dit, le niveau de subvention est réduit du fait de la prise en compte de l'externalité de pollution. Les auteurs montrent qu'à long terme, la subvention correspond en réalité à une taxe. Il convient de décourager l'investissement pour atteindre les niveaux stationnaires de capital et de pollution tels qu'ils sont définis à la solution optimale.

En résumé, ces analyses offrent une vision négative de la relation entre croissance et environnement en désignant les limites qui s'imposent à la croissance d'une économie polluante. Toutefois, plusieurs pistes théoriques ont été avancées pour contourner cet obstacle à la croissance : l'engagement dans des activités de dépollution, la recherche dans des technologies moins polluantes ou encore le développement d'autres moteurs à la croissance. Ces différents points sont développés dans la section suivante.

1.3.2 Dépasser cette limite : la croissance durable

Le contrôle de la pollution par les activités de dépollution

Gradus et Smulders [1993] délivrent une extension du modèle AK avec polluant flux. Contrairement aux études précédentes, les auteurs supposent que les émissions polluantes $E(t)$, produit fatal de la production, peuvent être maîtrisées par des dépenses de dépollution $D(t)$: $E(t) = E(K(t), D(t))$[15]. Les préférences dépendent, de manière classique, de la consommation et de la pollution : $U(C(t), E(t))$. La solution centralisée est décrite par le programme d'optimisation suivant :

$$\max_{\{C(t),D(t)\}_{t=0}^{\infty}} \int_0^{\infty} U(C(t), E(t)) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{K}(t) = AK(t) - C(t) - D(t) \\ E(t) = E(K(t), D(t)) \\ K(0) \text{ donné} \end{cases}$$

La première partie de l'étude a trait aux conditions de l'optimalité et de la durabilité de la croissance équilibrée. La durabilité impose que la pollution soit non croissante le long du sentier de croissance équilibrée (SCE)[16]. Afin de satisfaire à cette exigence, les auteurs recourent à la spécification suivante de la fonction d'émission :

$$E(K(t), D(t)) = \left(\frac{K(t)}{D(t)}\right)^{\gamma} \tag{1.5}$$

[15]avec $E_K > 0$ et $E_D < 0$.

[16]Par la suite, lorsque nous emploierons le terme de croissance durable, c'est à cette définition que nous nous réfèrerons. Nous verrons, avec l'étude de Chevé et Schubert [2002], qu'il existe cependant d'autres définitions de la durabilité.

avec γ une constante positive.

La propriété d'homogénéité de degré 0 est un condition *ad hoc* suffisante pour la durabilité puisque, le long du SCE, capital et dépenses de dépollution croîtront au même taux constant impliquant, par là-même, un flux d'émission constant. L'optimalité de la croissance équilibrée requiert des conditions sur les préférences : l'élasticité intertemporelle de substitution et la préférence pour l'environnement doivent être constantes. Gradus et Smulders [1993] choisissent une fonction d'utilité satisfaisant ces restrictions : $U(C(t), E(t)) = \ln C(t) - \phi E(t)^{1+\psi}/(1+\psi)$ $(\psi > 0)$[17]

Dans ce cadre, une croissance soutenue et durable est réalisable. Toutefois, l'étude du SCE révèle que l'introduction des préoccupations environnementales s'accompagne inévitablement d'un ralentissement de la croissance de long terme. En effet, le long du SCE, le taux de croissance optimal, $g = A - \delta - \rho - D(t)/K(t)$, est réduit d'un montant $D(t)/K(t)$ constant par rapport au modèle AK standard. Ce terme supplémentaire traduit l'existence d'un effet d'éviction de l'investissement par les dépenses de dépollution. Cet effet joue de la manière suivante. L'accumulation de capital provoque une hausse de la pollution qui affecte les agents. Le rendement social du capital s'en trouve donc réduit, relativement au modèle de Rebelo [1991] (où il est constant et égal à A), en raison de la prise en compte du dommage causé par la pollution. Cela implique finalement une baisse de l'incitation à investir et de l'investissement au profit des dépenses de dépollution. De même, une hausse des préférences pour l'environnement (ϕ augmente) entraîne une diminution du taux de croissance car l'effet d'éviction est renforcé. L'économie doit consacrer une fraction plus grande de ses ressources à la dépollution, au détriment de la consommation et de l'investissement (le ratio $D(t)/K(t)$ augmente), afin de combattre le dommage occasionné par la pollution.

Le fait de s'engager dans une activité de dépollution restaure donc la possibilité d'une croissance équilibrée durable en offrant à l'économie un moyen de maîtriser les émissions polluantes inhérentes à l'utilisation du capital. Il n'en reste pas moins que l'introduction de la pollution affecte le comportement de l'économie, à long terme, puisque le taux de croissance est inférieur à celui du modèle de Rebelo [1991]. Withagen [1995], en employant le même type de formulation pour la fonction d'émission, généralise ce résultat dans son modèle avec polluant stock.

Den Butter et Hofkes [1995] développent un modèle intégrant tous les aspects économiques de l'environnement :

- la qualité de l'environnement comme indicateur de bien-être,
- les services environnementaux comme facteurs de production,
- les retombées positives de l'environnement sur la productivité des facteurs.

[17] Plus généralement, dans ce qui suit, nous constaterons que les travaux emploient des fonctions d'utilité présentant une aversion relative au risque constante (classe de fonctions CRRA).

La principale contribution, relativement aux références précédentes, réside donc dans la prise en compte de la dimension technologique de l'environnement : la pollution est dorénavant un produit joint de la production et il existe une externalité environnementale positive. La problématique poursuivie consiste à évaluer l'effet d'une hausse des préférences pour l'environnement sur la croissance de long terme de l'économie polluante. Pour ce faire, les auteurs supposent l'existence d'un bien environnemental $Z(t)$ dont la loi de croissance est affectée par le flux net de pollution : $\dot{Z}(t) = N(E(t), Z(t))$ avec $N_E < 0$. La pollution "brute" $e(t)$ est un produit joint de la production. Les dépenses de dépollution contribuent à la maîtrise de ce mal public. Le flux net de pollution s'élève finalement à : $E(t) = E(e(t), D(t))$ avec $E_e > 0$ et $E_D < 0$. La fonction de production est à rendements constants dans les inputs capital et pollution et bénéficie d'une externalité environnementale : $Y(t) = F(K(t), e(t), Z(t))$. Les propriétés de cette fonction révèle l'existence d'un "dilemme" technologique provenant du fait qu'un accroissement des émissions profite directement à la production ($F_e > 0$) mais engendre, par le biais de la dégradation de l'environnement ($N_E < 0$), une baisse de la productivité des facteurs (et de la production puisque $F_Z > 0$). L'utilité $U(c(t), Z(t))$ est croissante et concave dans la consommation et l'environnement.

Après avoir étudié les conditions d'optimalité et de durabilité du sentier de croissance équilibré, les auteurs parviennent, pour une spécification du modèle[18], à caractériser le taux de croissance de long terme. Ils montrent alors qu'une hausse de la préférence pour l'environnement se traduit généralement par une augmentation de la qualité de l'environnement et une réduction du taux de croissance. Toutefois, ils insistent sur le fait qu'il est possible, contrairement aux résultats de Gradus et Smulders [1993], d'observer une hausse du taux de croissance consécutive à un renforcement des préoccupations environnementales à condition que l'externalité de production soit suffisamment forte. Ainsi, la prise en compte de cette externalité environnementale se manifeste par la possibilité d'obtenir une situation de *win-win*, autrement dit, une hausse simultanée du taux de croissance et de la qualité de l'environnement suite à l'augmentation du poids accordé à ce bien dans les préférences. Nous signalons que la question de savoir s'il est pertinent ou pas de considérer cette externalité de production fait l'objet d'une controverse. En effet, s'il est vraisemblable de penser que cet effet joue grandement dans certains secteurs d'activité comme l'agriculture ou le tourisme, rien ne garantit qu'il soit pertinent de le faire figurer au niveau d'une fonction de production

[18] Ils recourent à la spécification suivante :

$$\begin{cases} Y = AK^{\alpha}e^{(1-\alpha)}Z^{\beta} \\ U(C,Z) = \ln(C) + \phi\ln(Z) \\ E(e,D) = \frac{e}{D} \\ N(Z,E) = -\gamma_1\frac{\sqrt{E}}{Z} - \gamma_2(Z-\bar{Z})^2 + \Gamma \end{cases}$$

agrégée.

Pour conclure cette partie, notons que la contribution de Michel et Rotillon [1995] se distingue des précédentes par la modélisation d'un secteur de dépollution à part entière. Les auteurs introduisent en fait une technologie de dépollution utilisant du capital $D(t) = D(K_2(t))$, $D'(K_2(t)) > 0$, où $K_2(t)$ représente la part du capital allouée aux activités de dépollution au détriment de l'investissement et de la consommation. La dynamique du modèle devient : $\dot{K}(t) = AK_1(t) - C(t)$ et $\dot{P}(t) = BK_1(t) - D(K_2(t)) - \mu P(t)$. En fait, seul le stock de capital agrégé $K(t) = K_1(t) + K_2(t)$ fait l'objet d'une accumulation ce qui implique que le capital peut être réalloué instantanément d'un secteur à l'autre. De plus, les auteurs spécifient la fonction de dépollution : par analogie avec la production du bien final, la dépollution est produite avec des rendements constants dans le capital $D(K_2(t)) = DK_2(t)$ avec $D > 0$. Dans ce contexte, leur résultat se rapproche de ceux des travaux exposés jusqu'alors : si la technologie de dépollution est suffisamment efficace, la solution optimale coïncide avec une croissance illimitée (et durable) et ce, quelque soit la fonction d'utilité considérée.

Dissocier les processus de croissance et de pollution : l'accumulation de connaissances

Gradus et Smulders [1993], après avoir mesuré les répercussions de l'introduction de la dimension environnementale dans le modèle AK, étendent leur analyse au cadre théorique fourni par le modèle de Lucas [1988]. Dans le modèle de Lucas [1988], la croissance est intentionnelle puisqu'elle nécessite d'allouer des ressources à la production de capital humain $h(t)$ dont l'accumulation constitue le moteur de la croissance. L'économie comporte alors deux secteurs de production. Le secteur du bien final emploie une technologie à rendements constants dans le capital physique et le travail efficace : $Y(t) = F(K(t), uh(t)L(t))$ avec $u \in (0, 1)$ la part du travail efficace allouée au secteur du bien final et $L(t)$ le facteur travail "classique". Le stock de connaissance (ou de capital humain), qui permet d'accroître l'efficacité du travail, est produit à partir d'une technologie utilisant seulement du capital humain $\dot{h}(t) = \epsilon(1 - u)h(t)$, l'idée étant que les agents consacrent une partie de leur temps au travail mais investissent aussi dans l'éducation et l'accumulation de connaissances.

La modélisation demeure, pour le reste, inchangée. En particulier, la fonction d'émission, identique à (1.5), est supposée homogène de degré 0 dans le ratio capital / dépollution. Le recours à ce cadre d'analyse n'est pas neutre puisqu'il implique que, si les émissions sont un produit fatal de la production, elles sont plus précisément la conséquence de l'utilisation de capital physique. Il existe donc une distinction majeure entre les facteurs de production basée sur les répercussions environnementales inhérentes à leur utilisation : la capital physique est polluant au contraire du capital humain.

Nous présentons le problème du planificateur social avec une fonction de production Cobb-Douglas :

$$\max_{\{C(t),D(t),u(t)\}_{t=0}^{\infty}} \int_0^{\infty} \left(\ln C(t) - \frac{\phi E(t)^{1+\psi}}{(1+\psi)} \right) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{K}(t) = K(t)^{\beta}(u(t)h(t)L(t))^{1-\beta} - C(t) - D(t) \\ \dot{h}(t) = \epsilon(1-u(t))h(t) \\ E(K(t),D(t)) = (\frac{K(t)}{D(t)})^{\gamma} \\ K(0),\ h(0) \text{ donnés} \end{cases}$$

Les conditions de la croissance équilibrée permettent de définir le taux de croissance de long terme de l'économie qui s'établit en fait au niveau du taux de croissance du capital humain diminué du taux d'escompte : $g = \epsilon - \rho$. Ainsi, il apparaît que, contrairement au modèle AK, les préoccupations environnementales n'ont aucun impact sur la croissance économique. Ce résultat s'explique par le fait que le moteur de la croissance (l'accumulation du capital humain) est indépendant de la sphère environnementale. L'intégration du dommage causé par l'accumulation de capital physique, via les émissions polluantes, réduit l'intensité capitalistique K/Y. Mais, dans ce cadre d'analyse, cette baisse est exactement compensée par une substitution des facteurs, dans le secteur du bien final, favorable à l'emploi du capital humain non polluant. Au final, cet effet de substitution contrebalance exactement l'effet d'éviction ce qui permet de maintenir le taux de croissance à un niveau inchangé.

Avant de conclure cette sous-section, nous nous focalisons sur un moyen alternatif destiné à lutter contre la pollution : l'adoption de technologies économes en environnement.

Adoption de technologies moins polluantes

Processus involontaire : Musu [1995] développe un modèle de croissance endogène dans lequel les émissions polluantes sont un produit joint de la production. L'auteur considère que l'amélioration de la performance environnementale de la technologie n'est pas la résultante d'un choix volontaire des firmes. Par analogie avec l'effet d'apprentissage *à la* Romer [1986], le principe consiste à supposer que l'accumulation de capital est source d'un effet externe qui se manifeste par un accroissement de la productivité du facteur pollution. La technologie, à rendements d'échelle constants, s'écrit : $Y(t) = K(t)^{\alpha}(xE(t))^{1-\alpha}$ où x représente l'externalité. Au niveau agrégé, la production est homogène de degré 1 dans le capital puisque $x = K$: $Y(t) = K(t)E(t)^{1-\alpha}$. D'après cette formulation, une hausse du stock de capital implique que l'on pourra émettre un niveau moindre de pollution pour atteindre un niveau de production donné. La loi d'accumulation de la pollution est donnée par : $\dot{P}(t) = E(t) - \mu P(t)$. Les répercussions de la pollution se mesurent en termes de la dégradation d'un indice de la qualité de l'environnement $Q(t) = \bar{P} - P(t)$ avec $\bar{P}$ un niveau maximum de pollution exogène. Son évolution est déduite de celle de la pollution : $\dot{Q}(t) = \mu(\bar{P} - Q(t)) - E(t)$. Les ménages retirent une utilité de la consommation et de la qualité de l'environnement : $U(C(t), Q(t)) = (C(t)Q(t))^{1-\eta}/(1-\eta)$.

Dans ce contexte[19], l'auteur montre que la croissance équilibrée et durable est possible à condition que le taux d'escompte soit compris dans un intervalle précis[20]. Il se focalise ensuite sur les moyens d'internaliser les deux externalités qui ont cours au niveau de l'économie décentralisée (l'externalité environnementale qui passe par les préférences et l'externalité technologique). Pour ce faire, Musu [1995] propose la mise en place d'un système composé d'un taxe sur les émissions polluantes τ et d'une subvention s à l'accumulation du capital. Le solde net éventuel étant versé (prélevé) sous forme de transfert forfaitaire aux ménages. Ce système modifie les profits des firmes qui doivent supporter le coût associé aux émissions : $\pi = K(t)^{\alpha}(xE(t))^{1-\alpha} - (r(t)-s)K(t) - \tau E(t)$. Il apparaît finalement qu'il est possible de décentraliser l'optimum (dont les valeurs sont repérées par l'indice "$*$") en fixant les instruments au niveau suivant : $\tau E^* = sK^* = (1-\alpha)K^*(\mu(\bar{P} - Q^*))^{1-\alpha}$. Ce système vérifie donc la contrainte de budget équilibré puisque la taxe sur les émissions permet exactement de financer la subvention à l'investissement.

Recherche dans les technologies "vertes" : Bovenberg et Smulders [1995] considèrent, par analogie cette fois avec le modèle de Lucas [1988], que l'adoption de technologies moins polluantes relève d'un processus de recherche volontaire. Plus précisément, ils s'intéressent aux implications de long terme d'une politique environnementale plus ambitieuse (ou plus sévère) dans un modèle de croissance endogène à deux secteurs. Dans ce modèle, il existe un bien environnemental $Z(t)$ dont la croissance est affectée par le flux de pollution $E(t)$: $\dot{Z}(t) = N(Z(t), E(t))$[21]. La production du bien final est réalisée grâce à une technologie employant du capital et un input de pollution efficace $X(t)$ et, bénéficie d'une externalité environnementale positive : $Y(t) = A(Z(t))F(K_y(t), X_y(t))$ avec $A'() \geq 0$ et $F()$ homogène de degré 1. La pollution efficace $X(t) = h(t)E(t)$ est une fonction des émissions brutes $E(t)$ et du stock de connaissance $h(t)$. Cette connaissance est produite dans un secteur de recherche et développement selon la technologie à rendements constants suivante : $\dot{h}(t) = G(K_h(t), X_h(t))$. Capital et pollution efficace se répartissent entre les deux sec-

[19] Musu [1995] n'introduit pas de dépenses de dépollution et postule l'absence de dépréciation du capital.

[20] Le taux de croissance s'établit au niveau suivant : $g = [(\mu(\bar{P} - Q(t)))^{1-\alpha} - \rho]/\eta$ et le taux d'escompte doit satisfaire une double inégalité : $(1-\eta)(\mu(\bar{P} - Q(t)))^{1-\alpha} < \rho < (\mu(\bar{P} - Q(t)))^{1-\alpha}$

[21] avec $N_Z > 0$, $N_{ZZ} < 0$, $N_E < 0$, $N_{EE} < 0$ et $N_{EZ} > 0$

teurs de productions : $K(t) = K_y(t) + K_h(t)$ et $X(t) = X_y(t) + X_h(t)$. L'accumulation de connaissance génère donc, comme produit joint, des émissions polluantes. Elle permet toutefois d'accroître l'efficacité de la pollution dans le processus de production. Autrement dit, l'innovation autorise la production à survenir de manière moins polluante. Les préférences portent à la fois sur la consommation et le bien environnemental avec une fonction d'utilité $U(C(t), Z(t))$ appartenant à la classe CRRA. Dans ce cadre d'analyse, les auteurs concluent à l'inefficacité de l'équilibre concurrentiel qui souffre de deux insuffisances de marché liées au caractère de bien public de la connaissance h et du bien environnemental Z. Ils introduisent alors une taxe sur la pollution τ qui est fixée à un niveau tel que le bénéfice d'une hausse de l'input pollution dans le secteur du bien final soit égal au coût supporté par les agents[22]. Les revenus procurés par la taxe servent finalement à subventionner la recherche et développement. Un tel système permet de décentraliser la solution optimale à l'équilibre concurrentiel.

Bovenberg et Smulders [1995] évaluent ensuite les effets d'une politique environnementale plus ambitieuse (hausse de la taxe et baisse de la pollution) sur la croissance de long terme. Cette politique affecte les propriétés du sentier de croissance équilibrée selon deux effets de sens contraire. La diminution de la pollution est d'abord associée à un effet direct négatif sur la productivité des facteurs dans la mesure où l'input pollution devient plus rare et, tend à ralentir l'accumulation de capital physique et de connaissance ($F_{K_y X_y} > 0$ et $G_{X_h} > 0$). Par contre, cette diminution s'accompagne également d'une hausse du bien environnemental ($N_E < 0$) qui bénéficie, par le biais de l'externalité de production ($A'(Z) > 0$), au secteur du bien final. Si l'externalité de production est suffisamment importante et si l'effet marginal d'une baisse de la pollution sur l'environnement est fort, les bénéfices d'une politique environnementale plus sévère en dépassent les coûts[23]. Ainsi, il est possible d'obtenir une situation de *win-win*, à savoir, une hausse simultanée de la qualité de l'environnement et du taux de croissance suite à un renforcement de la politique environnementale.

Bovenberg et Smulders [1996] emploient un modèle semblable à celui présenté dans Bovenberg et Smulders [1995] afin d'analyser les conséquences d'un renforcement de la politique environnementale, à partir d'une situation initiale non optimale[24]. Toutefois, les auteurs complètent l'étude précédente en s'intéressant non seulement à l'impact de

[22]Le bénéfice est une hausse de la production permettant une hausse de la consommation et s'élève à $U_C Y_{X_y}$. Le coût correspond à une hausse de la pollution associée à une diminution de la ressource environnementale. Celle-ci implique, en retour, une baisse de la productivité des facteurs $A'(Z) > 0$ et de l'utilité des agents (raisonnement à niveau de connaissance h constant). Le coût est finalement mesuré par $-\theta N_E/h$ avec θ le prix fictif de la ressource naturelle (qui intègre notamment le dommage causé par la pollution aux agents, soit, $-U_Z$).

[23]Il faut également que la part de la pollution dans les deux secteurs de production soit relativement faible.

[24]L'équilibre initial pouvant être caractérisé, par exemple, par un niveau trop élevé de pollution. Le

la réforme sur le taux de croissance de long terme mais aussi, à ses répercussions sur le comportement de l'économie lors de la transition vers le nouveau sentier de croissance équilibrée. Ils se focalisent donc sur les effets à la fois de court et long terme d'une réforme non anticipée de la politique environnementale.

Suite à un choc sur la politique environnementale, l'ajustement de l'économie passe, d'une part, par une substitution des inputs capital et pollution efficace dans chaque secteur et, d'autre part, par une réallocation des facteurs entre les deux secteurs de production du bien final et de la connaissance. L'impact sur la croissance dépend de la manière dont sont perçus les bénéfices environnementaux. Si l'environnement est essentiellement un bien de consommation public (l'externalité environnementale jouant principalement sur les préférences), alors le renforcement affecte aussi bien la croissance de court terme que de long terme. Par contre, s'il s'apparente plus à un bien d'investissement public[25], alors la politique environnementale a un effet positif sur le taux de croissance de long terme tandis que la croissance lors de la transition peut soit ralentir, soit être stimulée. Globalement, cette analyse illustre le contraste entre les effets de court et long terme d'une politique environnementale plus sévère. L'intuition de ce résultat repose sur le fait que les coûts de la politique environnementale surviennent lors de la phase de transition, à court et moyen termes, alors que les bénéfices liés à une qualité de l'environnement meilleure sont ressentis à long terme.

Dans cette sous-section, plusieurs solutions aux limites de la croissance, imposées par la dégradation de l'environnement, ont été apportées. Toutefois, par définition, les externalités environnementales supposent que les agents privés sont incapables d'appliquer les remèdes aux maux causés par la pollution et la plupart des travaux exposés précédemment ont proposé des politiques incitatives destinées à promouvoir le contrôle de la pollution. Nous complétons cette analyse du rôle de la politique environnementale dans la partie suivante.

1.3.3 Implications politiques des externalités environnementales

Nous distinguons deux types d'études : *i/* celles qui envisagent la politique environnementale comme un moyen d'atteindre l'optimum de premier rang à partir de la solution décentralisée et *ii/* celles qui se placent, au contraire, dans un cadre de second rang, marqué par l'existence de distorsions, pour évaluer l'effet de la régulation de la pollution.

renforcement de la politique consistant alors en une hausse de la taxe sur la pollution.

[25] Ce qui revient à considérer encore une fois que l'externalité environnementale de production est forte, postulat qui constitue, dans ce modèle, une condition nécessaire à l'obtention d'une situation de *win-win*.

Décentraliser l'optimum social

Mohtadi [1996] procède à une revue des instruments de politique économique, parmi les taxes, les subventions et la régulation directe, susceptibles de décentraliser l'optimum social d'une économie polluante. L'auteur suppose que la production ($Y(t) = AK(t)$) génère des émissions polluantes qui affectent un indice de la qualité de l'environnement $Q(t) : Q(t) = Q_0 K(t)^{-\beta}$. L'environnement, comme la consommation, est un argument de la fonction d'utilité des agents $U(C(t), Q(t)) = ((C(t)^\nu Q(t)^\zeta)^{1-\sigma} - 1)/(1-\sigma)$. L'étude du sentier de croissance équilibrée, aussi bien pour la solution centralisée que décentralisée, révèle que le taux de croissance de l'économie à l'équilibre g^e

$$g^e = \frac{1}{1-(1-\sigma)(\nu-\beta\zeta)}(A-\rho)$$

est typiquement différent de celui qui prévaut à l'optimum social

$$g^o = \frac{1}{1-(1-\sigma)\nu}\left(A - \frac{\rho}{1-\beta\zeta/\nu}\right)$$

en raison de l'incapacité des agents à internaliser l'externalité environnementale. Pour autant, il n'existe pas d'ordre établi entre ces deux valeurs. En effet, le long du sentier de croissance équilibrée, il apparaît que le taux de croissance à l'équilibre est inférieur à celui de l'optimum social ($g^e < g^o$) lorsque le dommage causé par la production β est faible. Au contraire, il est supérieur quand ce dommage est fort (la croissance optimale est même nulle pour un niveau de dommage suffisamment important). En fait, quand β est faible, une hausse du capital implique une diminution de l'environnement et de l'utilité marginale de la consommation (puisque $U_{CQ} > 0$). Cette hausse tend donc à réduire la croissance de la consommation à la fois à l'équilibre et à l'optimum. De même, on observe un ralentissement de l'accumulation du capital. Toutefois, ce ralentissement provoque, en retour, un ralentissement de la dégradation de l'environnement. Cet effet n'est pas pris en compte par l'économie décentralisée (qui prend Q comme une donnée) et cela se traduit par une tendance à sur-compenser la baisse de Q par une réduction trop importante de la croissance de la consommation (l'argument inverse s'applique quand β est fort).

Afin de compenser les imperfections de marché, Mohtadi [1996] propose d'abord d'introduire une taxe proportionnelle τ sur la production reversée sous la forme d'un transfert forfaitaire T aux consommateurs. La contrainte budgétaire après taxe s'écrit : $\dot{K}(t) = (1-\tau)AK(t) - C(t) + T$. Il est possible d'obtenir l'expression du taux de croissance conditionnée à l'instrument $g^e(\tau)$ et la valeur de la taxe qui égalise les taux de croissance $g^e(\tau)$ et g^o :

$$\tau = \frac{\beta\mu}{1-(1-\sigma)\nu}(\rho/A(\nu-\beta\zeta) - (1-\sigma))$$

Fort logiquement, la politique optimale consiste en fait à subventionner la production (pour stimuler l'accumulation de capital) pour des niveaux de dommage modérés tandis qu'il faut, au contraire, taxer la production lorsque le dommage qu'elle occasionne est important. Ensuite, l'auteur combine la taxe à une régulation directe visant à imposer un standard d'émission à la production (c'est-à-dire à fixer β) : $Y(t) = A(\beta)K(t)$ avec $A'(\beta) > 0$, cette formulation traduisant l'idée que diminuer β implique de polluer moins mais nécessite de renoncer aux technologies les plus productives (et polluantes). Dans ce contexte, il est toujours possible de décentraliser la solution optimale et on atteint même un niveau de bien-être supérieur. En fait, β devient une variable de contrôle du planificateur dont le choix permet de maximiser le taux de croissance à l'optimum social.

Gradus et Smulders [1996] analysent un modèle dans lequel la production subit une externalité négative de pollution ($Y(t) = K(t)^{\beta}E(t)^{-\chi}$) et, est soumise à un effet de seuil : au delà du niveau $\bar{E}$, la pollution provoque l'effondrement de l'activité économique ($Y(t) = 0 \; \forall E(t) \geq \bar{E}$). La pollution est un produit fatal de la production mais peut être jugulée grâce à de la maintenance $D(t)$: $E(t) = K(t)^{\lambda}D(t)^{-\gamma}$ avec $\lambda \geq \gamma$[26]. Le flux de pollution affecte également les agents : $U(C(t), E(t)) = (C(t)E(t)^{-\phi})^{1-1/\sigma}/(1-1/\sigma)$. L'économie décentralisée échoue à internaliser toutes les externalités. En effet, si une firme tient compte de l'effet de la pollution qu'elle génère sur ses propres conditions de production, elle ignore cependant le dommage causé par son activité aussi bien aux autres firmes qu'aux consommateurs. Ainsi, au niveau d'une firme i, la fonction de production s'écrit :

$$Y_i(t) = K_i(t)^{\beta}E_i(t)^{-\tilde{\chi}}E(t)^{-(\chi-\tilde{\chi})}$$

où $E_i(t)^{-\tilde{\chi}}$, avec $\tilde{\chi} < \chi$, représente l'effet négatif de ses propres émissions ($E_i(t) = K_i(t)^{\lambda}D_i(t)^{-\gamma}$) sur la productivité des facteurs tandis que le terme $E(t)^{-(\chi-\tilde{\chi})}$ mesure le dommage causé par la pollution sur la production au niveau agrégé (soit, l'externalité de production). L'équilibre concurrentiel est nécessairement inefficace puisque les firmes ne consacrent pas assez de ressources à la dépollution. Afin de remédier à cet état de fait, les auteurs comparent deux systèmes d'intervention. Le premier repose sur une taxe τ_e sur les émissions polluantes, le second se compose d'une subvention à la dépollution τ_d et d'une taxe sur la production τ_y. En introduisant simultanément ces trois instruments, le problème de la firme consiste à choisir la suite $\{D_i(t), I_i(t)\}$, où la variable $I_i(t)$ représente l'investissement, qui maximise la somme actualisée de ses profits :

$$\max \int_0^{+\infty} ((1-\tau_y)Y_i(t) - (1-\tau_d)D_i(t) - \tau_e E_i(t) - I_i(t)) \exp^{-\int_0^t r(s)ds} dt$$

[26]La croissance endogène provient de l'existence de rendements constants, au niveau agrégé, dans le capital et la dépollution : $\beta - \chi(\lambda - \gamma) = 1$

$$s.c \begin{cases} Y_i(t) = K_i(t)^{\beta} E_i(t)^{-\tilde{\chi}} E(t)^{-(\chi-\tilde{\chi})} \\ E_i(t) = K_i(t)^{\lambda} D_i(t)^{-\gamma} \\ \dot{K}_i(t) = I_i(t) \end{cases}$$

Ce programme s'associe aux conditions du premier ordre suivantes :

$$\left((1-\tau_y)(\beta-\lambda\tilde{\chi}) - \lambda\tau_e\frac{E_i}{Y_i}\right) y = r$$

$$(1-\tau_d)s_d = (1-\tau_y)\gamma\tilde{\chi} + \gamma\tau_e\frac{E_i}{Y_i}$$

avec $y = Y/K$, $s_d = D/Y$.

Le problème du consommateur débouche de manière classique sur la règle de Keynes-Ramsey. Le taux de croissance g de la consommation et du capital est donné par : $g = (r-\rho)\sigma/(1+(1-\sigma)(\gamma-\lambda)\phi)$. La solution centralisée est, quant à elle, caractérisée par les deux équations suivantes : $s_d = \gamma(\chi - \tilde{\chi} + \phi s_c)$ et $g = ((\beta - \lambda s_d/\gamma)y - \rho)\sigma/(1 + (1-\sigma)(\gamma-\lambda)\phi)$ avec $s_c = C/Y$.

Dès lors, il est possible de décentraliser l'optimum social avec seulement la taxe pigouvienne ($\tau_y = \tau_d = 0$) sur la pollution $\tau_e\frac{E_i}{Y_i} = \chi - \tilde{\chi} + \phi s_c$. Les deux composantes de cette taxe traduisent la nécessité d'internaliser l'externalité de pollution au niveau des firmes (premier terme) et d'intégrer le coût social de la pollution mesuré en termes du bien-être (second terme). L'autre système ($\tau_e = 0$) permet également d'atteindre l'optimum social grâce à une subvention à la dépollution $\tau_d = \beta(\chi - \tilde{\chi} + \phi s_c)/((\beta - \lambda\tilde{\chi})(\phi s_c + \chi))$ et une taxe sur la production $\tau_y = \lambda(\chi - \tilde{\chi} + \phi s_c)/(\beta - \lambda\tilde{\chi})$. La subvention garantit le niveau optimal de dépollution mais stimule de manière excessive la croissance. Ainsi, elle doit être combinée avec la taxe sur la production qui s'apparente finalement à un instrument correctif agissant sur le rendement du capital (donc sur l'incitation à investir).

Politique environnementale en la présence de distorsions

Lighart et Van der Ploeg [1994] proposent également une analyse des répercussions d'une politique environnementale plus sévère dans un contexte de second rang où l'économie est sujette à des distorsions. Dans ce modèle, la production ($Y(t) = AK(t)$) est une source d'émissions polluantes ($E(t) = B(t)Y(t)$). Le ratio émissions/output peut être réduit grâce à des dépenses de dépollution $D(t)$: $B(t) = (D(t)/Y(t))^{-\psi}$. Les préférences des agents portent sur la consommation privée $C(t)$, la consommation publique $G(t)$ (qui correspond aux dépenses du gouvernement) et sont affectées par la pollution : $U(t) = \log C(t) + \eta_G \log G(t) - \eta_E \log E(t)$ où η_G (*resp.* η_E) correspond au poids accordé aux dépenses publiques (*resp.* à la pollution) dans l'utilité. En l'absence d'intervention des pouvoirs publics, les agents prennent la pollution comme une donnée et l'équilibre concurrentiel est caractérisé par des niveaux de production et de pollution trop élevés. Les auteurs supposent alors l'intervention du gouvernement qui engage à la fois des dépenses de dépollution et des dépenses publiques. Le financement de ces dépenses est assuré par une taxe sur la production $\tau(t)$. Sa contrainte budgétaire s'écrit $\tau(t)Y(t) = G(t) + D(t)$. La résolution du problème du consommateur conduit à la règle de Keynes-Ramsey : $\dot{C}(t) = (r(t) - \rho)C(t)$. La maximisation des profits donne l'expression du taux d'intérêt $(r(t) = (1 - \tau(t))A)$. Le taux de croissance de l'économie s'écrit donc $g = (1 - \tau(t))A - \rho$. L'intervention du gouvernement aboutit nécessairement à un optimum de second rang puisque le seul instrument de la taxe échoue à garantir à la fois la croissance optimale et la provision optimale des deux biens publics.

La politique du gouvernement consiste alors à choisir le taux de taxe qui maximise la somme actualisée des utilités instantanées sous la contrainte du taux de croissance d'équilibre. Le choix du taux de taxe doit respecter deux conditions. D'après la première, la taxe doit satisfaire la règle de Samuelson modifiée selon laquelle le ratio de l'utilité marginale des dépenses publiques sur l'utilité marginale de la consommation est égal au coût marginal des fonds publics (CMFP). La seconde impose un partage optimal de la recette procurée par la taxe entre les deux postes de dépenses. Dans ce contexte, Lighart et Van der Ploeg [1994] montrent qu'une hausse des préoccupations environnementales implique un renforcement de la politique (hausse de la taxe) et une diminution du CMFP. Ainsi, le part du revenu national consacrée aux dépenses publiques et à la dépollution augmente. Cette intervention promeut donc une réduction de la pollution mais, celle-ci est obtenue au détriment de la croissance économique. En effet, dans cette situation, il n'existe pas de double dividende (dans le sens où un renforcement de la politique environnementale permet une baisse des taxes causant des distorsions économiques) puisque les deux catégories de dépenses publiques sont assises sur la même base, à savoir, la taxe sur l'output.

Bovenberg et de Mooij [1997] étudient aussi l'effet d'un renforcement de la politique environnementale sur la croissance dans une situation marquée par l'existence de taxes à l'origine de distorsions dans l'économie. La production du bien final est assurée par une technologie, à rendements d'échelle constants, employant deux inputs intermédiaires M et N : $f(M(t), N(t))$. Le bien intermédiaire M est produit à l'aide du capital et de l'investissement public S : $M = M(K(t), S(t))$ avec $M()$ également homogène de degré 1. L'input naturel N se compose des émissions polluantes E et de l'activité de dépollution D des firmes : $N(t) = D(t)E(t)^{\alpha}$. Les émissions des firmes dégradent la qualité de l'environnement : $Q(t) = Q(E(t))$ avec $Q'(E) < 0$. En outre, l'environnement intervient à la fois comme une externalité positive dans la production $Y(t) = f(M(t), N(t))Q(t)^{\eta}$ et dans les préférences $U(C(t), Q(t)) = ((C(t)Q(t)^{\phi})^{1-1/\sigma} - 1)/(1 - 1/\sigma)$.

Contrairement au modèle précédent, le gouvernement dispose d'outils distincts afin de financer les dépenses publiques et de veiller à l'internalisation des externalités. Les instruments retenus par les auteurs sont une taxe sur l'output τ_y (causant des distorsions sur l'investissement par le biais de son effet sur le rendement du capital), une taxe sur la pollution τ_e et une subvention à la dépollution τ_d (un budget équilibré nécessitant $\tau_y Y + \tau_e E = \tau_d D + S$). L'économie décentralisée avec intervention publique est décrite par le comportement des firmes et des consommateurs. Les firmes maximisent leurs profits en prenant les taxes et le taux d'intérêt comme donnés. On obtient les conditions néoclassiques d'égalisation de la productivité marginale des facteurs à leurs prix (ou à leur coût) : $r = (1-\tau_y)F_K$, $(1-\tau_d) = (1-\tau_y)F_D$ et $\tau_e = (1-\tau_y)F_E$[27]. Les consommateurs maximisent la somme actualisée de leurs utilités instantanées sous leur contrainte budgétaire ce qui donne la règle de Keynes-Ramsey : $\dot{C}(t) = \sigma(r(t)-\rho)C(t)$.

Les auteurs se proposent alors de mesurer l'impact d'un renforcement de la politique environnementale (hausse de τ_e) sur la croissance dans le cas où les dépenses publiques restent constantes et la substitution entre les deux inputs est aisée dans le secteur du bien final ($f()$ est, par exemple, de type Cobb-douglas). Si la hausse de la taxe entraîne une baisse incontestable des émissions, son effet sur le taux de croissance dépend de son impact sur le rendement du capital après taxe $(1-\tau_y)F_K$ (seul déterminant de l'incitation à investir donc de l'accumulation de capital). Les conséquences d'une hausse de la taxe sur la productivité du capital sont la donnée de deux effets de sens contraire (du type de ceux détectés par Bovenberg et Smulders [1995]). D'abord, cette hausse est associée à un effet direct négatif sur la productivité en raison de la diminution de l'input pollution disponible (l'ampleur de cet effet dépendant de l'élasticité de la production par rapport à la pollution). Ensuite, le second effet, indirect et positif, provient de l'externalité environnementale de production. La baisse de la pollution implique une amélioration de la qualité de l'environnement favorable à la productivité du capital. Si l'effet négatif l'emporte, le rendement du capital avant taxe diminue. Mais cette chute tend aussi à réduire la production donc la base de la taxe associée aux distorsions. Ainsi, à niveau de dépenses constant, le gouvernement est obligé d'augmenter la taxe sur l'output. Dès lors, le rendement du capital après taxe diminue également ce qui, en réduisant "doublement" l'incitation à investir, provoque un ralentissement de la croissance. Par contre, lorsque l'externalité de production est suffisamment forte pour que l'effet indirect l'emporte sur l'effet direct d'une hausse de la taxe τ_e, le rendement du capital avant taxe augmente et s'accompagne d'un accroissement de la base de la taxe à l'origine de distorsions. Par conséquent, le gouvernement a la possibilité de réduire la taxe τ_y et l'économie profite d'un double dividende. Au final, le renforcement de la politique environnementale se manifeste par une hausse simultanée de la croissance et de l'environnement. Les déterminants de ce résultat sont d'une part l'existence d'une externalité de production forte et, d'autre part, la modification de la répartition du

[27] avec $F(K, D, E, S, Q) = f(M(K, S), N(D, E))Q^{\eta}$

fardeau de la taxe favorable à l'investissement. En effet, une hausse de la taxe sur la pollution (qui affecte les profits) autorise une réduction de la taxe sur l'output (affectant l'investissement) et stimule finalement l'accumulation de capital.

1.3.4 Résumé

Nous avons débuté la section avec un résultat pessimiste concernant l'effet des préoccupations environnementales (et de la dégradation de l'environnement) sur les perspectives de croissance d'une économie polluante. La croissance équilibrée n'est plus la règle quand la pollution est associée à un effet de dégoût (Michel et Rotillon [1995]). Le survol de cette littérature a cependant permis d'identifier plusieurs solutions à cette limite au premier rang desquelles figurent l'engagement dans des activités de dépollution (Gradus et Smulders [1993]) et la recherche de technologies moins polluantes (Bovenberg et Smulders [1995]). Les externalités environnementales nécessitent l'intervention des pouvoirs publics afin de promouvoir le développement de ces activités et de conduire l'économie décentralisée sur la voie de la croissance optimale (Gradus et Smulders [1996]).

Ces résultats tendent à inverser la tendance initiale relative à la perception de la relation (essentiellement de long terme) entre croissance et environnement. D'abord, la croissance ne s'accompagne pas nécessairement d'une dégradation de l'environnement et, au contraire, un développement durable est possible (Gradus et Smulders [1993]). Ensuite, un renforcement des préférences environnementales n'implique pas automatiquement un ralentissement de la croissance (en vertu de la situation de *win-win* détectée par den Butter et Hofkes [1995]) tandis qu'une politique environnementale plus vigoureuse peut procurer un double dividende (Bovenberg et de Mooij [1997]).

Cependant, nous avons également constaté que l'optimalité et la durabilité de la croissance exigent des conditions fortes sur les préférences, la technologie et la loi d'évolution de la pollution. Pour conclure cette section, nous présentons la contribution de Chevé et Schubert [2002] qui offre non seulement une bonne synthèse des conditions requises pour une croissance soutenue et respectueuse de l'environnement mais aussi, qui délivre une réflexion sur la relation entre les notions de durabilité et d'équité entre les générations.

Chevé et Schubert [2002] se focalisent sur la détermination des conditions d'optimalité du sentier de croissance équilibrée d'une économie polluante en retenant trois critères distincts pour le choix de la fonction de bien-être social : *i/* le critère utilitariste escompté qui consiste à maximiser la somme actualisée des utilités instantanées[28], *ii/*

[28]Ce critère s'apparente à une dictature du présent puisque le poids accordé au futur dans l'objectif social est infime.

le critère utilitariste non escompté (qui traduit un souci d'équité intergénérationnelle) et, *iii/* le critère du maximin qui repose sur le principe rawlsien de la maximisation du bien-être des plus défavorisés. Chevé et Schubert [2002] s'intéressent également aux conditions de la durabilité de la croissance en distinguant la durabilité au sens écologique de celle au sens économique. La durabilité écologique impose que la qualité de l'environnement (respectivement la pollution) soit non décroissante (respectivement non croissante) le long du sentier de croissance équilibrée. La notion de durabilité économique, inspirée de la définition du rapport Brundtland [1987], stipule, quant à elle, que l'utilité doit être non décroissante le long du sentier de croissance de long terme. Le problème du planificateur social avec le premier critère s'écrit :

$$\max_{\{C(t),D(t)\}_{t=0}^{\infty}} \int_0^{\infty} U(C(t),P(t)) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{K}(t) = AK(t) - C(t) - D(t) \\ \dot{P}(t) = K(t)^{\alpha} D(t)^{-\gamma} - \mu P(t) \\ K(0), P(0) \text{ connus} \end{cases}$$

Le modèle retenu est une extension de l'étude de Gradus et Smulders [1993] où la fonction d'émission est généralisée puisqu'elle n'est pas *a priori* homogène de degré 0 ($\alpha \neq \gamma$). Les auteurs donnent d'abord les conditions de l'optimalité de la croissance équilibrée. Ces conditions portent sur les préférences et exigent notamment que l'élasticité intertemporelle de substitution $\sigma = -U_C/CU_{CC}$ et la préférence pour l'environnement $\phi = -PU_P/CU_C$ soient constantes. C'est pourquoi, les travaux de cette littérature recourent généralement à une fonction d'utilité du type CRRA ; c'est-à-dire, présentant une aversion relative au risque constante : $U(C,P) = ((CP^{-\phi})^{1-1/\sigma} - 1)/(1 - 1/\sigma)$.

Dans ce contexte, la durabilité écologique exige que $\alpha \leq \gamma$ et l'économie converge alors vers un "paradis écologique" (Michel [1993]) puisque la croissance s'accompagne d'une diminution perpétuelle de la pollution. Par contre, la recherche de la durabilité écologique implique, comme nous l'avons déjà signalé, un ralentissement de la croissance par rapport au modèle AK sans pollution. De plus, Chevé et Schubert [2002] soulignent le fait qu'il peut exister des sentiers de croissance associés à une pollution croissante et durables d'un point de vue économique en raison de l'existence d'un effet de compensation $U_{CP} > 0$ (cet effet permet, en termes d'utilité, de compenser la hausse ininterrompue de la pollution par une hausse de la consommation). Enfin, sous les deux autres critères de bien-être social, il apparaît que les sentiers optimaux vérifient nécessairement la durabilité économique puisqu'ils induisent le respect d'un principe d'équité entre les générations.

A ce stade de l'analyse, nous mettons l'accent sur une caractéristique essentielle de la littérature étudiée jusqu'à présent. En supposant que l'horizon de vie de l'agent économique correspond à celui de l'environnement, les modèles de croissance à agent à durée de vie infinie se focalisent nécessairement sur la dimension intragénérationnelle des problèmes de pollution. Ce faisant, ils laissent de côté la dimension intergénérationnelle pourtant omniprésente dès qu'il est question d'environnement. Il est donc a priori intéressant, voire indispensable, de compléter notre étude par l'exposé de références choisies introduisant l'environnement dans le modèle de croissance à générations imbriquées d'agents. Comme l'indique Solow [1986], ce cadre conceptuel est le plus à même de rendre compte de l'aspect intergénérationnel inhérent aux problèmes de pollution : les décisions actuelles affectent non seulement l'environnement dont bénéficient les générations présentes mais aussi, celui dont pourront jouir les générations futures.

1.4 Prise en compte de la dimension intergénérationnelle : croissance et générations imbriquées

Les modèles à générations imbriquées ont été initialement développés pour traiter des problèmes de dette publique et de retraite (voir De La Croix et Michel [2002] pour une étude exhaustive de ce modèle et de ses applications). Grâce à une description plus fine de la structure de la population, ils autorisent une plus grande richesse des comportements puisqu'à chaque période, coexistent des agents hétérogènes confrontés à des arbitrages différents. Cette spécificité explique le positionnement des travaux qui introduisent l'environnement dans le modèle à générations imbriquées. Ceux-ci poursuivent généralement une démarche consistant d'abord à repérer les inefficacités de l'équilibre décentralisé puis, à discuter des instruments de politique économique susceptibles de pallier ces insuffisances. La plupart des contributions à cette littérature recourent à un cadre d'analyse *à la* Allais [1947], Samuelson [1958] et Diamond [1965][29]. D'autres, plus rares (comme Fisher et Van Marrewijk [1998] ou Bovenberg et Heijdra [1998]) emploient le modèle de Blanchard et Fisher [1989]. Dans la première approche, la durée de vie des agents est généralement fixée à deux périodes alors que dans la seconde, la durée de vie est conditionnée à une probabilité de décès.

La problématique du rôle de la politique environnementale étant indissociable de cette littérature, nous procédons à un regroupement des travaux exposés sur la base du type d'instrument de régulation qu'ils proposent. Nous présentons d'abord des références qui se focalisent sur la régulation de la pollution par un système de taxe. Nous détaillons ensuite des études qui s'intéressent plutôt au contrôle de la pollution par un système de droits ou permis à polluer. Nous nous posons enfin la question de savoir si l'altruisme, au delà d'une intervention des pouvoirs publics, peut être une solution à l'inefficacité de l'équilibre concurrentiel.

[29] Nous nous concentrons sur ce cadre d'analyse.

1.4.1 Régulation de la pollution par la taxe

Pollution et consommation d'énergie

Howarth et Norgaard [1992] est l'article pionnier de la littérature introduisant la pollution dans le modèle à générations imbriquées. La finalité de ce travail est d'apporter un démenti à la vision, héritée de l'analyse en équilibre partiel, selon laquelle la valorisation des services environnementaux (en permettant l'intégration de la dimension environnementale dans la prise de décision) assure l'allocation efficace de ces ressources et contribue à un développement durable. Les auteurs insistent au contraire sur la différence existante entre les notions d'efficience économique et d'équité intergénérationnelle (et de développement durable).

Le modèle comporte un unique secteur de production. La production, homogène de degré 1, emploie les inputs capital K_t, travail L_t et consomme de l'énergie en quantité E_t (produite par les firmes au coût constant e). La consommation d'énergie est source d'émissions polluantes et favorise l'accumulation d'un stock de pollution : $P_{t+1} = (1 - \mu)(P_t + \gamma E_t)$ avec $\mu \in]0,1[$ le taux d'assimilation naturelle de la pollution et $\gamma > 0$. En retour, le stock de pollution affecte la productivité des facteurs par le biais d'une externalité négative de production : $Y_t = F(K_t, L_t, E_t, P_t)$ avec $F_P < 0$[30]. Les firmes choisissent le niveau des inputs K_t, L_t et E_t afin de maximiser leurs profits, étant donné le taux de rendement du capital, le taux de salaire et le coût de l'énergie : $\pi_t = F(K_t, L_t, E_t, P_t) - r_t K_t - w_t L_t - eE_t$. On obtient les conditions usuelles d'égalisation de la productivité marginale des facteurs à leurs prix (ou à leurs coût) : $F_K = r_t$, $F_L = w_t$ et $F_E = e$.

La population est constante, à chaque période naît un nombre N, normalisé à 1, d'agents identiques qui vivent deux périodes. Un agent jeune de la génération t offre, de manière inélastique, une unité de travail aux firmes en contrepartie d'un salaire w_t. Ce salaire, accompagné d'un transfert éventuel de la part du gouvernement ν_t, est alloué à la consommation c_t et à l'épargne s_t. En seconde période de vie, il consomme d_{t+1} l'intégralité de son revenu constitué du rendement de l'épargne ($R_{t+1}s_t$, avec R_{t+1} le facteur d'intérêt : $R_{t+1} = 1 + r_{t+1}$) et d'un transfert gouvernemental θ_{t+1}. La particularité de ce modèle réside dans le fait que les dommages causés par la pollution sont ressentis seulement dans la production. Autrement dit, Les préférences ne portent que sur les consommations de première et seconde périodes de vie : $U(c_t, d_{t+1})$. L'agent choisit la répartition de ses ressources entre consommation et épargne de manière à maximiser son utilité sous les deux contraintes budgétaires. Formellement, le problème

[30] Les hypothèses sur les dérivées premières et secondes de la fonction de production sont habituelles. Les auteurs supposent l'absence de dépréciation du capital.

à résoudre s'écrit :

$$\max_{c_t, s_t, d_{t+1}} U(c_t, d_{t+1})$$

$$s.c \begin{cases} c_t = w_t + \nu_t - s_t \\ d_{t+1} = R_{t+1} s_t + \theta_{t+1} \end{cases}$$

La condition d'optimalité porte sur l'arbitrage relatif à la consommation sur le cycle de vie : $U_c(c_t, d_{t+1}) = R_{t+1} U_d(c_t, d_{t+1})$. Etant donné les conditions d'optimalité des firmes et des ménages et l'évolution de la pollution, l'équilibre concurrentiel est parfaitement caractérisé par les conditions d'équilibre des marchés de facteurs ($L_t = 1$, $K_t = s_{t-1}$) et la contrainte de ressources de l'économie ($c_t + d_t + K_{t+1} = F(K_t, L_t, E_t, P_t) + K_t - eE_t$).

Howarth et Norgaard [1992] étudient, à des fins de comparaison, l'optimum social. Le problème du planificateur social est de choisir la répartition des ressources entre consommations et investissement et le niveau de consommation d'énergie de manière à maximiser la somme actualisée des utilités de toutes les générations sous les contraintes de ressources de l'économie et d'accumulation de la pollution :

$$\max_{\{c_t, d_t, E_t\}} \sum_{t=-1}^{T} \rho^t U(c_t, d_{t+1})$$

$$s.c \begin{cases} c_t + d_t + K_{t+1} = F(K_t, L_t, E_t, P_t) + K_t - eE_t \\ P_{t+1} = (1-\mu)(P_t + \gamma E_t) \end{cases}$$

où $\rho \in]0,1[$ correspond au facteur d'actualisation.

L'équilibre concurrentiel se révèle être inefficace puisque les firmes, lorsqu'elles forment leur décision de production et d'emploi de ressources énergétiques, ignorent l'externalité de pollution. Afin de garantir un niveau d'émission optimal, les auteurs proposent l'instauration d'une taxe proportionnelle τ_t sur la consommation d'énergie, le produit de la taxe étant reversé sous forme de transferts forfaitaires (ν_t, θ_t) aux ménages. Le taux de taxe doit alors être fixé à un niveau tel que le bénéfice marginal de l'utilisation d'énergie $(F_E - e)$ soit égal à la valeur actualisée de son coût social. Ce coût est mesuré à l'aune de la dégradation des conditions de production $(F_P < 0)$ provoquée par les répercussions de cette utilisation sur le stock de pollution légué aux périodes suivantes (selon le facteur $\gamma(1-\mu)$ puis $\gamma(1-\mu)^2$ *etc...*).

Reste alors la question de la redistribution du revenu de la taxe ($\tau_t E_t = \nu_t + \theta_t$). Le déterminant principal des transferts intergénérationnels est le taux d'escompte de la fonction de bien-être social. Or, Howarth et Norgaard [1992] montrent, à partir de simulations, que la durabilité économique et l'équité intergénérationnelle ne s'obtiennent qu'à condition d'accorder un poids suffisamment important aux générations futures dans l'objectif social. Ainsi, les sentiers optimaux ne sont pas nécessairement durables malgré la présence d'une politique destinée à internaliser le dommage environnemental. Finalement, cette étude révèle que le développement durable est essentiellement une "affaire" d'équité intergénérationnelle.

Michel [1993] présente une extension du modèle précédent dans laquelle la croissance illimitée est rendue possible par l'existence d'un effet d'apprentissage *à la* Arrow [1962]. A la manière de Howarth et Norgaard [1992], l'auteur suppose que l'énergie E_t est un input de production dont l'utilisation génère des émissions polluantes. Ces émissions contribuent à l'accroissement du stock de pollution P_t qui affecte toujours la productivité des facteurs : $Y_t = F(K_t^Y, A_t L_t^Y, E_t, P_t)$ où $A_t = AK_t^Y$ représente l'externalité de connaissance qui passe par l'accumulation du capital (Romer [1986]). Ce travail se distingue également du précédent pour deux raisons. D'abord, Michel [1993] considère que la pollution affecte aussi le bien-être des agents. La fonction d'utilité s'écrit $U(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})$. Ensuite, il intègre la possibilité de réduire la pollution grâce à une technologie de dépollution homogène de degré 1, bénéficiant aussi d'une externalité d'apprentissage, dans le capital et le travail : $D_t = D(K_t^D, A_t' L_t^D)$ avec $A_t' = A' K_t^D$. La dynamique d'accumulation de la pollution est finalement décrite par l'équation suivante : $P_{t+1} = \gamma E_t - D_t + (1-\mu)P_t$.

A l'équilibre concurrentiel, les firmes maximisent leurs profits, les ménages maximisent leur utilité sous les contraintes budgétaires en considérant la pollution comme une donnée exogène (ces deux problèmes sont inchangés relativement à l'étude d'Howarth et Norgaard [1992]). Autrement dit, aucune ressource n'est allouée à l'activité de dépollution. L'étude du sentier de croissance de l'économie est réalisée pour une spécification du modèle et révèle que la croissance illimitée est exclue du fait de la baisse de la productivité des facteurs consécutive à l'externalité de production. En effet, à l'équilibre, la pollution est croissante avec le capital. Dès lors, l'accumulation du capital a deux effets contradictoires sur la production : un effet direct positif $F_K > 0$ (mais qui s'épuise $F_{KK} < 0$) et un effet direct négatif qui provient de l'externalité $F_P < 0$. A long terme, le second effet l'emporte et l'économie converge vers un état stationnaire. L'analyse de la solution optimale montre au contraire, que, s'il existe un sentier de croissance équilibrée, alors celui-ci doit correspondre au "paradis écologique" caractérisé par un stock de pollution nul et une croissance à taux constant du capital, de la consommation et de la production. La croissance de la dépollution compense alors exactement la hausse des émissions polluantes.

Michel [1993] s'intéresse ensuite à la décentralisation de l'optimum social. Pour ce faire, il propose d'introduire une taxe τ_t sur la consommation d'énergie mais suppose, à la différence de l'étude précédente, que les revenus de la taxe $\tau_t E_t$ sont intégralement alloués au secteur de la dépollution. La finalité de ce système consiste à s'assurer du fait que ce secteur soit en mesure, à chaque période, d'assimiler toute nouvelle source d'émission : $D(K_t^D, A_t' L_t^D) = \gamma E_t$ de telle sorte que la pollution évolue de manière optimale.

Pollution et consommation du bien final

John, Pecchenino, Schimmelpfennig et Schreft [1995] appréhendent le problème du contrôle de la pollution dans un cadre d'analyse sensiblement différent des travaux précédents. Dans leur modèle, l'activité des firmes est neutre d'un point de vue environnemental. Elles produisent le bien homogène à partir d'une technologie à rendements d'échelle constants dans le capital et le travail : $Y_t = AF(K_t, L_t)$ avec $A > 0$ un paramètre d'échelle. A chaque période naît un nombre N_t d'agents identiques (la population croît à taux constant : $N_{t+1} = (1+n)N_t$). Le revenu de l'agent jeune, constitué du salaire w_t diminué d'une taxe m_t, est entièrement alloué à l'épargne : $w_t = s_t + m_t$. L'agent retraité consomme l'intégralité de son revenu : $d_{t+1} = R_{t+1}s_t$. A chaque période, la consommation des retraités est source d'émissions polluantes qui s'élèvent, au niveau agrégé, à : $E_t = N_{t-1}d_t$. Ces émissions contribuent à la dégradation d'un indice de la qualité de l'environnement Q_t. Les préférences de l'agent porte sur la consommation et la qualité de l'environnement en seconde période de vie : $U^t = U(d_{t+1}, Q_{t+1})$. Le choix de ne pas intégrer de consommation de première période de vie revient à ignorer l'arbitrage de consommation sur le cycle de vie. Le recours à cette hypothèse simplificatrice, de même que le fait de considérer que la pollution affecte seulement les retraités, s'explique par la volonté des auteurs de se focaliser sur l'arbitrage que doivent opérer les agents entre consommation du bien final et consommation d'un bien environnemental qui sont des biens rivaux. Nous précisons notre propos dans ce qui suit.

John *et al.* [1995] supposent que le contrôle de la pollution relève de la compétence d'un gouvernement de court terme élu par les générations successives pour représenter leurs intérêts. Ce gouvernement a le pouvoir de lever une taxe forfaitaire m_t sur le revenu des jeunes afin de financer des dépenses de dépollution : $D_t = N_t m_t$ au niveau agrégé, son objectif étant de maximiser l'utilité de son électorat. Dans cette optique, les contraintes qu'il doit satisfaire sont constituées de l'ensemble des conditions d'équilibre[31] et de la dynamique d'évolution de la qualité de l'environnement : $Q_{t+1} = (1-\mu)Q_t - \beta N_{t-1}c_t + \gamma N_t m_t$. L'origine de l'externalité intergénérationnelle est claire : les agents retraités consomment et polluent mais ne subissent pas (donc n'agissent pas contre) la dégradation de la qualité de l'environnement qui est ressentie à la période suivante. Formellement, le problème du gouvernement s'écrit :

$$\max_{m_t} U(d_{t+1}, Q_{t+1})$$

[31] soit les conditions de la maximisation des profits, les conditions d'équilibre du marché du travail et du capital. Il prend également le stock de capital disponible en début de période comme donné.

$$s.c \begin{cases} w(k_t) = (1+n)k_{t+1} + m_t \\ d_{t+1} = (1 + r(k_{t+1}) - \delta)(1+n)k_{t+1} \\ Q_{t+1} = (1-\mu)Q_t - \beta N_{t-1} d(k_t) + \gamma N_t m_t \\ k_t \text{ connu} \end{cases}$$

Il est confronté à l'arbitrage suivant. Augmenter la taxe permet d'accroître les dépenses de dépollution et d'améliorer la qualité de l'environnement dont bénéficieront les retraités. Toutefois, cette opération est réalisée au détriment de l'épargne des jeunes qui détermine le niveau de consommation en seconde période de vie. En stationnaire, sa condition d'optimalité s'écrit[32] :

$$\frac{(1 + Af'(k) - \delta) + kAf''(k)}{1 + f'(k) - \delta} = \frac{\gamma}{q}$$

Dans ce contexte, les auteurs montrent que la décision de ce gouvernement conduit à une situation sous optimale puisqu'il échoue, en raison de son horizon de vie fini (égal à une période), à internaliser les externalités intergénérationnelles liées à l'environnement. Plus précisément, il ne tient pas compte de l'effet néfaste de la consommation sur la qualité de l'environnement léguée aux générations futures (β n'apparaît pas dans son arbitrage). Son rôle se limite finalement à fournir la provision optimale en bien public pour la génération qui l'a élu en intégrant seulement l'externalité intragénérationnelle liée au choix de m_t (présence de γ dans la condition).

John *et al.* [1995] opposent alors aux choix de ce gouvernement myope les décisions d'un gouvernement dont l'horizon de vie correspond exactement à celui de l'environnement. Ce planificateur est supposé choisir l'allocation des ressources entre consommation, dépollution et investissement de manière à maximiser l'utilité de la génération représentative sous la contrainte de ressources de l'économie et, étant donné le niveau d'environnement :

$$\max_{c,m,k} \log d + \log q$$

$$s.c \begin{cases} Af(k) + (1-\delta)k = \frac{d}{1+n} + m + (1+n)k \\ e = \frac{\gamma}{n+b} m - \frac{\beta}{(n+b)(1+n)} d \end{cases}$$

Les conditions d'optimalité correspondent respectivement à la condition de la règle d'or pour le capital ($Af'(k) = n + \delta$) et à la condition d'arbitrage entre consommation et environnement :

$$\frac{1+n}{d} = \frac{\gamma + \beta}{(n+\mu)q}$$

Cette dernière impose l'égalité entre le taux marginal de transformation et le taux marginal de substitution entre consommation et environnement. Elle traduit la prise

[32] avec une fonction d'utilité log-additive, $k = K/N$ (la production apparaissant en terme intensif) et $q = Q/N$.

en compte par le planificateur des effets intergénérationnels liés aux choix de consommation et de dépollution (présence de μ dans le terme de droite). Les auteurs montrent qu'il est possible d'atteindre l'optimum social de long terme à partir de l'économie décentralisée grâce à un système composé d'une taxe sur le salaire τ_w et d'une taxe sur le rendement du capital τ_k le tout étant reversé sous la forme d'un transfert forfaitaire aux retraités. Les taxes optimales ne sont pas explicitées. Le principe consiste d'abord à calculer la fonction d'utilité indirecte issue du problème du gouvernement myope soumis au système de taxe. Ensuite, la maximisation de cet objectif, en stationnaire, par rapport aux instruments donne des conditions du premier ordre identiques à celles de l'optimum.

Ono [1996] poursuit une problématique similaire à celle de John *et al.* [1995] et détecte trois autres systèmes d'intervention capables de garantir l'optimalité de l'équilibre concurrentiel. Pour ce faire, il utilise un modèle très proche du précédent excepté le fait qu'il intègre la consommation des jeunes dans les préférences[33]. En outre, il n'existe pas de gouvernement de court terme et la décision de dépollution incombe aux ménages jeunes. Dans ce contexte, l'auteur propose trois mécanismes destinés à corriger les inefficacités constatées au niveau des décisions, en matière de consommation et de dépollution, des agents privés :

- La combinaison de taxes différentes sur la consommation des jeunes, des retraités et d'une taxe sur le salaire des jeunes. Le tout reversé sous forme d'un transfert forfaitaire aux retraités,

- La combinaison d'une taxe identique sur la consommation des jeunes et des retraités, d'une taxe sur le salaire et d'une taxe sur le rendement du capital avec un transfert forfaitaire aux retraités,

- La combinaison d'une taxe sur le salaire et le rendement du capital et d'une subvention aux activités de dépollution.

Le premier système conduit évidemment à plus taxer la consommation des retraités puisque les jeunes internalisent une partie de l'externalité environnementale. En effet, même s'ils ignorent l'effet de leur consommation sur les générations futures, leur décision intègre l'incidence négative de leur consommation sur l'état de l'environnement dont ils héritent en seconde période de vie. Le second système se justifie par le fait qu'il est difficile de discriminer entre la consommation des jeunes et des retraités. Il convient alors de corriger les conséquences d'une taxe identique sur la consommation des jeunes et des retraités par une taxe sur le rendement du capital qui affecte seulement le revenu des retraités. Enfin, la troisième proposition se base sur l'alternative

[33]Cet ajout ne présente pas un grand intérêt puisque, dans ce modèle, l'effet intergénérationnel passe déjà par la consommation des vieux. Il permet seulement à l'auteur d'étudier une plus grande variété de systèmes d'intervention.

consistant subventionner l'activité de dépollution afin d'inciter les agents à investir dans la maintenance.

La pollution, produit fatal de la production

La problématique d'Ono [2003] se distingue de celle des travaux précédents. En fait, il se pose la question de savoir comment réagit le taux de croissance de long terme d'une économie polluante à une politique environnementale plus sévère. Dans son modèle, la production est la source des émissions polluantes. Le secteur productif et les émissions sont formalisées à la manière de Stokey [1998]. La production du bien finale Y_t est donnée par le produit d'un indice $z_t \in [0,1[$, caractéristique de l'intensité polluante de la technologie, et de l'output potentiel $\tilde{A}_t K_t^{\alpha} L_t^{1-\alpha}$: $Y_t = z_t \tilde{A}_t K_t^{\alpha} L_t^{1-\alpha}$. Les émissions représentent une fraction de l'ouput potentiel et le ratio émissions/output est croissant (et convexe) dans l'indice z_t : $E_t = z_t^{\epsilon} \tilde{A}_t K_t^{\alpha} L_t^{1-\alpha}$ avec $\epsilon > 1$. L'élimination de z_t dans ces deux expressions permet d'écrire la production comme une fonction homogène de degré 1 dans le capital, le travail et les émissions : $Y_t = A_t K_t^{\alpha_K} L_t^{\alpha_L} E_t^{\alpha_E}$. La production est soumise à une externalité d'apprentissage *à la* Romer [1986] : $A_t = AK_t^{1-\alpha_K-\alpha_E}$. Les émissions dégradent la qualité de l'environnement Q_t qui entre, comme argument, dans l'utilité des agents $U(c_t, d_{t+1}, Q_{t+1}) = \eta_1 \log c_t + \eta_2 \log d_{t+1} + \log Q_{t+1}$.

L'auteur fait une nouvelle fois la distinction entre deux types d'institutions : *i/* un gouvernement à durée de vie infinie dont le rôle consiste à taxer au taux τ_e les émissions polluantes des firmes et, à reverser le revenu de la taxe aux retraités grâce à un transfert forfaitaire T, *ii/* un gouvernement à durée de vie finie qui choisit le montant de ressources à allouer à la dépollution m_t de manière à maximiser l'utilité de la génération qui l'a élu. L'évolution de la qualité de l'environnement est finalement donnée par : $Q_{t+1} = Q_t - \beta E_t + \gamma m_t$.

Les firmes maximisent leurs profits étant donné le prix des facteurs r_t, w_t et la taxe sur les émissions τ_e. On retrouve les conditions classiques de la maximisation des profits. La population est constante de taille normalisée à 1, en identifiant le problème du gouvernement de court terme à celui de l'agent représentatif, l'objectif à résoudre est lui aussi classique :

$$\max_{c_t, s_t, m_t, d_{t+1}} \eta_1 \log c_t + \eta_2 \log d_{t+1} + \log Q_{t+1}$$

$$s.c \begin{cases} w_t = c_t + s_t + m_t \\ d_{t+1} = R_{t+1} s_t + T_{t+1} \\ Q_{t+1} = Q_t - \beta E_t + \gamma m_t \end{cases}$$

avec $T_{t+1} = \tau_e E_{t+1}$ la contrainte de budget équilibré du gouvernement immortel.

Après avoir étudié l'équilibre concurrentiel (uniquement pour la solution intérieure $m_t \geq 0$) conditionné à la taxe τ_e, l'auteur montre qu'il existe un intervalle $[\tau_e^1, \tau_e^2]$

sur lequel le taux de croissance est positif $g(\tau_e) \geq 0$. Sur cet intervalle, la croissance équilibrée est donc réalisable. Elle est également durable puisque la qualité de l'environnement croît au même taux que le capital. De plus, la relation entre le taux de croissance et la taxe suit une courbe en forme de cloche. Par conséquent, pour des niveaux de taxe initialement faibles, une politique environnementale plus vigoureuse stimule la croissance. En fait, la taxe sur la pollution est à l'origine de deux effets revenu positif et négatif. Une hausse de la taxe implique d'abord une baisse des émissions associée à une hausse de l'environnement (à la période suivante). Cela se traduit par le fait que la génération concernée a relativement moins de ressources à consacrer à la dépollution pour maintenir la qualité de l'environnement dont elle profitera en seconde période de vie. Elle peut épargner une plus grande part de son revenu ce qui favorise l'accumulation de capital. Par contre, une augmentation de la taxe impose une charge fiscale plus importante aux firmes. Elles ont tendance à réduire leurs émissions ce qui provoque, en retour, une baisse du salaire payé aux ménages. Cet effet revenu négatif déprime l'investissement et ralentit l'accumulation du capital. Il apparaît toutefois, lorsque la taxe fixée initialement est basse, que le premier effet l'emporte sur le second et, que le renforcement de la politique environnementale s'accompagne d'une hausse du taux de croissance du capital et de la qualité de l'environnement.

Les travaux exposés jusqu'ici ont tenté d'apporter une solution, grâce à l'instrument de la taxe (couplé soit avec des transferts forfaitaires soit, avec une activité de dépollution), au problème posé par la pollution que celle-ci ait pour origine la production ou la consommation. Dans la partie qui suit, nous considérons une alternative à la taxe, à savoir, la mise en place d'un marché de droits ou de permis échangeables.

1.4.2 Contrôle de la pollution par les droits ou permis

Les droits de propriété sur l'environnement

Jouvet, Michel et Vidal [2002a] recourent, dans une optique de décentralisation de l'optimum social, à l'instrument des droits de propriété sur l'environnement. Leur objectif consiste, plus précisément, à comparer les deux modes d'appropriation de l'environnement, propriété privée *versus* propriété collective, quant à leur capacité à garantir l'optimalité de l'équilibre concurrentiel[34].

Dans le modèle avec propriété privée de l'environnement, l'autorité publique fixe un volume de droits $\bar{E}$ correspondant au montant maximum de dégradation de l'environnement (ou de pollution). Ces droits ont une durée de vie infinie et sont la propriété des ménages. Ils peuvent être échangés entre les générations successives sur un marché créé

[34] Ce travail est finalement très proche d'une étude antérieure de Crettez, Loupias et Michel [1997] relative au mode d'appropriation des terres.

à cet effet. A chaque période naît un nombre N (normalisé à 1) d'agents identiques. L'agent jeune de la génération t offre inélastiquement une unité de travail aux firmes en échange d'un salaire w_t. Ce salaire est alloué à la consommation c_t, à l'épargne en capital physique s_t et à l'acquisition de droits en quantité e_t (au prix p_t). Il peut louer ses droits aux firmes en contrepartie du versement d'une rente ϕ_t. Retraité, il consomme d_{t+1} l'intégralité de son revenu composé du rendement de l'épargne $R_{t+1}s_t$ et de la vente des droits sur le marché d'échange $p_{t+1}e_t$. Les préférences portent sur ses consommations et sur la pollution présente aux deux périodes de vie : $U^t = U(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})$. Il convient de noter que la pollution est perçue comme une externalité. Son objectif est donné par le programme suivant :

$$\max_{\{c_t, s_t, e_t, d_{t+1}\}} U(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})$$

$$s.c \begin{cases} w_t = c_t + s_t + (p_t - \phi_t)e_t \\ d_{t+1} = R_{t+1}s_t + p_{t+1}e_t \end{cases}$$

Les conditions du premier ordre renvoient à l'arbitrage de consommation sur le cycle de vie ($U_c = R_{t+1}U_d$) et imposent l'égalité du rendement procuré par les deux types d'actifs ($R_{t+1} = p_{t+1}/(p_t - \phi_t)$).

Les firmes produisent le bien final à partir d'une technologie homogène de degré 1 utilisant du travail, du capital et de l'environnement : $Y_t = F(K_t, L_t, E_t)$. Elles maximisent leurs profits en prenant le prix des facteurs comme donné (r_t est le taux de rendement du capital, w_t le taux de salaire et ϕ_t la rente environnementale). L'utilisation de l'environnement dans la production s'apparente à des émissions polluantes et l'évolution du stock est décrite, à chaque période, par : $P_t = E_t + (1-\mu)P_{t-1}$. L'équilibre de cette économie est caractérisé par les conditions d'optimalité des firmes et des ménages, les conditions d'équilibre des marchés ($L_t = 1$, $K_{t+1} = s_t$ et $E_t = e_t = \bar{E}$). Enfin, il est parfaitement défini par la contrainte de ressources de l'économie et la dynamique d'évolution de la pollution.

Dans ce contexte[35], les auteurs prouvent que la propriété privée de l'environnement ne permet pas de décentraliser l'optimum social de long terme. En effet, si les droits de propriété garantissent une évolution optimale de l'environnement (à condition que le quota $\bar{E}$ coïncide avec le niveau d'émission défini par la solution centralisée[36]), il n'en reste pas moins qu'ils constituent un actif environnemental qui détourne une partie de l'épargne productive. Cet effet d'éviction de l'épargne productive se traduit, à long

[35]En fait, toute l'analyse est menée avec le recours à des formes fonctionnelles : l'utilité est log-additive dans la consommation et linéaire dans la pollution, la fonction de production est de type Cobb-Douglas.

[36]L'optimum social, ou règle d'or "verte", correspond à la solution du problème suivant

$$\max_{c,d,E,K} U(c, P, d, P)$$

terme, par le fait que le rendement du capital est supérieur à celui de la règle d'or impliquant, par là-même, une inefficacité dans l'accumulation de capital. Les auteurs montrent alors que la seule politique permettant de décentraliser l'optimum revient à taxer la totalité de la rente environnementale.

Ce constat amène Jouvet, Michel et Vidal [2002a] à considérer plutôt un système de propriété collective de l'environnement. Les droits de propriété deviennent finalement des droits d'usage de l'environnement. Les firmes versent, à chaque période, une rente $\phi_t \bar{E}$ à la collectivité pour l'utilisation de l'environnement. Cette rente est distribuée aux agents privés sous la forme d'un transfert forfaitaire avec η la part de la rente qui échoie aux jeunes. Les contraintes budgétaires deviennent : $w_t = c_t + s_t + \eta\phi_t \bar{E}$ et $d_{t+1} = R_{t+1}s_t + (1-\eta)\phi_{t+1}\bar{E}$. Les agents n'ont plus d'arbitrage à réaliser concernant le support de l'épargne ce qui implique l'absence d'effet d'éviction. Dès lors, il apparaît que l'optimum peut être décentralisé en choisissant la répartition de la rente environnementale de manière optimale. L'instrument η, qui joue finalement le rôle des transferts forfaitaires intergénérationnels dans le modèle de Diamond [1965], est destiné à vérifier la condition de la règle d'or pour le capital.

Jouvet, Michel et Vidal [2002b], à partir du même cadre d'analyse, rompent avec l'approche normative poursuivie par l'étude précédente. En effet, ils s'intéressent plutôt aux répercussions d'une variation du nombre de droits disponibles dans l'économie sur l'accumulation du capital. Pour ce faire, les auteurs se concentrent sur le cas d'une propriété privée de l'environnement. Comme nous l'avons signalé, la propriété privée des droits implique qu'ils constituent un actif financier substituable à l'épargne classique. Ainsi, à l'équilibre concurrentiel, l'accumulation de capital est moindre que celle du modèle de Diamond [1965]. Les auteurs donnent d'abord des conditions d'existence et de stabilité dans le cas général exposé précédemment. Ensuite, ils se focalisent sur les effets d'une variation du quota global $\bar{E}$ sur le niveau de capital à long terme à partir d'un exemple avec une production CES et une utilité logarithmique dans les consommations. Une politique environnementale plus "laxiste", hausse de $\bar{E}$, fait jouer deux effets de sens contraire. Tout d'abord, elle est associée à un effet revenu qui se manifeste par une hausse du salaire et de la rente environnementale et qui implique une augmentation de l'épargne totale. Ensuite, cette hausse modifie la répartition de l'épargne globale entre ses deux supports. Puisque la quantité de permis disponible dans l'économie augmente, elle stimule l'épargne dans l'actif environnemental au détriment de l'épargne classique ce qui ralentit l'accumulation de capital (l'effet d'éviction est plus vigoureux). En résumé, les auteurs prouvent que lorsque les facteurs de pro-

$$s.c \begin{cases} c + d + k = F(k, E) \\ P = E/h \end{cases}$$

duction sont complémentaires, l'effet global d'une hausse du standard d'émission $\bar{E}$ sur le capital stationnaire est positif. Quand, au contraire, il y a suffisamment de possibilité de substitution entre les facteurs, l'effet d'éviction l'emporte et provoque une baisse du stock de capital de long terme.

Les permis négociables

Ono [2002] traite de l'effet d'une politique environnementale plus sévère sur l'accumulation de capital dans une économie polluante soumise, cette fois, à un contrôle de la pollution par un système de permis. La modélisation est rigoureusement identique à celle employée par Ono [2003] exception faite de l'instrument utilisé (et de l'absence d'effet d'apprentissage). Du fait de la distinction droit/permis, il est possible de repérer deux différences essentielles avec les études de Jouvet, Michel et Vidal [2002a&b] bien que la problématique soit proche de la seconde. Ce sont les firmes, et non pas les ménages, qui s'échangent l'actif environnemental. En outre, la durée de vie d'un permis est limitée puisque son utilisation dans la production implique sa destruction.

Dans cette étude, le gouvernement à durée de vie infinie choisit le quota global d'émission $\bar{E}$ qui est réparti entre les firmes. Soit $\bar{E}^i$ la dotation en permis de la firme i. Il existe un marché concurrentiel où les firmes peuvent s'échanger des permis au prix q_t en fonction de leurs besoins. En toute généralité, les firmes maximisent leurs profits étant donné le prix des facteurs : $\pi_t = AK_t^{\alpha_K} L_t^{\alpha_L} E_t^{\alpha_P} - r_t K_t - w_t L_t - q_t(E_t - \bar{E})$ où le terme $E_t - \bar{E}$ représente la demande nette en permis sur le marché. A l'équilibre des firmes, subsiste un profit égal au revenu procuré par la vente de la dotation $\bar{E}$: $\pi_t = q_t \bar{E}$. Ce profit est prélevé par le gouvernement et versé aux jeunes sous forme d'un transfert forfaitaire. Une fois l'équilibre défini, l'auteur mesure les conséquences d'un renforcement de la politique (diminution de $\bar{E}$) sur l'accumulation de capital et la qualité de l'environnement à l'état stationnaire stable pour un quota appartenant à un intervalle prédéterminé $[0, \bar{E}^1]$ (qui correspond à un intervalle d'existence de l'équilibre avec système de permis). Ono [2002] montre qu'une baisse de $\bar{E}$ est défavorable à la fois à l'accumulation de capital et à l'environnement dès que le quota est compris initialement dans un sous-intervalle $[0, \bar{E}^2]$ de l'intervalle d'existence. Ce résultat s'appuie sur le même type de raisonnement en termes d'effets revenu que celui développé dans Ono [2003]. A l'équilibre, une baisse du quota a deux effets revenu négatifs : elle s'accompagne d'une diminution du salaire payé aux jeunes et d'une baisse du revenu procuré par la taxe du profit $q_t \bar{E}$ car les firmes sont dans l'obligation de réduire leurs émissions. Ces deux effets jouent dans le sens d'une baisse du revenu de l'agent jeune ce qui provoque un découragement de l'épargne et de l'activité de dépollution. Par contre, la baisse de $\bar{E}$ tend, d'un autre côté, à améliorer la qualité de l'environnement et les ménages ont donc relativement plus de ressources à allouer à l'épargne. Quand

$\bar{E} \in [0, \bar{E}^2]$, c'est-à-dire quand la politique environnementale est déjà sévère, la renforcer encore implique que les effets négatifs l'emportent et que l'économie subit une détérioration à la fois du capital et de l'environnement à long terme. En particulier, les bénéfices d'une baisse de $\bar{E}$ sur l'environnement sont plus que compensés par la réduction des dépenses de dépollution.

Jouvet, Michel et Rotillon [2005] analysent le comportement d'une économie concurrentielle dans laquelle les émissions polluantes des firmes sont régulées par un système de permis de pollution. Plus précisément, les auteurs se posent la question de savoir s'il est possible de décentraliser la croissance optimale (et pas seulement l'optimum stationnaire) à l'aide de l'instrument permis. Dans ce modèle, la production est définie *à la* Stokey [1998] : $Y_t = z_t F(K_t, L_t)$ où $z_t \in [0, 1[$ représente le type de technologie utilisée et $F(K_t, L_t)$ correspond à l'output potentiel produit à partir d'une fonction de production homogène de degré 1. Les émissions polluantes, qui s'expriment comme une fraction $\varphi(z_t)$ ($\varphi' > 0$, $\varphi'' > 0$) de l'output potentiel : $E_t = \varphi(z_t)F(K_t, L_t)$, contribuent à l'accumulation d'un stock de pollution P_t : $P_t = (1-\mu)P_{t-1} + E_t$. La qualité de l'environnement Q_t est définie comme la différence entre $\bar{Q}$ (le niveau stationnaire d'environnement en l'absence d'activité humaine) et le stock de pollution : $Q_t = \bar{Q} - P_t$. Sa dynamique est par conséquent déduite de celle de la pollution : $Q_t = \mu\bar{Q} + (1-\mu)Q_{t-1} - E_t$.

La population est constante. A chaque période, naît un nombre N d'agents identiques. L'agent jeune consacre une partie l_t de son temps au travail ce qui lui procure un salaire $w_t l_t$. Ce revenu, augmenté d'un transfert ν_t de la part du gouvernement, est alloué à la consommation c_t et à l'épargne s_t. L'agent retraité consomme d_{t+1} la totalité de son revenu constitué du rendement de l'épargne et d'un transfert θ_{t+1} du gouvernement. Un agent né en t retire de l'utilité de la consommation, de l'environnement et du loisir $U^t = U(c_t, 1-l_t, Q_t, d_{t+1}, Q_{t+1})$.

Jouvet, Michel et Rotillon [2005] caractérisent d'abord l'optimum social dynamique. Le problème consiste à choisir l'allocation des ressources entre consommation des jeunes et des retraités et investissement et, le niveau d'utilisation de la technologie et le temps de travail de manière à maximiser la somme actualisée des utilités de toutes les générations sous les contraintes de ressources de l'économie et d'évolution de la pollution :

$$\max_{\{c_t d_t, l_t z_t, k_t, Q_t\}} \sum_{t=-1}^{+\infty} \rho^t U(c_t, 1-l_t, Q_t, d_{t+1}, Q_{t+1})$$

$$s.c \begin{cases} z_t F(k_t, l_t) = c_t + d_t + k_{t+1} - (1-\delta)k_t \\ Q_t = \mu\bar{Q} + (1-\mu)Q_{t-1} - \varphi(z_t)F(k_t, l_t) \end{cases}$$

avec $k_t = K_t/N$ le capital par tête et δ le taux de dépréciation du capital.

Pour une solution intérieure ($z_t < 1$), les conditions d'optimalité sont au nombre de quatre et concernent l'arbitrage de consommation entre les générations ($U_d^{t-1} = \rho U_c^t$), l'arbitrage de consommation sur le cycle de vie ($U_c^t = (1 - \delta + \psi(z_{t+1})F_k)U_d^t$ avec $\psi(z) = z - \varphi(z)/\varphi'(z) > 0$), l'arbitrage entre consommation et loisir ($U_{1-l}^t = U_c^t \psi(z_t) F_l$) et, enfin, l'arbitrage entre consommation et qualité de l'environnement[37].

Après avoir défini la croissance optimale, les auteurs s'intéressent à l'équilibre décentralisé avec système de permis. L'agent représentatif maximise son utilité sous ses contraintes budgétaires en prenant la qualité de l'environnement comme donnée. Les deux conditions du premier ordre décrivent l'arbitrage de consommation sur le cycle de vie ($U_c^t = R_{t+1} U_d^t$) et l'arbitrage consommation-loisir ($U_{1-l}^t = w_t U_c^t$).

La politique environnementale consiste à fixer une norme de pollution $\bar{E}_t$ à chaque période. Une partie $\bar{E}_t^f$ de ce quota est distribué gratuitement aux firmes tandis que le reste est vendu sur le marché des permis au prix q_t. Les firmes, détentrices du capital K_t, maximisent leurs profits étant donné le taux de salaire w_t et le prix des permis :

$$\max_{z_t L_t} \pi_t = z_t F(K_t, L_t) - w_t L_t - q_t(E_t - \bar{E}_t^f)$$

$$s.c \; E_t = \varphi(z_t) F(K_t, L_t)$$

avec $E_t - \bar{E}_t^f$ la demande nette en permis.

On obtient deux conditions du premier ordre : $z_t = \varphi^{-1}(q_t) = z(q_t)$ et $w_t = (z(q_t) - \varphi(z(q_t))F_L = m(q_t)F_L$. Les profits sont redistribués aux capitalistes sachant que l'expression du profit moyen est donnée par : $\pi_t / K_t = m(q_t)F_K + q_t^f \bar{E}t / K_t = R_t - 1 + \delta$ (la propriété néoclassique d'égalité entre le rendement du capital et sa productivité marginale n'est donc plus satisfaite). L'équilibre est alors caractérisé par les conditions de la maximisation des profits, les conditions d'arbitrage du consommateur, les conditions d'équilibre des marchés ($Nl_t = L_t$, $K_t = Ns_{t-1}$ et $E_t = \bar{E}_t$), et la contrainte de budget du gouvernement ($q_t(E_t - \bar{E}_t^f) = N(\nu_t + \theta_t)$ où $q_t(E_t - \bar{E}_t^f)$ représente le revenu procuré par la vente de permis aux firmes). Dans ce contexte, Jouvet, Michel et Rotillon [2005] montrent que si la politique de quota $\{\bar{E}_t\}$ est optimale, alors la décentralisation de la croissance optimale nécessite notamment de ne donner aucun permis aux firmes, soit, $\bar{E}_t^f = 0$. En effet, l'allocation gratuite en permis revient finalement à accorder une subvention à la production qui modifie le rendement du capital et provoque des distorsions au niveau de son accumulation. Ce résultat participe au débat concernant la question de savoir s'il est préférable d'allouer gratuitement les permis aux firmes ou bien de les mettre aux enchères. Ici, la contribution des auteurs consiste clairement à

[37] Cette condition

$$U_c^t \frac{1}{N\varphi'(z_t)} = \frac{1-h}{N\varphi'(z_{t+1})} \rho U_c^{t+1} + U_Q^t + \frac{1}{\rho} U_Q^{t+1}$$

traduit l'égalisation, par le planificateur, des coûts et bénéfices liés à une hausse de l'indice d'utilisation de la technologie z_t.

montrer que donner des permis aux firmes n'est pas efficace dans une perspective de maximisation du bien-être.

Au delà de la régulation de la pollution par les pouvoirs publics, la question se pose de savoir si l'altruisme des agents pourrait constituer une solution à l'internalisation des externalités environnementales intergénérationnelles.

1.4.3 L'altruisme, une solution à l'inefficacité de l'équilibre ?

Une hypothèse comportementale alternative : l'altruisme

Un autre attrait du modèle à générations imbriquées est de pouvoir opposer le comportement de deux types d'agents : *i/* les agents égoïstes qui ne se préoccupent que de leur bien-être (hypothèse comportementale employée jusqu'à présent) et *ii/* les agents altruistes qui s'intéressent à la situation de leur descendance. Dans le cadre d'un modèle avec environnement, on peut *a priori* penser que l'introduction d'un lien de filiation entre les générations est un moyen de remédier à la non optimalité de l'équilibre concurrentiel.

La manière la plus répandue de modéliser l'altruisme consiste à supposer que les préférences d'un agent admettent comme argument l'utilité de son descendant. On parle alors d'altruisme dynastique *à la* Barro [1974]. Chaque lignée de descendants se comporte comme un agent à durée de vie infinie qui maximise la somme actualisée des utilités présente et futures, le facteur d'actualisation coïncidant alors avec le degré d'altruisme. Nous pouvons également signalé qu'il existe deux autres approches pour la modélisation de l'altruisme. Le second type d'altruisme, dit altruisme familial, a été introduit récemment dans l'étude de Lambrecht, Michel et Vidal [2005]. Ce concept se distingue du précédent dans la mesure où les agents ne se préoccupent pas de l'utilité mais plutôt de la richesse dont disposeront leurs descendants directs (qui entre comme argument dans la fonction d'utilité). Howarth et Norgaard [1995], à partir d'une extension de Howarth et Norgaard [1992], introduisent enfin une troisième forme d'altruisme en modifiant la structure démographique de la population. L'agent est en fait un couple qui donne naissance, en fin de première période, à deux enfants. Une fois adulte, ceux-ci forment un nouveau ménage avec les enfants d'autres familles. Cette modélisation suppose donc que la structure dynastique de la population est perdue car les familles ne sont plus indépendantes. Dans ce contexte, l'altruisme se manifeste par la possibilité, pour les ménages retraités, d'effectuer un transfert à chacun de ses enfants.

Afin d'illustrer le rôle et les limites de l'altruisme dans un modèle à générations imbriquées avec environnement, nous présentons la contribution de Jouvet, Michel et Vidal [2000].

Altruisme et externalités environnementales

Jouvet, Michel et Vidal [2000] introduisent l'hypothèse d'altruisme dynastique *à la* Barro [1974] dans un modèle à générations imbriquées où opèrent des externalités de pollution. Dans leur étude, les agents privés se préoccupent du bien-être de leur descendance. Ils peuvent contribuer à celui-ci grâce à deux types de legs : un legs financier classique x_t et un legs "environnemental" qui consiste à engager des dépenses de dépollution m_t enfin d'améliorer la qualité de l'environnement dont disposeront les générations futures. La pollution provient de la production et s'accumule selon la dynamique suivant : $P_t = aY_t - bNm_t + (1-\mu)P_{t-1}$. La population est constante ; à chaque période naissent N agents identiques qui forment une génération. Un agent jeune dispose d'un revenu composé du salaire w_t et d'un legs financier x_t. Ce revenu est alloué à l'épargne. Retraité, son revenu, provenant du rendement de l'épargne, se répartit entre consommation d_{t+1}, legs financier x_{t+1} et dépense de dépollution m_{t+1}. Ses préférences portent sur la consommation, la pollution et l'utilité de sa descendance : $V_t = U(d_{t+1}, P_{t+1}) + \gamma V_{t+1}$ avec $\gamma \in (0,1)$ le degré d'altruisme. Les agents privés font face au problème suivant :

$$\max_{s_t, d_{t+1}, x_{t+1}, m_{t+1}} U(d_{t+1}, P_{t+1}) + \gamma V_{t+1}$$

$$s.c \begin{cases} x_t + w_t = s_t \\ d_{t+1} + x_{t+1} + m_{t+1} = (1 + r_{t+1})s_t \\ P_{t+1} = aY_{t+1} - bm_{t+1} - bM_{t+1}^{-1} + (1-h)P_{t-1} \end{cases}$$

où m_{t+1} représente la contribution individuelle au bien public (à la dépollution) et M_{t+1}^{-1} la contribution de l'ensemble des autres agents considérée comme donnée. Autrement dit, la décision de dépollution est formée sur la base d'un comportement Nash non coopératif. L'agent est donc altruiste vis à vis de sa descendance mais égoïste avec ses contemporains.

L'étude de ce modèle révèle que, même en l'absence de legs financier direct, l'altruisme joue sur l'équilibre par le biais de son influence sur le choix de contribuer au bien public car, lors de la prise de décision, les agents intègrent l'effet positif de la dépollution sur le bien-être de leur descendance. Toutefois, l'équilibre concurrentiel reste, malgré l'altruisme, sous-optimal dans la mesure où les agents privés ignorent l'effet positif de leur contribution sur le bien-être de leurs contemporains et ne tiennent pas compte, non plus, de l'effet néfaste de l'accumulation de capital, et de la pollution qui en découle, sur le bien-être. Deux instruments sont finalement proposés pour corriger ces deux externalités : une subvention à la dépense m pour obtenir un niveau de dépense de dépollution efficace et, une taxe sur le rendement du capital afin d'égaliser rendement privé et rendement social.

1.4.4 Résumé

L'enseignement principal tiré du modèle à générations imbriquées avec environnement est clair : l'équilibre concurrentiel est inefficace en raison de l'incapacité des agents à mesurer les répercussions de long terme de leurs décisions[38]. Il est possible d'illustrer ce résultat en se référant aux études qui supposent que la pollution provient de la consommation. Les agents polluent sans se soucier des incidences sur le bien-être des générations qui leur succèderont et, quand bien même ils ont la possibilité de consacrer une partie de leurs ressources à des dépenses de dépollution, cet effort est insuffisant au regard de la qualité de l'environnement léguée au futur.

Cette spécificité du modèle à générations imbriquées en fait un outil complémentaire du modèle à agent à durée de vie infinie en particulier, dans la perspective de l'analyse des moyens d'internalisation des externalités environnementales. La problématique ayant trait à la compatibilité des objectifs de croissance et de préservation de l'environnement, centrale dans la littérature de la croissance endogène, est moins présente ici à l'exception des travaux d'Ono [2003] et Michel [1993]. Ce dernier, en postulant les conditions d'une croissance illimitée, souligne la convergence éventuelle vers un paradis écologique.

Concernant les moyens de régulation à proprement parler, cette littérature offre un éventail assez large des instruments à la disposition du régulateur pour corriger les insuffisances de l'équilibre décentralisé. La mise en place d'un système de taxe destiné à valoriser l'utilisation des ressources environnementales, éventuellement associé à des transferts intergénérationnels et des dépenses de dépollution, est une solution permettant d'atteindre l'optimum social. Toutefois, une telle intervention, pour être efficace, ne peut relever de la compétence d'un gouvernement à courte durée de vie mais doit plutôt échoir à une sorte de planificateur immortel (John *et al.* [1995]). De même, si ce système est garant d'une certaine efficience économique, il n'est pas pour autant synonyme d'équité intergénérationnelle (Howarth et Norgaard [1992]).

La comparaison entre la taxe et les droits de propriété soulève le problème posé par l'appropriation de l'environnement. Elle provoque un effet d'éviction de l'épargne classique et une moindre accumulation de capital (Jouvet, Michel et Vidal [2002a]). L'étude de Jouvet, Michel et Rotillon [2005] contribue, quant à elle, à la discussion sur les difficultés posées par une régulation grâce aux marchés de permis négociables et, plus particulièrement, souligne les inefficacités qu'induit une allocation gratuite des permis aux firmes.

Enfin, l'abandon de l'hypothèse comportementale d'agents égoïstes au profit de l'al-

[38]Le résultat d'inefficacité vaut tout aussi bien en l'absence d'environnement et provient de l'hypothèse de cycle de vie qui engendre des régimes de suraccumulation du capital. Toutefois, l'introduction de la dimension environnementale renforce cette propriété d'inefficience.

ternative offerte par l'altruisme est insuffisante pour internaliser toutes les externalités environnementales (Jouvet, Michel et Vidal [2000]).

Dans ces trois premières sections, nous nous sommes intéressés à l'effet de l'introduction de l'environnement dans les modèles de croissance et, avons notamment détaillé les contributions de la théorie de la croissance endogène à la problématique du développement durable. Parallèlement à ces travaux, une littérature s'est développée, au milieu des années 90, avec la volonté d'étudier la relation entre croissance et environnement lors du sentier de transition de l'économie. L'émergence de cette littérature a correspondu au développement d'analyses empiriques estimant la relation entre le revenu des pays et la qualité de l'environnement. Sa finalité est de fournir, à partir notamment des instruments fournis par la théorie de la croissance, des fondements théoriques à la relation communément nommée Courbe de Kuznets environnementale.

1.5 La courbe de Kuznets environnementale

Dans cette section, nous donnons d'abord un bref aperçu des résultats empiriques détectant la courbe de Kuznets environnementale et des principales explications qui ont été avancées pour justifier son existence. Nous nous focalisons ensuite sur les développements, apportés à cette littérature, s'appuyant sur la théorie de la croissance. Enfin, nous abordons les limites de cette notion en mettant essentiellement l'accent sur la notion d'irréversibilité des dommages environnementaux. L'objectif de cette section n'est pas de faire une revue exhaustive des littératures, empirique et théorique, sur la courbe de Kuznets environnementale mais plutôt d'évaluer l'apport et les limites de la contribution de la théorie de la croissance au débat existant autour de cette notion.

1.5.1 Evidence empirique et facteurs explicatifs

L'évidence empirique

Au début des années 1990, un certain nombre de travaux empiriques ont cherché à estimer la relation entre croissance économique et pollution (World Bank Report [1992], Holtz-Eakin et Selden [1992], Grossman et Krueger[1993], [1995], Selden et Song [1994]). La méthodologie employée par ces études économétriques est commune. Elle consiste à régresser un indicateur de pollution (p_{it}) sur une mesure (x_{it}) du revenu d'une nation, les données utilisées étant essentiellement des données croisées pour différents pays. Typiquement, ces travaux recourent à une forme réduite quadratique (ou cubique) du type suivant :

$$p_{it} = \alpha_i + \beta_1 x_{it} + \beta_2 x_{it}^2 + \beta_3 z_{it} + \varepsilon_{it}$$

où z_{it} inclut toutes les autres variables influençant la pollution et, où les indices i et t représentent respectivement un pays et une période.

Le résultat majeur de ces estimations est la détection d'une relation en forme de U inversé (avec la combinaison $\beta_1 > 0$ et $\beta_2 < 0$) entre le revenu par tête et la concentration de certains polluants de l'air (comme le SO_2, le CO ou le NO_x) et de l'eau (le nitrate, certains métaux lourds, ou les contaminants fécaux). Une représentation de cette relation, communément nommée courbe de Kuznets environnementale (CKE), est donnée par la figure 1.1[39]. L'intuition qui sous-tend l'émergence de la CKE est délivrée par Dasgupta *et al.* [2002]. Selon ces auteurs : *"In the first stage of industrialization, pollution in the environmental Kuznets curve world grows rapidly because people are more interested in jobs and income than clean air or water, communities are too poor to pay for abatement, and environmental regulation is correspondingly weak. The balance shifts as income rises. Leading industrial sectors become cleaner, people value the environment highly, and regulatory institutions become more effective"*.

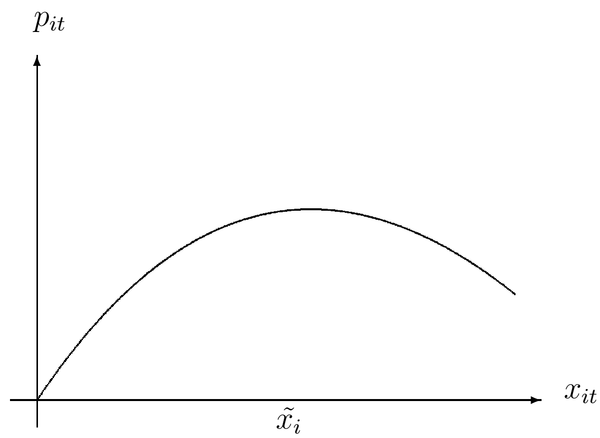

FIG. 1.1 – La courbe de Kuznets environnementale

Ces travaux ont impulsé des développements importants autour de la notion de CKE aussi bien dans les disciplines empiriques que théoriques. Dans la littérature empirique (voir Stern [1998] pour une revue détaillée), comme le soulignent Copeland et Taylor [2003], les contributions ultérieures ont principalement cherché soit à confirmer, soit à infirmer l'existence d'une telle relation en complétant les estimations précédentes avec de nouvelles variables explicatives (comme un indice de l'inégalité de revenu, de démocratie...), en tentant de la valider pour d'autres variétés de polluants, ou bien encore, en testant le robustesse des résultats fondateurs, notamment aux données utilisées.

Trois enseignements essentiels peuvent être tirés de cette littérature foisonnante. Tout d'abord, si la CKE semble effectivement valable pour les polluants précités, dans

[39]En références aux travaux antérieurs de Kuznets et Simon [1955] qui avaient révélé l'existence de ce type de relation entre les inégalités de revenu et la croissance d'une nation.

certaines études (qui utilisent une forme réduite cubique), le U inversé est suivi d'une phase de croissance de la pollution : la relation a alors une représentation en forme de N. Ensuite une seconde constatation concerne la nature des polluants pour lesquels cette relation est valide : ce sont principalement des polluants qui ont une durée de vie limitée et dont les effets opèrent au niveau local. A l'inverse, les polluants stocks (comme le CO_2), dont les répercussions sont globales et de long terme, croissent de manière monotone avec le revenu (les exceptions sont Carson *et al.* [1997], Schmalensee *et al.* [1998] qui détectent une CKE pour le CO_2). Enfin, d'un point de vue purement méthodologique, Stern [2003], en pointant la faiblesse économétrique de la majorité de ces études (existence d'un biais dû à l'omission de variables, problème de causalité...), émet clairement une réserve quant à la robustesse des résultats voire à l'existence même d'une telle relation (Perman et Stern [2003]). En résumé, la CKE est une notion à manipuler avec précaution et ne peut en aucun cas être interprétée comme une représentation globale de la relation entre croissance et qualité de l'environnement puisqu'elle est détectée seulement pour un nombre restreint de polluants (les plus facilement observables, connus et contrôlés). De même, la nature des données employées par les études empiriques n'est pas la garantie que les pays, à titre individuel, suivront cette trajectoire de développement estimée (de Bruyn *et al.* [1998]).

Fondements théoriques

La notion de CKE, sa pertinence et ses implications, est la source d'un débat intense qui oppose la communauté des économistes[40]. Malgré tout, une littérature conséquente s'est développée avec la volonté de fournir des explications à ce fait stylisé. Plusieurs arguments ont été avancés (voir Dinda [2004] pour une revue complète) au premier rang desquels figure le rôle joué par :

- l'élasticité revenu de la demande d'environnement,
- l'interaction entre les effets d'échelle, de composition et technique associés au processus de croissance,
- la régulation des activités polluantes et la nature des institutions,
- le commerce international.

Elasticité revenu de la demande : selon ce premier argument, avec la croissance du revenu, les agents atteignent un meilleur niveau de vie et accordent une plus grande importance à l'environnement dans lequel ils évoluent (Selden et Song [1994]). Cette valorisation supérieure de l'environnement implique une demande accrue en faveur de mesure de contrôle de la pollution et favorise l'amélioration de la qualité de l'environnement dans les pays à hauts revenus. L'hypothèse associée est une élasticité

[40]Nous reviendrons sur cette discussion dans la section 1.5.3.

revenu de la demande supérieure à l'unité ce qui revient à attribuer à un environnement préservé une caractéristique de bien supérieur. Toutefois, cette explication se heurte au constat selon lequel bon nombre d'indicateurs de la dégradation de l'environnement exhibent une relation monotone croissante avec le revenu. Reste qu'elle semble valable pour les polluants dont les dommages sont connus et perceptibles comme les émissions de monoxyde de carbone (CO) et leurs conséquences sur la qualité de l'air des grandes agglomérations (Brock et Taylor [2004]).

Effets d'échelle, de composition et technique : la seconde explication se fonde sur une décomposition de la manière dont la croissance affecte l'environnement en trois effets (Grossman et Krueger [1993]). L'effet d'échelle implique, toutes choses égales par ailleurs, qu'une hausse de l'activité engendre comme produit fatal une hausse de la pollution. L'effet de composition joue à deux niveaux. D'abord, la croissance économique s'accompagne inévitablement d'un modification de la structure de l'output : le développement démarre par une économie agricole "naturelle" qui se mue en économie industrielle polluante pour finir en économie de services respectueuse de l'environnement. Ensuite, une explication complémentaire est l'existence d'un changement dans la combinaison des inputs utilisés (Copeland et Taylor [2003]). Selon cette idée, le retournement de la relation entre croissance et environnement provient du remplacement de technologies employant principalement du capital physique polluant par des technologies utilisant plutôt du capital humain économe en environnement. L'effet technique, quant à lui, confère un rôle majeur au progrés technique (et à la politique de promotion de la R&D), induit par la croissance économique, qui permet le remplacement des technologies polluantes et obsolètes par des technologies nouvelles et conçues pour réduire le niveau d'émission (Thomson et Sholm [1996])[41].

La régulation et la nature des institutions : La régulation, ou l'absence de régulation, est un troisième argument fréquemment énoncé. La hausse de la pollution dans les pays à bas revenus proviendrait d'une régulation environnementale insuffisante voire inexistante. C'est avec le développement économique que les pays connaissent une modernisation de leurs institutions essentielle à l'instauration de standards environnementaux efficaces. Selon Jones et Manuelli [2001], la pollution implique la présence d'externalités qui ne peuvent être internalisées que par des institutions politiques avancées, or, ces institutions n'existent que dans les pays développés. Bohm et Deacon [2000] expliquent la partie croissante (resp. décroissante) de la courbe par l'absence (resp.

[41] Au final, la CKE s'explique par la prédominance du premier effet dans les premiers stades de développement tandis que les deux autres sont prépondérants dans les phases plus avancées (voir les contributions de Gale et Mendez [1998] ou Hilton et Levinson [1998] qui, à partir d'analyses empiriques, illustrent l'importance de ces différents effets).

l'existence) de droits de propriété sur l'environnement dans les pays à bas (resp. hauts) revenus. On pourrait aussi faire référence au rôle des Organisations Non Gouvernementales qui, en participant à la sensibilisation du grand public, peuvent contraindre les pouvoirs publics à adopter de réelles mesures de protection de l'environnement (notion de lobbying informel développée par Yu [2005]) mais leur efficacité suppose une liberté d'expression et d'action qui existe seulement dans les régimes démocratiques.

Le libre échange : le commerce international a également un effet évident sur la relation entre croissance et environnement. D'abord, puisque le libre échange implique, *ceteris paribus*, un surcroît d'activité (développement des exportations), il s'associe à un effet d'échelle défavorable à l'environnement. Ensuite, le constat selon lequel le changement des structures de production n'a pas été suivi d'un changement des structures de consommation dans les pays développés (Arrow *et al.* [1995]) témoigne d'une autre évidence concernant les facteurs explicatifs de la CKE. Sa partie décroissante pourrait résulter d'un phénomène, rendu possible par l'ouverture des frontières, de déplacement des industries polluantes des économies développées vers les économies en voie de développement (Suri et Chapman [1998]). La justification de ce déplacement est l'adoption de standards environnementaux plus contraignants chez les premiers qui implique que les seconds, plus permissifs, deviennent un refuge pour ces industries. La CKE pourrait donc provenir d'un changement de spécialisation internationale caractérisée par la mutation des PVD en exportateurs net des biens intensifs en pollution. Chichilniski [1994] montre qu'ils n'ont en fait qu'un avantage comparatif fictif dans ces productions qui provient justement de l'absence, ou d'une mauvaise définition, des droits de propriété sur l'environnement. Par ailleurs, il est évident que ce processus de fuite des industries polluantes ne pourra être répliqué indéfiniment.

Parmi les autres arguments notables, Andreoni et Levinson [2001] montrent, à partir d'un modèle statique, que la courbe de Kuznets pourrait simplement provenir de l'existence de rendements croissants dans les activités de dépollution. L'existence d'effets de seuil est également une explication fréquemment donnée. Celle-ci a essentiellement été l'objet d'un développement dans les modèles de croissance qui constituent un cadre d'analyse dynamique approprié à la génération de ces effets de seuil. La sous-section suivante est consacrée à l'exposé des contributions principales à cette littérature et de quelques-unes de leurs extensions.

1.5.2 CKE : l'apport de la théorie de la croissance

Trois articles font références dans chacune des branches qui forment la théorie de la croissance : John et Pecchenino [1994] pour les générations imbriquées, Selden et Song

[1995] pour la croissance néoclassique et Stokey [1998] pour la croissance endogène. Nous présentons ces travaux dans le détail.

Croissance néoclassique

Selden et Song [1995] proposent simplement de reprendre le modèle de Forster [1973] afin d'illustrer la possibilité d'avoir une CKE liant la croissance à la pollution. Dans le modèle de Forster [1973], le polluant flux est un produit fatal de la production ($Y(t) = F(K(t))$) dont la concentration peut être réduite par des dépenses de dépollution $D(t)$: $E(t) = E(K(t), D(t))$ avec $E_K > 0$ et $E_D < 0$. Les auteurs relâchent l'hypothèse qui permettait à Forster [1973] d'exclure la solution de coin $E = 0$ ($\lim_{D \to 0} E_D = -\infty$) et, ce choix n'est évidemment pas neutre pour l'analyse de la CKE. Les préférences dépendent de la consommation et le flux de pollution est dommageable : $U_t = U(C(t), E(t))$. Le problème du planificateur social consiste à choisir la suite $\{C(t), D(t)\}$ qui maximise la somme actualisée des utilités sous les contraintes de ressources et d'évolution de la pollution :

$$\max_{\{C(t),D(t)\}} \int_0^{+\infty} U(C(t), E(K(t), D(t))) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{K}(t) = F(K(t)) - \delta K(t) - C(t) - D(t) \\ D(t) \geq 0 \end{cases}$$

Les conditions du premier ordre permettent de définir la dynamique et de donner les conditions d'existence et de stabilité (point selle) d'un équilibre. Les auteurs caractérisent ensuite, dans le plan (K, C), la frontière $\tilde{D}(K, C)$ constituée de l'ensemble des points où l'économie est indifférente entre le fait d'engager ou pas des dépenses de dépollution. En deçà de cette frontière, la dépollution est nulle car le bénéfice marginal d'une hausse de D (diminution de la pollution et du dommage) est inférieur à son coût (mesuré en termes de la baisse de l'investissement et de la consommation). Dès lors, si l'économie démarre dans cette zone, la pollution est d'abord croissante avec l'accumulation de capital. Par contre, dès que l'économie atteint un niveau seuil de richesse et/ou de pollution, c'est à dire, dès qu'elle franchit le frontière[42], la dépollution devient opérante. Dans ce cas, sous certaines conditions[43], la pollution décroît avec l'accumulation de capital durant cette seconde phase. Ainsi, les auteurs montrent que le modèle de Forster [1973], à condition d'étudier la solution de coin, peut exhiber une courbe en forme de U inversé liant l'accumulation de capital et la pollution lors de la dynamique

[42]ce qui se produira d'autant plus rapidement que l'impact de la production sur les émissions est fort de même que la désutilité de la pollution.

[43]Ces conditions exigent notamment que l'"efficacité" marginale de la dépollution E_D soit élevée . Il suffit, par exemple, d'avoir des rendements constants dans l'activité de dépollution.

de transition vers l'état stationnaire. Cette possibilité se base sur un changement de régime concernant les dépenses de dépollution.

Kelly [2003] s'intéresse également à la nature de la relation entre croissance et environnement lors de la transition vers l'état stationnaire d'un modèle de croissance optimale avec pollution (en temps discret). Dans ce contexte, l'auteur se demande notamment comment varie cette relation selon le type de mesure de la pollution retenu : les émissions polluantes (le flux), la concentration du polluant (le stock) ou encore le contrôle de la pollution. Ainsi, contrairement à l'étude précédente, il ne se borne pas à une mesure de la pollution en tant que flux puisqu'il intègre aussi la possibilité d'accumulation de ce polluant. Pour répondre à la question posée, Kelly [2003] considère un stock de pollution P_t qui s'accumule au gré des émissions E_t et qui est partiellement assimilé, à chaque période, par la nature : $P_{t+1} = E_t + (1-\mu)P_t$. Les émissions sont un produit fatal de la production $E_t = \alpha F(K_t)$ mais peuvent être réduites d'une fraction u_t à condition d'engager une dépense $\Omega(u_t)$ proportionnelle à l'output. Ainsi, cette dépense vient réduire le revenu brut $q_t = F(K_t)$ et le revenu net s'écrit $Y_t = (1-\Omega(u_t))F(K_t)$. La fonction d'utilité dépend de la consommation et de la qualité de l'environnement $U(C_t, Q_t)$ qui est définie comme l'opposée du stock de pollution $Q_t = -P_t$.

L'étude de ce modèle révèle que la nature de la relation entre accumulation de capital et pollution repose une nouvelle fois sur une analyse coût/bénéfice concernant l'effort de dépollution. En faisant l'hypothèse que l'environnement est un bien normal et en imposant la convexité de la fonction de coût, il apparaît qu'il est possible d'observer une relation croissante, décroissante ou en forme de U inversé entre le revenu et la pollution. En particulier, la CKE s'obtient grâce à des restrictions sur les paramètres de la fonction de coût et de la loi d'évolution de la pollution[44]. Enfin, l'auteur confirme son intuition selon laquelle la forme de cette relation varie effectivement en fonction du type de mesure de la pollution considéré. En effet, une étude numérique révèle que la relation entre croissance et environnement suit une courbe en forme de U inversé lorsque la mesure de la pollution correspond au flux de pollution, c'est-à-dire, aux émissions polluantes. Par contre, cette relation est monotone croissante dès qu'on considère plutôt le stock de pollution. Ses résultats sont donc plutôt conformes à l'évidence empirique.

Croissance endogène

Stokey [1998] se pose la question de savoir sous quelles conditions il est possible de générer théoriquement la courbe de Kuznets. Elle aborde ce problème successivement dans un modèle statique, dans un modèle AK et, dans deux modèles intégrant du progrès technique exogène (avec polluant flux puis polluant stock). Nous

[44] De telle sorte que la fonction de coût soit fortement convexe et la décroissance de la pollution soit relativement lente, ces deux conditions jouant sur le coût marginal de la pollution.

présentons ici la version du modèle AK en signalant que le déterminant fondamental de la relation entre croissance et environnement est déjà contenu dans le modèle statique. L'auteur considère une technologie particulière où l'output total est le produit de l'output potentiel $q(t) = AK(t)$ et d'un indice d'utilisation de la technologie $z(t) \in [0,1[$: $Y(t) = z(t)AK(t)$. Le flux de pollution est proportionnel à l'output potentiel et le ratio émissions/output est déterminé par une fonction croissante, convexe du degré d'utilisation de la technologie : $E(t) = z(t)^{\beta}AK(t)$ avec $\beta > 1$. L'indice $z(t)$ reflète finalement le caractère polluant de la technologie de production utilisée. Lorsque $z(t) = 1$, l'output réel s'identifie à l'output potentiel mais, est produit grâce à la technologie la plus polluante. Le flux de pollution affecte l'utilité des agents $U(C(t), E(t)) = C(t)^{1-1/\sigma}/(1-1/\sigma) - \phi E(t)^{\gamma}/\gamma$[45]. Le problème du planificateur social s'écrit :

$$\max_{\{C(t),z(t)\}_{t=0}^{\infty}} \int_0^{\infty} \left(\frac{C(t)^{1-1/\sigma} - 1}{1-1/\sigma} - \frac{\phi}{\gamma} E(t)^{\gamma} \right) \exp^{-\rho t}\, dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{K}(t) = z(t)AK(t) - C(t) - \delta K(t) \\ E(t) = z(t)^{\beta}AK(t) \\ z(t) \in [0,1[,\ K(0) \text{ donné} \end{cases}$$

Dans ce contexte, l'obtention de la CKE nécessite d'imposer une restriction sur les préférences et plus particulièrement sur l'élasticité intertemporelle de substitution, à savoir, $\sigma < 1$ (effet de satiété de la consommation). En fait, tout repose sur un arbitrage entre coût et bénéfice de la dépollution. Dans les premières étapes du développement, le coût de la dépollution excédant son bénéfice, l'économie choisit de ne pas mener de politique environnementale ($z = 1$) et la pollution augmente avec le revenu. Au fur et à mesure que la richesse croît, l'économie atteint et dépasse un niveau critique de revenu au delà duquel l'incitation à combattre la pollution est suffisamment forte pour qu'elle s'engage dans la régulation de la pollution. Si $\sigma < 1$ alors, avec la croissance de l'output potentiel, le bénéfice marginal d'une hausse de la pollution (lié à l'augmentation de la consommation) devient insuffisant relativement à son coût (mesuré par le dommage environnemental) et la pollution décroît avec le revenu. Au final, on observe une relation en forme de V inversé entre pollution et capital qui provient d'un changement de régime quant au type de technologie utilisé ($z = 1$ puis $z < 1$ et décroissant). Toutefois, il apparaît que la croissance équilibrée n'est plus optimale puisque la décroissance du standard d'émission z s'accompagne inévitablement d'une baisse du rendement du capital. L'incitation à investir s'affaiblit peu à peu jusqu'à un certain point où elle devient nulle, l'économie converge alors vers un état stationnaire. L'introduction du

[45] Cette fonction d'utilité traduit notamment le fait qu'avec l'accroissement de la consommation, les agents sont disposés à renoncer à une fraction plus grande de leur revenu pour une réduction donnée du niveau de pollution.

progrès technique exogène restaure la possibilité d'une croissance soutenue compatible avec une qualité de l'environnement non décroissante.

Stokey [1998] délivre également une analyse comparative des instruments de marché (taxe et permis) et des instruments de régulation directe quant à leur capacité à décentraliser l'optimum social. En l'absence de régulation, les firmes utilisent toujours la technologie la plus polluante ($z = 1$) car elles ne tiennent pas compte des répercussions de la pollution qu'elles émettent sur le bien-être des consommateurs. De même, l'épargne est trop élevée car les agents ignorent l'effet de l'accumulation du capital sur la pollution. Pour remédier à ces inefficacités, l'auteur considère d'abord la mise en oeuvre d'une politique de taxation des émissions, selon l'instrument τ, dont les recettes sont reversées forfaitairement aux ménages. Le problème de l'agent représentatif donne deux conditions du premier ordre : $C(t)^{-1/\sigma} = \Lambda(t)$ et $\dot{\Lambda}(t) = (\rho + \delta - r(t))\Lambda(t)$ avec $\Lambda(t)$ la variable adjointe du capital. La maximisation des profits ($\pi(t) = z(t)AK(t) - r(t)K(t) - \tau z(t)^{\beta}AK(t)$) permet d'obtenir l'expression du taux d'intérêt : $r(t) = Az(t)(1 - \tau z(t)^{\beta-1})$. Le taux de taxe qui décentralise l'optimum est déterminé par la comparaison des conditions d'équilibre avec les conditions d'optimalité[46] :

$$\tau^* = \begin{cases} \frac{\phi(AK^*(t))^{\gamma-1}}{\lambda^*(t)} & \text{si } z^*(t) = 1 \\ \frac{z(t)^{*1-\beta}}{\beta} & \text{si } z^*(t) < 1 \end{cases}$$

L'expression de la taxe est conditionnée au fait de savoir s'il est optimal ou non d'adopter un standard d'émission plus sévère ($z^*(t) \leqq 1$). Il est intéressant de noter que la taxe est opérante même en l'absence de régulation de la pollution ($z^*(t) = 1$). En effet, l'instrument de la taxe permet non seulement de s'assurer de l'adéquation entre le standard z adopté par les firmes et le standard optimal z^* mais aussi, de réduire l'accumulation de capital par un découragement de l'investissement (de par l'influence de la taxe sur le taux de rendement du capital). L'auteur montre ensuite qu'un système de permis consistant à vendre aux firmes un volume de permis de pollution $E^*(t)$ est également un moyen de décentraliser l'optimum de premier rang. En effet, le prix des permis s'établit au niveau de la taxe et les deux systèmes sont équivalents. Par contre, une régulation directe basée sur l'imposition du standard z^* est une intervention inefficace car, si elle garantit bien évidemment l'utilisation du standard optimal par les

[46] qui sont données par les équations suivantes : $C(t)^{-1/\sigma} = \lambda(t)$,

$$z(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \lambda(t) \geq \beta\phi(AK(t))^{\gamma-1} \\ (\lambda(t)/\beta\phi(AK(t))^{\gamma-1})^{\frac{1}{\beta\gamma-1}} & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\frac{\dot{\lambda}(t)}{\lambda(t)} = \begin{cases} \rho - A + \frac{\phi(AK(t))^{\gamma-1}}{\lambda(t)} & \text{si } \lambda(t) \geq \beta\phi(AK(t))^{\gamma-1} \\ \rho - A(1 - 1/\beta)z(t) & \text{sinon} \end{cases}$$

avec $\lambda(t)$ la variable adjointe du capital.

firmes, elle provoque des distorsions sur le marché du capital (le rendement du capital vaut alors $r(t) = Az(t)^*$ et ne correspond plus à son équivalent à l'optimum) qui se traduisent par une épargne des ménages et une accumulation de capital sous-optimales.

Hartman et Kwon [2005] développent le même type d'approche à partir d'une extension du modèle de Lucas [1988]. Ils proposent d'abord un cadre d'analyse dans lequel la pollution est modélisée comme un flux puis, dans un second temps, la pollution est intégrée sous la forme d'un stock. Nous présentons seulement le modèle avec polluant flux. La production du bien final est réalisée à l'aide d'une technologie, homogène de degré 1, utilisant du capital physique et du capital humain $h(t)$: $Y(t) = (z(t)K(t))^{\eta}(u(t)h(t))^{1-\eta}$ avec $z(t) \in [0,1]$ (resp. $u(t) \in [0,1]$) la part du capital physique (resp. du capital humain) consacrée à la production du bien final. La production de capital humain emploie seulement ce même capital : $\dot{h}(t) = \delta(1-u(t))h(t)$. Les émissions polluantes sont un produit fatal de la production du bien final mais peuvent être maîtrisées grâce à une technologie utilisant une partie du capital physique. Formellement, le niveau d'émission s'établit à : $E(t) = z(t)^{\beta\eta}Y(t)$, $\beta > 0$. Le ratio émissions/output décroît donc avec la part du capital allouée à ce secteur. A partir de ces spécifications, il est possible de réécrire la production comme une fonction homogène de degré 1 dans le capital physique, le capital humain et les émissions :

$$Y(t) = E(t)^{1/1+\beta}K(t)^{\eta\beta/1+\beta}(u(t)h(t))^{\beta(1-\eta)/1+\beta}$$

La fonction d'utilité est identique à celle employée par Stokey [1998] et les auteurs imposent d'office $\sigma < 1$. Dans ce contexte, Hartman et Kwon [2005] montrent que leur modèle est compatible avec l'émergence de la CKE. Ils parviennent aux mêmes résultats qualitatifs avec un polluant stock. Si ce résultat repose sur un mécanisme similaire à celui identifié par Stokey [1998], l'intérêt de cette étude est de faire intervenir un double effet de composition facilitant l'obtention de la partie décroissante de la CKE[47]. D'une part, l'externalité de pollution est une incitation à privilégier l'accumulation du capital le moins néfaste à l'environnement. Lors de la phase de transition, au fur et à mesure que le dommage causé par la pollution est ressenti plus fortement, il se produit une modification de la composition de l'output favorable au secteur de production du capital humain. D'autre part, ce phénomène est renforcé par la possibilité de substituer du capital humain "propre" au capital physique et aux émissions dans la technologie de production du bien final. Autrement dit, la combinaison productive des inputs évolue dans un sens favorable à la préservation de l'environnement. Enfin, dans ce cadre d'analyse, contrairement à Stokey [1998], une croissance soutenue et durable est évidemment possible.

[47]Cela est évidemment rendu possible par le développement d'un modèle à deux secteurs avec accumulation de deux stocks dont l'utilisation implique des répercussions environnementales distinctes.

Modèle à générations imbriquées

John et Pecchenino [1994][48] proposent un modèle à générations imbriquées avec pollution dans l'objectif d'étudier le lien entre croissance et environnement, en s'appuyant sur l'aspect intergénérationnel du problème. Chaque génération, de taille normalisée à 1, vit deux périodes. Un individu jeune de la génération t travaille et alloue son salaire w_t entre épargne s_t et dépense de dépollution (ou maintenance) m_t. Lorsqu'il est retraité, il consomme d_{t+1} l'intégralité de son revenu constitué par le rendement de l'épargne ($R_{t+1}s_t$ avec $R_{t+1} = 1 + r_{t+1}$ le facteur d'intérêt). Les préférences de l'agent né en t portent sur la consommation et la qualité de l'environnement Q_{t+1} de seconde période vie $U(d_{t+1}, Q_{t+1})$. La qualité de l'environnement est affectée par les émissions polluantes, directement liées au fait de consommer, mais peut être améliorée grâce à la maintenance : $Q_{t+1} = (1-\mu)Q_t - \beta d_t + \gamma m_t$. Il est possible de résumer le problème de l'agent représentatif de la manière suivante :

$$\max_{s_t, m_t, d_{t+1}} U(d_{t+1}, Q_{t+1})$$

$$s.c \begin{cases} w_t = s_t + m_t \\ d_{t+1} = R_{t+1}s_t \\ Q_{t+1} = (1-\mu)Q_t - \beta d_t + \gamma m_t \\ m_t \geq 0 \end{cases}$$

La condition du premier ordre, qui s'écrit $R_{t+1}U_d(d_{t+1}, Q_{t+1}) = \gamma U_Q(d_{t+1}, Q_{t+1})$ à la solution intérieure, traduit parfaitement le dilemme auquel sont confrontés les agents. Si une hausse de la dépollution permet de diminuer les émissions et d'accroître la qualité de l'environnement de la période suivante, elle se fait au détriment de l'épargne donc de la consommation à $t+1$. Le problème de l'agent représentatif illustre également la dimension intergénérationnelle présente dans ce modèle. Lors de la prise de décision en matière de maintenance et de consommation, l'agent n'intègre pas les répercussions de ses décisions sur le bien-être des générations futures (via l'évolution de la qualité de l'environnement).

Concernant le secteur productif, le processus de production est soumis à une externalité technologique, l'idée étant de reconnaître que la production et l'accumulation de capital permettent d'accroître l'efficacité de l'appareil productif. La technologie s'écrit : $\varphi(K_{t-1})F(K_t, L_t)$ avec $F()$ homogène de degré 1. Notons enfin que le capital se déprécie au taux δ. Les firmes maximisent leurs profits et on obtient les conditions usuelles d'égalisation des prix des facteurs à la productivité marginale.

[48]Ce travail constitue la véritable référence de la littérature employant le modèle à générations imbriquées pour traiter des problèmes de pollution. En effet, si Howarth et Norgaard [1992] est la référence historique, le cadre conceptuel utilisé par John et Pecchenino [1994] fournit une base sur laquelle s'appuient l'essentiel des travaux composant cette littérature.

Les auteurs considèrent d'abord le cas $\varphi() = 1$ et analysent successivement la solution intérieure ($m \geq 0$) et la solution en coin. Pour la solution intérieure, ils montrent que, selon les conditions imposées sur les paramètres et pour une technologie Cobb-Douglas, il est possible d'avoir un, deux ou aucun état stationnaire. Dans le cas où il existe des équilibres multiples, la condition nécessaire à la stabilité de l'état stationnaire implique que seul l'équilibre associé à une qualité de l'environnement et à un niveau de capital élevés est stable. De plus, il apparaît que le long de la trajectoire d'équilibre, la qualité de l'environnement et le capital varient dans le même sens, autrement dit, il existe une relation positive entre croissance et environnement. L'analyse de la solution en coin, lorsque la maintenance est nulle, révèle que l'unique état stationnaire est stable et que, lors de la convergence vers celui-ci, l'accumulation de capital s'accompagne d'une dégradation de l'environnement. La synthèse des deux cas permet d'obtenir une relation entre le capital et la qualité de l'environnement ayant les propriétés qualitatives de la CKE (elle a ici une forme de V), à condition que l'économie franchisse la frontière d'indifférence entre le fait de dépolluer, ou pas, avant d'atteindre l'état stationnaire associé à $m = 0$. En effet, si l'on suppose que l'économie est initialement pauvre mais relativement bien dotée en environnement, les agents ne sont pas suffisamment incités à investir dans l'environnement et consacrent au contraire l'intégralité de leur revenu à la consommation et à l'épargne, ce qui a pour effet d'accélérer l'accumulation de capital. Ainsi, les premiers stades de développement se caractérisent par une hausse du capital accompagnée d'une détérioration de la qualité de l'environnement. Ce processus se poursuit jusqu'au moment où l'économie atteint un niveau seuil de richesse et/ou de dommage environnemental au delà duquel les agents engagent des dépenses de dépollution et on retrouve alors une corrélation positive entre accumulation de capital et environnement. L'émergence de la CKE provient donc d'un changement de régime relatif aux dépenses de dépollution. Lorsque l'économie est "pauvre", l'accent est mis sur l'accumulation de richesses au détriment de l'environnement. Par contre, dès lors qu'elle franchit la frontière d'indifférence, la dotation en capital et les dommages occasionnés par la pollution atteignent des niveaux tels que la dépollution devient opérante.

L'analyse du modèle avec externalité technologique n'apporte rien de nouveau quant à la relation entre croissance et environnement. Le résultat principal concerne la possibilité d'avoir une croissance soutenue à la fois du capital et de la qualité de l'environnement à condition que les rendements croissants (et l'externalité) soient suffisamment forts pour renverser la courbure de la fonction de production. Il faut donc que la fonction $\varphi(k)f(k)$, représentant la production par tête, soit convexe. Pour conclure, les auteurs montrent que l'équilibre concurrentiel est Pareto inefficient (avec notamment un risque de sur-accumulation du capital et/ou de l'environnement) ce qui légitime une intervention des pouvoirs publics.

Lieb [2004] propose une extension du modèle de John et Pecchenino [1994] consistant à introduire deux polluants distincts : un polluant stock et un polluant flux. L'objectif de cette étude réside toujours dans l'explication des déterminants théoriques de la CKE.

A chaque période naît un nombre N constant d'agents. L'agent jeune de la génération t travaille en contrepartie d'un salaire w_t. Son salaire, éventuellement diminué d'un prélèvement forfaitaire τ_t, est alloué à l'épargne s_t. L'agent retraité consomme d_{t+1} l'intégralité de son revenu de seconde période de vie : $d_{t+1} = R_{t+1}s_t$. Les préférences d'un agent né en t dépendent de la consommation et du niveau de pollution en $t+1$: $U(d_{t+1}, P_{t+1})$ avec $U_d > 0$, $U_P < 0$. La consommation et la qualité de l'environnement $(-P_t)$ sont des biens normaux. La production du bien final emploie une technologie à rendements constants dans le capital et le travail : $Y_t = AK_t^\alpha L_t^{1-\alpha}$ (avec $A > 0$ un paramètre d'échelle) et les firmes maximisent leurs profits. La pollution perçue par les ménages est en fait une agrégation de deux polluants différents : $P_t = P_t^1 + \lambda P_t^2$ avec $\lambda > 0$. Le premier polluant est un flux, produit fatal de la production, pouvant être maîtrisé par des dépenses de dépollution m_t^1 : $P_t^1 = g(K_t, m_t^1)$ avec g_K, $g_{KK} > 0$, $g_m < 0$, $g_{mm} > 0$ et $g_{mK} \leq 0$ (la dépollution est d'autant plus efficace que les émissions polluantes sont importantes). Le second est un stock qui s'accumule au gré des émissions polluantes et peut également être régulé par une activité de dépollution : $P_{t+1}^2 = (1-\mu)P_t^2 + h(K_t, m_t^2)$ avec $\mu \in [0,1]$ le taux d'assimilation naturel et $h()$ la fonction d'émission aux propriétés similaires à $g()$. En résumé, la production de la période t contribue à la hausse des émissions polluantes de cette période mais aussi à la hausse d'une stock de pollution de la période $t+1$.

A la manière de John *et al.* [1995], l'auteur suppose qu'à la période t, la décision de dépollution incombe à un gouvernement représentatif de la génération née à cette même période. Etant donné les conditions d'équilibre des marchés et les conditions de la maximisation des profits, il choisit le montant de la taxe τ_t et la répartition entre les deux dépenses de dépollution ($\tau_t = m_{t+1}^1 + m_{t+1}^2$) de manière à maximiser le bien-être de la génération qui l'a élu. Le gouvernement, à durée de vie égale à celle de cette génération, est "myope" puisqu'il n'intègre pas les répercussions de ses décisions sur les bien-être des générations futures. Par conséquent, il choisit de n'allouer aucune ressource à la lutte contre le polluant stock (m_{t+1}^2) car les dépenses de dépollution m_{t+1}^2 ne bénéficient qu'aux agents vivants en $t+2$. Dans ce contexte, l'étude de la trajectoire d'équilibre révèle l'existence d'une CKE reliant le polluant flux au stock de capital. La principale force conduisant à ce résultat est identique à celle décrite par John et Pecchenino [1994] et repose sur un changement de régime relatif à l'activité de dépollution m_t^1. Par contre, l'auteur souligne le fait que le polluant stock est continûment croissant avec le capital. Ce résultat s'explique logiquement par la mission du gouvernement qui n'a aucune raison d'engager des dépenses de dépollution pour combattre son accumulation. Puisque la pollution est perçue de manière globale, lorsque le polluant stock est élevé, le gouvernement a seulement la volonté d'augmenter les dépenses de dépollution affectant le polluant flux afin de limiter le dommage causé par la pollution. L'existence du polluant stock renforce finalement l'incitation à réduire les émissions polluantes et facilite l'obtention de la partie décroissante de la CKE pour le polluant flux. Ces résultats sont une nouvelle fois assez conformes à ceux de la littérature empirique.

Les travaux présentés sont parvenus à générer, de manière théorique, une relation entre croissance et environnement ayant les propriétés qualitatives de la CKE en exploitant le cadre d'analyse offert par les modèles de croissance (et en recourant, pour certains, à des hypothèses spécifiques sur les préférences ou sur la source des émissions). En cela, ils ont largement participé à la diffusion d'une des explications les plus répandue de la CKE, à savoir, l'existence d'effets de seuil. Dans la partie qui suit, nous revenons sur la portée et les limites du concept de CKE.

1.5.3 Portée et limites de la CKE

Cette discussion est réalisée dans une perspective visant également à mettre en lumière l'intérêt et les limites des travaux théoriques qui introduisent l'environnement dans les modèles de croissance notamment pour expliquer l'émergence d'une CKE.

Controverse sur la relation entre croissance et environnement

Malgré les doutes entourant la validité de la notion de CKE (relation détectée seulement pour certains polluants, résultats sensibles aux données et aux méthodes), certains économistes ont utilisé et vulgarisé cette courbe afin de promouvoir la croissance et "bannir" toute forme de régulation environnementale. Beckerman [1992] écrit : *" In the end, the best and probably the only way to attain a decent environment in most countries is to become rich"*. Pour Panayotou [1993], la croissance est une manière efficace d'améliorer la qualité de l'environnement dans les pays en voie de développement. Dans le même esprit, Bartlett [1994] clame que la régulation environnementale, en réduisant la croissance économique, pourrait finalement agir en défaveur de la qualité de l'environnement.

Ce type d'interprétation, voire d'instrumentalisation, de la CKE a été critiqué par de nombreux auteurs. Selon Arrow *et al.* [1995], la critique majeure réside dans le fait que le modèle sous-jacent à la CKE suppose qu'il n'existe pas d'effet de *feedback* des dommages environnementaux sur l'économie puisque le revenu est une variable exogène. Cela revient implicitement à considérer que ces dommages n'ont pas un impact suffisant sur l'activité économique pour engendrer l'effondrement du processus de croissance. Autrement dit, cette approche ignore la potentielle irréversibilité des dommages causés à l'environnement et suppose, au contraire, que le développement économique est durable. Cependant, la notion d'irréversibilité remet en question le principe même de la CKE : si une activité économique élevée n'est pas durable, la promotion d'une croissance soutenue dans les premiers stades de développement paraît pour le moins inadéquate et dangereuse. Dasgupta et Mäler [2002] abondent dans le sens de cette mise en garde. En effet, ils rejettent cette vision selon laquelle il est possible de polluer autant que l'on veut aujourd'hui puisqu'une fois riche, il sera toujours possible de faire marche arrière, c'est-à-dire, de compenser les dommages causés à l'environnement dans le passé et ce, quelque soient leurs niveaux. Cette critique s'appuie une nouvelle fois sur la notion d'irréversibilité et souligne que dégrader de manière trop importante l'environnement pourrait entraîner le dépassement de seuils écologiques au delà desquels les conséquences de la pollution deviendraient irréversibles. Un exemple parmi d'autres est donné par le problème de pollution globale posé par les émissions de gaz à effet de serre[49].

Dans la section suivante, nous définissons la notion d'irréversibilité de la pollution (ou des dommages environnementaux) et faisons le point sur les implications économiques de la prise en compte de cette propriété (dans les modèles dynamiques et déterministes).

Une limite majeure à la CKE : l'irréversibilité de la pollution

Un rapide retour en arrière sur la littérature exposée jusqu'à présent nous permet de constater que l'ensemble des travaux, qui introduisent l'environnement dans les modèles de croissance, recourent à une approche commune concernant la modélisation de l'accumulation de la pollution. L'évolution du stock de pollution est, typiquement, le résultat de la différence entre les émissions polluantes et la décroissance naturelle de la pollution, rendue possible par l'existence d'une capacité de régénération de l'environnement (correspondant au paramètre $\mu \in (0,1)$). Plus précisément, la fonction de décroissance de la pollution présente la particularité d'être linéaire (ou monotone croissante) dans le stock de pollution. Autrement dit, cela revient à faire l'hypothèse d'un taux d'assimilation exponentiel constant. La dynamique de la pollution est généralement décrite par :

$$\dot{P}(t) = E(t) - \mu P(t)$$

[49] La hausse ininterrompue des émissions liées à l'activité humaine contribue au réchauffement climatique et la fonte de la banquise. Or, des études climatologiques affirment que le déversement d'eau douce dans les océans pourrait bouleverser, en modifiant la salinité de l'eau, le *Gulf Stream*, courant océanique qui tempère le climat dans l'hémisphère nord. La conjecture la plus dramatique est l'arrêt pur et simple de ce courant conduisant à une nouvelle ère glaciaire ce qui constitue une illustration forte d'un risque d'irréversibilité.

Si cette formulation est acceptable pour certains polluants, comme les déchets nucléaires, il n'en reste pas moins qu'elle a été critiquée par plusieurs études (dont Forster [1975], Comolli [1977] ou Dasgupta [1982]). Ces auteurs avancent en effet l'argument selon lequel des niveaux de pollution trop élevés peuvent causer des dommages irréversibles affectant le processus de régénération de l'environnement. Ce constat se fonde sur les conclusions de travaux appartenant aux disciplines de la biologie et de l'écologie. Depuis les études d'Holling [1973] et Peterman [1980], la preuve a été faite que certains écosystèmes peuvent posséder plus d'un équilibre stable. Cette propriété implique que lorsqu'ils sont soumis à des perturbations fortes, ces systèmes naturels sont dans l'incapacité de recouvrer leur état originel. L'exemple le plus populaire est celui des lacs en eau peu profonde. Ces lacs subissent une pollution causée par l'activité humaine. Elle provient notamment de l'utilisation d'engrais (qui contiennent des substances toxiques comme le phosphore blanc) qui se déversent, par le biais des rivières, dans les lacs. Cette pollution peut provoquer, au delà d'un certain seuil, la prolifération d'algues microscopiques (le phytoplancton) qui en constituant un filtre de lumière, perturbent le développement de la flore et de la faune et engendrent même la disparition de certaines espèces. Aussi, exposé trop longtemps à la pollution, cet écosystème atteint un nouvel équilibre aux propriétés très éloignées de la situation initiale.

Cette caractéristique des écosystèmes appelle à une généralisation de la fonction de décroissance (de la pollution) à taux constant, celle-ci devant nécessairement refléter l'idée que des niveaux de pollution élevés altèrent drastiquement la capacité de régénération de l'environnement. Ainsi, il a été proposé, notamment par Forster [1975] ou Dasgupta [1982] de renoncer à la formulation linéaire de l'assimilation au profit d'une formulation alternative intégrant la potentielle irréversibilité des dommages occasionnés par la pollution.

Une approche possible consiste en fait à supposer que la capacité d'assimilation de la pollution par la nature est une fonction en forme de U inversé du stock de polluant et s'annule au delà d'un niveau critique élevé de celui-ci. Cette formulation est très inspirée de la loi de croissance logistique employée pour retranscrire l'évolution de la concentration de certaines espèces naturelles comme les poissons (Dasgupta [1982]). Selon Holling [1973], elle constitue une bonne approximation de l'accumulation de polluants organiques dans les lacs en eau peu profonde. Ce type de formalisation complique la résolution des problèmes de contrôle optimal de pollution en y introduisant des sources de non convexités[50]. La possibilité d'extinction du processus de régénération de la nature a déjà fait l'objet de plusieurs études (Forster [1975], Cesar et de

[50]Mathématiquement, les difficultés à traiter sont du même ordre que celles posées par la théorie de la croissance avec des rendements croissants (fonction de production convexe-concave) et étudiées notamment par Skiba [1979] et Dechert et Nishimura [1983].

Zeeuw [1994], Tahvonen et Withagen [1996] ou encore, Tahvonen et Salo [1996])[51]. Les conséquences de l'introduction de l'irréversibilité de la pollution peuvent être résumées par la présentation de l'article fondateur de cette littérature.

Forster [1975] est le premier à renoncer à l'hypothèse d'un taux de décroissance exponentiel constant en se référant à l'exemple des lacs. L'objectif de cette étude est de mesurer les conséquences de l'irréversibilité de la pollution sur les propriétés de l'équilibre d'un modèle de contrôle optimal de la pollution. Dans ce modèle, l'accumulation de capital est ignorée, la production est fixe et se répartit entre consommation et dépense de dépollution : $\bar{Y} = C(t) + D(t)$. Les émissions polluantes proviennent de la consommation et sont contrôlées par les dépenses de pollution : $E(t) = g(C(t)) - h(D(t)) = E(C(t))$ avec $E(C(t))$ croissante convexe et $E(C) < 0 \ \forall C < C_0$, $E(C) \geq 0$ sinon. Autrement dit, pour des niveaux de consommation bas, les émissions sont négatives ce qui se traduit par une diminution nette de la pollution. Le stock de pollution $P(t)$, dont une fraction est absorbée à chaque instant par la nature, s'accumule avec les émissions polluantes : $\dot{P}(t) = E(C(t)) - \mu(P(t))P(t)$. La fonction $\sigma(P(t)) = \mu(P(t))P(t)$ représente la quantité de pollution assimilée par la nature. Elle est concave sur l'intervalle $[0, \bar{P}[$, d'abord croissante puis, au delà d'un seuil P^*, décroissante. La capacité de régénération de l'environnement s'épuise alors jusqu'au niveau critique $\bar{P}$ à partir duquel elle est annihilée : $\mu(P) = 0 \ \forall P \geq \bar{P}$. Les préférences portent sur la consommation et sont affectées par la pollution. Elles sont décrites par une fonction d'utilité $U(C, P)$ séparable avec des hypothèses classiques sur les dérivées partielles premières et secondes. Le problème du planificateur avec critère utilitariste escompté s'écrit :

$$\max_{C(t)} \int_{t=0}^{+\infty} U(C(t), P(t)) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{P}(t) = E(C(t)) - \mu(P(t))P(t) \\ P(0) = P_0 \text{ donné} \end{cases}$$

L'analyse des conditions nécessaires d'optimalité révèle l'existence d'une multiplicité d'états stationnaires dont certains sont associés à un niveau de pollution irréversible. Sans discuter de la validation des conditions suffisantes d'optimalité (le Hamiltonien n'étant pas forcément concave dans ce contexte), l'auteur montre qu'il existe un niveau limite de pollution au delà duquel l'économie converge vers l'état stationnaire aux

[51] Le problème de la gestion de ressources naturelles soumises à un risque d'extinction a également été étudié (voir les contributions de Clark [1971], [1973], Lewis et Schmalensee [1979] et plus récemment, de Olson et Roy [1996] ou Dawid et Kopel [1997]). Dans la majorité de ces études, la loi de croissance de la nature est non concave et présente une forme de S. Le résultat principal de ces travaux est de montrer que l'optimalité de la conservation ou de l'extinction d'une ressource repose sur le rapport entre le taux d'escompte et le taux de croissance de la ressource, la supériorité du taux d'escompte conduisant à son extinction.

caractéristiques environnementales médiocres. Il souligne également le rôle joué par le taux d'escompte : la convergence vers cet état de long terme a d'autant plus de chances de se réaliser que le taux d'escompte social est élevé. En effet, dans ce cas, les coûts de la détérioration de l'environnement sont ressentis dans le long terme et pèsent peu relativement aux bénéfices d'un accroissement de la consommation présente. Ce constat incite Forster [1975] à considérer l'approche à la Ramsey [1928] consistant à minimiser la somme non escomptée des écarts entre l'utilité instantanée et le maximum d'utilité indéfiniment soutenable $\hat{U}$ défini par la règle d'or verte[52]. Le problème à résoudre devient

$$\min \int_{t=0}^{+\infty} (\hat{U} - U(C(t), P(t)))dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{P}(t) = E(C(t)) - \mu(P(t))P(t) \\ P(0) = P_0,\ P(\infty) = \hat{P} \end{cases}$$

L'auteur montre que le recours à cette fonction de bien-être social permet d'éliminer la multiplicité d'équilibres. De plus, l'état stationnaire se caractérise nécessairement par un niveau de pollution réversible. La règle d'or implique un niveau de consommation positif $\hat{C}$, dès lors, pour maintenir la pollution à un niveau constant, l'assimilation de la nature doit être opérante.

Tahvonen et Withagen [1996] introduisent également une fonction d'assimilation en forme de U inversé dans un problème de contrôle optimal de la pollution. Le stock de pollution $P(t)$ évolue selon la dynamique suivante : $\dot{P}(t) = E(t) - \mu(P(t))P(t)$ où $E(t)$ correspond aux émissions polluantes. La fonction $\sigma(P(t)) = \mu(P(t))P(t)$ a des propriétés similaires à celle de l'étude de Forster [1975]. Le reste de la modélisation est volontairement simplifié : la production s'établit au niveau des émissions $Y(t) = E(t)$ et, est intégralement consommée. La fonction d'utilité est croissante et concave dans la production ($U(Y(t))$ avec $\bar{Y}$ une borne supérieure sur les émissions telle que $U'(\bar{Y}) = 0$) et les consommateurs subissent un dommage lié à la pollution $D(P(t))$ (avec $D' > 0$ $D'' > 0$). De plus, les auteurs imposent la condition suivante : $\max\{\sigma(P)\} > \bar{Y}$. Cette hypothèse traduit l'idée selon laquelle le niveau maximum d'émission est inférieur à la capacité maximale d'assimilation de la pollution par la nature. Elle tend finale-

[52]Ce choix s'explique une nouvelle fois par la prise en compte de la remarque de Ramsey [1928] selon laquelle il n'existe aucune justification éthique à l'actualisation. De plus, cette formulation permet à l'auteur de lever la difficulté inhérente à l'étude des conditions suffisantes d'optimalité. Ici, le niveau d'utilité de la règle d'or est déterminé par la maximisation de l'utilité stationnaire sous la contrainte d'un niveau de pollution constant :

$$\hat{U} = \begin{cases} \max U(C, P) \\ s.c\ \dot{P} = 0 \end{cases}$$

ment à "retarder" ou limiter la possibilité de survenue d'un état irréversible[53]. Dans ce contexte, la question se pose de savoir s'il peut être optimal de laisser la pollution s'accumuler jusqu'à atteindre le seuil d'irréversibilité. Formellement, le programme à résoudre s'écrit :

$$\max_{y(t)} \int_{t=0}^{+\infty} U(Y(t)) - D(P(t)) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c \quad \dot{P}(t) = \begin{cases} Y(t) - \sigma(P(t)) \; \forall t < T \\ Y(t) \; \forall t \geq T \end{cases}$$

$$T \leqq +\infty \; / \; P(T) = \bar{P}$$

Les auteurs montrent que la conséquence de l'introduction de non convexités réside dans le fait que deux trajectoires optimales peuvent exister simultanément : *i/* une "politique" irréversible conduisant à un niveau de pollution important et à des émissions nulles (sachant que $U'(0) < +\infty$) et, *ii/* une politique réversible de maîtrise de la pollution caractérisée par des émissions strictement positives et un niveau de pollution inférieur au seuil critique. Ils soulignent également qu'il est difficile de trancher quant à la supériorité d'une solution relativement à l'autre en raison du problème posé par les non convexités. A partir d'un exemple numérique, ils illustrent notamment le fait que les gains actualisés associés à ces deux trajectoires peuvent être exactement égaux.

Toman et Withagen [2000] développent un modèle d'équilibre général simplifié (absence d'accumulation de capital) dans lequel ils comparent les conséquences de trois formulations différentes de la capacité d'assimilation de la nature[54] non seulement sur les propriétés de l'équilibre mais aussi, sur les recommandations en termes de politiques de contrôle des émissions. Cette étude diffère toutefois des précédentes dans la mesure où les auteurs autorisent la production à survenir de manière non polluante ; autrement dit, ils considèrent une fonction $F(L(t), E(t))$ où $L(t)$ et $E(t)$ représentent respectivement les inputs travail et pollution, avec $f(L(t), 0) \geqq 0$. En la présence d'irréversibilité, ils retrouvent le résultat d'existence d'équilibres multiples dont certains sont associés à un niveau de pollution irréversible. Ils abordent aussi la question de la régulation des activités polluantes rendue plus délicate dans ce contexte. Malgré la présence d'irréversibilité, ils constatent que le recours à des politiques rigides de régulation directe (par exemple, interdiction des technologies les plus polluantes) n'est pas forcément justifié car des politiques incitatives de prix (taxes, permis négociables) peuvent suffire à guider l'économie vers l'équilibre aux propriétés environnementales les meilleures.

[53]Tahvonen et Salo [1996] considèrent l'alternative qui implique, au contraire, un renforcement du risque de franchissement du seuil d'irréversibilité.

[54]croissante et concave, puis décroissante et convexe et, en forme de U inversé avec seuil d'irréversibilité dans les deux derniers cas.

A ce niveau de l'analyse, force est de constater que l'essentiel des contributions à la littérature sur les irréversibilités sont des approches d'équilibre partiel ou d'équilibre général simplifié (pas d'accumulation de capital)[55]. A notre connaissance, la notion d'irréversibilité des dommages environnementaux est largement absente des modèles de croissance avec environnement. Ce manquement nous semble pour le moins préjudiciable à une théorie dont la finalité consiste précisément à étudier les tensions inhérentes à la poursuite des objectifs de croissance économique et de préservation de l'environnement. Une exception notable est l'étude de Chevé [2000] qui introduit une irréversibilité de la pollution, du type de celle considérée par les travaux précédents, dans un modèle de croissance endogène.

Chevé [2000] s'intéresse plus exactement aux conditions de la croissance économique soutenable dans une extension du modèle AK comportant un risque d'irréversibilité de la pollution. En fait, elle considère la dynamique d'accumulation de la pollution suivante : $\dot{P}(t) = (K(t)/D(t))^{\gamma} - \sigma(P(t))$ où le flux d'émission $E(t) = (K(t)/D(t))^{\gamma}$ est une fonction homogène de degré 0 du capital et de l'activité de dépollution $D(t)$. A la manière de Toman et Withagen [2000], l'auteur envisage trois types de spécifications pour la fonction d'assimilation $\sigma(P(t))$: *i/* une assimilation croissante concave ($\sigma() \geq 0$, $\sigma'() > 0$ et $\sigma''() < 0$), *ii/* une assimilation décroissante convexe avec irréversibilité ($\sigma() \geq 0$, $\sigma'() < 0$, $\sigma''() > 0$ et $\sigma(P) = 0\ \forall P \geq \bar{P}$) et, *iii/* une assimilation en forme de U inversé avec irréversibilité ($\sigma() \geq 0$, $\sigma'() \geq 0\ \forall P \leq \hat{P}$, $\sigma'() < 0\ \forall P > \hat{P}$, $\sigma''() < 0$ et $\sigma(P) = 0\ \forall P \geq \bar{P}$ avec $\hat{P} < \bar{P}$). Le reste de la modélisation ne présente pas de nouveauté (en particulier, les préférences dépendent toujours de la consommation et sont affectées par la pollution). Le programme à résoudre est donc le suivant :

$$\max_{\{C(t),D(t)\}} \int_0^{+\infty} \left(\log C(t) - \phi \frac{P(t)^{1+\theta}}{1+\theta} \right) \exp^{-\rho t} dt$$

$$s.c \begin{cases} \dot{K}(t) = AK(t) - C(t) - D(t) \\ \dot{P}(t) = (K(t)/D(t))^{\gamma} - \sigma(P(t)) \\ K(0), P(0) \text{ donnés} \end{cases}$$

Dans le modèle associé à une absorption naturelle croissante, il existe un unique sentier de croissance durable (point selle). Par contre, l'irréversibilité de la pollution conduit à une multiplicité d'équilibre et nécessite d'imposer des restrictions fortes (les préférences pour l'environnement doivent être importantes, le niveau de pollution initial doit être relativement bas) afin de garantir l'existence d'un sentier de croissance équilibrée durable. De plus, contrairement au cas d'une assimilation de la pollution monotone croissante, il est possible, du fait de la généralisation de la fonction d'assimilation, d'obtenir une situation de *win-win* suite à une hausse des préoccupations

[55] Ce qui s'explique par les difficultés techniques sous-jacentes à cette hypothèse.

environnementales. Lorsque l'assimilation est croissante, une hausse des préférences pour l'environnement implique, toutes choses égales par ailleurs, une diminution du stock de pollution donc de la capacité d'assimilation de la nature. Ainsi, pour maintenir la qualité de l'environnement, il faudra consacrer relativement plus de ressources à la dépollution au détriment de l'accumulation du capital ce qui suppose un effet négatif sur le taux de croissance. A contrario, dans les deux autres cas, cette hausse des préférences va provoquer (pour le cas *ii/* et le sous-intervalle du cas *iii/* où $\mu'() < 0$) une diminution du stock associée cette fois à une amélioration de la capacité d'assimilation impliquant, par là-même, que l'économie aura moins de ressources à allouer à la dépollution ce qui sera finalement profitable à la croissance. Le point intéressant concerne le fait que le résultat de *win-win* ne repose plus sur l'hypothèse controversée, employée par Den Butter et Hofkes [1995] et Bovenberg et Smulders [1995], [1996], d'existence d'une externalité environnementale de production.

1.5.4 Résumé

La courbe de Kuznets environnementale, détectée par plusieurs études empiriques au début des années 90 (Grossman et Krueger [1993], [1995]), suppose l'existence d'une relation en forme de U inversé entre la concentration de certains polluants et le revenu par tête. Cette notion présente pour intérêt majeur de rompre avec la vision pessimiste selon laquelle la croissance économique est synonyme de dégradation de l'environnement en soulignant, au contraire, les avantages d'une croissance soutenue (qui s'associe notamment au développement de moyens plus efficaces de protection de l'environnement). Cependant, la CKE comporte un certain nombre de limites qui en réduisent considérablement la portée : elle n'est pas généralisable à tous les polluants et, surtout, elle suppose, par nature, que le développement est durable en faisant fi des risques d'irréversibilité des dommages environnementaux (*confer* les critiques émises par Arrow *et al.* [1995] et Dasgupta et Mäler [2002]).

Malgré ses insuffisances, une littérature importante s'est construite autour de l'objectif visant à donner des fondements théoriques à ce fait stylisé. Plusieurs arguments ont ainsi été avancés pour expliquer cette relation. En particulier, notre attention s'est portée sur les travaux qui ont contribué à cette littérature en se basant sur les outils fournis par les théorie de la croissance (John et Pecchenino [1994], Selden et Song [1995] et Stokey [1998]). La question du crédit à accorder aux conclusions de ces études (qui en obtenant la CKE, offre une vision plutôt positive quant à la relation entre croissance et environnement) mérite d'être posée. En effet, celles-ci se placent (pour les modèles avec polluant stock), en vertu de l'hypothèse d'une assimilation à taux constant de la pollution, dans les conditions prédisposant à l'émergence de la CKE. De même, comme le souligne Sterner [2003] : *"it seems fairly easy to develop models* *that generate EKCs under appropriate assumptions... Furthermore, if, in fact, the EKC for emissions is monotonic as more recent evidence suggests, the ability of a model to produce an inverted U-shaped curve is not a particularly desirable property".*

Ce constat met l'accent sur une caution générale qui peut être apposée au message délivré par la littérature qui introduit l'environnement dans les modèles de croissance. A de rares exceptions près, elle étudie la relation entre croissance et environnement et appréhende le problème du développement durable en ignorant une partie de l'interaction entre les sphères économique et environnementale qui découle de la potentielle irréversibilité des dommages environnementaux.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur l'analyse de la relation entre croissance et environnement à partir d'une revue de la littérature intégrant la dimension environnementale dans les modèles de croissance, néoclassique, endogène et à générations imbriquées. Les travaux présentés donnent une idée précise de la manière d'introduire l'environnement dans la modélisation et des conséquences de l'approche retenue sur les perspectives de croissance d'une économie polluante. De même, la théorie de la croissance est un outil de grande valeur, incontournable, dans une optique visant à traiter de questions telles que : le développement économique est-il durable ? quelles sont les raisons de l'émergence de la courbe de Kuznets environnementale ? ou encore, quels sont les moyens dont disposent les pouvoirs publics afin de contrôler les activités polluantes ?

Une première piste de recherche nous semble insuffisamment explorée. Celle-ci fait écho au constat de Dasgupta et Mäler [2002] selon lequel la notion de courbe de Kuznets environnementale doit être rejetée lorsque l'on tient compte des risques d'irréversibilité des dommages environnementaux occasionnés par l'activité humaine. Il existe une littérature assez étendue sur les déterminants théoriques de ce fait stylisé très controversé (John et Pecchenino [1994], Selden et Song [1995], Stokey [1998] ou Lieb [2004]). Certains de ces travaux modélisent la pollution comme un stock mais, aucun n'intègre la possibilité d'irréversibilité de la pollution. Dès lors, notre premier sujet de recherche (chapitre 2) va consister en une extension du modèle de John et Pecchenino [1994] reposant précisément sur l'introduction d'une fonction d'assimilation naturelle de la pollution du type de celle considérée par Forster [1975], Cesar et de Zeeuw [1994] ou de Tahvonen et Withagen [1996]. L'objectif de cette étude est de confronter les notions d'irréversibilité de la pollution et de courbe de Kuznets afin de déterminer en quoi la prise en compte du risque d'extinction du processus de régénération de la nature peut remettre en question la possible émergence de la CKE.

Les deux thèmes de recherche que nous abordons ensuite portent sur la performance d'une régulation de la pollution par l'instauration d'un marché de permis à polluer.

Sans anticiper sur les résultats du second chapitre, nous montrerons qu'un processus de croissance non régulée peut conduire une économie polluante vers une trappe de pauvreté économique et écologique. Autrement dit, il semble légitime de faire appel à une intervention des pouvoirs publics et nous considèrerons, dans le chapitre 3, une régulation par les permis. Cette approche nous amène naturellement à nous demander si le recours à un tel instrument est susceptible de prémunir l'économie contre une convergence vers ces états de long terme aux caractéristiques médiocres. Plus globalement, la question se pose de savoir quel est l'effet d'une régulation par les permis sur le processus de développement d'une économie polluante. Il existe une littérature importante qui cherche à mesurer les répercussions d'une politique environnementale plus ambitieuse sur les conditions de la croissance économique (pour la taxe voir notamment Bovenberg et Smulders [1995], [1996] ou Bovenberg et de Mooij [1997], pour les permis voir Jouvet, Michel et Vidal [2002b] ou Ono [2002]). Ces travaux se différencient non seulement en raison de l'instrument de politique étudié mais aussi, par le cadre d'analyse retenu. Les premiers cités emploient des modèles de croissance à agent à durée de vie infinie alors que les seconds recourent aux modèles à générations imbriquées. Ces contributions aboutissent à des résultats sensiblement différents : la première catégorie d'études montre qu'une politique environnementale plus sévère peut générer un double dividende et la seconde détecte au contraire un dilemme entre accumulation de richesse et protection de l'environnement. Nous tenterons dans ce chapitre, extension du précédent, de réconcilier les résultats de cette littérature en répondant à la question posée.

Notre troisième travail de recherche se base sur le constat selon lequel la plupart des travaux qui concluent à la possibilité d'atteindre l'optimum social, à partir de l'équilibre concurrentiel, grâce à un système de permis ou de droits à polluer (voir notamment Jouvet, Michel et Vidal [2002a] ou Jouvet, Michel et Rotillon [2005]), ne traitent pas de la question délicate de la définition de la norme de pollution initiale. Plus précisément, ces études font implicitement l'hypothèse que le régulateur est capable de choisir, à chaque période, un quota global d'émission correspondant très exactement au niveau d'émission optimal (tel qu'il est défini par la solution centralisée). Or, les politiques de régulation par les permis sont décidées au cours de sommets internationaux (Protocole de Kyoto (1997) pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre) et, comme le soulignent plusieurs auteurs (Hoel [2005], Kolstad [2005] ou Yu [2005]), rien ne garantit que les décisions qui découlent de ces rencontres soient efficaces[56]. Dès lors, il est fort probable que les engagements pris, en matière de réduction des émissions, échouent à

[56]Les sources d'inefficacité proviennent, par exemple, de la pression exercée par les lobbies industriels ou encore des divergences de vue des protagonistes à la négociation.

garantir le niveau de pollution socialement désiré à l'échelle de la nation. Notre conjecture consiste finalement à admettre, de manière équivalente, que le quota dont hérite l'économie à chaque période est différent du niveau de pollution optimal. Nous consacrons le dernier chapitre à l'étude du problème de l'inadéquation entre la norme de pollution et l'objectif de pollution de l'économie dans le cadre du modèle à générations imbriquées. Dans un tel contexte, notre objectif est de proposer des instruments supplétifs susceptibles de pallier les inefficacités du système de permis à polluer.

Chapitre 2

Implication de l'irréversibilité de la pollution sur la relation entre croissance et environnement : la courbe de Kuznets dégénérée

2.1 Introduction

Au début des années 1990, s'est développée une littérature empirique visant à estimer la relation entre croissance économique et pollution (World Bank [1992], Holtz-Eakin et Selden [1992], Grossman et Krueger [1993], [1995], Selden et Song [1994]). Ces travaux détectent une relation en forme de U inversé entre le revenu par tête et la concentration de certains polluants de l'air (SO_2, CO, NO_x) et de l'eau (nitrate, métaux lourds, contaminants fécaux). L'intuition qui sous-tend l'émergence de cette relation, communément nommée Courbe de Kuznets environnementale, est la suivante. Dans les premiers stades de l'industrialisation, la pollution croît rapidement parce que d'une part, la priorité est donnée à l'accumulation de richesse et que d'autre part, les agents se préoccupent plus de leur emploi et de leur revenu que de la qualité de l'air ou de l'eau (Dasgupta *et al.* [2002]). Dans les stades plus avancés de développement, au fur et à mesure que les revenus augmentent, les individus accordent plus de valeur à l'environnement et, cela justifie la mise en place, par les autorités compétentes, d'une régulation de la pollution de nature à permettre sa baisse effective.

Comme nous l'avons noté dans le premier chapitre, la courbe de Kuznets environnementale (CKE) suscite des débats intenses chez les économistes aussi bien dans les disciplines empiriques que théoriques. Les études empiriques plus récentes signalent que si cette relation est généralement valable pour les polluants flux précités, bien que les résultats soient plus mitigés pour les polluants de l'eau (Paudel *et al.* [2005]), les polluants stock comme le CO_2 exhibent plutôt une relation monotone croissante avec le revenu (les exceptions sont les études de Carson *et al.* [1997] ou Schmalensee *et al.* [1998] qui obtiennent également une CKE pour le CO_2). Les travaux théoriques ont quant à eux cherché à évaluer les déterminants de l'émergence de la courbe de Kuznets environnementale. Ainsi, Andreoni et Levinson [2001] avancent, à partir d'un modèle statique, que les rendements croissants dans les activités de dépollution sont à l'origine de cette relation. Dans les modèles de croissance, John et Pecchenino [1994], Selden et Song [1995] ou Stokey [1998] montrent que la CKE proviendrait plutôt de changements de régime relatifs soit aux activités de dépollution soit, à l'adoption de technologies moins polluantes. Chez John et Pecchenino [1994], cette relation résulte, plus précisément, de l'existence de deux phases de développement distinctes. Dans la première (pour un niveau de richesse bas et un environnement élevé), les agents privilégient leur consommation au détriment des activités de dépollution et la croissance économique s'associe à une dégradation de l'environnement. Une fois que l'économie atteint un niveau suffisant de richesse et/ou subit un dommage environnemental important, les agents sont incités à engager des dépenses de dépollution. Dans cette seconde phase, la croissance s'accompagne finalement d'une amélioration de la qualité de l'environnement. La synthèse de ces deux phases permet alors d'observer l'équivalent de la courbe de Kuznets environnementale.

La courbe de Kuznets environnementale a été l'objet, par certains économistes, d'une instrumentalisation visant à bannir toute forme de régulation de la pollution et à promouvoir la croissance comme seul moyen de préserver l'environnement (Beckerman [1992], Bartlett [1994]). Dasgupta et Mäler [2002] rejettent cette vision selon laquelle une économie peut polluer en toute impunité aujourd'hui puisque, une fois riche, elle sera toujours en mesure de faire marche arrière en compensant les dommages causés à l'environnement par le passé. Cette critique s'appuie sur la notion d'irréversibilité des dommages environnementaux introduite antérieurement par des travaux dans les disciplines de la biologie et de l'écologie (Holling [1973], Peterman [1980]). Ces études montrent que certains écosystèmes peuvent posséder plus d'un équilibre stable. Cette propriété implique que lorsqu'ils sont soumis à des perturbations fortes, ces systèmes naturels sont dans l'incapacité de recouvrer leur état originel. L'exemple le plus populaire est celui des lacs en eau peu profonde mais, comme le remarquent Dasgupta et Mäler [2002], la notion d'irréversibilité peut également s'appliquer à des problèmes globaux comme les répercussions des émissions de gaz à effet de serre sur le climat.

Ce concept a donné lieu à une remise en cause de l'hypothèse d'assimilation naturelle de la pollution à taux constant utilisée de manière quasi systématique pour décrire l'accumulation de la pollution dans les modèles de croissance (Keeler *et al.* [1971], Van der Ploeg et Withagen [1991], Gradus et Smulders [1993] John et Pecchenino [1994] et bien d'autres). Plusieurs auteurs (dont Forster [1975], Comolli [1977] et Dasgupta [1982]) ont ainsi proposé de renoncer à cette approche au profit d'une formulation de la fonction d'assimilation de la pollution reflétant notamment l'idée que des niveaux de pollution élevés altèrent drastiquement la capacité de régénération de la nature. En effet, pour eux, il est déraisonnable de penser que plus le niveau de pollution est important, plus la capacité d'assimilation naturelle est forte. Cette proposition a correspondu à l'avènement d'une littérature introduisant une fonction d'assimilation en forme de U inversé présentant la particularité de s'annuler au delà d'un certain seuil de dommage (définissant le seuil d'irréversibilité). La conséquence essentielle de la prise en compte de ce type de discontinuité dans le processus naturel de régénération, dans les modèles de contrôle optimal de la pollution ou de croissance optimale, réside dans l'existence d'une multiplicité d'équilibres dont certains sont associés à un niveau de pollution irréversible (Forster [1975], Cesar et de Zeeuw [1994], Tahvonen et Withagen [1996], Toman et Withagen [2000]). Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a intégré l'irréversibilité de la pollution afin d'en analyser les répercussions sur la relation entre croissance et environnement à proprement parler.

L'objet de ce travail consiste à savoir s'il est possible de valider, dans un cadre théorique, l'affirmation de Dasgupta et Mäler [2002] selon laquelle la notion de courbe de

Kuznets environnementale doit être rejetée dès que l'on tient compte de l'irréversibilité potentielle des dommages occasionnés à l'environnement. Notre volonté est donc de mesurer les répercussions de l'irréversibilité potentielle de la pollution sur la relation entre croissance et environnement. Plus précisément, nous cherchons à isoler les raisons pour lesquelles l'irréversibilité pourrait remettre en cause l'émergence de la CKE telle qu'elle a été détectée dans le modèle à générations imbriquées proposé par John et Pecchenino [1994]. L'intuition étant que l'obtention de ce type de relation, dans leur étude avec polluant stock, est largement conditionnée à l'hypothèse d'un taux d'assimilation de la pollution par la nature constant. Pour ce faire, nous généralisons leur cadre d'analyse en remplaçant l'hypothèse d'une assimilation croissante à taux constant par une fonction de décroissance naturelle de la pollution du type de celle employée notamment par Forster [1975].

Dans ce contexte, nous démontrons l'existence d'une multiplicité d'équilibres aux propriétés diamétralement opposées. Si certains des équilibres présentent un environnement sauvegardé, d'autres exhibent au contraire un niveau de pollution irréversible malgré une activité de dépollution opérante. Ce résultat implique que, contrairement au modèle de John et Pecchenino [1994], il ne sera pas toujours possible de faire marche arrière du point de vue de la maîtrise des dommages environnementaux provoqués par l'activité humaine. En effet, lors des phases de développement où les agents n'ont pas suffisamment d'incitations à combattre la pollution, la croissance économique s'accompagne de l'accumulation d'un passif environnemental. Mais, il est vraisemblable que ce passif soit tel que, une fois que les agents s'engagent dans une activité de dépollution, cet effort soit insuffisant pour empêcher une dégradation irrémédiable de l'environnement. Celle-ci provoque en retour une phase de récession économique qui conduit finalement l'économie vers une trappe de pauvreté à la fois écologique et économique. Nous isolons donc une autre source possible d'émergence de trappes de pauvreté qui repose sur l'existence d'un effet de seuil affectant la loi de régénération de l'environnement (voir Azariadis et Stachursky [2005] pour un survol de la littérature sur les trappes). L'analyse dynamique confirme que la CKE n'est plus la règle. A partir d'un exemple numérique nous détectons plutôt une sorte de courbe de Kuznets dégénérée représentant la trajectoire de convergence vers la solution associée à un niveau de pollution irréversible.

Ce travail est structuré de la manière suivante. Dans la seconde section, nous présentons le modèle en insistant sur les caractéristiques de l'évolution de la pollution et sur les choix et arbitrages auxquels sont confrontés les agents privés. La section 3 est consacrée à l'étude détaillée des propriétés de l'équilibre. Dans la section suivante, nous menons une discussion à partir d'un exemple numérique destiné à illustrer les différentes trajectoires d'équilibre remarquables. Enfin, la cinquième section conclut.

2.2 Le modèle

Nous proposons un modèle à générations imbriquées *à la* Allais [1947], Samuelson [1958], Diamond [1965]. L'économie se compose d'un unique secteur de production. Les firmes, parfaitement concurrentielles, y produisent un bien homogène, le numéraire, destiné à la fois à la consommation et à l'investissement des ménages. La consommation des ménages génère de la pollution qui s'accumule dans le temps.

2.2.1 L'environnement

En l'absence d'activité humaine, l'évolution de la pollution est décrite, pour des niveaux non négatifs de cette variable ($P_t \geq 0$), par l'équation suivante :

$$P_{t+1} = P_t - \Gamma(P_t) \tag{2.1}$$

où $\Gamma(P_t)$ correspond à la fonction de décroissance naturelle de la pollution qui donne, à chaque période, la quantité de pollution assimilée par la nature.

Par conséquent, la capacité de la nature à assimiler la pollution dépend de la concentration du polluant. Nous voulons plus particulièrement rendre compte de l'idée selon laquelle des niveaux de pollution trop élevés peuvent altérer le processus de régénération de l'environnement. Notre approche se fonde sur les conclusions de travaux antérieurs en biologie et en écologie. Depuis les études d'Holling [1973] ou Peterman [1980], la preuve a été faite que certains écosystèmes peuvent posséder plus d'un équilibre stable. Cette propriété implique que lorsqu'ils sont soumis à des perturbations fortes, ces systèmes naturels s'éloignent, de manière irréversible, de leur état originel. L'exemple le plus populaire d'irréversibilité des dommages environnementaux est donné par les lacs en eau peu profonde (*shallow lakes*)[1].

Afin d'intégrer cette éventualité, nous recourons, à la manière de Forster [1975], Tahvonen et Withagen [1996] ou Chevé [2000], à une fonction d'assimilation en forme de U inversé (voir la figure 2.1). Ses propriétés, résumées dans notre première hypothèse, traduisent la possibilité que les dommages causés par la pollution à l'environnement soient irréversibles.

Hypothèse 1. *la fonction d'assimilation $\Gamma(P_t) : \mathbb{R}^+ \to \mathbb{R}^+$ (avec $\Gamma(0) = 0$) est concave ($\Gamma''(P_t) \leq 0$), croissante jusqu'au niveau $\tilde{P}$ ($\Gamma'(P_t) \geq 0\ \forall P_t \leq \tilde{P}$) puis, décroissante jusqu'au seuil d'irréversibilité $\bar{P}$ ($\Gamma'(P_t) < 0\ \forall P_t \in]\tilde{P}, \bar{P}[$) avec $\tilde{P} < \bar{P}$. Au delà de cette valeur, l'assimilation est nulle : $\Gamma(P_t) = 0\ \forall P_t \geq \bar{P}$. Nous supposons également que la quantité de pollution assimilée est toujours inférieure au stock de polluant i.e. $\Gamma(P_t) < P_t\ \forall P_t > 0$.*

[1] Cet exemple est présenté, en détail, dans la section du premier chapitre consacrée à la CKE.

Lorsque l'assimilation est opérante ($P_t < \bar{P}$), cette fonction présente l'allure de la fonction logistique. En effet, pour des concentrations de pollution faibles ($P_t \leq \tilde{P}$), la quantité de pollution assimilée par la nature est d'abord croissante avec le stock. Au delà du niveau $\tilde{P}$, la capacité de régénération s'épuise et l'assimilation décroît avec la pollution. Enfin, dès que la pollution franchit le niveau critique $\bar{P}$, la nature n'est plus capable d'absorber la pollution et, ce processus est irrémédiable. Autrement dit, à partir du niveau de pollution $\tilde{P}$, la nature a d'autant plus de difficultés à assimiler la pollution que le stock de polluant est important et, au delà d'un seuil de dommage déterminé $\bar{P}$, la pollution devient irréversible en raison de l'annihilation complète et définitive de la capacité de régénération de la nature.

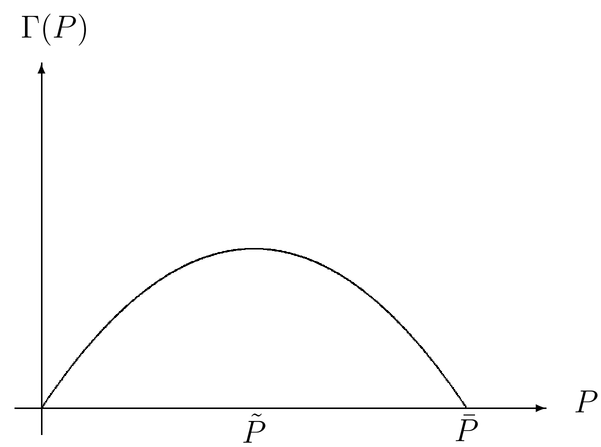

FIG. 2.1 – La fonction d'assimilation

La pollution s'accompagne d'une dégradation de la qualité de l'environnement. Nous définissons un indice de la qualité de l'environnement Q_t représentant, à chaque période, l'écart entre un niveau stationnaire d'environnement et le niveau de pollution : $Q_t = \bar{Q} - P_t$. Le niveau $\bar{Q}$ correspond au niveau stationnaire maximum d'environnement en l'absence d'activité humaine (obtenu pour une pollution nulle). Le fait de supposer que la pollution est non négative revient à considérer que $\bar{Q}$ constitue la borne supérieure du domaine de variation de la qualité de l'environnement. La dynamique de l'indice Q_t est donnée par,

$$Q_{t+1} = N(Q_t) \tag{2.2}$$

où la fonction $N(Q_t) :]-\infty, \bar{Q}] \rightarrow]-\infty, \bar{Q}]$ peut s'interpréter comme une sorte de loi de croissance de l'environnement. Cette fonction est définie par morceaux :

$$N(Q_t) = \begin{cases} Q_t & \forall Q_t \leq \bar{Q} - \bar{P} \\ Q_t + \Gamma(\bar{Q} - Q_t) & \forall Q_t \in]\bar{Q} - \bar{P}, \bar{Q}] \end{cases} \tag{2.3}$$

Ses propriétés se déduisent immédiatement de celles de la fonction d'assimilation. Pour des niveaux d'environnement $Q_t \leq \bar{Q} - \bar{P}$ (correspondants à des niveaux de pollution irréversibles), elle est simplement linéaire. Au delà du seuil d'irréversibilité $\bar{Q} - \bar{P}$, elle est croissante et concave dans la qualité de l'environnement (voir le détail des propriétés de $N(Q_t)$ dans l'annexe $A.1$).

Nous exposons à présent les choix et arbitrages auxquels sont confrontés les agents privés.

2.2.2 La production

Dans le cadre de la concurrence parfaite, les firmes produisent le bien final Y_t à partir d'une technologie à rendements d'échelle constants utilisant le facteur travail L_t et le facteur capital K_t :

$$Y_t = F(K_t, L_t) \tag{2.4}$$

Hypothèse 2. *la fonction de production est croissante et concave dans chacun de ses arguments : $F_i \geq 0$, $F_{ii} \leq 0$ pour $i = 1, 2$. Elle satisfait les conditions d'Inada pour le capital : $F(0, L) = 0$, $\lim_{K_t \to 0} F_1(K_t, L_t) = +\infty$ et $\lim_{K_t \to +\infty} F_1(K_t, L_t) = 0$.*

La propriété d'homogénéité de degré 1 permet d'écrire la fonction de production en termes intensifs : $F(K_t, L_t) = L_t F(k_t, 1) = L_t f(k_t)$ avec $k_t = K_t/L_t$. Sous l'hypothèse précédente, nous savons que la production par tête $f(k_t)$ est également croissante et concave en k_t et qu'elle respecte les conditions d'Inada : $f(0) = 0$, $\lim_{k_t \to 0} f'(k_t) = +\infty$ et $\lim_{k_t \to +\infty} f'(k_t) = 0$.

Sachant que le capital se déprécie au taux $\delta < 1$, l'objectif de la firme est de maximiser ses profits étant donné les prix des facteurs de production :

$$\max_{K_t, L_t} F(K_t, L_t) - r_t K_t - w_t L_t - \delta K_t \tag{2.5}$$

Nous obtenons les conditions classiques d'égalisation des prix des facteurs à leurs productivités marginales, exprimées en termes des variables par tête :

$$w_t = f(k_t) - k_t f'(k_t) \tag{2.6}$$

$$r_t = f'(k_t) - \delta \tag{2.7}$$

avec w_t le taux de salaire et r_t le taux d'intérêt réel.

2.2.3 Les ménages

Nous considérons une économie à horizon infini composée d'agents à durée de vie finie. A chaque période $t = 1, 2, ...$, une nouvelle génération naît et vit deux périodes. La population est supposée constante et la taille de chaque génération est normalisée à 1. Un agent jeune de la génération t offre de manière inélastique une unité de travail en contrepartie de laquelle il perçoit un salaire w_t. Ce revenu de première période lui sert à la fois à épargner s_t et à engager des dépenses de dépollution m_t[2][3]. Lorsqu'il est retraité, l'agent consomme c_{t+1} l'intégralité de son revenu constitué du rendement de l'épargne ($R_{t+1}s_t$ avec $R_{t+1} = 1 + r_{t+1}$ le facteur d'intérêt). Les contraintes budgétaires de première et seconde périodes de vie s'écrivent respectivement :

$$w_t = s_t + m_t \tag{2.8}$$

$$c_{t+1} = R_{t+1}s_t \tag{2.9}$$

Les préférences de l'agent né en t portent sur la consommation et la qualité de l'environnement Q_{t+1} de seconde période de vie. Ces préférences sont décrites par la fonction d'utilité $U(c_{t+1}, Q_{t+1})$.

Hypothèse 3. *la fonction d'utilité est croissante et concave en chacun de ses arguments : $U_i \geq 0$, $U_{ii} \leq 0$ pour $i = 1, 2$. La dérivée croisée est positive : $U_{12} \geq 0$. Enfin, nous imposons la condition suivante : $\lim_{c\to 0} U_1(c, P) = +\infty$.*

Notons que l'hypothèse d'un effet croisé positif est classique dans la littérature qui introduit un indice de la qualité de l'environnement plutôt que la pollution dans l'utilité (outre John et Pecchenino [1994], voir Mohtadi [1996] ou Ono [2002]). Elle signifie l'existence d'un effet de complémentarité entre l'environnement et la consommation dans l'utilité des agents (Jouvet et Rotillon [2005]). Selon cet effet, une hausse de l'environnement, en augmentant l'utilité marginale de la consommation, stimule le désir de consommer. Dans ce modèle, une consommation plus importante s'associe à une épargne plus forte et tend à accélérer l'accumulation du capital. Cette hypothèse va ainsi influencer, de manière cruciale, la relation entre capital et environnement à la solution intérieure que nous définirons dans la section 2.3.1. L'hypothèse alternative $U_{12} < 0$ traduit au contraire l'idée selon laquelle une hausse de l'environnement est une incitation à moins consommer pour les ménages (et renvoie plutôt à une hypothèse de substituabilité).

La qualité de l'environnement subit une dégradation occasionnée par la pollution. Dans le modèle à générations imbriquées, on retrouve généralement deux manières de

[2]Il est possible de réinterpréter m_t comme une taxe prélevée par les pouvoirs publics afin de financer l'activité de dépollution (John *et al.* [1995]). Nous parlerons indifféremment d'activité de dépollution, de maintenance ou de dépense de dépollution pour définir m_t.

[3]Nous n'introduisons pas de consommation de première période de vie. Cette hypothèse simplificatrice, en excluant l'arbitrage classique de consommation sur le cycle de vie, permet de se focaliser sur l'arbitrage, central dans ce modèle, entre consommation du bien final et "consommation" du bien environnemental (voir le problème de l'agent représentatif). Dans tous les cas, ajouter une consommation de première période ne changerait pas les propriétés qualitatives du modèle.

définir la source des émissions. Parmi les travaux présentés dans le chapitre 1 (quatrième section), certains considèrent que la production du bien final est responsable de la pollution (Howarth et Noorgard [1992], Ono [2003] ou Jouvet, Michel et Rotillon [2005]). Nous admettons plutôt, dans la lignée des études de John et Pecchenino [1994], John *et al.* [1995] ou Ono [1996], que les émissions proviennent de la consommation des ménages. En outre, le flux périodique d'émission peut être contrôlé grâce à leurs dépenses de dépollution m_t. Les émissions nettes sont représentées par la fonction linéaire suivante : $E(c_t, m_t) = \beta c_t - \gamma m_t$ avec $0 \leq \beta, \gamma < 1$. La qualité de l'environnement évolue donc au gré des émissions polluantes et de sa propre loi de croissance :

$$Q_{t+1} = N(Q_t) - E(c_t, m_t) \tag{2.10}$$

Il convient de noter que cette modélisation diffère de celle employée par John et Pecchenino [1994] qui font l'hypothèse d'une assimilation de la pollution à taux constant pour formuler la dynamique environnementale[4].

Dans notre cadre d'analyse, les ménages sont typiquement confrontés à une externalité intergénérationnelle. Lorsque l'agent retraité consomme, il ne tient pas compte des répercussions négatives de cette décision sur les générations futures via la qualité de l'environnement qui leur est léguée. De même, au moment de choisir le montant de ressources à allouer à la dépollution, si l'agent jeune intègre l'effet positif de cette activité sur l'environnement dont il disposera une fois retraité, il ne se préoccupe pas de ses effets futurs. L'importance de la dimension intergénérationnelle est renforcée relativement à l'étude de John et Pecchenino [1994]. En effet, les décisions des générations présentes font courir le risque aux générations futures de se trouver en présence d'un environnement irrémédiablement dégradé (du fait de l'irréversibilité potentielle de la pollution).

L'agent représentatif de la génération t doit procéder à l'arbitrage suivant. Il fixe l'allocation de ses ressources entre l'épargne en capital physique (qui détermine la consommation du bien final) et la maintenance (qui influence la "consommation" du bien environnemental) de manière à maximiser son utilité. Etant donné ses contraintes budgétaires et l'évolution de la qualité de l'environnement, son objectif est résumé par le problème suivant :

$$\max_{s_t, m_t, c_{t+1}} U(c_{t+1}, Q_{t+1})$$

[4]Ils utilisent en fait la formalisation suivante : $Q_{t+1} = (1 - \Gamma)Q_t - \beta c_t + \gamma m_t$ où $0 \leq \Gamma < 1$ représente précisément le taux d'assimilation.

$$\begin{cases} s.c \\ w_t = s_t + m_t \\ c_{t+1} = R_{t+1} s_t \\ Q_{t+1} = N(Q_t) - E(c_t, m_t) \\ m_t \geq 0 \end{cases}$$

Les conditions du premier ordre s'écrivent en toute généralité :

$$-R_{t+1} U_1(c_{t+1}, Q_{t+1}) + \gamma U_2(c_{t+1}, Q_{t+1}) + \mu = 0 \tag{2.11}$$

$$\mu m_t = 0 \tag{2.12}$$

avec $\mu \geq 0$, le multiplicateur de Lagrange associé au problème.

La contrainte de non négativité sur m_t nécessite de distinguer le cas où la dépollution est inopérante *i.e.* $m_t = 0$ du cas où l'agent contribue à la dépollution *i.e.* $m_t \geq 0$. De plus, l'étude de ces deux situations doit également être scindée en deux sous-cas selon que la qualité de l'environnement soit en deçà ou au delà du seuil d'irréversibilité $\bar{Q} - \bar{P}$.

Dans la section suivante, nous procédons à la caractérisation de l'équilibre concurrentiel en analysant séparément les quatre configurations envisageables pour lesquelles les dynamiques économique et environnementale présenteront des propriétés nettement distinctes.

2.3 Analyse d'équilibre

2.3.1 La solution intérieure

Lorsque le problème des ménages admet une solution intérieure, la condition du premier ordre devient

$$R_{t+1} U_1(c_{t+1}, Q_{t+1}) = \gamma U_2(c_{t+1}, Q_{t+1}) \tag{2.13}$$

Elle traduit effectivement l'arbitrage relatif à la décision de dépollution. Si une hausse de la dépense m_t permet d'accroître la qualité de l'environnement dont bénéficiera l'agent en $t+1$ donc son bien-être "environnemental" (terme de droite), elle se fait au détriment de l'épargne et de sa consommation de seconde période de vie, ce qui se traduit par une chute du bien-être non environnemental (terme de gauche). Dès lors, le choix optimal de m_t est tel que le bénéfice marginal et le coût marginal de la maintenance soient égalisés.

Nous définissons à présent l'équilibre intertemporel avec prévisions parfaites.

Définition 1. *un équilibre intérieur avec prévisions parfaites est la donnée de la suite des variables par tête* $\{c_t, m_t, s_t\}$*, de la suite des variables agrégées* $\{L_t, K_t, Q_t\}$ *et de la suite de prix* $\{R_t, w_t\}$ *qui sont telles que :*

i/ Les agents sont à leur optimum : la condition d'arbitrage (2.13) de l'agent représentatif et les deux conditions de la maximisation du profit (2.6) et (2.7) sont vérifiées,

ii/ les marchés sont équilibrés : $L_t = N = 1$ *sur le marché du travail et* $K_{t+1} = s_t (= k_{t+1})$ *sur le marché du capital,*

iii/ les contraintes budgétaires (2.8) et (2.9) sont respectées,

iv/ la dynamique de la qualité de l'environnement est celle décrite par (2.10).

L'analyse de l'équilibre revient donc à considérer le système d'équations composé de (2.6)-(2.13) et de la condition d'équilibre du marché du capital. En combinant ces conditions, il est possibles d'exprimer les décisions de consommation et de maintenance comme des fonctions du stock de capital,

$$c_t = R(k_t)k_t = (1-\delta)k_t + k_t f'(k_t) \tag{2.14}$$

$$m_t = w(k_t) - k_{t+1} = f(k_t) - k_t f'(k_t) - k_{t+1} \tag{2.15}$$

et, la fonction d'émission $E(c_t, m_t)$ peut se réécrire :

$$E(k_t, k_{t+1}) = \beta\left((1-\delta)k_t + k_t f'(k_t)\right) - \gamma\left(f(k_t) - k_t f'(k_t) - k_{t+1}\right) \tag{2.16}$$

Après avoir défini la part du capital dans l'output et l'élasticité de substitution capital-travail comme étant respectivement données par,

$$s(k_t) = \frac{k_t f'(k_t)}{f(k_t)} \tag{2.17}$$

$$\sigma(k_t) = -\frac{(1 - s(k_t))f'(k_t)}{k_t f''(k_t)} \tag{2.18}$$

nous formulons deux conditions qui affectent les propriétés de la fonction de production.

Hypothèse 4. *la fonction de production est supposée satisfaire les deux conditions suivantes :*

$$\lim_{k_t \to 0} \frac{f(k_t) - k_t f'(k_t)}{k_t} > 1 \tag{2.19}$$

$$\sigma(k_t) \geq 1 - s(k_t) \tag{2.20}$$

La condition (2.19) est similaire à la condition nécessaire d'absence de *catching point*, présentée dans De La Croix et Michel [2002], selon laquelle la première unité de capital doit être suffisamment efficace, en termes de la productivité du travail, pour éviter l'équilibre trivial avec $k = 0$. Sous cette hypothèse, la maintenance est positive, en stationnaire, dans un voisinage de 0. La seconde inégalité (2.20) stipule que l'élasticité intertemporelle de substitution doit être supérieure à la part du travail dans la production[5]. Cette condition est suffisante pour s'assurer du fait que la consommation est une fonction croissante du stock de capital.

En substituant ensuite (2.14) dans (2.13), on obtient l'équation suivante,

$$R(k_{t+1})U_1(c(k_{t+1}), Q_{t+1}) - \gamma U_2(c(k_{t+1}), Q_{t+1}) = 0 \tag{2.21}$$

qui définit une relation d'équilibre,

$$Q_t = Q^e(k_t) \tag{2.22}$$

valable pout tout t, monotone croissante[6]. Cette relation régit la dynamique économique dans la totalité de la zone caractérisée par une dépense de dépollution opérante et ce, indépendamment du fait de savoir si la pollution est irréversible ou pas.

Enfin, l'équation obtenue en remplaçant (2.16) dans (2.10), combinée à l'équation (2.21), termine de caractériser un système en $(k_t, Q_t, k_{t+1}, Q_{t+1})$ représentant la dynamique à l'équilibre :

$$\begin{cases} R(k_{t+1})U_1(c(k_{t+1}), Q_{t+1}) - \gamma U_2(c(k_{t+1}), Q_{t+1}) = 0 \\ Q_{t+1} = N(Q_t) - E(k_t, k_{t+1}) \end{cases} \tag{2.23}$$

Nous nous focalisons maintenant sur les propriétés de l'équilibre selon que l'économie ait atteint ou pas le niveau de pollution irréversible $\bar{P}$.

Existence de l'état stationnaire : Un état stationnaire est solution du système suivant :

$$\begin{cases} R(k)U_1(c(k), Q) - \gamma U_2(c(k), Q) = 0 \\ Q - N(Q) = -E(k) \end{cases} \tag{2.24}$$

Nous résumons les conditions d'existence d'une solution intérieure dans la proposition suivante. L'étude est limitée à l'intervalle de variation du capital $[0, \bar{k}]$ sur lequel la maintenance stationnaire est positive : $m(k) \geq 0 \ \forall k \in [0, \bar{k}]$ (voir l'équation (2.38) de l'annexe $A.1$ pour la définition de $\bar{k}$).

[5]Cette condition semble plutôt raisonnable sachant que la plupart des estimations de la part du travail dans la production et de l'élasticité de substitution donnent des valeurs respectivement comprises entre 0.6 et 0.7 et proches de 1. Un exemple de fonction de production satisfaisant ce critère est la technologie Cobb-Douglas. Nous renvoyons le lecteur à l'annexe $A.1$ pour une analyse détaillée des propriétés des relations (2.14), (2.15) et (2.16).

[6]Par le théorème des fonctions implicites, nous obtenons :

$$Q^{e\prime}(k_t) = -\frac{R'U_1 + Rc'U_{11} - \gamma c'U_{12}}{RU_{12} - \gamma U_{22}}$$

cette dérivée est positive sous l'ensemble de nos hypothèses. En particulier, nous confirmons le rôle joué par la condition $U_{12} \geq 0$.

Proposition 1 *a) Sous la condition,*

$$\lim_{k \to 0} \frac{r(k)}{m'(k)} < \frac{\beta + \gamma}{\beta} \tag{2.25}$$

il existe un état stationnaire (k_{ii}^*, Q_{ii}^*)[7] *caractérisé par un niveau de qualité de l'environnement "irréversible".*

b) Sous les conditions additionnelles suivantes,

$$\sup_{P \in [0, \bar{P}]} \{\Gamma(P)\} \geq \sup_{k \in [0, \bar{k}]} \{E(k)\} \tag{2.26}$$

$$Q^e(\bar{k}) \geq \bar{Q} - \tilde{P} \tag{2.27}$$

il existe aussi une solution (k_{ir}^*, Q_{ir}^*) *avec un niveau d'environnement supérieur au seuil* $\bar{Q} - \bar{P}$.

Démonstration. voir l'annexe $A.2$. ∎

La condition (2.25) est suffisante pour prouver l'existence d'une solution intérieure avec pollution irréversible. Cette inégalité implique que la fonction d'émission $E(k)$, évaluée en stationnaire, est négative dans un voisinage de 0 (puisqu'on a $E(0) = 0$ et $E'(0) < 0$). Considérer des émissions négatives revient, de manière équivalente, à supposer qu'il existe une production humaine d'environnement. Ce cas de figure (repéré notamment par Forster [1975]) est d'autant plus vraisemblable, dans notre modèle, que l'impact d'une hausse du capital sur la maintenance dépasse ses répercussions sur la consommation[8]. Cela suppose également que la différence entre les paramètres de diffusion des émissions β et d'efficacité de la dépollution γ est relativement faible (quand $\beta \geq \gamma$).

La condition supplémentaire (2.26), pour une solution réversible, correspond à une réécriture, dans notre cadre d'analyse en équilibre général, de la condition utilisée par Tavhonen et Withagen [1996]. Elle traduit l'idée selon laquelle la quantité maximum de pollution assimilée par la nature est intrinsèquement supérieure au volume maximum des émissions sur les domaines de définition pertinents du capital et de la pollution[9].

[7]L'indice i vaut pour les solutions intérieures. Le second i (*resp.* r) indique simplement que la solution considérée présente un niveau de pollution irréversible (*resp.* réversible). Par la suite, l'indice c fera référence aux solutions contraintes.

[8]Si l'on se réfère encore à l'exemple d'une technologie Cobb-Douglas, on vérifie immédiatement que

$$\lim_{k \to 0} \frac{c(k)}{m(k)} < 1$$

dès que la part du capital dans la production est inférieure à $1/2$. Sachant que $c(0) = m(0) = 0$, cela revient bien à avoir un impact plus fort sur $m(k)$ que sur $c(k)$ d'une hausse du capital.

[9]Cette hypothèse tend finalement à "retarder" ou limiter la possible survenue d'un état irréversible. Tahvonen et Salo [1996] considèrent l'alternative qui implique, au contraire, un renforcement du risque de franchissement du seuil d'irréversibilité.

Enfin, le recours à l'inégalité (2.27) assure précisément une certaine correspondance entre les domaines de définition des variables étudiées. Cette condition technique nous autorise, sans perte de généralité, à mener à son terme l'étude de l'existence.

Ainsi, l'implication immédiate du choix d'une fonction d'assimilation en forme de U inversé est l'existence d'une multiplicité d'états stationnaires dont certains exhibent un niveau de pollution irréversible. Nous retrouvons donc un résultat proche de celui d'études, en équilibre partiel, qui introduisent ce type de formulation de la capacité de régénération de la nature dans les modèles de contrôle optimal (voir notamment Forster [1975], Tahvonen et Withagen [1996] ou Toman et Withagen [2000]).

Après avoir énoncé les conditions d'existence d'un état stationnaire, il convient de mener une analyse de la stabilité locale de l'équilibre.

Dynamique locale : La linéarisation du système (2.23) dans un voisinage d'un état stationnaire intérieur (k_i^*, Q_i^*) donne :

$$\begin{cases} dQ_{t+1} = Q^{e\prime}(k_i^*)dk_{t+1} \\ dQ_{t+1} = N'(Q_i^*)dQ_t - (E'(k_i^*) - \gamma)dk_t - \gamma dk_{t+1} \end{cases} \tag{2.28}$$

Le terme $E'(k_i^*) - \gamma = \beta c'(k_i^*) - \gamma w'(k_i^*)$, dans la seconde équation, a un signe *a priori* indéterminé. Il a trait à l'impact d'une hausse du stock de capital courant sur les émissions polluantes et la qualité de l'environnement. Cette hausse se répercute selon deux effets de sens contraire. Elle provoque d'abord une augmentation de la consommation qui va de pair avec un accroissement de la pollution. Elle s'associe également à une hausse du salaire qui stimule les dépenses de dépollution au profit d'une baisse des émissions polluantes. Si l'effet consommation l'emporte ($E'(k_i^*) - \gamma > 0$), alors la hausse du capital s'accompagne finalement d'une hausse des émissions et d'une détérioration de la qualité de l'environnement.

La manipulation de ces expressions permet d'obtenir le système linéarisé dans les variables d'état et de donner les conditions de la stabilité locale. Nous distinguons une nouvelle fois le cas $Q_i^* \leq \bar{Q} - \bar{P}$ du cas $Q_i^* > \bar{Q} - \bar{P}$

Proposition 2 *a) Un état stationnaire irréversible est stable si et seulement si*

$$0 < E'(k_{ii}^*) \leq 2(\gamma + (Q^e)'(k_{ii}^*)) \tag{2.29}$$

b) Quand le niveau d'environnement stationnaire est supérieur au seuil $\bar{Q} - \bar{P}$, la condition nécessaire et suffisante devient :

$$(N'(Q_{ir}^*) - 1)Q^{e\prime}(k_{ir}^*) < E'(k_{ir}^*) \leq 2\gamma + (1 + N'(Q_{ir}^*))Q^{e\prime}(k_{ir}^*) \tag{2.30}$$

Démonstration. Voir l'annexe B.1. ■

La condition (2.29) impose d'une part que les émissions sont croissantes avec le capital et que d'autre part, l'impact d'une hausse du capital sur les émissions est inférieur à une borne définie notamment par son impact sur la qualité de l'environnement (mesuré par $Q^{e\prime}(k_{ii}^*)$). Elle traduit simplement la capacité de l'économie à assimiler un choc sur le capital, à l'état stationnaire, pour retrouver, en quelques périodes, sa situation originelle. Lorsque le niveau de pollution est réversible, la condition (2.30) généralise (2.29). Nous notons que l'inégalité $N'(Q_{ir}^*) \leq 1$ est suffisante pour s'assurer du fait que les répercussions d'un choc sur la qualité de l'environnement sont amorties d'une période sur l'autre[10].

En résumé, l'analyse de la solution intérieure révèle l'existence d'une multiplicité d'équilibres aux propriétés diamétralement opposées puisque certains s'accompagnent d'une irréversibilité de la pollution tandis que d'autres présentent un environnement préservé. La coexistence de ces deux types de solution intérieure signifie que l'engagement des agents dans une activité de dépollution ne suffit pas à protéger l'économie contre la survenue d'un état de long terme aux caractéristiques environnementales médiocres. Ce résultat se différencie des conclusions de John et Pecchenino [1994] qui montrent, sous l'hypothèse d'un taux d'assimilation constant, que la maintenance est une "condition suffisante" à l'amélioration de la qualité de l'environnement.

Une synthèse des propriétés de l'équilibre intérieur fait également apparaître qu'un processus de croissance non régulée peut conduire l'économie polluante vers une trappe de pauvreté à la fois économique et écologique. En effet, les solutions "irréversibles" se caractérisent non seulement par un niveau d'environnement inférieur au seuil d'irréversibilité $\bar{Q} - \bar{P}$ mais aussi, par un niveau de capital inférieur à celui de n'importe quelle solution réversible. Ce résultat est à rapprocher de la littérature théorique sur les trappes de pauvreté. Depuis le travail fondateur d'Azariadis et Drazen [1990], de nombreuses études ont cherché à déterminer les facteurs à l'origine de l'émergence de tels états (voir Azariadis et Stachurski [2005] pour un survol récent de la littérature). Parmi les arguments les plus fréquemment invoqués, figurent un investissement insuffisant en capital humain ou l'existence d'externalités de seuil pouvant affecter soit la technologie de production soit la technologie d'éducation[11]. Nous participons donc à cette littérature en proposant ici une autre source possible d'apparition de trappes, à

[10] La formulation linéaire de la dynamique environnementale (voir la note 4) ne permet pas de saisir ce nouvel effet. La spécificité et les limites de cette approche résident dans le fait que la nature est toujours en mesure d'"absorber" un choc sur l'environnement qui retourne à son niveau stationnaire dans un laps de temps fini. Ici, si $N'(Q_{ir}^*) > 1$, alors ce choc se répercute de manière plus que proportionnelle et la stabilité de l'équilibre est compromise.

[11] et qui se manifestent, par exemple, par l'existence de rendements d'échelle croissants pour des niveaux suffisants de capital, physique ou humain.

savoir, l'irréversibilité de la pollution. La valeur critique $\bar{Q} - \bar{P}$ traduit précisément l'existence d'un effet de seuil qui joue au niveau de la loi de régénération de la nature. De plus, nous obtenons une solution qui présente une double caractéristique de trappe puisqu'elle cumule à la fois un niveau de richesse bas et une concentration du polluant élevée.

Le fait de savoir si l'économie va être happée par la trappe de pauvreté ou si elle va, au contraire, connaître une phase de croissance économique jointe à une amélioration de la qualité de l'environnement va dépendre, de manière évidente, de sa situation initiale. Une économie disposant d'un niveau de richesse initial bas et d'une qualité de l'environnement moyenne aura probablement le plus de difficultés à s'échapper de cette zone d'appauvrissement. Nous illustrerons notre propos, dans la section 2.4, en présentant notamment les bassins d'attraction de ces différentes solutions.

2.3.2 La solution contrainte

Nous analysons ici la solution du problème lorsque la contrainte de non négativité sur la dépollution est saturée *i.e.* $m_t = 0$. Une justification de l'étude de ce cas pourrait reposer sur le constat selon lequel certaines économies, les moins développées, pourraient ne pas se préoccuper de la préservation de l'environnement et privilégier, au contraire, l'accumulation de richesse. Autrement dit, ces économies, dans les premiers stades de développement, disposeraient d'un niveau de richesse trop faible (combiné à une qualité de l'environnement élevée) pour être incitées à investir dans la dépollution (Dasgupta *et al.* [2002]).

Définition 2. *Un équilibre contraint avec prévisions parfaites est la donnée de la suite des variables par tête $\{c_t, s_t\}$, de la suite des variables agrégées $\{L_t, K_t, Q_t\}$ et de la suite de prix $\{R_t, w_t\}$ telles que :*

i/ Les agents sont à leur optimum : les ménages épargnent l'intégralité de leur revenu : $w_t = s_t$ et, les deux conditions de la maximisation du profit (2.6) et (2.7) sont vérifiées,

ii/ les marchés sont équilibrés : $L_t = N = 1$ sur le marché du travail et $K_{t+1} = s_t (= k_{t+1})$ sur le marché du capital,

iii/ les contraintes budgétaires (2.8) et (2.9) sont respectées (pour $m_t = 0$),

iv/ la dynamique de la qualité de l'environnement est celle décrite par (2.10) (également pour $m_t = 0$) .

Dans cette situation, l'agent représentatif n'a plus aucun arbitrage à réaliser puisque le poids de la contrainte financière est tel que l'intégralité de son salaire de première période de vie est allouée à l'épargne. L'analyse de l'équilibre passe donc par l'étude du même système d'équations qu'à la solution intérieure sauf que la condition d'arbitrage du consommateur (2.13) est remplacée par $m_t = 0$. Nous obtenons immédiatement la dynamique du capital à l'équilibre,

$$k_{t+1} = f(k_t) - k_t f'(k_t) \tag{2.31}$$

et, il est important de noter qu'elle est indépendante de l'évolution de la qualité de l'environnement qui, quant à elle, est conditionnée au fait de savoir s'il y a, ou pas, irréversibilité de la pollution. Les émissions dépendent seulement de la consommation : $E(k_t) = \beta c(k_t)$ sachant que l'expression de la consommation, à l'équilibre, est inchangée et correspond toujours à (2.14).

Le système dynamique, à l'équilibre contraint, est ainsi caractérisé par les équations d'évolution du capital (2.31) et de la qualité de l'environnement :

$$\begin{cases} k_{t+1} = f(k_t) - k_t f'(k_t) \\ Q_{t+1} = N(Q_t) - E(k_t) \end{cases} \tag{2.32}$$

Nous procédons toujours selon la même démarche en analysant les propriétés de l'équilibre associé à une dépense de dépollution nulle.

Existence d'un état stationnaire : Le système (2.32), en stationnaire, peut se réécrire

$$\begin{cases} k = f(k) - kf'(k) \\ Q - N(Q) = -E(k) \end{cases} \tag{2.33}$$

L'analyse des conditions d'existence donne les résultats suivants :

Proposition 3 *Il n'existe pas de solution de long terme associée à une maintenance nulle et à un niveau de pollution irréversible.*

Si les conditions (2.19) et (2.26) sont satisfaites alors, il existe un état stationnaire contraint (k^*_{cr}, Q^*_{cr}) avec réversibilité de la pollution.

Démonstration. voir l'annexe $A.2$. ■

L'absence d'état stationnaire caractérisé par une dépollution nulle et une irréversibilité de la pollution s'explique par l'incapacité de la qualité de l'environnement à se stabiliser à un niveau constant. En effet, dans ce contexte, la capacité d'assimilation est nulle et l'environnement se détériore perpétuellement du fait des émissions polluantes provenant de la consommation. L'unique moyen d'enrayer sa dégradation suppose de cesser de consommer (et même de stopper toute activité productive) mais, sous l'ensemble de nos hypothèses (préférences, technologie), ce cas limite est exclu.

Nous pouvons également préciser le nombre de solutions contraintes avec pollution réversible sachant que les conditions (2.19) et (2.26) sont désormais nécessaires et suffisantes à l'existence.

Corollaire. *Dès que l'inégalité (2.26) est stricte, il existe exactement deux solutions pour* $k \in [0, \bar{k}]$.

Démonstration. voir l'annexe $A.2$. ■

Nous nous intéressons maintenant aux conditions de la stabilité locale des solutions contraintes réversibles.

Dynamique locale : Le système linéarisé dans un voisinage d'un état stationnaire (k^*_{cr}, Q^*_{cr}) s'écrit

$$\left\{ \begin{array}{l} dk_{t+1} = w'(k^*_{cr})dk_t \\ dQ_{t+1} = N'(Q^*_{cr})dQ_t - \beta c'(k^*_{cr})dk_t \end{array} \right. \tag{2.34}$$

et, le résultat de stabilité est immédiat.

Proposition 4 *Les conditions nécessaires et suffisantes de stabilité, pour une solution contrainte, sont :*

$$w'(k^*_{cr}) < 1 \tag{2.35}$$

$$N'(Q^*_{cr}) < 1 \tag{2.36}$$

si l'inégalité (2.26) est stricte, la solution haute est localement stable alors que la solution basse est instable.

Démonstration. voir l'annexe $B.2$. ■

La condition (2.35) implique que l'économie est capable d'absorber un choc sur le capital, tandis que la condition (2.36), comme pour la solution intérieure, traduit l'aptitude de l'environnement à recouvrer son état originel lorsqu'il est soumis à une perturbation.

En fait, sur l'intervalle $[0, \bar{k}]$, il apparaît que le niveau stationnaire k^*_{cr} s'établit, pour toutes les solutions contraintes, à hauteur de la borne supérieure $\bar{k}$. Or, d'après la définition de cette valeur, on a nécessairement $w'(k^*_{cr}) < 1$ (*confer* l'annexe $A.1$). De plus, si l'inégalité (2.26) est stricte, alors les deux solutions contraintes sont associées à des niveaux de qualité de l'environnement situés de part et d'autre du niveau remarquable $\bar{Q} - \tilde{P}$ (tel que $N'(\bar{Q} - \tilde{P}) = 1$) : $Q^{*-}_{cr} < \bar{Q} - \tilde{P} < Q^{*+}_{cr}$. D'après les propriétés de la loi de croissance de l'environnement, cela implique l'instabilité de la solution basse alors que l'état stationnaire haut est localement stable puisque $N'(Q^{*+}_{cr}) < N'(\bar{Q} - \tilde{P}) < N'(Q^{*-}_{cr})$

En résumé, l'analyse révèle que le résultat de multiplicité des équilibres vaut donc autant pour la solution intérieure que pour le cas contraint. Toutefois, ici, les états stationnaires sont nécessairement caractérisés par un niveau de pollution réversible.

Nous abordons à présent le problème de l'admissibilité des différentes solutions ce qui revient à discuter de leur localisation par rapport aux frontières délimitant, pour l'une, la région intérieure de la région contrainte et, pour l'autre, la zone de pollution réversible de la zone d'irréversibilité.

2.3.3 Le cas frontière

La frontière séparant le cas contraint de la situation où les agents contribuent à la dépollution est définie, en toute généralité, par l'équation suivante (obtenue en posant $m_t = \mu = 0$ dans la condition (2.11)) :

$$R(w(k_t))U_1(c(w(k_t)), N(Q_t) - \beta c(k_t)) - \gamma U_2(c(w(k_t)), N(Q_t) - \beta c(k_t)) = 0 \quad (2.37)$$

L'équation (2.37) détermine une relation $Q_t = Q^f(k_t)$ croissante[12], qui caractérise la séparation effective du plan $k - Q$ entre les deux zones. Cette frontière représente l'ensemble des points du plan en lesquels les agents sont indifférents entre le fait d'investir ou pas dans la maintenance. Lorsque l'économie se situe au delà de cette courbe, la qualité de l'environnement est suffisamment importante et/ou le stock de capital est trop bas ce qui implique que les agents n'engagent pas de dépenses de dépollution. Quand l'économie se trouve en deçà de la frontière, les agents contribuent, au contraire, à la dépollution. Il convient de noter, même si les propriétés qualitatives de $Q^f(k_t)$ sont relativement invariantes, que l'allure particulière de cette courbe dépend du niveau d'environnement (qui conditionne l'expression de la fonction $N(Q_t)$). En fait, la seconde frontière séparant les niveaux de pollution réversibles de la zone d'irréversibilité est simplement représentée, dans le plan des variables d'état, par l'horizontale $Q_t = \bar{Q} - \bar{P}$.

La localisation de l'ensemble des états stationnaires relativement à ces frontières est de toute première importance en ce qui concerne l'admissibilité de ces solutions. En effet, nous avons étudié les quatre systèmes dynamiques correspondants chacun à des zones particulières du plan $k-Q$. Nous avons démontré l'existence d'états stationnaires pour trois de ces zones. Mais, il est tout à fait envisageable, lors de la convergence vers une solution stable d'une zone déterminée, que la trajectoire d'équilibre franchisse l'une ou l'autre des frontières avant d'atteindre cette solution . Or, dès que la trajectoire traverse une de ces frontières, la dynamique est régie par un nouveau système totalement différent du précédent. Autrement dit, la solution stable considérée n'est pas admissible puisqu'une fois la frontière traversée, l'économie va converger vers une solution stable différente définie par la dynamique ayant cours dans cette nouvelle zone.

[12] A partir de l'équation (2.37), l'utilisation du théorème des fonctions implicites donne

$$Q^{f\prime}(k) = \frac{R'w'U_1 + Rc'w'U_{11} - \beta c'U_{12} - \gamma c'(w'U_{12} - \beta U_{22})}{N'(\gamma U_{22} - RU_{12})}$$

et, cette dérivée est positive sous l'ensemble de nos hypothèses.

Afin d'avoir une meilleure appréhension du comportement dynamique de cette économie, nous procédons, dans section suivante, à des simulations destinées à illustrer certaines trajectoires d'équilibre remarquables et, à discuter de la possibilité d'émergence de la courbe de Kuznets environnementale.

2.4 Discussion

L'objectif de cette section est d'isoler l'impact d'une fonction d'assimilation en forme de U inversé sur les dynamiques économique et environnementale. La question clé est de savoir si, oui ou non, l'irréversibilité potentielle de la pollution remet en cause le résultat central de l'étude de John et Pecchenino [1994], à savoir, l'existence d'une courbe de Kuznets environnementale (CKE). Afin de répondre à cette question, nous recourons à un exemple numérique et utilisons les formes fonctionnelles suivantes :

La capacité naturelle d'assimilation est décrite, pour $P_t \geq 0$, par une fonction définie par morceaux (avec $\theta \bar{P} < 1$) :

$$\Gamma(P_t) = \begin{cases} \theta P_t(\bar{P} - P_t) & \forall P_t < \bar{P} \\ 0 & P_t \geq \bar{P} \end{cases}$$

le volume de pollution absorbé par la nature est d'abord croissant avec le stock jusqu'au niveau $\bar{P}/2$ puis, il est décroissant. A partir du niveau seuil $\bar{P}$, la capacité de régénération est définitivement épuisée.

La loi de croissance de la qualité de l'environnement se déduit directement de la fonction précédente :

$$N(Q_t) = \begin{cases} Q_t & \forall Q_t \leq \bar{Q} - \bar{P} \\ Q_t + \theta(\bar{Q} - Q_t)(\bar{P} - (\bar{Q} - Q_t)) & \forall Q_t \in]\bar{Q} - \bar{P}, \bar{Q}] \end{cases}$$

Les émissions nettes sont toujours données par $E_t = \beta c_t - \gamma m_t$.

Par analogie avec John et Pecchenino [1994], nous utilisons une technologie Cobb-Douglas :

$$Y_t = AK_t^{\alpha} L_t^{1-\alpha}$$

avec$A > 0$ un paramètre d'échelle.

Enfin, les préférences des ménages sont représentées par une fonction d'utilité séparable[13],

$$U(c_{t+1}, Q_{t+1}) = \log c_{t+1} - \frac{1}{2}(\bar{Q} - Q_{t+1})^2$$

cette fonction est croissante et concave dans la consommation et l'environnement (pour $Q \leq \bar{Q}$).

[13]Nos résultats qualitatifs ne sont pas conditionnés à l'hypothèse de séparabilité.

Pour le jeu de paramètres suivant,

$$\left\{A = 2.52, \theta = 0.09, \gamma = 0.2, \beta = 0.3, \alpha = 0.3, \delta = 0.6, \bar{P} = 5, \bar{Q} = 7\right\}$$

il est possible de montrer qu'il existe deux états stationnaires admissibles et stables[14]. Ces solutions sont localisées dans l'espace où la dépollution est opérante. La première est associée à un niveau de pollution réversible tandis que la seconde constitue une trappe de pauvreté économique et écologique.

Nous procédons alors à des simulations afin de mesurer les bassins d'attraction de ces solutions et de représenter certaines trajectoires d'équilibre remarquables.

Nous nous intéressons d'abord aux bassins d'attraction des deux états stationnaires stables (voir la figure 2.2). La délimitation de l'espace des variables d'état est claire : partant de n'importe quel point (K_0, Q_0) situé dans la zone supérieure (*resp.* inférieure), l'économie atteint, à long terme, la solution intérieure réversible (*resp.* irréversible). Par conséquent, lorsque la dotation initiale Q_0 est inférieure au seuil $\bar{Q} - \bar{P}$, la dynamique conduit le système vers l'état stationnaire avec un environnement irrémédiablement dégradé. Au contraire, une économie bénéficiant, à l'instant initial, d'une qualité de l'environnement suffisamment élevée profitera, à long terme, d'un environnement préservé.

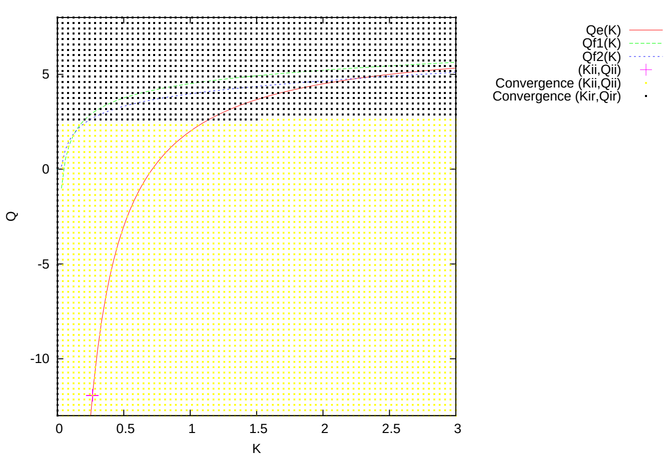

FIG. 2.2 – Les bassins d'attraction. Le graphique contient la relation d'équilibre $Q^e(k_t)$ et les frontières $Q_1^f(k_t)$ et $Q_2^f(k_t)$ délimitant la zone intérieure (au dessous) du cas contraint (au dessus). La véritable frontière étant définie par $Q^f(k_t) = \min\{Q_1^f(k_t), Q_2^f(k_t)\}$. Les solutions stables admissibles se situent sur $Q^e(k_t)$. La solution intérieure irréversible (K_{ii}, Q_{ii}) est repérée par le "+". La solution intérieure réversible (K_{ir}, Q_{ir}) n'apparaît pas explicitement. La frontière définissant le seuil d'irréversibilité se situe au niveau $\bar{Q} - \bar{P} = 2$.

[14]Les restrictions sur les paramètres et les propriétés de l'équilibre sont résumées dans l'annexe C.

Il convient de noter que l'ensemble des conditions initiales caractérisées par un niveau de pollution réversible et associées à une convergence vers la trappe de pauvreté n'est pas vide (voir la figure 2.3). Cette propriété signifie qu'une économie pourrait être attirée vers ce type de solution stationnaire malgré une dotation initiale en environnement relativement importante.

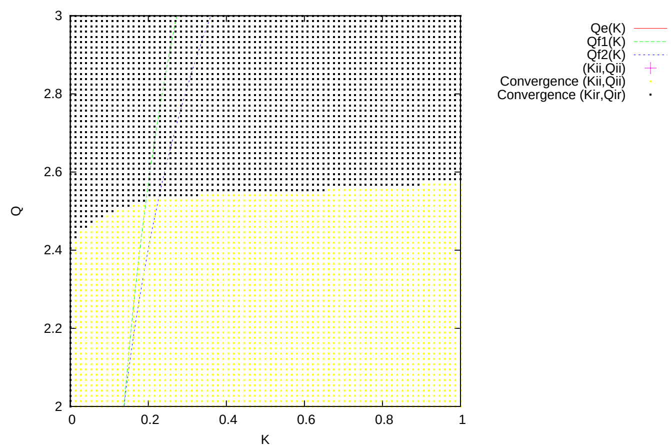

FIG. 2.3 – Ensemble des points situés dans la région réversible mais convergeant vers la trappe (région inférieure gauche).

Nous nous focalisons ensuite sur l'étude des propriétés qualitatives des trajectoires d'équilibre gouvernant la dynamique. L'analyse met en lumière l'existence d'un contraste saisissant entre les caractéristiques de notre modèle et celles de John et Pecchenino [1994][15]. Par analogie avec leur approche, une attention particulière est portée à des conditions initiales (K_0, Q_0) appartenant à la région contrainte. De plus, nous ne

[15]Ces auteurs détectent une relation en forme de V entre le capital et la qualité de l'environnement lors de la convergence vers une solution intérieure. Ce résultat repose sur un changement de régime relatif à l'activité de dépollution. A partir d'un point initial appartenant à la zone contrainte (niveau de capital bas et d'environnement suffisamment élevé), les agents n'ont d'abord aucune incitation à investir dans la maintenance et privilégient, au contraire, leur consommation. Durant cette phase, l'accumulation de capital s'accompagne d'une détérioration de la qualité de l'environnement. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que l'économie atteigne un niveau de richesse et/ou de dommage environnemental (l'équivalent de notre frontière $Q^f(k_t)$) tel(s) que les agents décident de consacrer des ressources à la dépollution. Lors de cette seconde phase, la qualité de l'environnement croît avec le capital jusqu'à la solution intérieure. La combinaison de ces deux phases permet finalement d'obtenir une relation entre capital et environnement ayant les propriétés qualitatives de la CKE. Formellement, ce résultat s'explique par le fait que l'état stationnaire associé à la dynamique contrainte se situe en fait dans la zone intérieure (il n'est pas admissible). Par conséquent, à partir d'un point de la zone contrainte, la trajectoire d'équilibre bute nécessairement sur la frontière $Q^f(k_t)$ avant d'atteindre la solution contrainte et, la convergence est ensuite gouvernée par une autre système dynamique (l'équivalent de notre relation d'équilibre $Q^e(k_t)$) jusqu'à l'état stationnaire intérieur.

considérons que des points de départ associés à un niveau de pollution réversible. Dès lors, la simulation des trajectoires d'équilibre montre que l'émergence de la CKE n'est plus la règle. Nous repérons plutôt deux types de trajectoires remarquables.

La première trajectoire (figure 2.4), à partir d'une situation initiale où la qualité de l'environnement est proche de son niveau maximum $\bar{Q}$, illustre une convergence (essentiellement) monotone décroissante vers l'état associé à un niveau de pollution réversible. Le niveau d'environnement Q_0 est tellement important que l'économie reste durant quasiment toute la phase de transition dans la zone contrainte. Autrement dit, lors de cette transition, elle ne consacre aucune ressource à la maintenance et connaît une phase de croissance économique soutenue. Celle-ci se traduit d'abord par une dégradation relativement lente de l'environnement. Puis, quand le niveau de capital approche son niveau stationnaire, ce qui implique une consommation et des émissions fortes, le stock d'environnement chute avant de se stabiliser au niveau Q^*_{ir}. On remarque également l'existence d'un point de retournement (au moment du franchissement de la frontière $Q^f_2(k_t)$, situé à proximité de la solution de long terme) à partir duquel l'économie engage des dépenses de dépollution. Si cet effort permet de ralentir la dégradation de l'environnement, il n'empêche pas la qualité de l'environnement de décroître encore jusqu'à la convergence vers l'état stationnaire.

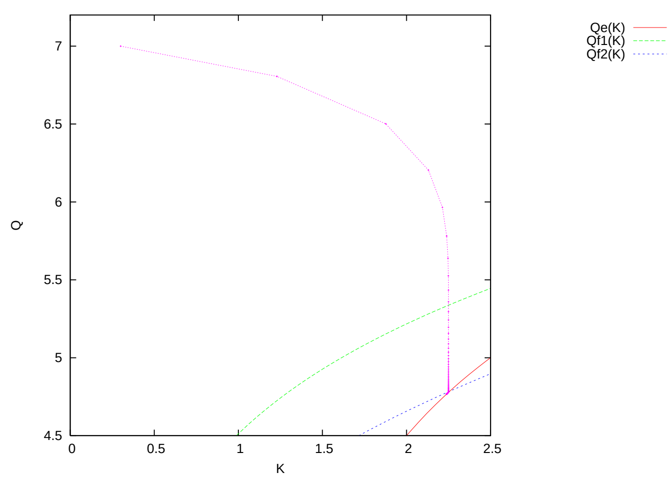

FIG. 2.4 – Trajectoire d'équilibre : convergence vers la solution réversible

Une autre trajectoire d'équilibre, aux propriétés remarquables, doit faire l'objet d'une analyse plus détaillée (figure 2.5). Cette trajectoire, obtenue pour des niveaux d'environnement bas mais supérieurs au seuil d'irréversibilité, correspond à la situation où l'économie va être "happée" par la trappe de pauvreté économique et écologique. L'intuition qui sous-tend l'émergence de cette courbe de Kuznets dégénérée est la suivante. Partant d'un état initial où les niveaux de richesse et d'environnement sont relativement bas, on observe d'abord une phase de développement économique qui s'accompagne d'une détérioration (lente) de la qualité de l'environnement. Lors de cette phase, les agents privés sont suffisamment bien dotés en environnement et, privilégient l'accroissement de leur consommation au détriment de l'activité de dépollution. L'économie s'enrichit (par l'accumulation de capital) mais, elle accumule également un "passif" environnemental qui incombera aux générations futures. Toutefois, puisque les agents ne tiennent pas compte des externalités environnementales intergénérationnelles, ce passif va excéder les gains provenant d'un niveau de richesse plus élevé. Ainsi, une fois la frontière $Q^f(k_t)$ franchie, le simple fait de s'engager dans la maintenance ne va pas suffire à éponger cette dette environnementale et à empêcher la convergence vers l'état de long terme aux caractéristiques économiques et environnementales médiocres.

Durant cette seconde phase, les agents sont contraints de consacrer une part importante de leurs ressources à la dépollution afin de maintenir l'environnement à un niveau satisfaisant. Cependant, l'activité de dépollution ne suffit pas à compenser l'effet de la hausse des émissions polluantes, provenant de la consommation, qui est exacerbé par la faiblesse de la capacité de régénération naturelle (on se situe ici sur la partie décroissante de la fonction d'assimilation de la pollution). De plus, la dépollution est réalisée au détriment de l'épargne et se traduit par une rupture dans le processus d'accumulation du capital physique. D'une période à l'autre, le capital et la qualité de l'environnement s'établissent donc à des niveaux inférieurs.

Ce mécanisme d'appauvrissement va finalement se reproduire de proche en proche et provoquer le franchissement du seuil d'irréversibilité. Dans ce contexte, l'économie se révèle incapable d'enrayer l'effondrement de la qualité de l'environnement qui entraîne, en retour, une phase de récession économique (car il faut consacrer toujours plus de ressources à la dépollution pour combattre la hausse ininterrompue de la pollution). A très long terme, elle parvient malgré tout à se stabiliser au niveau de l'état stationnaire caractérisé par un niveau de richesse quasi nul et une qualité de l'environnement fortement négative.

Les propriétés qualitatives de cette trajectoire font écho à la mise en garde de Dasgupta et Mäler [2002] contre toute interprétation hâtive de la CKE. Dans le cas d'un taux d'assimilation constant, l'économie peut polluer en toute impunité car elle sera toujours en mesure de faire marche arrière et de juguler les dommages passés causés à l'environnement, aidée en cela par une assimilation naturelle croissante avec le stock de polluant. Par contre, dès que l'irréversibilité de la pollution est prise en compte, il apparaît que le dépassement de seuils de dommage critiques implique que l'économie ne puisse plus compter sur le processus naturel d'assimilation de la pollution et n'ait pas la possibilité, par ses propres moyens, de résorber le passif environnemental accumulé par ses activités polluantes passées. Par conséquent, elle est vouée à subir une dégradation irrémédiable de son environnement.

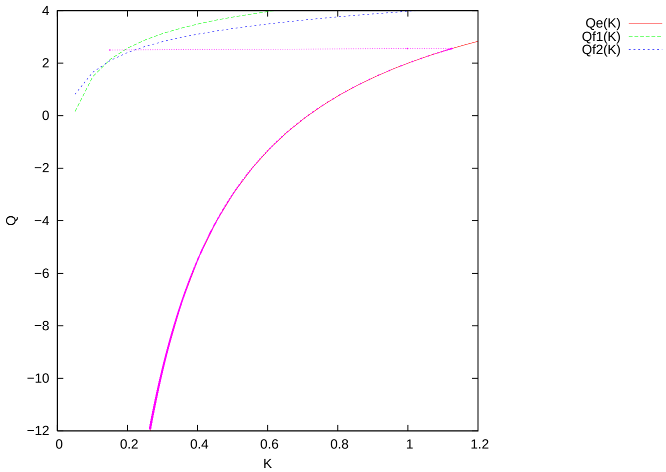

FIG. 2.5 – Trajectoire d'équilibre : la CKE dégénérée

2.5 Conclusion

L'objet de cette étude est de confronter les notions d'irréversibilité de la pollution et de courbe de Kuznets environnementale. Notre analyse est motivée par les conclusions de l'article de John et Pecchenino [1994] qui constitue une référence de la littérature théorique s'intéressant aux conditions d'émergence de la courbe de Kuznets environnementale. A partir d'un modèle de croissance à générations imbriquées, les auteurs montrent que la relation entre capital et qualité de l'environnement présente effectivement les caractéristiques de la CKE, l'existence d'une telle relation reposant sur un changement de régime dans l'activité de dépollution. Ce résultat suppose qu'il sera toujours possible de remédier aux dommages causés par la pollution, dans les premiers stades de l'industrialisation, à condition de consacrer, une fois que le besoin s'en fera sentir, suffisamment de ressources aux activités de dépollution. Dans cette étude, nous nous posons la question de savoir dans quelle mesure leur résultat est conditionné à l'hypothèse d'un taux naturel d'assimilation de la pollution constant. Notre approche se fonde sur le constat de Dasgupta et Mäler [2002] selon lequel le concept de CKE doit être rejeté dès lors que l'on intègre l'irréversibilité potentielle des dommages environnementaux.

Pour répondre à cette interrogation, nous généralisons leur cadre d'analyse par le recours à une fonction d'assimilation de la pollution présentant un effet de seuil (du type de celui introduit par Forster [1975]). L'étude de l'équilibre révèle l'existence d'une multiplicité d'états stationnaires dont certains sont associés à des niveaux de pollution irréversibles. L'implication directe des équilibres multiples réside dans le fait qu'une économie, ayant dégradé l'environnement dans des proportions trop importantes en donnant la priorité à la croissance économique, peut se trouver dans l'incapacité de faire marche arrière. Autrement dit, le simple fait de mettre en oeuvre une activité de dépollution ne va pas suffire à éviter la convergence vers un état de long terme ayant les propriétés d'une trappe de pauvreté à la fois économique et écologique. Ce type de convergence, qui est illustré à partir d'un exemple numérique, s'apparente à une courbe de Kuznets dégénérée. Nous confirmons ainsi notre intuition selon laquelle la courbe de Kuznets environnementale telle qu'elle est détectée par John et Pecchenino [1994], n'est plus la seule issue possible quand on tient compte du risque d'irréversibilité.

Ces résultats nous amènent logiquement à aborder la question du rôle des pouvoirs publics. La régulation des activités polluantes semble en effet être un moyen par le biais duquel il sera possible de prévenir la survenue d'états de long terme ayant les caractéristiques d'une trappe de pauvreté. Dès lors, un prolongement naturel de notre étude repose sur l'introduction d'instruments de politique environnementale et sera l'objet du chapitre suivant. Plus précisément, nous proposerons une extension du cadre d'analyse développé dans ce chapitre consistant à supposer d'une part que la pollution a pour origine la production (et non plus la consommation) et d'autre part, que l'activité polluante des firmes est contrôlée par un système de permis à polluer. Sachant qu'il existe, à l'heure actuelle, une littérature grandissante consacrée à l'évaluation de la performance de l'instrument permis (voir notamment, pour les modèles à générations imbriquées, Ono [2002], Jouvet, Michel et Vidal [2002b] ou Jouvet, Michel et Rotillon [2005]), notre analyse devrait nous permettre d'y contribuer en répondant notamment à la question de savoir si une régulation par les permis est susceptible de conduire l'économie sur la voie d'une croissance durable (au sens de la convergence vers un état stationnaire associé à un niveau de pollution réversible).

Annexes

A. Démonstration des propositions 1 et 3

Avant d'aborder l'analyse de l'existence dans les quatre cas de figure possibles, il convient, au préalable, de détailler les propriétés des fonctions de maintenance, de consommation et d'émission en stationnaire. Nous exposons également le comportement de la loi de croissance de l'environnement.

A.1 Propriétés des fonctions

• La maintenance :

Nous devons ici étudier le comportement de la fonction de salaire $w(k)$ et sa localisation relativement à la première bissectrice puisque

$$m(k) = w(k) - k = f(k) - kf'(k) - k$$

La fonction de salaire est à valeurs positives : $w(k) = f(k) - kf'(k) \geq 0 \ \forall k$ implique $f(k) \geq kf'(k) \geq 0$. Sachant que $f(0) = 0$, nous avons donc $\lim_{k\to 0} kf'(k) = 0$ et $\lim_{k\to 0} w(k) = 0$. Sa dérivée est positive : $w'(k) = -kf''(k) \geq 0 \ \forall k$ et nous savons, d'après les propriétés de la fonction de production, que $\lim_{k\to +\infty} w(k)/k = \lim_{k\to +\infty} f(k)/k - f'(k) = 0$, la fonction de salaire se situe donc en deça de la bissectrice à l'infini. Dès lors, si nous supposons (hypothèse (2.19)) :

$$\lim_{k\to 0} \frac{w(k)}{k} > 1$$

l'ordre en 0 est inversé ce qui nous permet de conclure qu'il existe au moins un point d'intersection entre $w(k)$ et la bissectrice, donc, une valeur de k positive finie telle que $m(k) = 0$. Soit,

$$\bar{k} = \inf\{k \in [0, +\infty[\ / w(k) = k\} \tag{2.38}$$

en ce point remarquable, nous avons également $w'(\bar{k}) < 1$ puisque la fonction de salaire coupe la première bissectrice par "dessus".

La condition $m(k) \geq 0$ pour une solution intérieure nécessite de se limiter à l'analyse de l'existence sur le domaine de définition pertinent pour le capital. Nous nous contenterons en fait d'étudier l'existence sur l'intervalle défini par le plus petit point d'intersection $\bar{k}$ puisque nous savons que $\forall k \in [0, \bar{k}],\ m(k) \geq 0$[16].

Sur cet intervalle, la fonction de dépense $m(k)$ se comporte de la manière suivante. Sachant $m'(k) = -1 - kf''(k)$ et $\lim_{k\to 0} m(k) = \lim_{k\to \bar{k}} m(k) = 0$, il est possible de définir $\breve{k} = \sup\{k \in [0, \bar{k}] \ / m'(k) = 0\}$ tel que $\forall k \in [\breve{k}, \bar{k}],\ m'(k) \leq 0$. Nous ignorons *a*

[16] Dans le cas particulier d'une technologie Cobb-Douglas, $\bar{k}$ est unique.

priori le comportement de $m(k)$ sur $[0, \breve{k}]$ ainsi que le signe de sa dérivée seconde (qui implique la dérivée troisième de la fonction de production).

- **La consommation :**

La consommation s'écrit en toute généralité

$$c(k) = R(k)k = (1-\delta)k + kf'(k)$$

Nous savons que $\forall k \in [0, \bar{k}],\ c(k) \geq 0$ et repérons les valeurs aux bornes : $\lim_{k\to 0} c(k) = 0$ et $c(\bar{k}) = (1-\delta)\bar{k} + \bar{k}f'(\bar{k}) > 0$. La dérivée de la fonction de consommation s'écrit $c'(k) = 1 - \delta + f'(k) + kf''(k)$ et nous imposons la condition (hypothèse (2.20)) :

$$\sigma(k) \geq 1 - s(k) \leftrightarrow f'(k) + kf''(k) \geq 0$$

avec $\sigma(k)$ l'élasticité de substitution définie par (2.18) et $1 - s(k)$ la part du travail dans la production (*confer* (2.17)).

Cette hypothèse garantit $c'(k) > 0$ sur l'intervalle $[0, \bar{k}]$.

- **Les émissions polluantes :**

A l'équilibre stationnaire, elles se définissent comme une fonction du capital

$$E(k) = \beta c(k) - \gamma m(k)$$

Etant donné les valeurs aux bornes des fonctions $m(k)$ et $c(k)$, les niveaux correspondants d'émission s'élèvent à : $\lim_{k\to 0} E(k) = 0$ et $E(\bar{k}) = \beta c(\bar{k}) > 0$. Nous savons également que les émissions atteignent leur maximum à la borne supérieure du domaine de définition $\bar{k}$: $E(\bar{k}) = \max\{E(k)\ /\ k \in [0, \bar{k}]\}$.

D'après les propriétés de $c(k)$ et $m(k)$, sa dérivée première : $E'(k) = \beta c'(k) - \gamma m'(k)$ est positive sur l'intervalle $[\breve{k}, \bar{k}]$. De plus, puisque $\lim_{k\to 0} m(k) = 0$ et $m(k) \geq 0$ $\forall k \in [0, \bar{k}]$, nous avons nécessairement $m'(k) \geq 0$ dans un voisinage de 0. Or, $m'(k) \geq 0 \leftrightarrow 1 + kf''(k) \leq 0$ et $c'(k) > 0 \leftrightarrow 1 + kf''(k) > \delta - f'(k)$. Sachant que la dérivée peut se réécrire $E'(k) = \beta(f'(k) - \delta) + (\beta + \gamma)(1 + kf''(k))$, nous imposons la condition suivante (condition (2.25)) :

$$\lim_{k\to 0} \frac{\delta - f'(k)}{1 + kf''(k)} < \frac{\beta + \gamma}{\beta}$$

qui est équivalente à :

$$\lim_{k\to 0} \frac{r(k)}{m'(k)} < \frac{\beta + \gamma}{\beta}$$

Sous cette condition, les émissions sont négatives dans un voisinage de 0 car : $\lim_{k\to 0} E(k) = 0$ et $\lim_{k\to 0} E'(k) < 0$. Cette propriété s'interprète comme de la production humaine d'environnement. Formellement, cela signifie qu'il est existe une valeur du capital pour laquelle les émissions sont nulles :

$$\exists \hat{k} \in [0, \bar{k}]/E(k) = 0$$

• **La loi de croissance de l'environnement**

La fonction $N(Q)$ est définie par morceaux sur l'intervalle $]-\infty, \bar{Q}]$ (la borne supérieure imposée provient du fait que nous raisonnons pour des niveaux de pollution non négatifs) :

$$N(Q) = \begin{cases} Q & \forall Q \leq \bar{Q} - \bar{P} \\ Q + \Gamma(\bar{Q} - Q) & \forall \bar{Q} - \bar{P} < Q \leq \bar{Q} \end{cases}$$

Pour des niveaux d'environnement $Q \leq \bar{Q} - \bar{P}$, elle est simplement linéaire. Nous avons donc $N(0) = 0$, $N(\bar{Q} - \bar{P}) = \bar{Q} - \bar{P}$ et $N'(Q) = 1 \; \forall Q \leq \bar{Q} - \bar{P}$.

Dès qu'on franchit le niveau critique $\bar{Q} - \bar{P}$, la capacité d'assimilation est active et la loi de croissance devient : $N(Q) = Q + \Gamma(\bar{Q} - Q)$. D'après les propriétés de la fonction d'assimilation, nous savons que $N(Q) > 0 \; \forall Q \in]\bar{Q} - \bar{P}, \bar{Q}]$, $\lim_{Q \to \bar{Q} - \bar{P}.} N(Q) = \bar{Q} - \bar{P}$ et $N(\bar{Q}) = \bar{Q}$. Sa dérivée $N'(Q) = 1 - \Gamma'(\bar{Q} - Q)$ est positive $\forall Q \leq \bar{Q}$. Il apparaît également que $N'(Q) \geq 1 \leftrightarrow Q \leq \bar{Q} - \tilde{P}$. Enfin, cette fonction est concave puisque $N''(Q) = \Gamma''(\bar{Q} - Q) \leq 0$.

A.2 Existence d'un état stationnaire

• **Solution intérieure irréversible (prop. 1 a)) :**

Un état stationnaire (k, Q) est solution du système suivant

$$\begin{cases} R(k)U_1(c(k), Q) - \gamma U_2(c(k), Q) = 0 \\ E(k) = 0 \end{cases}$$

Sous la condition (2.25), la seconde équation admet un nombre impair (d'après les propriétés de $E(k)$) de solutions non nulles k^*_{ii}. L'ensemble de ces solutions coïncide exactement avec l'ensemble des valeurs définies dans le point $A.1$: $\{k^*_{ii}\} = \{\hat{k} \in [0, \bar{k}]$ / $E(k) = 0\}$. De plus, pour la solution intérieure, la CPO définit une relation d'équilibre continue et monotone croissante $Q_t = Q^e(k_t)$ valable pour tout t. Substituer une solution k^*_{ii} dans cette relation, en stationnaire, nous donne la valeur correspondante pour la qualité de l'environnement $Q^*_{ii} = Q^e(k^*_{ii})$.

Il existe donc au moins un état stationnaire associé à une maintenance positive et à un niveau de pollution irréversible. L'admissibilité de cette solution (du point de vue de sa localisation par rapport au niveau critique $\bar{Q}-\bar{P}$), requiert $Q^*_{ii} \leq \bar{Q}-\bar{P}$ ce qui équivaut, sachant que la relation d'équilibre est inversible, à $k^*_{ii} \leq \underline{\mathrm{k}} = (Q^e)^{-1}(\bar{Q}-\bar{P})$.

- **Solution intérieure réversible (prop. 1 b)) :**

Le système d'équations d'équilibre, en stationnaire, s'écrit à présent

$$\begin{cases} R(k)U_1(c(k),Q) - \gamma U_2(c(k),Q) = 0 \\ \Gamma(\bar{Q}-Q) = E(k) \end{cases}$$

où la première équation caractérise toujours la relation d'équilibre : $Q = Q^e(k)$. La seconde équation peut alors se réécrire :

$$\Gamma(\bar{Q} - Q^e(k)) = E(k)$$

Appréhender la question de l'existence revient à comparer le comportement de la fonction d'émission $E(k)$ à celui de la fonction $G(k) = \Gamma(\bar{Q}-Q^e(k))$. De plus, le fait de se situer dans la zone de pollution réversible nécessite de limiter l'analyse à l'intervalle $]\underline{\mathrm{k}}, \bar{k}]$ avec $\underline{\mathrm{k}} = (Q^e)^{-1}(\bar{Q}-\bar{P})$. Nous notons qu'il existe *a priori* un problème de correspondance des domaines de définition de ces deux fonctions puisque si les émissions dépendent des conditions sur la technologie, les préférences et la loi de diffusion de la pollution dans la nature, la fonction $G(k)$ est aussi et surtout caractérisée par la fonction d'assimilation de la pollution. Il faut donc se donner des conditions de non vacuité du domaine de définition $]\underline{\mathrm{k}}, \bar{k}]$ pour être capable de discuter, en toute généralité, de l'existence.

$G(k)$ a globalement le même comportement que la fonction d'assimilation $\Gamma(\bar{Q}-Q)$ puisque $G'(k) = -Q^{e\prime}(k)\Gamma'(\bar{Q}-Q^e(k))$ avec $Q^{e\prime}(k) \geq 0$. Elle est donc croissante de $\underline{\mathrm{k}}$ à $(Q^e)^{-1}(\bar{Q}-\tilde{P})$ puis décroissante jusqu'à $(Q^e)^{-1}(\bar{Q})$. De plus, nous avons $G(k) \geq 0$ $\forall k \in]\underline{\mathrm{k}}, (Q^e)^{-1}(\bar{Q})]$, $G(\underline{\mathrm{k}}) = G((Q^e)^{-1}(\bar{Q})) = 0$ et $\max\{G(k)\ /\ k \in]\underline{\mathrm{k}}, (Q^e)^{-1}(\bar{Q})]\} = G((Q^e)^{-1}(\bar{Q}-\tilde{P})) = \Gamma(\tilde{P})$.

Nous formulons une quatrième hypothèse (condition (2.26)) selon laquelle la quantité maximale de pollution assimilée par la nature est intrinsèquement supérieure au volume maximum d'émission sur le domaine de définition pertinent. Formellement, cette hypothèse se traduit par

$$\sup_{P\in[0,\bar{P}]}\{\Gamma(P)\} \geq \sup_{k\in[0,\bar{k}]}\{E(k)\}$$

soit,

$$\Gamma(\tilde{P}) \geq E(\bar{k})$$

Pour connaître l'ordre entre les fonctions étudiées à la borne inférieure $\underline{\mathrm{k}}$, il est possible de se référer à la condition d'admissibilité (partielle) des solutions intérieures irréversibles selon laquelle $k_{ii}^{*} \leq \underline{k}$. Si toutes ces solutions sont admissibles alors $k_{ii}^{*s} = \sup\{\hat{k} \in [0, \bar{k}] \ / \ E(k) = 0\} \leq \underline{k}$. On en déduit donc que $E(\underline{k}) > G(\underline{k})$ (puisque $E(\bar{k}) > 0$ impose $E(k) > 0 \ \forall k > \underline{k}$).

Sinon, il suffit que la borne inférieure soit comprise entre deux solutions successives k_{ii}^{*} impaire puis paire pour avoir $E(\underline{k}) > G(\underline{k})$.

Dans ces deux cas, on connaît l'ordre en $\underline{k}$ et, si on impose $\bar{k} \geq \tilde{k}$ avec $\tilde{k} = (Q^{e})^{-1}(\bar{Q} - \tilde{P})$ (ce qui équivaut à la condition (2.27)), alors on garantit non seulement la non vacuité du domaine d'étude (puisque $\underline{k} < \bar{k}$) mais aussi, l'existence d'un point d'intersection entre les courbes $E(k)$ et $G(k)$. En effet, sous l'hypothèse 4, l'ordre entre ces fonctions est inversé au point remarquable $\tilde{k}$: $E(\tilde{k}) \leq G(\tilde{k})$.

Autrement dit, sous ces conditions, nous obtenons une solution de long terme intérieure avec pollution réversible (k_{ir}^{*}, Q_{ir}^{*}). Il est important de noter que ces solutions sont associées à des niveaux de capital et de qualité de l'environnement nécessairement supérieurs à ceux des solutions intérieures irréversibles.

- **Solution contrainte (prop. 3)) :**

Un état stationnaire, dans cette zone, est solution de

$$\begin{cases} k = f(k) - kf'(k) \\ \Gamma(\bar{Q} - Q) = \beta c(k) \end{cases}$$

Pour un niveau de pollution irréversible, la seconde équation se réécrit $c(k) = 0$. Le système n'admet pas de solution puisque l'hypothèse $\lim_{c \to 0} U_1(c, Q) = +\infty$ permet d'exclure le cas limite où $k = 0$. Il n'existe donc pas de solution contrainte avec pollution irréversible.

Dans le cas "réversible" pour $Q \in]\bar{Q} - \bar{P}, \bar{Q}]$, l'hypothèse (2.19) implique qu'il existe, sur $[0, \bar{k}]$, une unique solution non nulle à la première équation qui correspond très exactement au niveau $\bar{k} \ / \ m(k) = 0$. Nous avons donc $k_{cr}^{*} = \bar{k}$. Reste à déterminer le niveau d'environnement correspondant, à l'état stationnaire, à cette valeur par la résolution de l'équation suivante : $\Gamma(\bar{Q} - Q) = \beta c(\bar{k})$. D'après les propriétés de la fonction $\Gamma(\bar{Q} - Q)$, et sous l'hypothèse (2.26), nous pouvons conclure à l'existence d'une (deux si l'inégalité dans l'hypothèse 4 est stricte) valeur d'équilibre Q_{cr}^{*} associée à k_{cr}^{*}. Si cette solution est unique alors on a $Q_{cr}^{*} = \bar{Q} - \tilde{P} > \bar{Q} - \bar{P}$, sinon l'ordre est tel que $\bar{Q} - \bar{P} < Q_{cr}^{*-} < \bar{Q} - \tilde{P} < Q_{cr}^{*+2}$.

Il existe donc au minimum un et au plus deux états stationnaires (k_{cr}^{*}, Q_{cr}^{*}) avec maintenance nulle et pollution réversible.

B. Démonstration des propositions 2 et 4

Nous étudions ici la stabilité locale pour les trois types d'états stationnaires existants.

B.1 Solution intérieure (prop. 2 b)) :

Nous présentons l'analyse de la dynamique locale pour le cas général où la capacité d'assimilation de la nature est opérante. Nous en déduirons facilement les conditions de stabilité de la solution associée à un niveau de pollution irréversible puisqu'elle n'est finalement qu'un cas particulier où $N'(Q) = 1$.

• Pollution réversible (prop. 2 a)) :

La linéarisation de la dynamique d'équilibre donne le système d'équations (2.28) à partir duquel on obtient la matrice jacobienne suivante :

$$J = \frac{1}{Q^{e\prime}(k_{ir}^*) + \gamma} \begin{pmatrix} -E'(k_{ir}^*) - \gamma & N'(Q_{ir}^*) \\ -(E'(k_{ir}^*) - \gamma)Q^{e\prime}(k_{ii}^*) & N'(Q_{ir}^*)Q^{e\prime}(k_{ir}^*) \end{pmatrix}$$

L'étude de la stabilité se résume à l'analyse des valeurs propres du polynôme caractéristique associé :

$$P(\lambda) = \lambda^2 - \text{tra}(J)\lambda + \det(J)$$

Nous savons que la trace correspond à la somme des (parties réelles) valeurs propres et que le déterminant est le produit, en module, des valeurs propres. Dès lors, la stabilité totale de l'équilibre exige que les deux racines de $P(\lambda)$ soient à l'intérieur du cercle unité, toute autre configuration se traduisant par l'instabilité de l'état stationnaire.

Or, il est clair que $det(J) = 0$. Le système étudié est en fait de dimension 1 en raison de l'existence de la relation d'équilibre (2.22). La première valeur propre est donc nulle $\lambda_1 = 0$ tandis que la seconde, réelle, est égale à la trace $\lambda_2 =$tra(J) avec,

$$\text{tra}(J) = \frac{N'(Q_{ir}^*)Q^{e\prime}(k_{ir}^*) - (E'(k_{ir}^*) - \gamma)}{Q^{e\prime}(k_{ir}^*) + \gamma}$$

Nous résumons les différentes situations possibles :

1/ si $(N'(Q_{ir}^*) - 1)Q^{e\prime}(k_{ir}^*) < E'(k_{ir}^*) \leq \gamma + N'(Q_{ir}^*)Q^{e\prime}(k_{ir}^*)$ alors $1 >$tra$(J) \geq 0$

Les conditions $E'(k_{ir}^*) \geq 0$ et $N'(Q_{ir}^*) \leq 1$ (avec une des deux inégalités stricte) suffisent à satisfaire la condition nécessaire de stabilité $E'(k_{ir}^*) > (N'(Q_{ir}^*) - 1)Q^{e\prime}(k_{ir}^*)$.

2/ si $\gamma + N'(Q_{ir}^*)Q^{e\prime}(k_{ir}^*) < E'(k_{ir}^*) < 2\gamma + (1 + N'(Q_{ir}^*))Q^{e\prime}(k_{ir}^*)$ alors tra$(J) < 0$ et $|\text{tra}(J)| < 1$.

Ainsi, la double condition

$$(N'(Q_{ir}^*) - 1)Q^{e\prime}(k_{ir}^*) < E'(k_{ir}^*) < 2\gamma + (1 + N'(Q_{ir}^*))Q^{e\prime}(k_{ir}^*)$$

définit un intervalle de variation pour la dérivée de la fonction d'émission sur lequel la stabilité locale de l'état stationnaire est garantie. De plus, la convergence sera monotone dans le premier cas tandis qu'elle sera oscillante dans l'autre.

• Pollution irréversible (prop. 4)) :

Ce cas n'est qu'un cas particulier du précédent où $N'(Q) = 1$. Suivant la même démarche, il apparaît immédiatement que la stabilité de la solution intérieure avec pollution irréversible s'obtient sous la double condition suivante :

$$0 < E'(k_{ii}^*) < 2(\gamma + Q^{e\prime}(k_{ii}^*))$$

B.2 La solution contrainte

La matrice jacobienne s'écrit dans ce cas :

$$J = \begin{pmatrix} w'(k_{cr}^*) & 0 \\ -\beta c'(k_{cr}^*) & N'(Q_{cr}^*) \end{pmatrix}$$

Par conséquent, les conditions $w'(k_{cr}^*) < 1$ et $N'(Q_{cr}^*) < 1$ sont nécessaires et suffisantes à la stabilité. La première condition est satisfaite puisque $k_{cr}^* = \bar{k}$ et $w'(\bar{k}) < 1$. De plus, nous savons que s'il existe une unique solution alors $Q_{cr}^* = \bar{Q} - \tilde{P}$; or, $N'(\bar{Q} - \tilde{P}) = 1$ ce qui implique son instabilité. Dès qu'il existe deux solutions, étant donné leur localisation respective par rapport à $\bar{Q} - \tilde{P}$ ($Q_{cr}^{*-} < \bar{Q} - \tilde{P} < Q_{cr}^{*+}$), l'état stationnaire "bas" est instable (car $N'(Q_{cr}^{*-}) > 1$) tandis que l'autre est stable ($N'(Q_{cr}^{*+}) < 1$).

C. Simulations

Nous imposons une condition sur les paramètres de la technologie et de la fonction d'émission $\gamma(1-\alpha) - \beta\alpha \geq 0$ et fixons le domaine de variation du paramètre d'échelle $A \in [\underline{A}, \bar{A}]$ avec

$$\underline{A} = \left(\frac{2}{\gamma \bar{P}}\right)^{1-\alpha} \frac{1}{1-\alpha}$$

et,

$$\bar{A} = \left(\frac{\theta \bar{P}^2 (1-\alpha)}{4\beta((1-\delta)(1-\alpha)+\alpha)}\right)^{1-\alpha} \frac{1}{1-\alpha}$$

Ces conditions recouvrent les hypothèses formulées dans le cas général.

Dans ce contexte, l'étude de l'équilibre conduit aux résultats suivants. Il existe cinq états stationnaires :

- une solution intérieure irréversible localement stable,
- deux solutions intérieures réversibles avec la solution basse instable et la haute stable,
- deux solutions contraintes réversibles avec la même configuration pour la stabilité.

Pour ce modèle, il est possible d'expliciter analytiquement les équations de la dynamique globale caractérisant les quatre zones existantes. Nous procédons alors à des simulations des bassins d'attraction des différentes solutions stables admissibles et des trajectoires de convergence vers ces solutions. Pour ce faire, nous retenons le jeu de paramètres suivant :

$$A = 2.52, \theta = 0.09, \gamma = 0.2, \beta = 0.3, \alpha = 0.3, \delta = 0.6, \bar{P} = 5, \bar{Q} = 7$$

pour ses valeurs, seules les deux solutions contraintes réversibles sont inadmissibles dans le sens où ces états stationnaires se situent en fait dans la zone intérieure. Les deux seuls attracteurs admissibles correspondent donc à la solution intérieure réversible haute et à la solution intérieure irréversible.

Chapitre 3

Effets d'une réforme de la politique environnementale sur le développement d'une économie polluante : le cas des permis à polluer

3.1 Introduction

La signature des accords de Kyoto (1997), pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre, témoigne de l'intérêt et de la confiance placés dans une régulation de la pollution par l'instauration d'un marché de permis à polluer. D'un point de vue théorique, les recommandations à faire pour s'assurer de la performance de cet instrument sont encore discutées. Concernant le problème du contrôle des émissions polluantes *stricto sensu*, l'efficacité de ce mode de régulation ne fait aucun doute. En effet, depuis les travaux de Montgomery [1972] ou Baumol et Oates [1988], nous savons qu'il suffit, pour le régulateur, de choisir un quota global d'émission (en vertu d'un objectif à définir) et de laisser faire le marché afin de garantir une allocation optimale des permis entre les firmes polluantes. Mais, parmi les autres sujets de discussion, la question de l'effet d'une régulation par les permis sur le processus de développement d'une économie polluante demeure, dans une large mesure, ouverte.

Nous choisissons de traiter cette question comme un prolongement direct de la problématique (et des conclusions) du chapitre précédent et proposons, en conséquence, une extension du modèle présenté initialement. Dans le second chapitre, nous avons abordé l'analyse de la relation entre croissance et environnement sous un angle nouveau. Plus précisément, le principe a consisté à renoncer à l'hypothèse d'une assimilation à taux constant de la pollution par la nature (utilisée systématiquement par les études apparentées comme John et Pecchenino [1994]) au profit d'une modélisation de la capacité de régénération, inspirée notamment de Forster [1975] ou Tahvonen et Withagen [1996], traduisant l'irréversibilité potentielle des dommages environnementaux. Nous avons alors mis en lumière le résultat original selon lequel un processus de croissance non régulée peut conduire une économie polluante vers une trappe de pauvreté écologique et économique et ce, malgré une activité de dépollution opérante (menée par les agents privés).

L'existence d'un tel état de long terme confirme la nécessité d'une intervention des pouvoirs publics pour la gestion des problèmes de pollution et, nous amène naturellement à étudier les modalités ainsi que les effets d'une telle intervention. Pour ce faire, nous développons encore le modèle du chapitre 2 en supposant à présent que la pollution provient de l'activité de production et qu'elle est contrôlée grâce à un système de permis de pollution. Dans ce contexte, la question se pose d'abord de savoir sous quelles conditions la régulation par les permis permet d'éviter la convergence de l'économie vers une trappe de pauvreté. Ensuite, nous cherchons plus globalement à mesurer les effets d'une réforme du système de permis sur les perspectives de croissance de l'économie.

Il existe une littérature conséquente qui s'intéresse, à partir de modèles de croissance avec agent à durée de vie infinie, à l'analyse des répercussions d'une réforme de la politique environnementale sur la croissance économique. Toutefois, ces travaux se focalisent exclusivement sur l'instrument de la taxe (voir notamment Bovenberg et Smulders [1995], [1996] ou Bovenberg et de Mooij [1997]). Un trait commun à ces études réside dans l'introduction d'une externalité environnementale de production traduisant l'idée selon laquelle l'environnement améliore la productivité des facteurs de production. Leur conclusion essentielle est qu'une politique plus ambitieuse (hausse de la taxe sur les émissions) peut procurer un double dividende, au sens d'une hausse simultanée de la qualité de l'environnement et du taux de croissance, pourvu que l'environnement ait des retombées positives fortes sur la technologie.

A contrario, peu d'études appréhendent cette problématique à partir d'une régulation par les permis, à l'exception notamment des contributions de Jouvet, Michel et Vidal [2002b] et d'Ono [2002]. Ces travaux se distinguent également des précédents de par le type de formalisation employée. En effet, leur finalité est de mesurer les conséquences macroéconomiques d'un renforcement du système de permis (soit, d'une baisse du quota global d'émission) dans le cadre de modèles à générations imbriquées en considérant, cette fois, la pollution comme un facteur de production. Dans Jouvet, Michel et Vidal [2002b], l'effet d'une politique plus sévère dépend essentiellement des paramètres technologiques. Une baisse du quota pénalise (stimule) l'accumulation du capital quand les inputs sont complémentaires (fortement substituables). Pour des valeurs modérées de l'élasticité de substitution, l'impact global reste cependant indéterminé. Ono [2002] démontre, quant à lui, qu'une baisse du quota global d'émission accordé aux pollueurs peut même avoir, à long terme, un effet contraire à celui escompté en provoquant une baisse du niveau de capital et une hausse du niveau de pollution. Notre travail se situe plus particulièrement dans la lignée de cette dernière contribution puisque nous étendons son cadre d'analyse au cas où il existe un risque d'irréversibilité de la pollution

Nous montrons d'abord qu'il existe des équilibres multiples dont certains présentent *a priori* les caractéristiques d'une trappe de pauvreté. Toutefois, nous montrons qu'il est possible, contrairement aux conclusions du chapitre 2, de garantir l'absence de trappe grâce à la manipulation de l'instrument permis. En fait, un moyen de prémunir l'économie contre toute stabilisation à hauteur d'un tel état est de fixer le quota global d'émission au delà d'un niveau seuil déterminé. Autrement dit, il faut autoriser les firmes à polluer suffisamment. Une fois placé dans le contexte d'absence de trappes, nous évaluons ensuite l'effet d'une réforme de la politique environnementale sur les propriétés des autres équilibres du modèle. Les résultats dépendent du type d'équilibre considéré sachant que leurs propriétés diffèrent selon que les agents privés s'engagent ou pas dans une activité de dépollution. A la solution contrainte (où la dépollution est nulle), il existe un dilemme entre accumulation de capital et contrôle de la pollution.

Si la baisse du quota permet effectivement de réduire la pollution, elle s'accompagne d'un effet revenu négatif défavorable à l'accumulation du capital. A la solution intérieure (dépollution opérante), tout repose sur l'évolution du rapport de force entre les contraintes financière et environnementale auxquelles sont confrontés les agents. S'il est possible de retrouver le résultat d'Ono [2002], cette conclusion n'est valable que pour l'équilibre présumé instable. Au contraire, à l'autre état stationnaire, l'économie profite d'un double dividende : la baisse du quota global permet à l'économie d'atteindre un état de long terme plus riche et moins pollué. Et, nous notons que l'obtention d'un tel résultat ne nécessite pas, à la différence de la littérature sur la réforme de la taxe, de recourir à l'hypothèse controversée d'existence d'une externalité environnementale de production. Enfin, nous procédons à une analyse dynamique. Celle-ci nous apprend d'abord qu'imposer un quota restrictif est un moyen de ne pas exclure la convergence vers les solutions contraintes qui constituent des états souhaitables. De plus, hormis dans le cas hypothétique où l'environnement est déjà irrémédiablement dégradé au moment de l'instauration du système de permis, cette politique permet également à l'économie de suivre un sentier de croissance économique respectueux de l'environnement. En résumé, si l'on excepte le dilemme détecté à la solution contrainte, tout concourt à recommander la fixation du quota le plus bas possible pourvu qu'il soit supérieur au niveau plancher (excluant l'existence de trappes de pauvreté).

Le chapitre comporte cinq parties principales. Après l'introduction, la section 2 est consacrée à la présentation du modèle. Dans la section suivante, nous analysons, après avoir étudié les propriétés de l'équilibre, les conséquences d'une réforme du système de permis sur les différents types de solutions stationnaires. La section 4 est ensuite consacrée à l'étude des répercussions d'une telle réforme sur les dynamiques économique et environnementale. La dernière section conclut.

3.2 Le modèle

Nous proposons un modèle à générations imbriquées qui constitue un prolongement direct de celui développé dans le second chapitre. La seule différence concerne l'origine de la pollution. Nous considérons ici que l'activité productive génère, comme produit fatal, des émissions polluantes. Le contrôle de la pollution passe alors par la mise en place d'un système comprenant la définition d'un quota global d'émission et la création d'un marché de permis à polluer. Plus précisément, nous supposons que le quota d'émission $\bar{E}_t$ s'impose à l'économie de manière exogène. Le niveau d'émission à respecter peut, par exemple, être décidé lors de négociations internationales (comme le protocole de Kyoto (1997)) durant lesquelles tous les participants s'engagent à réduire leurs émissions. Le rôle du gouvernement se limite en fait à offrir aux firmes un volume équivalent à $\bar{E}_t$ de permis de pollution sur le marché créé à cet effet. Il est également responsable de la redistribution du revenu de la vente de permis (la rente environnementale) aux ménages.

Une remarque générale doit être énoncée avant d'aborder la présentation du cadre d'analyse. A la différence du second chapitre, nous choisissons ici de spécifier les formes fonctionnelles représentant la capacité naturelle d'assimilation, la production et les préférences. Cette approche est commune à toutes les études qui poursuivent une problématique proche de la notre. Elle se justifie par la volonté d'obtenir des résultats lisibles concernant l'effet d'une régulation par les permis sur la croissance ou l'accumulation de capital.

3.2.1 La Pollution

Nous considérons que la capacité de la nature à assimiler la pollution, à chaque période, dépend de la concentration du polluant. Notre objectif est plus particulièrement de rendre compte de l'idée selon laquelle des niveaux de pollution trop élevés peuvent enrayer de manière irrémédiable le processus de régénération de l'environnement[1]. Pour ce faire, nous recourons, à la manière de Forster [1975] ou Tahvonen et Withagen [1996], à une fonction d'assimilation $\Gamma(P_t)$ dont les propriétés traduisent effectivement la possible irréversibilité des dommages causés par la pollution. En fait, nous retenons la spécification suivante (sachant $P_t \geq 0$) :

$$\Gamma(P_t) = \begin{cases} \theta P_t(\bar{P} - P_t) & \forall P_t < \bar{P} \\ 0 & P_t \geq \bar{P} \end{cases} \tag{3.1}$$

où $\bar{P}$ correspond au seuil d'irréversibilité. La quantité de pollution assimilée est supposée inférieure au stock de pollution : $\Gamma(P_t) < P_t \ \forall P_t > 0$, cette inégalité étant vérifiée dès que $\theta\bar{P} < 1$.

Cette fonction présente l'allure de la fonction logistique (voir la figure 3.1). Pour des niveaux de pollution faibles à modérés ($P_t \leq \bar{P}/2$), la quantité de pollution absorbée par la nature est d'abord croissante avec le stock. Au delà d'un niveau seuil $\bar{P}/2$, la capacité de régénération s'épuise et l'assimilation décroît avec la pollution. Enfin, dès que la pollution franchit le niveau critique $\bar{P}$, la nature n'est plus capable de se régénérer, et ce processus est irréversible.

En l'absence d'activité humaine, l'évolution de la pollution est décrite, pour des niveaux non négatifs de cette variable ($P_t \geq 0$), par l'équation suivante

$$P_{t+1} = P_t - \Gamma(P_t) \tag{3.2}$$

[1] Voir le second chapitre pour une justification de l'approche retenue.

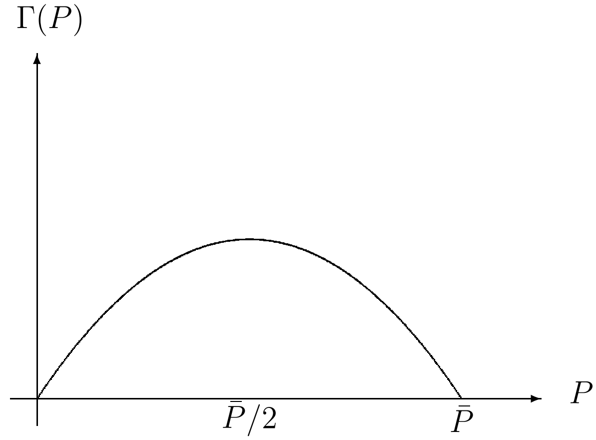

FIG. 3.1 – La fonction d'assimilation

Nous exposons à présent les choix et arbitrages auxquels sont confrontés les agents privés.

3.2.2 La Production

A chaque période, les firmes produisent le bien homogène Y_t servant de numéraire à l'économie. Pour ce faire, elles emploient une technologie de production à rendements constants dans le capital K_t et le travail L_t :

$$Y_t = \tilde{A} z_t K_t^{\nu} L_t^{1-\nu} \tag{3.3}$$

où $z_t \in [0, 1[$ est un indicateur du caractère polluant de la technologie et $\tilde{A} > 0$ représente un paramètre d'échelle.

La production génère, comme produit fatal, des émissions polluantes E_t. A la manière de Stokey [1998], le flux d'émission s'écrit :

$$E_t = z_t^{\zeta} Y_t \tag{3.4}$$

avec $\zeta > 0$. Le ratio émissions-output est donc positivement relié à l'indice z_t.

Finalement, il est possible de réécrire, en manipulant les expressions (3.3) et (3.4), la fonction de production comme une technologie à rendements constants dans le capital, le travail et les émissions :

$$Y_t = A K_t^{\alpha} L_t^{\beta} E_t^{1-\alpha-\beta} \tag{3.5}$$

avec $A = \tilde{A}^{\frac{\zeta}{1+\zeta}}$, $\alpha = \frac{\nu\zeta}{1+\zeta}$, $\beta = \frac{(1-\nu)\zeta}{1+\zeta}$.

Contrairement au chapitre précédent, extension directe de John et Pecchenino [1994], c'est la production, et non pas la consommation, qui est à l'origine des émissions polluantes. Nous avons fait le choix, dans ce chapitre, de nous focaliser sur l'instrument permis. Il convient donc d'imputer la pollution à la production puisqu'il paraît plus naturel de penser que ce sont les firmes (plutôt que les consommateurs) qui sont soumises à un régime de permis. Dans Jouvet, Michel et Rotillon [2005], les auteurs concluent, dans une optique de maximisation du bien-être, à la supériorité du système d'enchères sur le principe de l'allocation gratuite des permis aux firmes en montrant que ce dernier est source de distorsions économiques. Sur la base de leurs résultats, nous excluons donc le *grand-parentage* (au sens d'une allocation gratuite en permis)[2]. Aussi, les firmes sont dans l'obligation d'acheter, au prix de marché q_t, la quantité de permis de pollution correspondant précisément à leur besoin E_t afin d'être autorisées à produire. De plus, l'utilisation des permis dans la production provoque leur destruction, ce qui implique qu'à chaque période, les firmes renouvellent l'achat de permis sur le marché.

Par simplification, nous supposons la dépréciation totale du capital en une période. Dans un cadre concurrentiel, chaque firme choisit, à la période t, les quantités de capital, de travail et le niveau d'émission qui maximisent ses profits,

$$\max_{K_t,L_t,E_t} \pi_t = AK_t^{\alpha}L_t^{\beta}E_t^{1-\alpha-\beta} - w_tL_t - R_tK_t - q_tE_t$$

En exprimant les conditions du premier ordre en termes des variables par tête, avec $k_t = K_t/L_t$ et $e_t = E_t/L_t$, on obtient,

$$w_t = \beta Ak_t^{\alpha}e_t^{1-\alpha-\beta} \tag{3.6}$$

$$R_t = \alpha Ak_t^{\alpha-1}e_t^{1-\alpha-\beta} \tag{3.7}$$

$$q_t = (1-\alpha-\beta)Ak_t^{\alpha}e_t^{-\alpha-\beta} \tag{3.8}$$

où R_t correspond au facteur d'intérêt, w_t au taux de salaire et q_t au prix des permis.

3.2.3 Les ménages

L'économie, à horizon infini, est composée d'agents à durée de vie finie. La population est constante, à chaque période naît un nombre N, normalisé à 1, d'agents identiques qui forment une génération. Chaque génération vit deux périodes. Nous supposons que le gouvernement reverse l'intégralité du revenu de la vente de permis q_tE_t (la rente environnementale) aux ménages jeunes. Un agent jeune de la génération t offre également, de manière inélastique, une unité de travail en contrepartie de laquelle il perçoit un salaire w_t. Ce revenu de première période lui sert à la fois à épargner s_t et à

[2] Notons qu'Ono [2002] suppose au contraire qu'une partie du quota est allouée gratuitement aux firmes qui peuvent ensuite participer aux transactions sur le marché des permis. Toutefois, l'approche d'Ono est, au final, rigoureusement identique à la notre puisque, à l'équilibre de son modèle, subsiste un revenu $q_t\bar{E}_t$, exactement égal au revenu procuré par la vente de la totalité du quota, qui est intégralement taxé pour ensuite être reversé aux ménages jeunes.

engager des dépenses de dépollution m_t[3]. Lorsqu'il est retraité, l'agent consomme c_{t+1} l'intégralité de son revenu constitué du rendement de l'épargne ($R_{t+1}s_t$). Les contraintes budgétaires de première et seconde périodes de vie s'écrivent respectivement :

$$w_t + q_t E_t = s_t + m_t \tag{3.9}$$

$$c_{t+1} = R_{t+1}s_t \tag{3.10}$$

A la manière d'Ono [2002], l'activité de dépollution reste opérante malgré le système de permis. Ainsi, l'économie dispose de deux moyens distincts pour lutter contre la pollution. Si la politique de permis sert avant tout à réguler les émissions, elle agit également, grâce à la distribution de la rente environnementale, sur l'effort de dépollution des ménages. Notons que ce revenu complémentaire stimule aussi l'investissement productif via l'épargne.

Les préférences de l'agent né en t portent sur la consommation c_{t+1} et la pollution P_{t+1} de seconde période de vie. Pour la fonction d'utilité, nous retenons la spécification suivante (avec $\phi > 0$) :

$$U(c_{t+1}, P_{t+1}) = \log c_{t+1} - \phi \frac{P_{t+1}^2}{2}$$

Lorsqu'on tient compte de l'activité des agents privés (ménages et firmes), la dynamique du stock de polluant peut se réécrire (avec $\gamma > 0$) :

$$P_{t+1} = P_t - \Gamma(P_t) + E_t - \gamma m_t \tag{3.11}$$

Dans ce contexte, le problème de l'agent consiste à choisir la répartition de ses ressources entre épargne et dépollution de manière à maximiser son utilité, étant donné les contraintes budgétaires et l'évolution du stock de pollution. Formellement,

$$\max_{s_t, m_t, c_{t+1}} \log c_{t+1} - \phi \frac{P_{t+1}^2}{2}$$

sous contraintes,

$$\begin{cases} w_t + q_t E_t = s_t + m_t \\ c_{t+1} = R_{t+1}s_t \\ P_{t+1} = P_t - \Gamma(P_t) + E_t - \gamma m_t \\ m_t \geq 0 \end{cases}$$

La condition du premier ordre associée à ce problème s'écrit :

$$-\frac{1}{w_t + q_t \bar{E}_t - m_t} + \gamma\phi(P_t - \Gamma(P_t) + E_t - \gamma m_t) + \mu = 0 \tag{3.12}$$

[3]Il est possible de réinterpréter m_t comme une taxe prélevée par les pouvoirs publics afin de financer l'activité de dépollution (John *et al.* [1995]). La justification de l'absence de consommation de première période a été apportée dans le chapitre 2.

$$\mu m_t = 0 \tag{3.13}$$

avec $\mu \geq 0$, le multiplicateur de Lagrange.

La contrainte de non négativité sur m_t nécessite de distinguer le cas où la dépollution est inopérante *i.e.* $m_t = 0$ du cas où l'agent contribue à la dépollution *i.e.* $m_t \geq 0$. De plus, l'étude de ces deux situations doit également être scindée en deux sous-cas selon que la qualité de l'environnement soit en deçà ou au delà du seuil d'irréversibilité $\bar{P}$.

Le fil conducteur de notre analyse consiste à évaluer à la fois l'impact d'une régulation par les permis et l'effet d'une réforme de cette politique (passant par une variation du quota global d'émission $\bar{E}_t$) sur les propriétés de l'équilibre stationnaire et intertemporel. Pour ce faire, nous procédons à la caractérisation de l'équilibre concurrentiel en analysant séparément les quatre configurations envisageables.

3.3 Effet des permis sur l'équilibre

Dans cette section, nous étudions d'abord les propriétés des différents types de solutions (existence, unicité, stabilité locale) puis, nous mesurons les conséquences du choix du quota sur le niveau de richesse et de pollution d'équilibre. Cette analyse est réalisée successivement pour la solution contrainte ($m_t = 0$) et pour la solution intérieure ($m_t \geq 0$).

3.3.1 La solution contrainte

Ici le poids des contraintes financière et environnementale est tel que les agents n'ont pas suffisamment d'incitations à dépolluer. Ils consacrent alors l'intégralité de leur revenu Ω_t à l'épargne :

$$\Omega_t = s_t \tag{3.14}$$

sachant que,

$$\Omega_t = w_t + q_t E_t \tag{3.15}$$

Nous pouvons définir l'équilibre dans ce cas.

Définition 1.

Un équilibre contraint avec prévisions parfaites est la donnée de la suite des variables par tête $\{c_t, s_t\}$, de la suite des variables agrégées $\{L_t, K_t, E_t, P_t\}$ et de la suite de prix $\{R_t, w_t, q_t\}$ qui sont telles que :

i/ Les agents sont à leur optimum : l'agent représentatif épargne l'intégralité de son revenu (3.14) et les trois conditions de la maximisation des profits (3.6), (3.7) et (3.8) sont vérifiées, *ii/ les marchés sont équilibrés :* $L_t = N = 1$ *sur le marché du travail,* $K_{t+1} = s_t (= k_{t+1})$ *sur le marché du capital et* $E_t = \bar{E}_t (= e_t)$ *sur le marché des permis,*

iii/ les contraintes budgétaires (3.9) et (3.10) sont respectées (pour $m_t = 0$*),*

iv/ la dynamique de la pollution est celle décrite par l'équation (3.11) (également pour $m_t = 0$*).*

Etant donné l'expression du salaire, du prix des permis et la condition d'équilibre sur le marché des permis, il est possible de définir le revenu de l'agent. L'équation (3.15) dévient :

$$\Omega_t = (1-\alpha) A k_t^{\alpha} \bar{E}_t^{1-\alpha-\beta} \tag{3.16}$$

Connaissant ce revenu, la dynamique d'équilibre est obtenue grâce à la condition (3.14), à la condition d'équilibre du marché du capital et à l'équation d'évolution de la pollution :

$$\begin{cases} k_{t+1} = (1-\alpha) A k_t^{\alpha} \bar{E}_t^{1-\alpha-\beta} \\ P_{t+1} = P_t - \Gamma(P_t) + \bar{E}_t \end{cases} \tag{3.17}$$

Comme dans le chapitre 2, la dynamique du capital est indépendante de la pollution. Mais ici, la réciproque est également vraie puisqu'on constate que la dynamique de la pollution ne dépend que de la politique de quota exogène.

Un état stationnaire, dans cette région du plan $k - P$, est solution de :

$$\begin{cases} k = (1-\alpha) A k^{\alpha} \bar{E}^{1-\alpha-\beta} \\ \Gamma(P) = \bar{E} \end{cases}$$

La première équation admet une unique solution[4] $k_c^*(\bar{E})$ et les conditions d'existence sont résumées dans la proposition suivante.

Proposition 1 *Il n'existe pas d'état stationnaire exhibant un niveau de pollution irréversible. Il existe une (et au plus deux) solution(s) avec un niveau de pollution stationnaire en deçà du seuil d'irréversibilité si et seulement si*

$$\max_{P \in [0,\bar{P}]} \{\Gamma(P)\} = \frac{\theta \bar{P}^2}{4} \geq \bar{E} \tag{3.18}$$

Ces solutions $(k_{cr}^*(\bar{E}), P_{cr}^*(\bar{E}))$ *sont données par :*

$$k_{cr}^*(\bar{E}) = \left[(1-\alpha) A \bar{E}^{1-\alpha-\beta}\right]^{\frac{1}{1-\alpha}} \tag{3.19}$$

$$P_{cr}^*(\bar{E}) = \bar{P}/2 \pm \frac{\sqrt{4\theta(\theta \bar{P}^2/4 - \bar{E})}}{2\theta} \tag{3.20}$$

[4] L'indice "c" (*resp.* "i") vaut pour la solution contrainte (*resp.* intérieure). Le second indice "r" (*resp.* "i") fera, par la suite, référence à un niveau de pollution réversible (*resp.* irréversible).

Démonstration. Si la pollution est irréversible, alors la seconde équation $\Gamma(P) = \bar{E}$ admet une unique solution $\bar{E} = 0$. Mais, cette solution peut être exclue étant donné les propriétés des fonctions de production et d'utilité. Lorsque la pollution est réversible, le niveau de pollution est solution du polynôme $\Gamma(P) - \bar{E} = 0 \leftrightarrow \theta P^2 - \theta \bar{P} P + \bar{E} = 0$. Le discriminant $\Delta = 4\theta(\theta \bar{P}^2/4 - \bar{E})$ est nul dès que $\theta \bar{P}^2/4 = \bar{E}$ et, dans ce cas, nous avons $P^*_{cr}(\bar{E}) = \bar{P}/2$. Lorsque l'inégalité (3.18) est stricte, on obtient deux racines positives : $P^*_{cr}(\bar{E}) = \bar{P}/2 \pm \sqrt{\Delta}/(2\theta)$. ■

La condition d'existence traduit l'idée que la capacité maximum d'assimilation de la pollution par la nature, en stationnaire, est supérieure au niveau d'émission. Ce dernier correspond précisément, dans la zone contrainte, au quota global d'émission. Nous notons que cette condition nécessaire et suffisante revient à imposer une borne supérieure sur le quota $\bar{E}$.

Une fois les conditions d'existence déterminées, nous nous intéressons à l'effet d'une réforme de la politique environnementale sur les propriétés de l'état stationnaire. Notons que cette analyse n'a de sens que lorsque l'on raisonne à partir d'une solution (localement) stable. Dans le cas où il existe deux états stationnaires, nous pouvons facilement montrer que seule la solution basse est stable (voir l'annexe $B.2$). Nous considérons alors un renforcement du système de régulation, c'est-à-dire, une baisse du quota d'émission.

Proposition 2 *Une baisse du quota d'émission $\bar{E}$ implique une baisse à la fois des niveaux de capital et de pollution à l'état stationnaire stable.*

Démonstration. Il suffit de constater qu'à la solution stable, on a $k^{*\prime}_{cr}(\bar{E}) > 0$ et $P^{*\prime}_{cr}(\bar{E}) > 0$. ■

Lorsqu'un seul des deux instruments de contrôle de la pollution est opérant (les permis), il est possible de généraliser le résultat obtenu par Jouvet, Michel et Vidal [2002b], pour des facteurs de production complémentaires, au cas où ils sont normalement substituables (l'élasticité de substitution est unitaire pour une technologie Cobb-Douglas)[5]. Nous détectons en effet l'existence d'un dilemme entre croissance économique et protection de l'environnement : une politique plus sévère permet de réduire le niveau de pollution stationnaire au détriment du niveau de richesse. Une baisse de $\bar{E}$ provoque une réduction des émissions et de la pollution accumulée à chaque période. Mais, elle

[5] Il est important de noter que ces auteurs considèrent un cadre d'analyse assez distinct du notre. Ils supposent que les permis, à durée de vie infinie, sont la propriété des ménages qui se les transmettent de générations en générations et les louent aux firmes. Comparer nos résultats aux leurs se révèle donc un exercice purement informel, mais s'explique par la proximité de nos problématiques.

se traduit également par un effet revenu négatif puisque le salaire et la rente environnementale diminuent, ce qui constitue finalement un frein à l'épargne et à l'accumulation du capital.

Nous nous tournons à présent vers l'analyse de la solution intérieure.

3.3.2 La solution intérieure

Supposons maintenant un relâchement de la contrainte financière et/ou un renforcement de la contrainte environnementale tel(s) que les agents se décident à investir dans la dépollution. Dans ce cas, le problème des ménages admet une solution intérieure et la condition du premier ordre devient simplement :

$$P_{t+1} = \frac{1}{\gamma \phi s_t} \tag{3.21}$$

La définition de l'équilibre est modifiée et fait dorénavant intervenir la variable de dépollution m_t :

Définition 2.

Un équilibre intérieur avec prévisions parfaites est la donnée de la suite des variables par tête $\{c_t, m_t, s_t\}$*, de la suite des variables agrégées* $\{L_t, K_t, E_t, P_t\}$ *et de la suite de prix* $\{R_t, w_t, \phi_t\}$ *qui sont telles que :*

i/ Les agents sont à leur optimum : la condition d'arbitrage (3.21) de l'agent représentatif et les trois conditions de la maximisation des profits (3.6), (3.7) et (3.8) sont vérifiées,

ii/ les marchés sont équilibrés : $L_t = N = 1$ *sur le marché du travail,* $K_{t+1} = s_t (= k_{t+1})$ *sur le marché du capital et* $E_t = \bar{E}_t (= e_t)$ *sur le marché des permis,*

iii/ les contraintes budgétaires (3.9) et (3.10) sont respectées,

iv/ la dynamique de la pollution est celle décrite par (3.11).

L'analyse de l'équilibre revient donc à considérer le système d'équations composé de (3.6)-(3.11), (3.21) et des conditions d'équilibre sur les marchés. Sous ces conditions, il est possible d'exprimer la fonction de dépollution :

$$m_t = (1-\alpha) A k_t^{\alpha} \bar{E}_t^{1-\alpha-\beta} - k_{t+1} \tag{3.22}$$

La dynamique d'équilibre est alors décrite par le système d'équations suivant,

$$\begin{cases} P_{t+1} = \frac{1}{\gamma \phi k_{t+1}} \\ P_{t+1} = P_t - \Gamma(P_t) + \bar{E}_t - \gamma \left((1-\alpha) A k_t^{\alpha} \bar{E}_t^{1-\alpha-\beta} - k_{t+1} \right) \end{cases} \tag{3.23}$$

et, nous notons que la première équation, issue de la condition (3.21), définit une relation d'équilibre valable dans toute la zone intérieure :

$$P_t = \frac{1}{\gamma \phi k_t} \tag{3.24}$$

cette relation lie, à chaque période, le niveau de pollution de manière inverse au capital.

Nous procédons, dans ce qui suit, à une analyse des conditions d'existence d'un équilibre stationnaire en distinguant les deux cas de figure possibles (selon que la pollution est réversible ou pas). Nous limitons notre analyse à l'intervalle d'étude, pour le capital, $[0, \bar{k}(\bar{E})]$ avec,

$$\bar{k}(\bar{E}) = \left[(1-\alpha)A\bar{E}^{1-\alpha-\beta}\right]^{\frac{1}{1-\alpha}} \tag{3.25}$$

sur lequel nous savons que la variable de dépollution, en stationnaire, est positive où nulle : $m(k, \bar{E}) \geq 0$ (voir l'annexe A.1).

Equilibre stationnaire avec pollution irréversible

Dans la zone de pollution irréversible, la capacité d'assimilation est nulle *i.e.* $\Gamma(P) = 0 \; \forall P \geq \bar{P}$. En stationnaire, le système d'équations à étudier devient :

$$\begin{cases} P = \frac{1}{\gamma\phi k} \\ \bar{E} = \gamma((1-\alpha)Ak^{\alpha}\bar{E}^{1-\alpha-\beta} - k) \end{cases}$$

Le principe est ici de raisonner à $\bar{E}$ donné et de déterminer les conditions sous lesquelles la seconde équation admet une solution $k^*_{ii}(\bar{E})$.

Proposition 3 *Il existe un état stationnaire* $(k^*_{ii}(\bar{E}), P^*_{ii}(\bar{E}))$ *associé à un niveau de pollution irréversible si et seulement si le quota global est fixé en deçà d'un niveau limite* $\bar{E}_l$ *défini comme suit :*

$$\bar{E}_l = \left(\gamma A(1-\alpha)^2\right)^{\frac{1-\alpha}{\beta}} (\alpha(1-\alpha)A)^{\frac{\alpha}{\beta}} \tag{3.26}$$

Démonstration. voir l'annexe A.2 ■

L'analyse fait donc apparaître une valeur critique, pour le quota d'émission, en deçà de laquelle il existe un état stationnaire exhibant un niveau de pollution irréversible. Par construction ce type de solution constitue une trappe de pauvreté à la fois écologique (la pollution est supérieure au seuil d'irréversibilité $\bar{P}$) et économique puisque, en vertu de la relation d'équilibre (3.24), le niveau de capital stationnaire est inférieur à celui de n'importe quelle solution intérieure "réversible". Toutefois, contrairement au chapitre précédent, il est possible de se donner des conditions qui empêchent la survenue d'un tel état de long terme.

Corollaire. *Une condition nécessaire et suffisante pour exclure l'existence d'une trappe de pauvreté est de fixer le quota global d'émission à un niveau suffisamment élevé :* $\bar{E} > \bar{E}_l$.

Ainsi, la politique de permis, édictée à l'échelle supranationale, doit autoriser les firmes à polluer suffisamment si l'on veut éviter à l'économie une possible stabilisation, lors du processus de développement, à hauteur d'une trappe de pauvreté.

Ce résultat, *a priori* surprenant, s'explique par le fait que, dans la zone intérieure, l'économie dispose de deux instruments affectant les émissions polluantes. Or, l'existence d'un état stationnaire suppose que les émissions nettes soient nulles. Pour cela, il faut que l'activité de dépollution compense très exactement les émissions polluantes des firmes ce qui se produira si le quota est fixé en deçà de la valeur critique $\bar{E}_l$. La portée de ce résultat doit donc être relativisée. En effet, en fixant $\bar{E} > \bar{E}_l$, on s'assure mécaniquement de l'absence de trappes. Pour autant, il est vraisemblable que l'économie située dans cette zone subisse finalement une hausse perpétuelle de la pollution associée à une érosion continue du niveau de richesse. Ce type de trajectoire de développement s'apparente à une sorte de trappe de pauvreté "asymptotique" (ou encore à un processus de divergence). Nous reviendrons sur ce point important lors de l'analyse dynamique (section 3.4.2). Il conviendra notamment de se poser la question suivante : quel est l'effet du choix du quota sur la possibilité pour une économie, qui ne se trouve pas initialement dans la zone de pollution irréversible, de la rejoindre et de diverger ?

Si l'on admet que l'un des objectifs prioritaires de la politique économique en général, et de la politique environnementale en particulier, est précisément d'éviter à l'économie d'être happée par une trappe écologique et économique, nous imposons, par la suite, $\bar{E} > \bar{E}_l$. Dans ce contexte, nous nous focalisons sur les propriétés d'une solution associée à un niveau de pollution réversible.

Equilibre stationnaire avec pollution réversible

Quand la capacité d'assimilation de la nature est opérante, un état stationnaire est solution du système suivant (voir (3.23)) :

$$\begin{cases} P = \frac{1}{\gamma\phi k} \\ \theta P(\bar{P} - P) = \bar{E} - \gamma m(k, \bar{E}) \end{cases}$$

Substituer la relation d'équilibre dans le terme de gauche de la seconde équation ramène l'étude de l'existence à l'analyse du comportement de deux fonctions du capital sur le domaine de définition pertinent.

Proposition 4 *Sous les deux conditions suivantes,*

$$\max_{P\in[0,\bar{P}]}\{\Gamma(P)\} = \frac{\theta\bar{P}^2}{4} \geq \max_{k\in]\underline{k},\bar{k}(\bar{E})]}\{\bar{E} - \gamma m(k,\bar{E}))\} = \bar{E} \tag{3.27}$$

$$\bar{k}(\bar{E}) \geq \frac{2}{\gamma\phi\bar{P}} \tag{3.28}$$

il existe un état stationnaire $(k^*_{ir}(\bar{E}), P^*_{ir}(\bar{E}))$ *associé à un niveau de pollution réversible.*

Démonstration. voir l'annexe $A.1$. ■

La condition (3.27)[6], déjà utilisée dans le chapitre 2 pour prouver l'existence d'une solution intérieure avec pollution réversible, correspond à une réécriture, dans notre cadre d'analyse en équilibre général, de la condition introduite par Tahvonen et Withagen [1996]. Elle traduit l'idée selon laquelle la quantité maximale de pollution assimilée par la nature est intrinsèquement supérieure au volume maximum des émissions (ayant cours lorsque la dépollution s'annule *i.e.* en $k = \bar{k}(\bar{E})$) sur les domaines de définition pertinents du capital et de la pollution. La condition additionnelle (3.28) est précisément destinée à garantir une certaine correspondance des domaines de définition de ces deux variables. Elle nous autorise, sans perte de généralité, à appréhender l'étude de l'existence.

Notons que sous ces deux conditions, il existe au moins un et au plus deux états stationnaires. En cas d'unicité, on a nécessairement $k^*_{ir}(\bar{E}) < 2/(\gamma\phi\bar{P})$ (ce qui implique $P^*_{ir}(\bar{E}) > \bar{P}/2$). Lorsqu'il existe deux solutions, elles se situent de part et d'autre de cette valeur remarquable.

Avant d'étudier la sensibilité de l'équilibre à une variation du quota d'émission, plaçons-nous dans le cas le plus intéressant où il existe deux états stationnaires. Puisque la pollution et le capital sont inversement reliés à l'équilibre, nous simplifions la dénomination des solutions en appelant équilibre haut (resp. bas) celui associé à un niveau de richesse important (resp. bas). L'équilibre haut est donc aussi caractérisé par une concentration de polluant faible relativement à l'autre. L'étude de la stabilité locale est présentée dans l'annexe $B.2$. Les conditions suffisantes d'existence nous permettent seulement de connaître la localisation des niveaux de pollution stationnaires par rapport à la valeur remarquable $\bar{P}/2$: $P^{*h}_{ir}(\bar{E}) < \bar{P}/2 < P^{*b}_{ir}(\bar{E})$. Nous savons donc que seule la solution haute $(k^{*h}_{ir}(\bar{E}), P^{*h}_{ir}(\bar{E}))$ respecte la première des deux conditions suffisantes de stabilité : $\Gamma'(P) > 0$. Sachant que généralement, dans les modèles à générations imbriquées, lorsqu'il existe deux solutions l'une est localement stable et l'autre instable, il y a de fortes présomptions du fait que la solution stable sera celle qui présente un niveau de richesse élevé et une concentration faible du polluant (ce que confirmeront nos simulations dans la section 3.4.2).

Dans tous les cas, l'analyse d'une réforme de la politique environnementale conduit aux conclusions suivantes.

Proposition 5 *Soit $\bar{E}_1$ le quota initial de pollution, supposons un renforcement de la politique environnementale se traduisant par la fixation d'un quota $\bar{E}_2 < \bar{E}_1$ (pour lequel il existe deux états stationnaires). La baisse du quota implique :*

[6] Nous notons que cette condition suffisante d'existence, pour la solution intérieure, est formellement identique à la condition nécessaire et suffisante d'existence d'une solution contrainte.

- une baisse du niveau de capital et une hausse du niveau de pollution à l'équilibre bas (présumé instable),

- une hausse du niveau de capital et une baisse de la pollution à l'équilibre haut (présumé stable),

dès que le niveau seuil du quota vérifie : $\bar{E}_l \geq \bar{E}_c$ *avec* $\bar{E}_c$ *une borne définie de la manière suivante :*

$$\bar{E}_c = (\gamma(1-\alpha-\beta))^{(1-\alpha)/\beta}(A(1-\alpha))^{1/\beta}$$

Démonstration. voir l'annexe C. ■

Pour le premier état stationnaire, on retrouve le résultat principal du papier d'Ono [2002], sans pour autant devoir se placer dans le cas où la politique environnementale est déjà sévère avant la réforme (pour le quota initial $\bar{E}_1$). Toutefois, ce résultat doit être considéré avec précaution puisque cette solution est présumée instable. L'évolution du second état stationnaire est beaucoup plus intéressante et présente des similitudes avec les conclusions de la littérature sur la réforme de la taxe (Bovenberg et Smulders [1995], [1996] ou Bovenberg et de Mooij [1997]). En effet, nous constatons que la réforme du système de permis procure un double dividende puisqu'un quota plus contraignant permet à l'économie d'atteindre un état où à la fois le niveau de richesse est supérieur et la pollution inférieure. Nous notons également que ce résultat n'est pas conditionné au fait d'introduire une externalité environnementale de production contrairement aux travaux précités.

Pour comprendre ces résultats, décomposons les effets d'une baisse du quota. Cette baisse s'associe tout d'abord à un effet revenu négatif (voir la contrainte budgétaire (3.9)) : elle entraîne une diminution du salaire et de la rente environnementale ce qui implique que l'agent a relativement moins de ressources à allouer à l'épargne et à la dépollution (resserrement de la contrainte financière). Elle se traduit également par un effet substitution qui provient de la diminution des émissions polluantes et de la pollution accumulée à chaque période (voir la dynamique (3.11)). *Ceteris paribus*, avec la réduction du quota, la génération concernée a relativement moins de ressources à consacrer à la dépollution pour maintenir la qualité de l'environnement dont elle profitera en seconde période de vie (desserrement de la contrainte environnementale). Elle peut épargner une plus grande part de son revenu ce qui favorise l'accumulation de capital. La question se pose alors de savoir pourquoi le premier effet l'emporte pour l'état le moins souhaitable alors que c'est le second qui prévaut pour l'état le meilleur.

A l'état stationnaire haut, l'économie dispose, avant la réforme, d'un stock de capital relativement important. De plus, le niveau de pollution est inférieur au seuil $\bar{P}/2$ et va de pair avec une fonction d'assimilation croissante avec le stock. La baisse du quota provoque une diminution du revenu *a priori* défavorable à l'épargne et aux dépenses de dépollution. Mais, ce resserrement de la contrainte financière reste modéré car l'économie peut s'appuyer sur un stock de capital conséquent. La réduction du quota implique également un desserrement de la contrainte environnementale qui était déjà peu pesante. L'agent dispose alors d'une certaine latitude pour amortir les répercussions d'une baisse du revenu sur l'accumulation de capital. L'effet substitution joue à plein : la dépollution sert de variable d'ajustement de telle sorte que cette diminution ne pénalise pas l'épargne. Réduire les dépenses de dépollution peut, dans un premier temps, se traduire par une hausse des émissions (si cette baisse dépasse la baisse du quota). Cependant, ce supplément d'émission va être intégralement assimilé par la nature qui "profite" d'une capacité de régénération élevée. Par conséquent, d'une période à l'autre, la capital augmente et la pollution diminue. L'économie entre dans un cercle vertueux d'enrichissement et de baisse de la pollution car l'accumulation de capital s'associe, à chaque période, à une hausse du revenu ce qui permet de consacrer toujours plus de ressources aux deux postes de dépenses.

A partir de l'état bas, la baisse du quota provoque exactement l'effet contraire. Le poids de la contrainte financière, déjà conséquent du fait d'un niveau de richesse moindre, s'accroît encore. Finalement, cette contrainte écrase la contrainte environnementale de telle manière que à la fois l'épargne et les dépenses de dépollution baissent dans des proportions considérables. La baisse de l'épargne se traduit par un ralentissement de l'accumulation de capital (et une diminution du capital stationnaire). De plus, la baisse des émissions est plus que compensée par la réduction de la dépollution impliquant, par là-même, une hausse des émissions nettes. Puisque l'économie se situe dans la zone où $P > \bar{P}/2$ (où la fonction d'assimilation est sur sa phase décroissante), la hausse des émissions épuise encore la capacité de régénération de la nature ce qui contribue à accélérer l'accumulation du polluant (jusqu'à l'accession à un état stationnaire plus pollué).

Dans cette section consacrée à l'étude de l'équilibre (stationnaire), nous avons montré l'existence d'une multiplicité de solutions aux propriétés assez éloignées. Comme dans le second chapitre, certains équilibres présentent les caractéristiques d'une trappe de pauvreté à la fois écologique et économique. Toutefois, ici, il apparaît qu'il est possible de protéger l'économie contre une possible stabilisation à hauteur d'un tel état à condition de fixer le quota global d'émission à un niveau suffisamment important. L'analyse de l'effet d'une réforme de la politique environnementale sur les propriétés de l'équilibre a révélé deux caractéristiques remarquables. D'une part, en l'absence d'une activité de dépollution, une politique plus sévère permet d'atteindre un état moins pollué au détriment du niveau de richesse et d'autre part, à la solution intérieure, elle génère un double dividende.

Nous nous focalisons à présent sur l'analyse de la dynamique du modèle en étudiant successivement la localisation et l'évolution de la frontière (séparant la solution intérieure du cas contraint) en fonction du quota et, en présentant, à partir d'un exemple numérique, la dynamique globale du modèle (avec la simulation des bassins d'attraction).

3.4 Effet des permis sur la dynamique

3.4.1 Le cas frontière

Comme nous l'avons expliqué en détail dans le chapitre 2, l'étude du cas frontière est centrale lorsque l'on se pose la question de l'admissibilité des solutions. Afin de simplifier l'analyse et simplement dégager une tendance quant au comportement des frontières relativement au quota, nous supposons une politique de quota constante, soit, $\bar{E}_t = \bar{E}\ \forall t$.

Définition 3. *Dans l'espace $k - P$ des variables d'état, la première frontière correspond au seuil d'irréversibilité : $P_t = \bar{P}$. La seconde frontière, dite frontière d'indifférence, est le lieu des couples (k_t, P_t) en lesquels les agents sont indifférents entre le fait d'investir ou pas dans la dépollution. Soient les valeurs $\check{k}(\bar{E})$ et $\hat{k}(\bar{E})$, définies respectivement par,*

$$\check{k}(\bar{E}) = \left(\frac{1}{\gamma\phi(\bar{P}+\bar{E})(1-\alpha)A\bar{E}^{1-\alpha-\beta}}\right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

$$\hat{k}(\bar{E}) = \left(\frac{1}{\gamma\phi\bar{E}(1-\alpha)A\bar{E}^{1-\alpha-\beta}}\right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

la seconde frontière s'exprime de la manière suivante : $P_t = f(k_t, \bar{E})$ (voir l'annexe D.1) avec,

$$f(k_t,\bar{E}) = \begin{cases} \frac{1}{\gamma\phi(1-\alpha)Ak_t^{\alpha}\bar{E}^{1-\alpha-\beta}} - \bar{E} & \text{pour } k_t \in [0, \check{k}(\bar{E})] \\ \frac{\left(-(1-\theta\bar{P})+\sqrt{g(k_t,\bar{E})}\right)}{2\theta} & \text{pour } k_t \in]\check{k}(\bar{E}), \hat{k}(\bar{E})] \\ 0 & \text{pour } k_t > \hat{k}(\bar{E}) \end{cases} \tag{3.29}$$

et,

$$g(k_t,\bar{E}) = (1-\theta\bar{P})^2 + 4\theta\left(\frac{1}{\gamma\phi(1-\alpha)Ak_t^{\alpha}\bar{E}^{1-\alpha-\beta}} - \bar{E}\right)$$

En tout point situé au dessus (resp. au dessous) de la frontière, nous avons $m_t \geq 0$ (resp. $m_t = 0$).

La localisation de l'ensemble des états stationnaires relativement à ces frontières est de toute première importance en ce qui concerne l'admissibilité de ces solutions.

En effet, nous avons étudié les quatre systèmes dynamiques correspondant chacun à des zones particulières du plan $k - P$. Nous avons démontré l'existence d'états stationnaires pour deux de ces zones. Mais, il est tout à fait envisageable, lors de la convergence vers une solution stable d'une zone déterminée, que la trajectoire d'équilibre franchisse l'une ou l'autre des frontières avant d'atteindre cette solution. Or, dès que la trajectoire traverse une de ces frontières, la dynamique est régie par un nouveau système par définition totalement différent du précédent. Autrement dit, la solution stable considérée n'est pas admissible puisqu'une fois la frontière traversée, l'économie va converger vers une solution stable différente définie par la dynamique ayant cours dans cette nouvelle zone.

Intéressons-nous plus précisément aux propriétés de la frontière d'indifférence. Pour $k_t \leq \hat{k}(\bar{E})$, la fonction (3.29) caractérise une relation monotone décroissante entre la pollution et le capital : la décision de dépolluer est prise pour un niveau de pollution d'autant plus faible que l'économie est riche[7]. De plus, on constate que la frontière s'abaisse, dans le plan des variables d'état, quand le quota augmente : $P_t = f(\underset{-}{k_t}, \underset{-}{\bar{E}})$.

Ainsi, partant d'un état initial dans la zone contrainte, l'économie s'engagera d'autant plus vite dans l'activité de dépollution que le quota global de permis sera important. Cette propriété a des implications non triviales sur le comportement des agents. En effet, émettre une quantité élevée de permis va "précipiter" le moment où les agents décideront de consacrer des ressources à la dépollution. Cette caractéristique provient du resserrement de la contrainte environnementale consécutif à une hausse du quota, donc des émissions polluantes des firmes, à chaque période. L'explication trouve également sa source dans le rôle central joué par le volet redistribution de la politique environnementale : augmenter $\bar{E}$ tend à accroître le revenu des agents et implique que, dans leur arbitrage, le poids de la contrainte financière diminue ce qui accroît finalement leur incitation à dépolluer. Au contraire, fixer le quota à un niveau bas provoque un déplacement de la frontière vers le haut et retarde l'instant où la dépollution devient opérante.

On pourrait se poser la question de savoir s'il est préférable de fixer un quota élevé, donc d'atteindre rapidement la frontière mais avec un niveau de pollution potentiellement important, ou de recourir à une politique sévère avec un quota bas (donc une frontière plus éloignée et une accumulation plus lente de la pollution). Un élément de réponse est apporté par l'analyse de l'admissibilité des différentes solutions.

Par construction, les solutions contraintes et intérieures réversibles satisfont la première condition d'admissibilité, concernant le positionnement par rapport au seuil d'irréversibilité. L'étude de la localisation des deux types d'états stationnaires relativement

[7] Ce qui s'explique une nouvelle fois par l'évolution du rapport de force entre les contraintes financière et environnementale.

à la frontière d'indifférence est présentée dans l'annexe $D.2$. En fait, il apparaît que garantir l'admissibilité de telle ou telle autre solution nécessite d'imposer des conditions peu lisibles sur les paramètres. Nous choisissons plutôt de procéder à une analyse plus formelle. Le respect de la seconde condition d'admissibilité, simultanément pour les solutions intérieures et contraintes, suppose que le quota appartienne à un intervalle prédéfini : $\bar{E} \in [\bar{E}_i, \bar{E}_s]$. La borne supérieure de cet intervalle renvoie au positionnement du niveau de capital stationnaire, pour une solution contrainte, par rapport à la valeur remarquable $\hat{k}(\bar{E})$. Si le quota dépasse le montant $\bar{E}_s$, alors la frontière coupe l'axe des abscisses ($P_t = 0$) avant le niveau $k^*_{cr}(\bar{E})$. Par conséquent, l'économie se trouve dans l'incapacité d'atteindre les solutions contraintes puisque ces dernières se situent finalement dans la région intérieure et ne sont pas admissibles. L'inégalité $k^*_{cr}(\bar{E}) \leq \hat{k}(\bar{E})$, qui peut se réécrire $\bar{E} \leq \bar{E}_s$, est donc une condition nécessaire pour l'admissibilité des solutions contraintes[8].

Il est important de noter que l'ordre entre les bornes de l'intervalle $[\bar{E}_i, \bar{E}_s]$ et $\bar{E}_l$ (défini par (3.26)) est *a priori* inconnu. Si $\bar{E}_l < \bar{E}_s$, alors il existe un intervalle $]\bar{E}_l, \bar{E}_s[$ non vide dans lequel il est possible de choisir un quota qui vérifie à la fois l'exclusion des trappes et la satisfaction de la condition nécessaire d'admissibilité pour les solutions contraintes. Si, par contre, $\bar{E}_l \geq \bar{E}_s$, alors nous sommes confrontés à l'arbitrage suivant pour la fixation du quota. Imposer un quota $\bar{E} > \bar{E}_l$ garantit l'absence de trappes mais se traduit aussi par l'impossibilité d'atteindre les solutions contraintes. Au contraire, en choisissant $\bar{E} < \bar{E}_s$, l'économie pourra potentiellement converger vers les états stationnaires les meilleurs comme les pires. Pour la solution intérieure, le même type de raisonnement s'applique, de manière symétrique, si l'on considère cette fois l'ordre entre $\bar{E}_i$ et $\bar{E}_l$.

Nous procédons maintenant, à partir d'un exemple numérique, à des simulations destinées à représenter la dynamique globale et sa sensibilité au choix du quota.

3.4.2 Exemple numérique

Nous revenons, dans cette partie, sur la discussion amorcée dans la section 3.3.2. L'étude des propriétés d'une solution intérieure avec pollution irréversible a révélé qu'il était possible d'exclure l'existence de trappes de pauvreté à condition de choisir un quota d'émission supérieur au niveau critique $\bar{E}_l$. Pour autant, rien ne garantit que le sentier de croissance d'une économie, située dans la zone d'irréversibilité, ne soit divergent. La notion de divergence fait ici référence au fait que dans cette région, l'économie polluante subit une hausse perpétuelle de la pollution qui s'accompagne, en

[8] L'inégalité $\bar{E} \geq \bar{E}_i$ n'est qu'une condition suffisante à l'admissibilité de la solution intérieure (voir l'annexe $D.2$).

retour, d'une phase de récession économique (voir la figure 3.2 pour une illustration de ce type de trajectoire)[9]. La divergence peut également être appréhendée comme la convergence vers une trappe de pauvreté asymptotique.

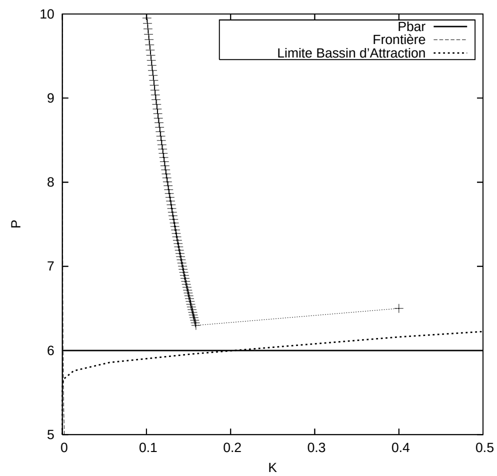

FIG. 3.2 – La trajectoire de divergence

Face à ce constat et partant du principe que le quota est fixé à un niveau $\bar{E} > \bar{E}_l$, la question se pose de savoir quel est l'effet du choix de $\bar{E}$ sur la "probabilité" qu'a l'économie d'atteindre la zone d'irréversibilité[10] sachant qu'elle n'y appartient pas à l'origine.

Pour appréhender ce problème, nous déterminons la dynamique globale du modèle (voir annexe E) et procédons à des simulations pour le jeu de paramètres suivant :

$$\left\{A, \alpha, \beta, \theta, \gamma, \phi, \bar{P}\right\} = \{1.9, 0.3, 0.6, 0.15, 1, 1, 6\}$$

Nous nous focalisons plus précisément sur la dynamique de la région intérieure afin de comparer les évolutions respectives du bassin d'attraction de la solution réversible stable (qui est ici unique et correspond à la solution haute définie dans la section 3.3.2)

[9]L'intuition qui sous-tend l'émergence d'une telle trajectoire de développement est la suivante. Dans cette région, la concentration de polluant est telle que d'une part, la nature n'assimile plus la pollution et d'autre part, les agents souffrent des dommages occasionnés par la pollution. Afin de remédier à ces dommages, ils n'ont d'autre choix que de consacrer une part importante de leurs ressources à l'activité de dépollution. Mais, cette décision va à l'encontre de l'épargne et de la consommation. Elle se traduit donc par une rupture dans le processus d'accumulation du capital physique. De plus, leur effort se révèle insuffisant, sur la durée, pour compenser les émissions polluantes des firmes et stopper le processus d'accumulation de la pollution. Même si, entre la première et la seconde période, la pollution décroît, on constate ensuite une baisse du stock de capital et une hausse du niveau de pollution et ce mécanisme d'appauvrissement va se reproduire de périodes en périodes. La trajectoire se confond finalement avec la relation d'équilibre (3.24) (la divergence, pour l'exemple considéré, présente la particularité d'être "lente").

[10]L'appartenance à cette zone étant déterminante pour expliquer le processus de divergence.

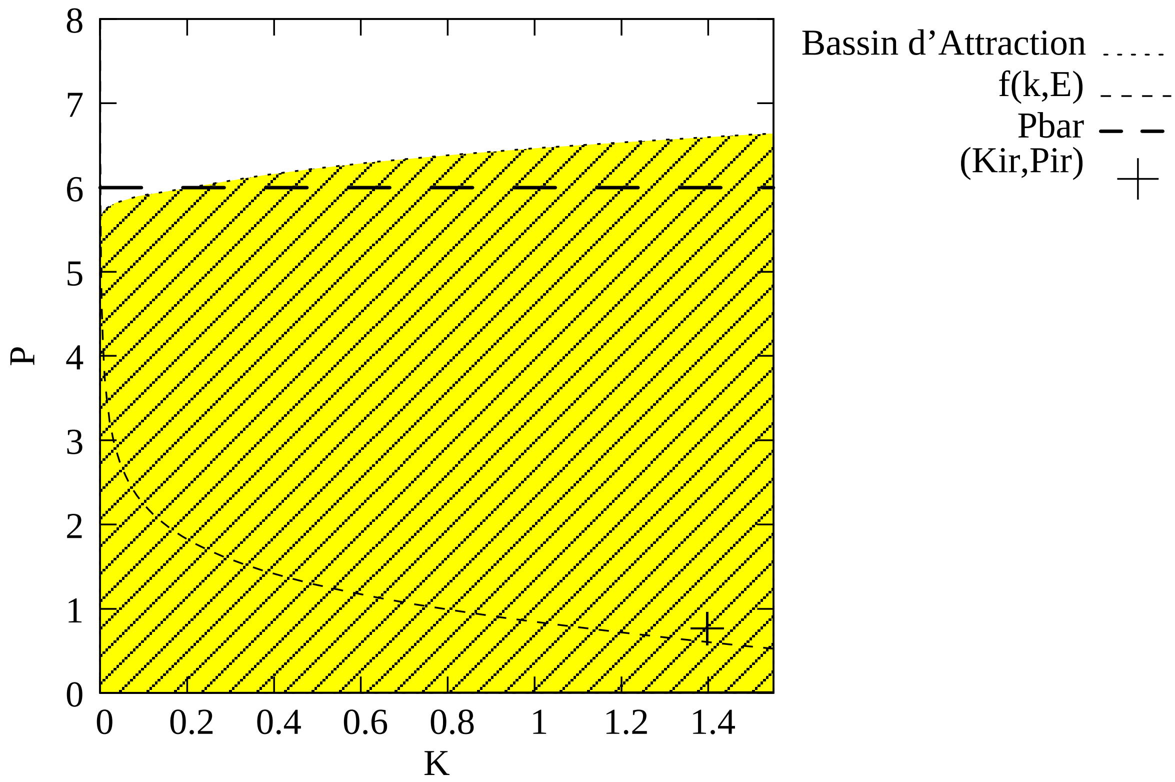

FIG. 3.3 – Bassin d'attraction et région de divergence pour $\bar{E} = 0.6$

et de la zone de divergence. Sachant que la seuil d'irréversibilité vaut $\bar{E}_l = 0.58$, nous réalisons les simulations pour deux valeurs du quota global : $\bar{E}_1 = 0.6$ et $\bar{E}_2 = 1.2$. La représentation des bassins d'attraction, pour chacune de ces valeurs, est rapportée dans les figures 3.3 et 3.4.

La comparaison de ces deux graphiques montre clairement que la "frontière" séparant la bassin d'attraction de la région de divergence[11] s'abaisse, dans le plan $k - P$, quand le quota augmente. Alors que diverger suppose de se situer initialement dans la zone de pollution irréversible pour un quota bas (excepté pour des niveaux faibles de capital), on s'aperçoit que les conditions initiales à partir desquelles l'économie connaît une divergence (asymptotique) exhibent des niveaux de pollution inférieurs au seuil d'irréversibilité $\bar{P}$ quand le quota est important. Autrement dit, choisir le quota le plus restrictif minimise, voire exclut, le risque pour une économie, qui ne souffre pas à l'instant initial d'une irréversibilité des dommages environnementaux, de suivre une trajectoire de développement marquée par l'appauvrissement en capital physique et environnemental.

Cette propriété est plutôt naturelle dans la mesure où un quota élevé contribue à renforcer le poids de la contrainte environnementale : *ceteris paribus*, le rythme d'ac-

[11]Partie supérieure située au delà de la frontière délimitant le bassin d'attraction

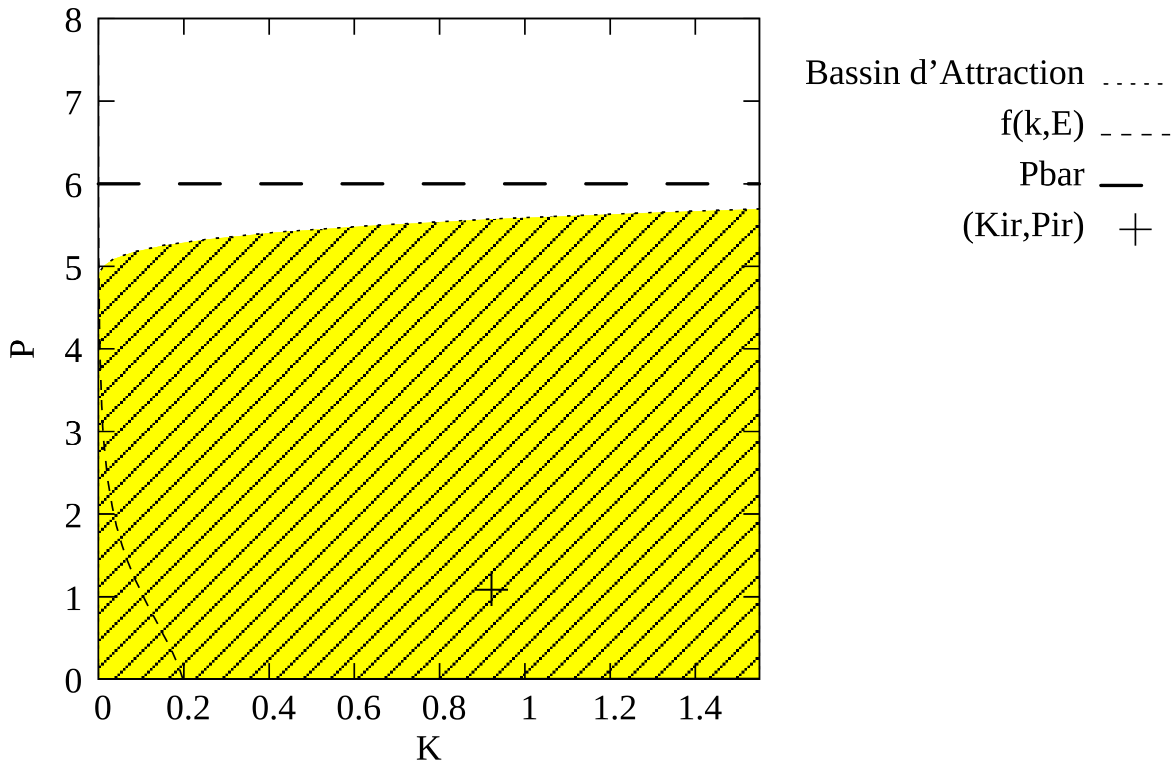

FIG. 3.4 – Bassin d'attraction et région de divergence pour $\bar{E} = 1.2$

cumulation de la pollution est plus soutenu et la capacité d'assimilation de la nature se trouve plus vite saturée. En retour, les agents réagissent en donnant la priorité à l'activité de dépollution au détriment de l'accumulation de richesse. Le mécanisme d'appauvrissement décrit plus haut va finalement jouer pour des niveaux de pollution plus bas (et inférieurs au seuil d'irréversibilité).

Grâce à cet exemple numérique, nous confirmons donc les résultats obtenus lors de l'analyse stationnaire, pour la solution intérieure, puisque nos observations recommandent la fixation du quota le plus bas possible pourvu qu'il soit supérieur au seuil critique $\bar{E}_l$.

Avant de clore cette discussion, il est important de formuler la remarque suivante. Emettre un quota $\bar{E} = \bar{E}_l + \varepsilon$, avec $\varepsilon > 0$ infinitésimal, protège l'économie non seulement d'une convergence vers une trappe de pauvreté mais aussi, de la divergence à condition de disposer à l'instant initial d'un environnement sauvegardé[12]. Toutefois, il subsiste le cas hypothétique où la pollution initiale est déjà irréversible. Dans cette situation extrême, nos conclusions devraient être, en toute logique, sensiblement révisées. En l'occurrence, on peut s'attendre à ce qu'il faille fixer le quota à un niveau très bas, et inférieur à $\bar{E}_l$, afin de permettre à l'économie de se stabiliser à hauteur d'une

[12] C'est le cas d'étude qui fait *a priori* le plus sens. En effet, l'idée que l'on se fait du rôle d'un système de régulation de la pollution est précisément d'intervenir avant de commettre l'irréparable.

trappe stationnaire. La convergence vers ces états constituerait alors un moindre mal au vue du processus d'appauvrissement perpétuel qui accompagne la divergence.

3.5 Conclusion

Ce travail est, en premier lieu, une extension de l'étude réalisée dans le second chapitre. A partir d'un modèle à générations imbriquées avec irréversibilité potentielle de la pollution, nous avons montré qu'une issue possible du développement économique, en l'absence de contrôle de la pollution, est la convergence vers une trappe de pauvreté à la fois écologique et économique.

Face à ce constat, la première question que l'on se pose, dans ce chapitre, est de savoir si une régulation de la pollution par l'instauration d'un marché de permis à polluer constitue une politique publique susceptible de prémunir l'économie contre la convergence vers une trappe. Dans notre cadre d'analyse, l'économie polluante peut être potentiellement confrontée à deux trappes de pauvreté de nature différente. La première est un équilibre stationnaire, associé à un niveau de richesse bas et à un niveau de pollution irréversible, en lequel l'économie peut se stabiliser à long terme. La seconde s'apparente à une trappe "asymptotique" dans la mesure où elle correspond à un sentier de (dé)croissance marqué par un appauvrissement perpétuel des ressources économiques et environnementales. L'analyse permet de déceler l'existence d'un niveau seuil pour les émissions polluantes. Choisir un quota global d'émission supérieur au seuil permet d'exclure toute convergence vers la trappe "stationnaire". De plus, fixer le quota au niveau le plus bas au delà de ce seuil est un moyen suffisant pour éviter à l'économie, qui ne souffre pas d'une pollution initiale irréversible, de subir la phase de récession accompagnant la convergence vers la trappe asymptotique.

Nous nous tournons ensuite, en nous plaçant dans le contexte d'absence de trappes, vers l'analyse des deux autres équilibres caractéristiques du modèle. Notre étude, en mesurant les effets d'une réforme de la politique environnementale sur les propriétés de l'équilibre, s'insère à présent dans une littérature à laquelle ont contribué notamment Bovenberg et Smulders [1995], [1996], pour l'instrument de la taxe, et Jouvet, Michel et Vidal [2002b] ou Ono [2002], pour l'instrument permis.

Un renforcement de la politique environnementale (*i.e.* une baisse du quota) a des répercussions très différentes selon le type d'équilibre considéré. En fait, ces équilibres avec pollution réversible se distinguent simplement du fait de l'engagement, ou pas, des agents privés dans une activité de dépollution : à la solution dite contrainte, les agents ne dépolluent pas contrairement à la solution intérieure. Dès lors, à la solution contrainte, il apparaît que ce renforcement permet effectivement de réduire le niveau de pollution stationnaire mais, cet effort est réalisé au détriment de l'accumulation de capital. Autrement dit, une politique plus sévère pénalise la croissance économique. Par contre, le résultat original consiste à montrer que, à la solution intérieure, cette politique s'accompagne à la fois d'un baisse de la pollution et d'une hausse du capital stationnaires. Ainsi, une réforme ambitieuse du système de permis procure un double bénéfice (économique et environnemental) à l'économie. Ce résultat d'existence d'un double dividende fait écho aux conclusions des travaux sur la taxe. Toutefois, il est obtenu sans émettre l'hypothèse discutable selon laquelle l'environnement entre dans la production en tant qu'externalité positive.

Dans ce chapitre, nous avons mis en lumière le rôle central joué par le quota global d'émission dans le système de régulation par les permis. C'est précisément grâce au choix de cette variable qu'il va être possible de protéger l'économie de l'accession à une trappe de pauvreté. C'est aussi la manipulation de cet instrument qui va déterminer, via l'effet du quota sur les contraintes financière et environnementale auxquelles sont confrontés les agents, les répercussions d'une réforme du système de permis.

Ce constat soulève une nouvelle question ayant trait aux conséquences du choix du quota d'émission sur la performance d'une régulation par les permis cette fois-ci, dans une optique de maximisation du bien-être. Plusieurs travaux (dont Beltratti [1995b], Jouvet, Michel et Vidal [2002a] ou Jouvet, Michel et Rotillon [2005]) ont montré qu'un système de permis permet de placer l'économie dans les conditions qui la prédisposent à atteindre l'optimum social pourvu que le quota coïncide exactement avec le niveau d'émission que choisirait un planificateur bienveillant. Pourtant, en pratique, il n'existe aucune garantie que les quotas d'émission imposés aux nations (dans le cadre, par exemple, des accords de Kyoto (1997)), correspondent effectivement à la cible de pollution idéale. Admettre que le quota est potentiellement une source de rigidité pour l'économie amène à se poser la question de savoir si le recours à l'instrument permis est toujours compatible avec la réalisation de l'optimum de premier rang. Cette préoccupation constituera le cœur de notre réflexion dans le quatrième chapitre.

Annexes

A. Démonstration des propositions 3, 4 et 5

A.1 Propriétés de la fonction de dépollution en stationnaire :

Nous raisonnons pour un quota $\bar{E}$ donné. Au préalable, il faut s'assurer que le quota $\bar{E}$ satisfait certaines conditions. En particulier, pour la solution intérieure, on doit avoir $m(k, \bar{E}) = \Omega(k, \bar{E}) - k \geq 0$. Avant d'étudier le comportement de la fonction de dépollution $m(k, \bar{E})$, il faut donc se donner un $\bar{E}$ pour lequel il existe un intervalle pour le capital sur lequel $m(k, \bar{E}) \geq 0$. L'équation (3.22), évaluée en stationnaire, donne l'équivalence suivante : pour tout k,

$$m(k, \bar{E}) \geq 0 \leftrightarrow \bar{E} \geq \bar{E}_k$$

avec,

$$\bar{E}_k = \left(\frac{k^{1-\alpha}}{A(1-\alpha)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha-\beta}}$$

Si on impose

$$\bar{E} > \lim_{k \to 0} \bar{E}_k = 0$$

alors nous avons $m(k, \bar{E}) > 0$ dans un voisinage de $k = 0$. Et, par un argument de continuité, nous savons qu'il existe un intervalle non vide pour le capital sur lequel $m(k, \bar{E}) \geq 0$. Pour cet exemple, cette condition n'est pas restrictive puisque, par hypothèse (sur les préférences, la production), nous avons nécessairement $\bar{E} > 0$.

On peut donc passer à l'étape suivante qui consiste à étudier les propriétés de $m(k, \bar{E})$ pour un quota $\bar{E}$ donné :

- $\exists! k \in [0, +\infty[$ tel que $m(k, \bar{E}) = 0$. Nous notons cette valeur $\bar{k}(\bar{E})$ et limitons notre étude à l'intervalle $[0, \bar{k}(\bar{E})]$ sur lequel nous avons $m(k, \bar{E}) \geq 0$ avec :

$$\bar{k}(\bar{E}) = \left[(1-\alpha) A \bar{E}^{1-\alpha-\beta} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

et on constate que $\bar{k}'(\bar{E}) > 0 \ \forall \bar{E} > 0$: la borne supérieure du domaine de définition est croissante avec le quota[13]. De plus, cette borne supérieure correspond exactement au niveau de capital stationnaire $k_c^*(\bar{E})$ d'une solution contrainte.

[13]De même, on a

$$\begin{aligned} m_2(k, \bar{E}) &= (1-\alpha-\beta)(1-\alpha) A k^{\alpha} \bar{E}^{-\alpha-\beta} > 0 \\ m_{22}(k, \bar{E}) &= -(\alpha+\beta)(1-\alpha-\beta)(1-\alpha) A k^{\alpha} \bar{E}^{-\alpha-\beta-1} < 0 \end{aligned}$$

- $\exists! k \in [0, \bar{k}(\bar{E})]$ tel que $m_1(k, \bar{E}) = 0$. Nous notons cette valeur $\tilde{k}(\bar{E})$ et nous savons que $m_1(k, \bar{E}) \geq 0 \; \forall k \leq \tilde{k}(\bar{E})$ avec :

$$m_1(k, \bar{E}) = \alpha(1-\alpha)Ak^{\alpha-1}\bar{E}^{1-\alpha-\beta} - 1$$

et,

$$\tilde{k}(\bar{E}) = \left[\alpha(1-\alpha)A\bar{E}^{1-\alpha-\beta}\right]^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

on remarque encore que $\tilde{k}'(\bar{E}) > 0 \; \forall \bar{E} > 0$.

- Enfin, nous savons que $m_{11}(k, \bar{E}) < 0$, $m(0, \bar{E}) = m(\bar{k}(\bar{E}), \bar{E}) = 0$ pour $0 < \bar{E} < +\infty$ et

$$m(\tilde{k}(\bar{E}), \bar{E}) = A(1-\alpha)^2 \left[\alpha(1-\alpha)A\right]^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \bar{E}^{\frac{1-\alpha-\beta}{1-\alpha}} > 0 \; \forall \bar{E} > 0$$

Une fois ces propriétés connues, il est possible de se focaliser sur l'étude des conditions d'existence.

A.2 Existence d'un état stationnaire irréversible :

Nous cherchons à savoir s'il existe une solution à l'équation $\bar{E} = \gamma m(k, \bar{E})$. Il est immédiat que la condition nécessaire et suffisante à l'obtention d'un tel résultat est

$$\gamma \left(\max_{k \in [0, \bar{k}(\bar{E})]} m(k, \bar{E}) \right) \geq \bar{E}$$

soit, $\gamma m(\tilde{k}(\bar{E}), \bar{E}) \geq \bar{E}$.

Des calculs directs montrent alors que la relation $\gamma m(\tilde{k}(\bar{E}), \bar{E}) = \bar{E}$ admet un unique point fixe $\bar{E}_l$ et que $\gamma m(\tilde{k}(\bar{E}), \bar{E}) \geq \bar{E} \leftrightarrow \bar{E} \leq \bar{E}_l$.

A.3 Existence d'un état stationnaire réversible :

L'admissibilité d'une solution intérieure "réversible" requiert $P = 1/(\gamma\phi k) < \bar{P}$ ce qui équivaut à $k > \underline{k}$ avec $\underline{k} = 1/(\gamma\phi\bar{P})$. Pour être en mesure de discuter en toute généralité de l'existence, il faut que l'intervalle $]\underline{k}, \bar{k}(\bar{E})]$ soit non vide. Etudier l'existence revient à comparer le comportement de deux fonctions du capital, à $\bar{E}$ donné. On se place dans le cas qui nous intéresse, à savoir, l'absence de trappes ce qui revient à supposer $\bar{E} > \bar{E}_l$.

- la première fonction est la fonction d'émission : $\Theta(k) = \bar{E} - \gamma m(k, \bar{E})$. Son comportement se déduit du comportement de $m(.)$ et de la condition $\bar{E} > \bar{E}_l$: $\Theta(k) > 0$ $\forall k \in]\underline{k}, \bar{k}(\bar{E})]$, $\Theta'(k) = -\gamma m_1(k, \bar{E})$, $\Theta(0) = \Theta(\bar{k}(\bar{E})) = \bar{E}$. Elle est d'abord décroissante jusqu'à $\tilde{k}(\bar{E})$ puis croissante jusqu'à $\bar{k}(\bar{E})$. Elle est convexe : $\Theta''(k) > 0$.

- la seconde fonction s'obtient par substitution de la relation d'équilibre (3.24), évaluée en stationnaire, dans la fonction d'assimilation $\Gamma(P)$:

$$\Lambda(k) = \frac{\theta}{\gamma\phi k}(\bar{P} - \frac{1}{\gamma\phi k})$$

Il apparaît que : $\Lambda(k) \geq 0 \ \forall k \in]\underline{\mathrm{k}}, \bar{k}(\bar{E})]$, $\Lambda'(k) = -\theta/(\gamma\phi k^2)(\bar{P} - 2/(\gamma\phi k))$ donc $\Lambda'(k) \geq 0 \ \forall k \in]\underline{\mathrm{k}}, 2/(\gamma\phi\bar{P})]$ et négative ensuite. On a aussi $\Lambda(\underline{\mathrm{k}}) = 0 = \lim_{k\to+\infty} \Lambda(k)$, $\Lambda(2/(\gamma\phi\bar{P})) = \Gamma(\bar{P}/2) = \theta\bar{P}^2/4$. Enfin, cette fonction est d'abord concave (jusqu'à $k = 3/(\gamma\phi\bar{P})$) puis convexe.

On connaît l'ordre entre les deux fonctions à la borne inférieure du domaine de définition : $\Theta(\underline{\mathrm{k}}) > \Lambda(\underline{\mathrm{k}}) = 0$. Par analogie avec le second chapitre, nous recourons alors à deux conditions qui garantissent l'existence.

La première condition,

$$\max_{P\in[0,\bar{P}]}\{\Gamma(P)\} = \Gamma(\bar{P}/2) \geq \max_{k\in]\underline{\mathrm{k}},\bar{k}(\bar{E})]}\{\Theta(k)\} = \bar{E}$$

implique que les deux courbes se croisent sur l'intervalle $]\underline{\mathrm{k}}, 2/(\gamma\phi\bar{P})]$. Ensuite, en imposant

$$\bar{k}(\bar{E}) \geq 2/(\gamma\phi\bar{P})$$

on s'assure du fait que l'intervalle d'étude est non vide et que l'intersection se fait avant la borne supérieure du domaine $\bar{k}(\bar{E})$. Cette condition technique peut se réécrire comme une condition sur le paramètre d'échelle :

$$A \geq \underline{\mathrm{A}} = \frac{(2/(\gamma\phi\bar{P}))^{1-\alpha}}{(1-\alpha)\bar{E}^{1-\alpha-\beta}}$$

Sous ces deux conditions, il existe au moins un et au plus deux états stationnaires. En cas d'unicité, on a nécessairement $k^* < 2/(\gamma\phi\bar{P})$ (donc $P^* > \bar{P}/2$). Lorsqu'il existe deux solutions, elles se situent nécessairement de part et d'autre de cette valeur remarquable. Pour garantir l'existence d'exactement deux solutions, il suffit par exemple de donner une condition fixant l'ordre à la borne supérieure du domaine de définition : $\Theta(\bar{k}(\bar{E})) > \Lambda(\bar{k}(\bar{E}))$.

B. Etude de la dynamique locale

B.1 La solution contrainte :

La linéarisation du système dynamique (3.17) de la voisinage d'un état stationnaire permet de caractériser la dynamique locale :

$$\begin{cases} dk_{t+1} = \Omega_1(k^*_{cr}(\bar{E}), \bar{E})dk_t \\ dP_{t+1} = (1 - \Gamma'(P^*_{cr}(\bar{E})))dP_t \end{cases}$$

Les inégalités $\Omega_1(k^*_{cr}(\bar{E}), \bar{E}) < 1$ et $\Gamma'(P^*_{cr}(\bar{E})) > 0$ sont suffisantes pour prouver la stabilité locale. Pour tout $\bar{E} > 0$, il existe une unique intersection $k^*_{cr}(\bar{E})$ entre la fonction de revenu et la première bissectrice. Et, étant donné les propriétés de la fonction de production, le revenu coupe nécessairement la bissectrice "par dessus", nous avons donc $\Omega_1(k^*_{cr}(\bar{E}), \bar{E}) < 1$. Dès lors, nous pouvons déduire du positionnement des niveaux de pollution stationnaires relativement à la valeur remarquable $\bar{P}/2$ (telle que $\Gamma'(\bar{P}/2) = 0$) la propriété de stabilité de l'équilibre. Dans le cas où la solution est unique, nous avons $P^*_{cr}(\bar{E}) = \bar{P}/2$ et la seconde condition de stabilité n'est pas respectée puisque $\Gamma'(P^*_{cr}(\bar{E})) = 0$. Quand l'inégalité (3.18) est stricte, les deux niveaux de pollution stationnaires, définis par (3.20), se situent de part et d'autre de la valeur $\bar{P}/2$: $P^*_{cr}(\bar{E})^- < \bar{P}/2 < P^*_{cr}(\bar{E})^+ \leftrightarrow \Gamma'(P^*_{cr}(\bar{E})^+) < 0 < \Gamma'(P^*_{cr}(\bar{E})^-)$. La conclusion est immédiate : la solution haute est instable tandis que la solution basse est localement stable.

Ces conditions de stabilité correspondent à des réécritures des conditions obtenues pour la stabilité de la solution contrainte dans le chapitre 2. La première renvoie à la capacité de l'économie à assimiler un choc sur le capital tandis que la seconde traduit au contraire l'aptitude de la nature à absorber un choc sur la pollution.

B.2 La solution intérieure réversible :

Pour une solution intérieure réversible, le système (3.23) linéarisé donne la matrice jacobienne suivante :

$$J = \frac{1}{1+\gamma^2\phi k^*_{ir}(\bar{E})^2}\begin{pmatrix} \gamma^2\phi k^*_{ir}(\bar{E})^2\Omega_1(k^*_{ir}(\bar{E}),\bar{E}) & -\gamma\phi k^*_{ir}(\bar{E})^2(1-\Gamma'(P^*_{ir}(\bar{E}))) \\ -\gamma\Omega_1(k^*_{ir}(\bar{E}),\bar{E}) & 1-\Gamma'(P^*_{ir}(\bar{E})) \end{pmatrix}$$

Le déterminant de cette matrice est nul. En effet, l'existence de la relation d'équilibre (3.24), liant le capital à la pollution à chaque période, implique que le système soit finalement de dimension 1. La première valeur propre est nulle tandis que la seconde valeur propre est égale à la trace. Il apparaît qu'une condition suffisante de stabilité locale est donnée par l'inégalité suivante :

$$\gamma^2\phi k^*_{ir}(\bar{E})^2(\Omega_1(k^*_{ir}(\bar{E}),\bar{E})-1) < \Gamma'(P^*_{ir}(\bar{E}))$$

En effet, par hypothèse, nous avons $\Gamma'(P) < 1\ \forall P$ ce qui implique que la seconde racine,

$$\lambda = \frac{1-\Gamma'(P^*_{ir}(\bar{E}))+\gamma^2\phi k^*_{ir}(\bar{E})^2\Omega_1(k^*_{ir}(\bar{E}),\bar{E})}{1+\gamma^2\phi k^*_{ir}(\bar{E})^2}$$

est positive. La condition de stabilité s'écrit $\lambda < 1$ ce qui équivaut à l'inégalité précédente.

C. Démonstration de la proposition 5

L'étude de la solution intérieure réversible a consisté à comparer le comportement de deux fonctions du capital. La fonction $\Lambda(k) = \Gamma(1/(\gamma\phi k))$ a une forme de U inversé et, est indépendante du quota. Dès lors, savoir comment évoluent les propriétés de l'équilibre quand $\bar{E}$ varie revient à savoir comment évolue la fonction d'émission nette

$\Theta(k, \bar{E}) = \bar{E} - \gamma m(k, \bar{E})$. Pour k quelconque, la dérivée par rapport au quota s'écrit : $\Theta'(k, \bar{E}) = 1 - \gamma m_2(k, \bar{E}) = 1 - \gamma \Omega_2(k, \bar{E})$. On sait, par hypothèse, que $\Omega_{12}(k, \bar{E}) > 0$. La dérivée première Ω_2 étant croissante en k, calculons sa valeur à la borne supérieure du domaine $\bar{k}(\bar{E})$. On obtient,

$$\Omega_2(\bar{k}(\bar{E}), \bar{E}) = (1 - \alpha - \beta)(A(1 - \alpha))^{1/(1-\alpha)} \bar{E}^{-\beta/(1-\alpha)}$$

On montre par des calculs directs que $\Omega_2(\bar{k}(\bar{E}), \bar{E}) \leq 1/\gamma$ équivaut à :

$$\bar{E} \geq \bar{E}_c = (\gamma(1 - \alpha - \beta))^{(1-\alpha)/\beta}(A(1 - \alpha))^{1/\beta}$$

Sachant qu'on raisonne pour des valeurs du quota supérieure au seuil critique $\bar{E}_l$, imposer la condition $\bar{E}_l \geq \bar{E}_c$ suffit pour conclure. En effet, dans ce cas, pour tout $\bar{E} > \bar{E}_l$, nous avons $\Theta'(k, \bar{E}) \geq 0$ $\forall k \in]\underline{k}, \bar{k}(\bar{E})]$. Autrement dit, la fonction $\Theta(k, \bar{E})$ évaluée en une valeur $\bar{E}_1$ se situera toujours au dessus de cette fonction évaluée en $\bar{E}_2 < \bar{E}_1$ sur l'intervalle du capital pertinent, soit, $]\underline{k}, \bar{k}(\bar{E}_2)]$. Etant donné les propriétés de la fonction $\Lambda(k)$, il est possible d'énoncer le résultat de la proposition 5 lorsqu'il existe deux états stationnaires pour le quota après réforme $\bar{E}_2$.

Notons l'inégalité $\bar{E}_l \geq \bar{E}_c$ est vérifiée à imposant, par exemple, une borne inférieure à la part du travail dans la production,

$$\beta \geq (1 - \alpha)(1 - \alpha^{\alpha/(1-\alpha)})$$

cette borne semble raisonnable et peu restrictive. En effet, si l'on suppose que la part du travail dans la production $1 - \nu$ est comprise dans l'intervalle $(0.6, 0.7)$ (qui est l'intervalle donné par le plupart des estimations de ce paramètre), alors cette inégalité est vérifiée, par exemple, pour $\theta = 1$.

D. Le cas frontière

D.1 Détermination de la frontière d'indifférence :

Son expression se déduit de la CPO (3.12) dans laquelle on pose $m_t = \mu = 0$. On obtient :

$$-\frac{1}{\Omega(k_t, \bar{E})} + \gamma\phi(P_t - \Gamma(P_t) + \bar{E}) = 0 \tag{3.30}$$

L'allure particulière de la frontière est conditionnée au fait de savoir si la pollution est réversible ou pas.

- si la pollution est irréversible, la frontière est donnée par :

$$P_t = f^1(k_t, \bar{E}) = \frac{1}{\gamma\phi(1 - \alpha)Ak_t^{\alpha}\bar{E}^{1-\alpha-\beta}} - \bar{E} \tag{3.31}$$

et cette expression est valable tant que $P_t \geq \bar{P}$, ce qui équivaut à :

$$k_t \leq \check{k}(\bar{E}) = \left(\frac{1}{\gamma\phi(\bar{P} + \bar{E})(1 - \alpha)A\bar{E}^{1-\alpha-\beta}}\right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

Si $\check{k}(\bar{E}) > \bar{k}(\bar{E})$ (borne supérieure du domaine de variation du capital), alors la frontière se situe toujours au delà du seuil d'irréversibilité.

Supposons que $\check{k}(\bar{E}) < \bar{k}(\bar{E})$[14], alors pour tout $k_t > \check{k}(\bar{E})$, la détermination de la frontière passe par la résolution du polynôme suivant :

$$P_t(1-\theta(\bar{P}-P_t)) - \left(\frac{1}{\gamma\phi(1-\alpha)Ak_t^{\alpha}\bar{E}^{1-\alpha-\beta}} - \bar{E}\right) = 0$$

Admettons que le discriminant est positif,

$$\Delta^f = (1-\theta\bar{P})^2 + 4\theta\left(\frac{1}{\gamma\phi(1-\alpha)Ak_t^{\alpha}\bar{E}^{1-\alpha-\beta}} - \bar{E}\right) > 0$$

Des calculs directs montrent que la première racine est toujours négative, nous devons donc retenir la racine qui renvoie des valeurs de la pollution (*a priori* positives) inférieures au seuil $\bar{P}$:

$$P_t = \frac{-(1-\theta\bar{P}) + \sqrt{\Delta^f}}{2\theta} \tag{3.32}$$

Cette fonction (3.32) est monotone décroissante dans le capital, il existe donc une unique valeur du capital $\hat{k}(\bar{E})$ pour laquelle elle coupe l'axe des abscisses $P = 0$ avec,

$$\hat{k}(\bar{E}) = \left(\frac{1}{\gamma\phi\bar{E}(1-\alpha)A\bar{E}^{1-\alpha-\beta}}\right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

Ainsi, pour tout $k_t \leq \hat{k}(\bar{E})$, la fonction racine est positive ou nulle. De plus, nous vérifions que le discriminant est strictement positif sur l'intervalle $[0, \hat{k}(\bar{E})]$: $\Delta^f > 0$.

Or, par hypothèse, nous raisonnons pour des niveaux non négatifs de la pollution ($P_t \geq 0$). Il est donc possible de déterminer l'allure de la frontière dans la zone de pollution réversible :

$$P_t = f^2(k_t, \bar{E}) = \begin{cases} \frac{-(1-\theta\bar{P})+\sqrt{\Delta^f}}{2\theta} & \text{pour } k_t \leq \hat{k}(\bar{E}) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.33}$$

Au delà du niveau $\hat{k}(\bar{E})$, en lequel la racine coupe l'axe $P = 0$, la frontière se confond précisément avec l'axe des abscisses et les agents s'engagent dans la dépollution indépendamment du niveau de pollution.

D.2 Etude de l'admissibilité :

Pour une solution contrainte, il est immédiat que $P^*_{cr}(\bar{E}) < \bar{P}$ (seule la solution stable nous intéresse). L'admissibilité exige aussi que $P^*_{cr}(\bar{E}) < f(k^*_{cr}(\bar{E}), \bar{E})$. Si

[14] Ce qui revient, par exemple, à exiger :

$$A \geq \frac{1}{(\gamma\phi(\bar{P}+\bar{E}))^{1-\alpha}(1-\alpha)\bar{E}^{1-\alpha-\beta}}$$

$k^*_{cr}(\bar{E}) = \bar{k}(\bar{E}) \leq \check{k}(\bar{E})$, alors la frontière se situe, sur le segment $[0, \check{k}(\bar{E})]$, toujours au dessus du seuil $\bar{P}$. La solution contrainte est donc admissible puisque $P^*_{cr}(\bar{E}) < \bar{P}$. Sinon ($\bar{k}(\bar{E}) > \check{k}(\bar{E})$), deux cas de figure se présentent :

- soit $\bar{k}(\bar{E}) \leq \hat{k}(\bar{E})$: dans ce cas, il faut trouver une condition sur les paramètres telle que $P^*_{cr}(\bar{E}) < f(k^*_{cr}(\bar{E}), \bar{E})$ (ce qui est possible mais peu intéressant).

- soit $\bar{k}(\bar{E}) > \hat{k}(\bar{E})$: on a alors $P^*_{cr}(\bar{E}) > f(k^*_{cr}(\bar{E}), \bar{E}) = 0$ et la solution est inadmissible.

Pour la solution intérieure, par construction on a $k^*_{ir}(\bar{E}) > 1/(\gamma\phi\bar{P}) \leftrightarrow P^*_{ir}(\bar{E}) < \bar{P}$. Reste à étudier sa localisation par rapport à la frontière d'indifférence et à vérifier que $P^*_{ir}(\bar{E}) > f(k^*_{ir}(\bar{E}), \bar{E})$. Supposons d'abord que $k^*_{ir}(\bar{E}) \leq \check{k}(\bar{E})$, Sur ce segment, la frontière est au dessus de $\bar{P}$ et nous avons $f(k^*_{ir}(\bar{E}), \bar{E}) > \bar{P} > P^*_{ir}(\bar{E})$, la solution n'est pas admissible car elle se situe finalement dans la région contrainte. Supposons maintenant que $k^*_{ir}(\bar{E}) > \check{k}(\bar{E})$, alors la solution intérieure est toujours admissible puisque :

- si $k^*_{ir}(\bar{E}) \in]\check{k}(\bar{E}), \hat{k}(\bar{E})]$, alors des calculs directs montrent que $P^*_{ir}(\bar{E}) > f(k^*_{ir}(\bar{E}), \bar{E})$ $\leftrightarrow \gamma m(k^*_{ir}(\bar{E}), \bar{E}) > 0$ ce qui est vérifié.

- si $k^*_{ir}(\bar{E}) > \hat{k}(\bar{E})$, on a forcément $P^*_{ir}(\bar{E}) > f(k^*_{ir}(\bar{E}), \bar{E}) = 0$.

En résumé, la double inégalité suivante : $\check{k}(\bar{E}) < \bar{k}(\bar{E}) \leq \hat{k}(\bar{E})$ constitue une condition nécessaire à l'admissibilité des deux types de solution simultanément. En effet, si $\bar{k}(\bar{E}) \leq \check{k}(\bar{E})$ alors seule la solution contrainte est admissible tandis que si $\bar{k}(\bar{E}) > \hat{k}(\bar{E})$, seule la solution intérieure l'est.

La manipulation de la condition nécessaire $\bar{k}(\bar{E}) \leq \hat{k}(\bar{E})$, pour la solution contrainte, nous ramène à l'inégalité suivante, pour le quota : $\bar{E} \leq \bar{E}_s$ avec

$$\bar{E}_s = \left(\frac{1}{A(1-\alpha)(\gamma\phi)^{1-\alpha}}\right)^{1/(2(1-\alpha))-\beta)}$$

L'inégalité $\check{k}(\bar{E}) < \bar{k}(\bar{E})$ équivaut à :

$$((A(1-\alpha)\bar{E}^{1-\alpha-\beta})^{1/(1-\alpha)}\gamma\phi(\bar{E} + \bar{P}) > 1$$

on ne peut extraire une condition sur $\bar{E}$ directement de cette inégalité. Mais, si l'on note que $\bar{E} < \bar{P}$, alors le terme de droite est supérieur à

$$2((A(1-\alpha)\bar{E}^{1-\alpha-\beta})^{1/(1-\alpha)}\gamma\phi\bar{E}$$

et il suffit d'imposer que cette expression soit supérieure à l'unité ce qui équivaut à

$$\bar{E} \geq \bar{E}_i = \left(\frac{1}{2A(1-\alpha)(\gamma\phi)^{1-\alpha}}\right)^{1/(2(1-\alpha))-\beta)}$$

pour respecter $\bar{k}(\bar{E}) \leq \hat{k}(\bar{E})$[15].

E. La dynamique globale et les simulations

- La dynamique globale pour la zone contrainte s'écrit :

$$k_{t+1} = (1-\alpha)Ak_t^{\alpha}\bar{E}^{1-\alpha-\beta}$$

$$P_{t+1} = P_t(1-\theta(\bar{P}-P_t)) + \bar{E}$$

si la pollution est réversible. Ou bien, dans le cas contraire :

$$P_{t+1} = P_t + \bar{E}$$

- La dynamique globale dans la zone intérieure est donnée par :

$$k_{t+1} = \frac{1}{\gamma\phi P_{t+1}}$$

$$P_{t+1} = \frac{x(k_t, P_t) + \sqrt{x(k_t, P_t)^2 + 4/\phi}}{2} \geq 0$$

avec,

$$x(k_t, P_t) = P_t + \bar{E} - \gamma(1-\alpha)Ak_t^{\alpha}\bar{E}^{1-\alpha-\beta}$$

quand la pollution est irréversible et, quand elle est réversible :

$$x(k_t, P_t) = P_t(1-\theta(\bar{P}-P_t)) + \bar{E} - \gamma(1-\alpha)Ak_t^{\alpha}\bar{E}^{1-\alpha-\beta}$$

[15]Notons que cette inégalité n'est pas une condition nécessaire d'admissibilité mais plutôt une condition suffisante à la validation de la condition nécessaire $\check{k}(\bar{E}) < \bar{k}(\bar{E})$.

Chapitre 4

Efficacité d'une régulation par les permis en présence de rigidités affectant le définition du quota d'émission

4.1 Introduction

Les permis de pollution constituent l'un des instruments les plus efficaces pour contrôler l'activité des industries polluantes (Montgomery [1972], Baumol et Oates [1988]). Il suffit, en effet, pour le régulateur de choisir le quota global d'émission satisfaisant un objectif précis et de laisser faire le marché afin de déterminer l'allocation optimale des permis entre les pollueurs. Mais le régulateur a-t-il toujours la possibilité d'émettre le montant optimal de permis ?

Nous considérons une économie à générations imbriquées *à la* Allais [1947], Samuelson [1958] et Diamond [1965], dans laquelle les émissions polluantes sont régulées par un système de permis. Depuis les articles de Solow [1986] et de John et Pecchenino [1994], nous savons que l'équilibre concurrentiel souffre d'inefficacités provenant de l'incapacité des agents, à durée de vie finie, à intégrer les répercussions de long terme de leurs décisions. Dans le cadre des modèles à générations imbriquées avec permis de pollution, Jouvet, Michel et Rotillon [2005] démontrent que les permis de pollution permettent de décentraliser la croissance optimale à condition de renoncer au principe du *grand-parentage* (au sens d'une allocation gratuite des permis).

Toutefois, la capacité d'une économie concurrentielle à atteindre l'optimum social grâce à une régulation de la pollution par un système alliant quota et permis de pollution repose sur une hypothèse à la fois cruciale et discutable. Cette hypothèse implique que le régulateur est en mesure de choisir le meilleur quota au vu d'un critère déterminé. Dans cet article, nous souhaitons généraliser ce cadre d'analyse en admettant que la définition de ce standard d'émission peut se heurter à un certain nombre de difficultés. En effet, dans la pratique, les orientations de la politique environnementale d'une nation sont édictées, pour une large part, lors de rencontres internationales (Protocole de Montréal (1987) pour la réduction des CFC, Protocole de Kyoto (1997) pour la réduction des émissions de GES). Or, comme le souligne un certain nombre d'articles récents, rien ne garantit l'efficacité des décisions qui en découlent, en matière de lutte contre la pollution (voir par exemple Hoel [2005] ou Kolstad [2005]).

Afin de rendre compte de cette inefficacité potentielle, nous supposons, de manière générique, que la politique environnementale d'un pays est décidée hors du simple cadre national. Plus précisément, le gouvernement se voit imposer un quota d'émission et s'engage, à chaque période, à offrir un volume équivalent de permis de pollution sur un marché d'échange de ces titres. La régulation par les permis garantit le contrôle des émissions de l'économie considérée puisqu'elle rejettera au maximum une quantité de polluants exactement égale à la norme de pollution qui lui est attribuée. Cette politique pourrait, par exemple, résulter de l'établissement d'un accord contraignant chaque pays signataire à respecter un volume d'émission déterminé ainsi que ses règles de mise à disposition sur le marché (comme l'absence de possibilité de stockage ou d'emprunt de permis par les firmes dans le cadre européen d'application du protocole de Kyoto).

Dans ce contexte, la question se pose de savoir si la politique de régulation de la pollution par les quotas constitue un instrument suffisant dans l'optique de la décentralisation de l'optimum social. Ce travail apporte une réponse en deux temps à cette interrogation en distinguant deux cas de figures diamétralement opposés.

Dans un premier temps, nous considérons que le quota appliqué à l'économie est efficace au sens où il autorise, à chaque période, un niveau d'émission correspondant précisément au "besoin" de pollution de l'économie. Dès lors, nous montrons qu'il est possible d'atteindre l'optimum de long terme à condition de répartir la rente environnementale, provenant de la vente de permis, de manière optimale. Nous retrouvons ainsi un résultat similaire aux conclusions de Jouvet, Michel et Vidal [2002a] pour une régulation de la pollution par des droits d'usage de l'environnement, défini comme un bien collectif.

Nous relâchons ensuite l'hypothèse d'efficacité de la politique de quota. Les raisons justifiant ce postulat sont multiples. En référence au protocole de Kyoto, l'idée est essentiellement de reconnaître l'existence de contraintes politiques susceptibles de fausser l'issue du processus de négociations (voir notamment Yu [2005]). Ces contraintes proviennent, par exemple, de la pression exercée par les lobbies (industriels *versus* écologistes) ou sont simplement la conséquence des divergences de vue des protagonistes à la négociation (Tanguay, Lanoie et Moreau [2004], Fredriksson et Sterner [2005]). Ainsi, nous admettons que le standard d'émission exogène n'a *a priori* aucune raison de correspondre au niveau de pollution socialement optimal à l'échelle de l'économie nationale.

Dans ce cadre d'analyse de second rang, notre contribution consiste alors à montrer qu'une solution à la sous-optimalité du système de quota peut être apportée en autorisant les ménages à participer au marché, au même titre que les firmes polluantes, et en créant une agence de gestion de la dotation en permis de l'économie. En effet, dans ce contexte, il est possible de procéder à une segmentation du marché des permis associée à une discrimination par les prix de la demande. En respectant l'interdiction de stockage des permis par les firmes, le principe consiste en fait à différencier les demandeurs de permis (firmes et ménages) selon l'usage qu'ils en ont (facteur de production *versus* épargne) et les répercussions environnementales qu'il implique (pollution immédiate *versus* pollution différée). Une telle politique permet finalement d'atteindre, à long terme, l'optimum de premier rang à partir d'une situation initiale de second rang. Là encore, l'instrument de redistribution de la rente joue un rôle central et a pour finalité d'influencer la décision de l'agence lorsque celle-ci accorde insuffisamment d'importance au bien-être des générations futures.

Ce quatrième chapitre est structuré de la manière suivante. La section 2 est consacrée à la présentation des choix auxquels sont confrontés les agents. L'étude de l'équilibre concurrentiel et de l'optimum social (de long terme) de cette économie constitue le coeur de la section 3. Dans la section suivante, nous appréhendons le problème de la décentralisation de la solution optimale en étudiant successivement les deux cas évoqués plus haut : quota "efficace" et sous-optimalité du système de permis. Enfin, la section 5 conclut.

4.2 Comportement des agents et du gouvernement

Nous considérons un modèle à générations imbriquées *à la* Allais [1947], Samuelson [1958] et Diamond [1965] dans lequel la pollution est un produit joint de la production. L'économie comporte un unique secteur de production. Les firmes, parfaitement concurrentielles, produisent un bien homogène destiné à la consommation et à l'investissement des ménages. Le processus de production génère des émissions polluantes qui affectent le bien-être des agents.

La pollution est régulée grâce à un système de permis. L'économie dispose, à chaque période, d'un quota global d'émission $\bar{E}_t$ exogène et défini, par exemple, lors de rencontres internationales (comme le Protocole de Kyoto (1997) pour la réduction des émissions de GES). Autrement dit, il n'appartient pas au gouvernement national de fixer les modalités de la politique environnementale puisque le choix du quota d'émission s'impose à lui de façon exogène.

Nous présentons d'abord l'ensemble des arbitrages auxquels sont confrontés les agents privés puis, le rôle du gouvernement.

4.2.1 Production et accumulation de la pollution

A chaque période, les firmes produisent un bien homogène servant de numéraire à l'économie. Pour ce faire, elles emploient une technologie de production néoclassique, à rendements d'échelle constants, à trois facteurs de production : le capital, le travail et l'environnement. Par conséquent, à la date t, les firmes, en plus d'utiliser du capital K_t et du travail L_t, utilisent de l'environnement en quantité E_t^F, pour produire une quantité de bien homogène Y_t :

$$Y_t = F(K_t, L_t, E_t^F) \tag{4.1}$$

Nous formulons l'hypothèse suivante concernant les propriétés de la fonction de production :

Hypothèse 1. *La technologie est croissante et strictement concave par rapport à chaque argument : $F_i > 0$, $F_{ii} < 0$ pour $i = 1, 2, 3$. Ses dérivées secondes croisées sont positives $F_{ij} > 0$ pour $i \neq j$. La dérivée partielle par rapport au capital satisfait les conditions d'Inada : $\lim_{K \to 0} F_1(K, L, E^F) = +\infty$ et $\lim_{K \to +\infty} F_1(K, L, E^F) = 0$. Enfin, nous supposons que :* $F(0, L, E^F) = F(K, L, 0) = 0$ et $\lim_{E^F \to 0} F_3(K, L, E^F) > 0$ $\forall K \geq 0$.

L'utilisation de l'environnement dans la production E_t^F s'apparente à des émissions polluantes qui vont contribuer à l'augmentation du stock de pollution P_t. La dynamique d'accumulation de la pollution est donnée par,

$$P_t = E_t^F + (1 - \Gamma) P_{t-1} \tag{4.2}$$

avec $\Gamma \in]0, 1]$, le taux naturel d'assimilation de la pollution[1].

Les firmes ont l'obligation d'acquérir la quantité de permis de pollution correspondant précisément à leur besoin E_t^F afin d'être autorisées à produire[2]. De plus, l'utilisation des permis dans la production provoque leur destruction, ce qui implique qu'à chaque période t, les firmes renouvellent l'achat de permis sur le marché.

Nous supposons la dépréciation totale du capital en une période. Dans un cadre concurrentiel, la firme représentative choisit les quantités de capital, de travail et de ressources environnementales qui maximisent ses profits, en prenant les prix des facteurs comme donnés :

$$\pi_t = F(K_t, L_t, E_t^F) - R_t K_t - w_t L_t - \phi_t E_t^F \tag{4.3}$$

où R_t représente le facteur d'intérêt, w_t le taux de salaire et ϕ_t, le prix des permis.

A l'équilibre, on retrouve les conditions usuelles d'égalisation des productivités marginales des facteurs et de leurs prix,

$$R_t = F_1(K_t, L_t, E_t^F) \tag{4.4}$$

$$w_t = F_2(K_t, L_t, E_t^F) \tag{4.5}$$

$$\phi_t = F_3(K_t, L_t, E_t^F) \tag{4.6}$$

4.2.2 Les ménages sans accès au marché des permis

La population est constante. A chaque période t naît un nombre, N, d'agents identiques. Chaque agent vit deux périodes. Un individu jeune de la génération t offre de

[1] Nous rompons donc avec l'approche des deux chapitres précédents dans lesquels la dynamique de la pollution était caractérisée par l'existence d'un risque d'irréversibilité.

[2] Comme dans le chapitre III, nous suivons les recommandations de Jouvet, Michel et Rotillon [2005] en excluant la possibilité d'allouer une partie des permis gratuitement aux firmes.

manière inélastique une unité de travail en contrepartie de laquelle il perçoit un salaire w_t. Ce salaire s'accompagne d'un transfert éventuel ν_t du gouvernement. L'agent alloue son revenu entre épargne s_t et consommation c_t. Sa contrainte budgétaire de première période s'écrit simplement :

$$w_t + \nu_t = c_t + s_t \tag{4.7}$$

En seconde période de vie, l'agent est à la retraite. Il perçoit un revenu composé du rendement de son épargne en capital $R_{t+1}s_t$ et d'un transfert μ_{t+1} de la part du gouvernement. Il consomme, d_{t+1}, l'intégralité de son revenu et, doit satisfaire la contrainte de budget de seconde période de vie :

$$d_{t+1} = R_{t+1}s_t + \mu_{t+1} \tag{4.8}$$

Les préférences d'un agent de la génération t sont représentées par la fonction d'utilité $U_t(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})$ qui dépend positivement des consommations de première et seconde périodes de vie et négativement des niveaux de pollution P_t et P_{t+1}.

Hypothèse 2. *La fonction $U(..)$ est strictement concave ($U_{ii} < 0$ pour $i = 1, 2, 3, 4$), croissante dans les consommations ($U_1 \geq 0$, $U_3 \geq 0$) et décroissante dans la pollution ($U_2, U_4 \leq 0$). La dérivée croisée entre consommations et pollution est supposée non positive : $U_{12}, U_{14}, U_{32}, U_{34} \leq 0$[3]. La dérivée croisée par rapport aux consommations c_t et d_{t+1} vérifie : $U_{13} > 0$. Nous imposons également $\lim_{c\to 0} U_1(c, P, d, P) = \lim_{d\to 0} U_3(c, P, d, P) = 0$ et $\lim_{P\to 0} |U_j(c, P, d, P)| < \infty$ pour $j = 2, 4$.*

Autrement dit, l'utilité d'un agent dépend non seulement de sa trajectoire de consommation mais également des conditions dans lesquelles il peut consommer.

L'objectif de chaque agent consiste à déterminer le jeu de variables $\{c_t, s_t, d_{t+1}\}$ qui maximise son utilité sous les contraintes budgétaires (4.7) et (4.8) :

$$\max_{c_t, s_t, d_{t+1}} U(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})$$

$$\begin{cases} s.c. \\ c_t = w_t + \nu_t - s_t \\ d_{t+1} = R_{t+1}s_t + \mu_{t+1} \end{cases}$$

La résolution de ce problème d'optimisation donne la condition du premier ordre suivante,

$$-U_1(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1}) + R_{t+1}U_3(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1}) = 0 \tag{4.9}$$

[3]Ces hypothèses traduisent l'existence d'un effet de dégoût de la pollution sur la consommation : une hausse de la pollution implique une baisse de l'utilité marginale de la consommation et réduit l'incitation des ménages à consommer. L'hypothèse alternative est celle de la compensation caractérisée par une dérivée croisée positive : par exemple, $U_{12} > 0$ (voir Michel et Rotillon [1995]).

qui traduit l'arbitrage de consommation sur le cycle de vie de l'agent. En choisissant l'épargne de première période, l'agent, qui anticipe parfaitement le niveau du prix R_{t+1}, fixe l'allocation intertemporelle de ses ressources entre les consommations des deux périodes de vie et ce, conformément à ses préférences.

4.2.3 Le gouvernement

La suite des quotas $\{\bar{E}_t\}_{t=0}^{+\infty}$ constitue une donnée exogène à l'économie. Le rôle du gouvernement se limite donc à celui de simple exécutant de la politique environnementale. Il s'engage, à chaque période, à offrir, un volume prédéterminé de permis $\bar{E}_t$ sur le marché créé à cet effet. En revanche, il est responsable de la redistribution du revenu procuré par la vente de permis aux firmes polluantes. A la période t, sachant qu'il respecte une contrainte d'équilibre budgétaire, il reverse, sous la forme d'une rente environnementale, ce revenu aux ménages jeunes et vieux :

$$N(\nu_t + \mu_t) = \theta\phi_t\bar{E}_t + (1-\theta)\phi_t\bar{E}_t = \phi_t\bar{E}_t \tag{4.10}$$

avec $\theta \in [0,1]$, l'instrument de politique économique fixant la répartition de la rente et $N\nu_t = \theta\phi_t\bar{E}_t$ (*resp.* $N\mu_t = (1-\theta)\phi_t\bar{E}_t$) la part de la rente allouée aux ménages jeunes (*resp.* aux retraités).

Nous nous focalisons, à présent, sur l'étude des propriétés de l'équilibre concurrentiel. A des fins de comparaison, l'optimum social, cadre d'analyse de référence où les ressources de l'économie sont allouées de manière optimale au vue d'un critère de maximisation du bien-être, sera également caractérisé.

4.3 Equilibre et optimum de long terme

4.3.1 L'équilibre concurrentiel

Au moment de la prise de décision, les agents privés prennent la politique économique $\{\bar{E}_t, \nu_t, \mu_t\}$ comme donnée. Il est alors possible de définir l'équilibre avec prévisions parfaites de cette économie.

Définition. *L'équilibre intertemporel, conditionné à la politique $\{\bar{E}_t, \nu_t, \mu_t\}$, est défini par la suite des variables par tête $\{c_t, d_t, s_t\}$, la suite des variables agrégées $\{L_t, K_t, E_t^F, P_t\}$ et la suite des prix $\{w_t, R_t, \phi_t\}$ telles que :*

i/ les agents sont à leur optimum : les conditions (4.4), (4.5) et (4.6) pour les firmes, (4.9), pour les ménages, sont vérifiées,

ii/ les marchés sont équilibrés : $L_t = N$ sur le marché du travail, $K_t = Ns_{t-1}$ sur le marché du capital et $E_t^F = \bar{E}_t$ sur le marché des permis,

iii/ la contrainte budgétaire (4.10) du gouvernement est satisfaite,
iv/ les contraintes budgétaires des agents (4.7) et (4.8) sont respectées,
v/ l'évolution de la pollution est décrite par (4.2).

Appliquer le théorème des fonctions implicites à la condition d'arbitrage des ménages (4.9) permet d'exprimer l'épargne (et l'accumulation de capital) comme une fonction des prix, de la pollution et des instruments de politique :

$$K_{t+1} = Ns_t \equiv N\sigma(\theta, w_t, \phi_t, \bar{E}_t, R_{t+1}, \phi_{t+1}, \bar{E}_{t+1}, P_t, P_{t+1}) \tag{4.11}$$

Connaissant l'expression des prix, les conditions d'équilibre des marchés et l'évolution du stock de pollution,

$$P_t = \bar{E}_t + (1 - \Gamma)P_{t-1} \tag{4.12}$$

nous pouvons énoncer les conditions d'existence et de stabilité locale dans les propositions suivantes.

Proposition 1 *Pour une politique de redistribution $\theta \in [0,1]$ et un quota $\bar{E}_t = \bar{E}$ donnés, il existe un état stationnaire $(K(\theta, \bar{E}), P(\bar{E}))$ non trivial avec $K(\theta, \bar{E}) > 0$ et $P(\bar{E}) = \bar{E}/\Gamma$ si*

$$\lim_{K \to +\infty} \frac{\bar{E}F_3}{KF_1} < \infty \tag{4.13}$$

et,

$$\lim_{K \to 0} \frac{N\sigma(\theta, w(K, \bar{E}), \phi(K, \bar{E}), \bar{E}, R(K, \bar{E}), \phi(K, \bar{E}), \bar{E}, \bar{E}/\Gamma, \bar{E}/\Gamma)}{K} > 1 \tag{4.14}$$

Démonstration. voir l'annexe A. ∎

La condition (4.14) est la condition classique dans le modèle à générations imbriquées qui permet de prouver l'existence d'un état stationnaire intérieur (voir Galor et Ryder [1989] ou De La Croix et Michel [2002]). L'inégalité (4.13) est une condition supplémentaire d'existence qui provient de l'introduction de la dimension environnementale. Elle impose que le ratio des élasticités prix de la production par rapport aux émissions et au capital soit fini pour des niveaux de capital importants (voir Jouvet, Michel et Vidal [2002b]). Cette condition est, par exemple, satisfaite pour une technologie Cobb-Douglas, le rapport des élasticités étant alors constant.

Si l'on admet que la politique de quota est constante ($\bar{E}_t = \bar{E}$) dans un voisinage de l'état stationnaire, les conditions de la stabilité locale peuvent être résumées comme suit.

Proposition 2 *Sachant que les consommations c_t et d_{t+1} sont des biens normaux et substituables, l'état stationnaire est localement stable si et seulement si :*

$$1 - N(\sigma_2 F_{12} + \sigma_5 F_{11} + (\sigma_3 + \sigma_6) F_{13}) > 0 \tag{4.15}$$

Démonstration. voir l'annexe B. ∎

La condition (4.15) est la condition de stabilité du modèle de Diamond [1965] à laquelle s'ajoute un terme supplémentaire $(\sigma_3 + \sigma_6)F_{13}$ traduisant l'effet d'une hausse du capital sur l'épargne, via la rente environnementale. Cette hausse se répercute en fait selon deux effets revenu de sens contraire. Elle implique clairement une augmentation du prix des permis ($F_{13} > 0$) qui se traduit par une hausse de la rente perçue en première période de vie favorable à l'épargne ($\sigma_3 > 0$) puisque le revenu global des ménages augmente. Mais, elle provoque également un accroissement de la rente reçue en seconde période de vie ce qui a pour effet de réduire l'incitation à épargner ($\sigma_6 < 0$). Au final, si le second effet l'emporte, ce terme est négatif et la condition de stabilité est moins restrictive que celle du modèle de Diamond [1965].

Nous avons démontré que, pour un quota quelconque et une politique de redistribution donnée, l'économie admet un équilibre stationnaire localement stable. Il convient à présent de caractériser l'optimum social de long terme.

4.3.2 L'optimum social de long terme

Dans cette partie, nous cherchons à caractériser l'allocation de la règle d'or "verte" ce qui revient à déterminer le niveau maximum d'utilité réalisable à long terme[4].

A l'équilibre macroéconomique, la production est égale à la somme des consommations et de l'investissement :

$$Y = F(K, N, E) = Nc + Nd + K \tag{4.16}$$

L'objectif du planificateur central est de maximiser l'utilité de la génération représentative sous la contrainte de ressources de l'économie (4.16) et, étant donné le niveau de pollution stationnaire :

$$P = \frac{E}{\Gamma} \tag{4.17}$$

Formellement, il convient d'allouer les ressources disponibles entre consommations et investissement et de choisir le niveau d'émission afin de satisfaire le programme

[4] La différence avec la notion de règle d'or, introduite par Phelps [1961], provient de l'introduction de la pollution dans les préférences. La prise en compte du dommage occasionné par la pollution implique que l'on ne peut pas se limiter à la recherche du niveau maximum de consommation indéfiniment soutenable.

suivant :

$$\max_{\{c,d,E,K\}} NU(c,P,d,P)$$

$$\begin{cases} s.c. \\ F(K,N,E) = Nc + Nd + K \\ P = \frac{E}{\Gamma} \end{cases}$$

où les variables de stock sont le capital K et la pollution P.

La résolution de ce problème permet d'énoncer les conditions d'optimalité[5] :

$$U_1(c^*,P^*,d^*,P^*) = U_3(c^*,P^*,d^*,P^*) \tag{4.18}$$

$$F_1(K^*,N,E^*) = 1 \tag{4.19}$$

$$\frac{N}{\Gamma}\left(U_2(c^*,P^*,d^*,P^*) + U_4(c^*,P^*,d^*,P^*)\right) + F_3(K^*,N,E^*)U_1(c^*,P^*,d^*,P^*) = 0 \tag{4.20}$$

La condition (4.18) définit l'arbitrage de consommations. La condition (4.19) correspond à la condition de la règle d'or pour le capital. Enfin (4.20) détermine le niveau d'émission optimal en se basant sur une analyse coût/bénéfice. D'après cette dernière condition, une hausse de E engendre une hausse de la production donc de la consommation c, ce qui tend à accroître le bien-être (terme de droite). Elle provoque également une augmentation de la pollution P qui affecte à la fois le bien-être des agents jeunes et retraités (terme de gauche). Cette condition d'arbitrage traduit simplement l'idée que le planificateur choisit E de telle sorte que le coût marginal et le bénéfice marginal d'une hausse des émissions soient égalisés au niveau social.

Avant de poursuivre notre étude, il est possible de se donner des conditions formelles d'existence de l'allocation de la règle d'or $(K^*, E^*, c^*, d^*, P^*)$.

Proposition 3 *Sous les conditions*

$$\begin{cases} U_{11}U_{i4} - U_{1i}U_{14} \geq 0 \\ U_{33}U_{i4} - U_{3i}U_{34} \geq 0 \end{cases} \quad pour\ i = 2,4 \tag{4.21}$$

et,

$$\lim_{E\to+\infty} \begin{cases} \frac{N}{\Gamma}\left(U_2(c(E),\frac{E}{\Gamma},d(E),\frac{E}{\Gamma}) + U_4(c(E),\frac{E}{\Gamma},d(E),\frac{E}{\Gamma})\right) \\ +F_3(K(E),N,E)U_1(c(E),\frac{E}{\Gamma},d(E),\frac{E}{\Gamma}) \end{cases} < 0$$

où les fonctions $c(E), d(E)$ et $K(E)$ sont obtenues après manipulation des conditions d'optimalité (4.16)-(4.19),

il existe une solution unique au problème de la règle d'or "verte".

[5]L'indice "$*$" vaut pour l'allocation de la règle d'or.

Démonstration. *confer* l'annexe C. ∎

L'étape suivante de l'analyse consiste à se poser la question de savoir si l'économie régulée par un système de quota est susceptible d'atteindre l'optimum social à partir de l'équilibre concurrentiel.

4.4 Régulation de la pollution par un système de permis

Nous distinguons deux situations diamétralement opposées : *i/* le gouvernement dispose d'un quota global d'émission "efficace", *ii/* la politique environnementale est contrainte. Nous nous limitons à une analyse de long terme.

4.4.1 Efficacité de la politique de quota

Dans un monde sans contrainte, le quota $\bar{E}_t$ imposé à l'économie, à chaque période, correspond au niveau d'émission socialement optimal. En particulier, à long terme, il s'établit exactement à hauteur du niveau d'émission de la règle d'or défini par l'ensemble des conditions (4.18)-(4.20) et, plus particulièrement, par (4.20). Il suffit donc, pour le gouvernement, de créer la quantité correspondante de permis et de la mettre à disposition des firmes, sur le marché, afin de garantir une évolution optimale de la pollution.

A l'équilibre stationnaire, la condition (4.9) peut se réécrire

$$U_1(c, P, d, P) = R(K(\theta, \bar{E}))U_3(c, P, d, P) \tag{4.22}$$

avec $R(K(\theta, \bar{E})) = F_1(K(\theta, \bar{E}), N, \bar{E})$.

De plus, le niveau de pollution s'établit forcément à hauteur du niveau optimal $P = \bar{E}/\Gamma = P^*$. Sous ces informations, nous obtenons le résultat suivant.

Proposition 4 *Lorsque la politique de quota est "efficace", il est possible de décentraliser l'optimum social de long terme en choisissant la répartition du revenu de la vente de permis de la manière suivante :*

$$\theta^* \textit{ tel que } F_1(K(\theta, \bar{E}), N, \bar{E}) = 1 \tag{4.23}$$

Démonstration. Nous sommes surtout intéressé ici par la dépendance du niveau de capital stationnaire par rapport à l'instrument θ : $K = K(\theta)$. Si on applique le théorème des fonctions implicites à l'équation (4.11) évaluée en stationnaire, on obtient :

$$K'(\theta) = \frac{N\sigma_1}{1 - N(\sigma_2 F_{12} + \sigma_5 F_{11} + (\sigma_3 + \sigma_6)F_{13})}$$

Sachant que le numérateur est positif ($\sigma_1 = \phi\bar{E}/N$), sous la condition nécessaire et suffisante de stabilité (4.15), nous avons $K'(\theta) > 0$.

Le facteur d'intérêt peut donc être défini comme une fonction du paramètre de redistribution : $R = F_1(K(\theta, \bar{E}), N, \bar{E}) = \varphi(\theta)$. Le comportement de la fonction $\varphi(\theta)$ se déduit immédiatement de celui de $K(\theta)$:

$$\varphi'(\theta) = F_{11}K'(\theta) < 0$$

Nous savons que $\varphi(\theta)$ est continue, monotone décroissante donc inversible ce qui permet d'écrire : $\theta = \varphi^{-1}(R)$ avec $R \in]0, +\infty[$. Par conséquent, nous pouvons conclure qu'il existe une unique valeur θ^* telle que $R = 1$ avec $\theta^* = \varphi^{-1}(1)$. En choisissant θ^*, les deux premières conditions d'optimalité sont satisfaites puisque $F_1(K(\theta^*, \bar{E}), N, \bar{E}) = F_1(K^*, N, E^*) = 1$ et (4.22) correspond formellement à (4.18). ■

L'instrument θ joue un rôle similaire aux transferts forfaitaires dans le modèle de Diamond [1965]. Il permet donc d'impulser une redistribution du revenu entre les générations afin de garantir la validation de la condition de la règle d'or (4.19) pour le capital. Finalement les niveaux de consommation et d'investissement, à l'équilibre, s'identifient aux niveaux définis par l'optimum[6].

En résumé, lorsque la politique de quota est "efficace", l'économie pourra atteindre, à long terme, l'optimum social à condition de répartir la rente environnementale de manière optimale. Nous nous focalisons à présent sur l'étude du cas contraint.

4.4.2 Rigidité imposée par la politique de quota

Le point de départ de l'analyse, dans cette section, consiste à supposer que le quota $\bar{E}_t$ dont dispose l'économie, à chaque période, ne coïncide pas *a priori* avec le niveau d'émission socialement optimal.

Plus précisément, si l'on se réfère aux plans d'allocation des permis dans le cadre de l'expérimentation européenne du protocole de Kyoto, il apparaît très clairement que la norme environnementale n'est pas suffisamment restrictive. Ce constat nous amène à considérer le cas le plus vraisemblable où la politique environnementale est trop "laxiste". Nous traduisons la notion de laxisme par l'hypothèse selon laquelle le quota est fixé à un niveau arbitrairement élevé. Sachant que le gouvernement est contraint d'offrir un volume de permis $\bar{E}_t$ sur le marché, nous devons à présent traiter

[6]Nous remarquons que le paramètre θ pourrait ne pas appartenir à l'intervalle $[0, 1]$. Dans le cas où $\theta > 1$, cela signifie qu'il faut verser l'intégralité de la rente environnementale aux jeunes et compléter cette rente par un transfert égal à $(\theta - 1)\phi\bar{E}$ financé par une taxe forfaitaire sur les retraités. Le mécanisme joue en sens inverse quand $\theta < 0$ (voir Jouvet, Michel et Vidal [2002a]).

une situation de second rang puisque le quota exogène constitue une source de rigidité pour l'économie.

Dans ce contexte, nous proposons, afin de dépasser cette rigidité, de permettre la participation des ménages au marché des permis et de mettre en place une agence de gestion de la dotation totale en permis de l'économie.

Le rôle des ménages dans la régulation de la pollution

La participation des ménages au marché (pour un motif d'épargne) va fournir un nouveau levier d'intervention par le biais duquel il sera possible d'agir sur les émissions polluantes. En effet, l'acquisition de permis par les ménages va permettre à l'économie d'épargner, à chaque période, une partie de la dotation totale $\bar{E}_t$ et, ce faisant, d'émettre effectivement un niveau de pollution qui ne s'établira pas nécessairement à hauteur de ce potentiel maximum d'émission. Supposons qu'à la période t, les ménages achètent un volume de permis $E_t^M = \sum_{i=1}^N e_t^i = Ne_t$[7], ces permis sont épargnés et viennent réduire le montant de permis disponibles pour les firmes. Si elles en utilisent la totalité, alors le niveau d'émission s'élève à $E_t^F = \bar{E}_t - E_t^M \leq \bar{E}_t$. En outre, à la période suivante, il suffira au gouvernement de créer une quantité $E_{t+1}^G = \bar{E}_{t+1} - E_t^M$ afin de respecter ses engagements puisque la dotation de l'économie en permis sera bien égale au niveau prédéfini par les accords $\bar{E}_{t+1}$[8].

Donner la possibilité aux ménages d'intervenir sur le marché impose de redéfinir l'ensemble des contraintes et des choix auxquels ils sont confrontés.

Le revenu de l'agent jeune se compose toujours du salaire w_t et d'un transfert ν_t versé par le gouvernement. Il est affecté à la consommation c_t, à l'épargne en capital physique s_t et à l'acquisition de permis (en quantité e_t) au prix q_t. Cette quantité de permis e_t est placée auprès de l'agence en contrepartie du versement, en seconde période de vie, d'un revenu $q_{t+1}e_t$. Les permis de pollution constituent en fait un actif financier substituable à l'épargne classique (voir Jouvet, Michel et Vidal [2002a] et [2002b]). Retraité, le revenu de l'agent, qui se compose aussi du rendement de l'épargne $R_{t+1}s_t$ et d'un transfert μ_{t+1} de la part du gouvernement, est intégralement alloué à la consommation d_{t+1}. Ses contraintes budgétaires s'écrivent :

$$w_t + \nu_t = c_t + s_t + q_t e_t \tag{4.24}$$

$$d_{t+1} = R_{t+1}s_t + q_{t+1}e_t + \mu_{t+1} \tag{4.25}$$

Les transferts $\{\nu_t, \mu_t\}$ servent une nouvelle fois à redistribuer le revenu procuré par la vente de permis. Sachant qu'en début de seconde période de vie les ménages

[7] Par hypothèse les ménages sont identiques, donc $e_t^i = e_t$.

[8] L'indice supérieur F, pour la variable E, renvoie à la décision des firmes. Les indices M et G correspondent respectivement aux choix des ménages et du gouvernement.

sont finalement propriétaires d'une partie $Ne_{t-1} = E_{t-1}^M$ de la dotation totale, la rente environnementale s'élève à hauteur du revenu de la vente de permis aux firmes et aux ménages jeunes $\phi_t(\bar{E}_t - E_t^M) + q_t E_t^M$ diminué de la compensation versée aux retraités $q_t E_{t-1}^M$, soit,

$$N\nu_t + N\mu_t = \phi_t(\bar{E}_t - E_t^M) + q_t(E_t^M - E_{t-1}^M) \tag{4.26}$$

Cette rente est toujours distribuée selon l'instrument de politique $\theta \in [0, 1]$ et nous pouvons donc préciser l'expression des transferts :

$$\nu_t = \frac{\theta(\phi_t(\bar{E}_t - E_t^M) + q_t(E_t^M - E_{t-1}^M))}{N} \tag{4.27}$$

$$\mu_t = \frac{(1-\theta)(\phi_t(\bar{E}_t - E_t^M) + q_t(E_t^M - E_{t-1}^M))}{N} \tag{4.28}$$

Dans ce contexte, chaque ménage fait face à deux arbitrages concernant l'allocation de ses ressources entre épargne et consommation et la répartition de son épargne entre ses deux supports, à savoir, l'épargne en capital physique et l'achat de permis. Formellement, il s'agit de résoudre le problème suivant :

$$\max_{c_t, s_t, e_t, d_{t+1}} U(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})$$

$$\begin{cases} s.c. \\ c_t = w_t + \nu_t - s_t - q_t e_t \\ d_{t+1} = R_{t+1} s_t + q_{t+1} e_t + \mu_{t+1} \end{cases}$$

Ce problème est associé à deux conditions du premier ordre,

$$-U_1(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1}) + R_{t+1} U_3(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1}) = 0 \tag{4.29}$$

$$-q_t U_1(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1}) + q_{t+1} U_3(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1}) = 0 \tag{4.30}$$

qui traduisent, de manière classique, l'arbitrage relatif à la consommation sur le cycle de vie.

La combinaison de ces deux équations donne une troisième condition qui impose l'égalité du rendement procuré par les deux formes d'épargne :

$$R_{t+1} = \frac{q_{t+1}}{q_t} \tag{4.31}$$

Les ménages n'intègrent pas l'effet de l'épargne en permis sur les émissions polluantes puisqu'ils prennent la pollution comme donnée. Autrement dit, les agents sont soumis à des externalités à la fois intra- et intergénérationnelles puisqu'ils ne tiennent compte ni de l'effet de leur décision sur leurs contemporains, ni de l'impact de la pollution sur les générations futures. Aussi, le simple fait de les autoriser à prendre part aux transactions de marché ne suffit pas à garantir un niveau d'émission optimal.

Le rôle de coordination de l'agence

Afin d'influencer et de coordonner les décisions individuelles d'achat de permis, nous supposons que le gouvernement peut mettre en place une agence dont les prérogatives consistent à gérer, à chaque période, la dotation totale en permis de l'économie. Cette agence, opérant sous la tutelle du gouvernement, est chargée du volet environnement de la politique publique. Elle est, plus précisément, responsable de la vente du quota $\bar{E}_t$ et surtout, de sa répartition entre les deux types de demandeurs (firmes et ménages) qui achètent des permis pour des motifs différents (production et épargne). L'agence, pour mener à bien sa mission, base son arbitrage sur un objectif de maximisation du bien-être et fait intervenir deux critères de décision. D'abord, elle intègre l'aspect financier lié au choix du montant de permis E_t^M alloué aux ménages. L'achat de permis par les ménages jeunes suppose qu'ils disposent de relativement moins de ressources à consacrer aux autres postes de dépenses (consommation et épargne). Par contre, cette épargne spécifique leur procure un rendement, en age de retraite, qui constitue un complément du revenu procuré par le rendement de l'épargne en capital physique. Ensuite, elle tient compte de la dimension environnementale inhérente à sa décision. Vendre des permis aux ménages permet, comme nous l'avons vu précédemment, de réduire l'offre de permis faite aux firmes et se traduit par une baisse des émissions polluantes à la période considérée. Par son intervention, l'agence se substitut au gouvernement du point de vue de la conduite de la politique environnementale. Celui-ci conserve cependant le pouvoir de distribuer le revenu de la vente de permis (la rente environnementale) aux ménages.

L'agence choisit la suite $\left\{E_t^M\right\}_{t=0}^{+\infty}$ des montants de permis à offrir aux ménages (et de manière duale, l'offre aux firmes $\bar{E}_t - E_t^M$) afin de maximiser la somme actualisée des utilités des agents et ce, en tenant compte des répercussions financières et environnementales de cette décision. En effet, les contraintes qu'elle considère sont constituées non seulement des contraintes budgétaires des ménages, qui s'écrivent, au niveau agrégé,

$$Nw_t + N\nu_t = Nc_t + Ns_t + q_t E_t^M \tag{4.32}$$

$$Nd_{t+1} = NR_{t+1}s_t + q_{t+1}E_t^M + N\mu_{t+1} \tag{4.33}$$

mais aussi de la dynamique de la pollution dans le cas où toute l'offre de permis faite aux firmes est écoulée :

$$P_t = \bar{E} - E_t^M + (1-\Gamma)P_{t-1} \tag{4.34}$$

Etant donné l'expression des transferts (4.27) et (4.28) et l'évolution de la pollution, l'objectif à résoudre peut s'écrire[9] :

$$\max_{\{E_t^M\}} \sum_{t=-1}^{+\infty} \beta^t NU(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})$$

sous les contraintes,

$$\begin{cases} Nw_t + \theta(\phi_t(\bar{E} - E_t^M) + q_t(E_t^M - E_{t-1}^M)) = Nc_t + Ns_t + q_t E_t^M \\ Nd_{t+1} = NR_{t+1}s_t + q_{t+1}E_t^M + (1-\theta)(\phi_{t+1}(\bar{E} - E_{t+1}^M) + q_{t+1}(E_{t+1}^M - E_t^M)) \\ P_t = \bar{E} - E_t^M + (1-\Gamma)P_{t-1} \end{cases}$$

Nous résolvons ce problème à l'aide du Lagrangien généralisé avec λ_t le multiplicateur de Lagrange associé au stock de pollution. Les deux conditions d'optimalité sont (voir annexe $D1$) :

$$-\lambda_t = \begin{cases} \frac{(1-\theta)(q_t-\phi_t)}{\beta} U_3(c_{t-1}, P_{t-1}, d_t, P_t) - (q_t - \theta(q_t - \phi_t))U_1(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1}) \\ +\theta q_{t+1} U_3(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1}) - \beta\theta q_{t+1} U_1(c_{t+1}, P_{t+1}, d_{t+2}, P_{t+2}) \end{cases} \tag{4.35}$$

$$\lambda_t = \beta(1-\Gamma)\lambda_{t+1} - N\left(\frac{1}{\beta}U_4(c_{t-1}, P_{t-1}, d_t, P_t) + U_2(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})\right) \tag{4.36}$$

La première condition (4.35) décrit l'effet d'une variation de E_t^M sur le composante non environnementale du bien-être. Prenons l'exemple d'une hausse de la quantité de permis mise à disposition des ménages. Cette hausse s'accompagne d'abord d'un effet revenu direct qui affecte les agents de la génération t. Elle implique que les jeunes ont relativement moins de ressources à allouer à la consommation (terme $-q_t U_1(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})$) au contraire des retraités qui profiteront d'un revenu, provenant de la détention de permis, plus important (terme $\theta q_{t+1} U_3(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})$). Il existe ensuite un effet revenu indirect qui résulte de la variation de la rente environnementale et qui joue sur trois générations successives ($t-1$, t, $t+1$). Clairement, augmenter E_t^M réduit le revenu versé aux jeunes de la période $t+1$ donc leur consommation (terme $-\beta\theta q_{t+1} U_1(c_{t+1}, P_{t+1}, d_{t+2}, P_{t+2})$). Le fait de savoir si cette hausse est bénéfique aux agents vivant à la période t dépend du rapport entre les prix des permis vendus aux firmes et aux ménages. Si $q_t < \phi_t$, alors une hausse de E_t^M provoque une baisse de la rente ce qui affecte à la fois le revenu des jeunes et des retraités et réduit leurs consommations (termes $\frac{(1-\theta)(q_t-\phi_t)}{\beta} U_3(c_{t-1}, P_{t-1}, d_t, P_t)$ et $\theta(q_t - \phi_t)U_1(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})$). La seconde expression (4.36) illustre, au contraire, les bénéfices d'une augmentation de E_t^M. Accroître la quantité de permis offerte aux ménages entraîne non seulement une diminution de la pollution favorable à tous les agents vivant à la période t (terme $-N\left(\frac{1}{\beta}U_4(c_{t-1}, P_{t-1}, d_t, P_t) + U_2(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})\right)$) mais aussi, une baisse de la pollution future (selon le facteur $1-\Gamma$) dont bénéficieront les générations suivantes.

[9]avec $\beta \in]0,1]$ le facteur d'actualisation propre à l'agence.

Une fois la décision de l'agence connue, il est possible de définir l'équilibre. Etant donné les contraintes budgétaires (4.24), (4.25) et la dynamique de la pollution (4.2), l'équilibre intertemporel, conditionné à la politique $\{\bar{E}_t, \nu_t, \mu_t\}$, est la donnée des conditions d'arbitrage de l'agence (4.35) et (4.36) et des conditions d'équilibre des firmes et des consommateurs (4.4) - (4.6) et (4.29) - (4.30). Il se caractérise enfin par l'énoncé des conditions d'équilibre des marchés : $L_t = N$ sur le marché du travail, $K_t = Ns_{t-1}$ sur le marché du capital et, sur le(s) marché(s) de permis, $Ne_t = E_t^M$ et $E_t^F = \bar{E}_t - E_t^M$ sachant que la suite $\{E_t^M\}$ est entièrement déterminée par l'agence.

Dans la partie suivante, nous étudions les propriétés de l'équilibre stationnaire avec intervention de l'agence. Nous cherchons plus particulièrement à savoir dans quelle mesure la participation des ménages au marché et l'intervention de l'agence peuvent apporter une solution à la rigidité imposée par le système de quota.

Analyse de long terme et décentralisation de l'optimum social

L'analyse stationnaire comporte deux temps de réflexion. Nous étudions d'abord les conditions d'existence d'un équilibre stationnaire avec quota contraint. Puis, comme dans la partie précédente, nous nous posons la question de savoir s'il est possible d'atteindre la règle d'or à partir de l'équilibre.

En fait, il apparaît que les deux conditions d'équilibre des ménages, évaluées en stationnaire, correspondent formellement aux deux premières conditions de la règle d'or (4.18) et (4.19). En effet, la condition (4.31), qui impose, à l'équilibre, l'égalité du rendement procuré par les deux supports de l'épargne, se réécrit, en stationnaire $R = 1$. Sachant qu'à l'équilibre, le facteur d'intérêt s'établit à hauteur de la productivité marginale du capital, on retrouve bien l'équivalent de la condition (4.19) :

$$F_1(K, N, \bar{E} - E^M) = 1 \tag{4.37}$$

La valeur unitaire du facteur d'intérêt implique également que la condition d'arbitrage de consommation sur le cycle de vie (4.29) s'identifie, à l'équilibre stationnaire, à la condition de la règle d'or (4.18) :

$$U_1(c, P, d, P) = U_3(c, P, d, P) \tag{4.38}$$

De plus, les équations définissant la pollution stationnaire sont identiques à l'équilibre et à l'optimum stationnaires. Enfin, la combinaison des deux contraintes budgétaires agrégées ((4.32) et (4.33)), en stationnaire, donne la contrainte de ressources de l'économie (4.16) utilisée à la règle d'or.

Dès lors, la question étudiée revient à se demander sous quelles conditions l'équation définissant la répartition du quota global $\bar{E}$ par l'agence, qui s'écrit à l'équilibre stationnaire,

$$(1-\theta(1-\beta))((1-\beta)q-\phi)U_1(c,P,d,P) = \frac{N}{1-\beta(1-\Gamma)}\left(\beta U_2(c,P,d,P) + U_4(c,P,d,P)\right) \tag{4.39}$$

coïncide avec la condition de la règle d'or pour la détermination du niveau d'émission optimal. Nous résumons le résultat dans la proposition suivante.

Proposition 5 *L'équilibre stationnaire avec politique contrainte existe et correspond à la règle d'or dès que :*

- le facteur d'actualisation du problème de l'agence vaut l'unité : $\beta = 1$,

- pour $\beta < 1$, la distribution de la rente environnementale se fait sur la base du paramètre θ solution de l'équation suivante[10] *:*

$$\theta = \frac{1}{1-\beta}\left(1 + \frac{\Gamma F_3(*)\left(\beta U_2(*) + U_4(*)\right)}{(1-\beta(1-\Gamma))((1-\beta)q(\theta,\bar{E}-E^*) - F_3(*))\left(U_2(*)+U_4(*)\right)}\right) \tag{4.40}$$

Cette équation admet une unique solution θ^* positive si :

$$(1-\beta)q(\theta,\bar{E}-E^*)_{\theta=0} > F_3(K^*,N^*,E^*) \tag{4.41}$$

Démonstration. voir l'annexe D. ∎

Nous montrons donc qu'il est possible d'atteindre la règle d'or grâce à l'intervention de l'agence et ce, malgré l'existence d'une rigidité provenant de la fixation, à l'échelle supranationale, du quota global d'émission $\bar{E}$. L'opportunité donnée aux ménages d'épargner en permis implique qu'ils alloueront leurs ressources entre consommation et investissement de manière optimale. En effet, à l'équilibre stationnaire, les deux supports de l'épargne (capital physique et permis) procurant le même rendement, les deux premières conditions de la règle d'or sont satisfaites sans avoir à recourir, comme dans la partie précédente, à une distribution particulière de la rente environnementale.

Concernant la décision de l'agence à proprement parler, il apparaît que si elle traite toutes les générations sur un même pied d'égalité ($\beta = 1$), alors sa condition d'équilibre s'identifie à la condition de la règle d'or pour la détermination du niveau d'émission optimal. Ce résultat, plutôt naturel, indique que les transferts forfaitaires, associés à la distribution de la rente et réalisés par le gouvernement, sont neutres. Par contre, dans le cas précis où l'agence impose une dictature du présent ($\beta < 1$), le gouvernement peut jouer sur la distribution de la rente environnementale et choisir l'instrument θ de telle sorte que la condition d'équilibre de l'agence corresponde exactement à la condition

[10] L'argument "$*$" signifie que les fonctions admettent comme argument l'allocation de la règle d'or.

de la règle d'or[11]. Lorsque l'on compare la situation où la quota est contraint avec la précédente, nous constatons alors que la finalité de la politique de redistribution n'est plus tant d'influencer les décisions des agents privés que d'orienter le choix du nombre de permis vendus aux ménages.

En résumé, l'intervention de l'agence impulse une segmentation du marché des permis en deux sous-marchés : un marché du facteur de production où interviennent les firmes et un marché de l'actif financier où opèrent les ménages. Cette segmentation du marché s'accompagne, à l'équilibre, d'une discrimination par les prix des deux types de demandeurs de permis qui se base sur l'utilisation faite des permis (utilisation dans le processus de production *versus* épargne) et sur les répercussions environnementales qui en découlent (pollution immédiate *versus* pollution différée). De plus, à long terme, il est possible de garantir un niveau d'émission optimal et, puisque les autres conditions d'optimalité sont vérifiées, l'économie converge finalement vers l'optimum social. Ainsi, partant de la situation initiale de second rang caractérisée par l'existence de contraintes politiques et un potentiel d'émission sous-optimal, nous parvenons malgré tout à restaurer, à long terme, l'optimum de premier rang grâce à la participation des ménages aux marché des permis et à la création d'une agence de gestion de la dotation de l'économie en permis.

4.5 Conclusion

Cet article se focalise sur la principale difficulté inhérente à la régulation de la pollution par un système de permis, à savoir, la définition de la norme de pollution initiale. Les travaux théoriques qui concluent à l'efficacité des permis de pollution non seulement pour contrôler les émissions polluantes mais aussi, pour réaliser l'optimum social à partir de l'économie décentralisée, éludent ce problème en admettant que le décideur public est parfaitement apte à choisir le niveau optimal du quota global d'émission. Ce postulat va cependant à l'encontre de l'évidence empirique qui témoigne de l'existence de contraintes politiques étant de nature à perturber la définition de ce standard d'émission. Dans cet article, nous recourons à un cadre d'analyse plus général autorisant la prise en compte de ces sources d'inefficacité. Le principe consiste en fait à supposer que la politique environnementale et le choix du quota ne relèvent pas de la

[11]Une nouvelle fois, le paramètre θ peut ne pas appartenir à l'intervalle $[0,1]$. Notons que pour la condition suffisante d'existence (4.41), θ^* est précisément supérieur à 1 ce qui signifie qu'il faut verser l'intégralité de la rente aux jeunes et compléter par un transfert financé par une taxe forfaitaire sur le revenu des retraités. Ce résultat n'est pas très surprenant car l'intervention de l'agence est surtout coûteuse pour les jeunes qui voient leur revenu (et leur consommation) amputé(s) par l'achat de permis.

seule compétence du gouvernement mais sont au contraire décidés lors de négociations internationales potentiellement sujettes aux interférences causées par les contraintes.

Dans ce contexte, nous étudions la pertinence du recours à l'instrument permis en particulier lorsque l'on poursuit un objectif de maximisation du bien-être.

Tant que le processus de négociation est efficace et offre à l'économie le quota socialement désiré, il apparaît clairement qu'il est possible de décentraliser, à long terme, l'optimum social à condition d'effectuer des transferts adaptés entre les générations.

Par contre, dès que les contraintes politiques sont actives, la négociation échoue à fournir la dotation souhaitée par l'économie. Nous montrons qu'il est malgré tout possible de pallier les inefficacités de la régulation par le quota en autorisant d'une part les ménages à participer aux transactions sur le marché des permis et en créant, d'autre part, une agence de gestion de la dotation en permis. L'action de cette agence, substitut imparfait du gouvernement, impulse une segmentation du marché qui s'accompagne d'une discrimination par les prix des acheteurs selon le dommage environnemental occasionné par leurs activités respectives (production des firmes, épargne des ménages). Cette intervention permet ainsi à l'économie concurrentielle d'atteindre l'optimum social de long terme à partir d'une situation initiale marquée par l'existence de rigidités.

Annexes

A. Existence d'un état stationnaire (proposition 1)

Le système d'équations (4.11)-(4.12), évalué en stationnaire, devient (par souci de simplification, le facteur travail $L = N$ n'apparaît pas explicitement comme argument des prix) :

$$K = N\sigma(\theta, w(K,\bar{E}), \phi(K,\bar{E}), \bar{E}, R(K,\bar{E}), \phi(K,\bar{E}), \bar{E}, P, P) \tag{4.42}$$

$$P = \frac{\bar{E}}{\Gamma}$$

Le niveau de pollution stationnaire est uniquement déterminé par la politique de quota. Reste à s'assurer du fait que la première équation admet une solution.

Par définition l'épargne est non supérieure au salaire, nous avons donc $\sigma(\theta, K, \bar{E}) \leq w(K,\bar{E})$ et, l'expression du taux de salaire est donnée par $w(K,\bar{E}) = F_2(K,N,\bar{E})$. La fonction de production est homogène de degré 1 et nous pouvons réécrire le salaire de la manière suivante :

$$F_2(K,N,\bar{E}) = \frac{F(K,N,\bar{E})}{N} - \frac{K}{N}F_1(K,N,\bar{E})(1+\epsilon(K,\bar{E}))$$

avec $\epsilon(K,\bar{E})$ le ratio des élasticités prix de la production par rapport aux émissions et au capital :

$$\epsilon(K,\bar{E}) = \frac{\bar{E}F_3(K,N,\bar{E})}{KF_1(K,N,\bar{E})} = \frac{\bar{E}\phi(K,\bar{E})}{KR(K,\bar{E})}$$

Dès lors, sous l'hypothèse que ce ratio est fini pour des niveaux importants de capital (il est constant pour une technologie Cobb-Douglas),

$$\lim_{K\to+\infty} \epsilon(K,\bar{E}) < \infty$$

et sous l'ensemble des conditions sur la fonction de production, nous obtenons :

$$\lim_{K\to+\infty} \frac{w(K,\bar{E})}{K} = \lim_{K\to+\infty} \frac{1}{N}\left(\frac{F(K,N,\bar{E})}{K} - F_1(K,N,\bar{E})\left(1+\epsilon(K,\bar{E})\right)\right) = 0$$

La fonction d'épargne se situe donc en deçà de la première bissectrice dans un voisinage de l'infini :

$$\lim_{K\to+\infty} \frac{N\sigma(\theta, w(K,\bar{E}), \phi(K,\bar{E}), \bar{E}, R(K,\bar{E}), \phi(K,\bar{E}), \bar{E}, P, P)}{K} = 0$$

Il suffit alors de recourir à la condition classique dans les modèles à générations imbriquées (Galor et Ryder [1989], De La Croix et Michel [2002]) pour garantir l'existence d'une solution stationnaire intérieure pour le capital :

$$\lim_{K\to 0} \frac{N\sigma(\theta, w(K,\bar{E}), \phi(K,\bar{E}), \bar{E}, R(K,\bar{E}), \phi(K,\bar{E}), \bar{E}, \bar{E}/h, \bar{E}/h)}{K} > 1$$

En effet, cette condition assure que la fonction d'épargne croise au moins une fois la première bissectrice sur le domaine de variation du capital et dans ce cas l'équation (4.42) admet une solution positive finie.

B. Stabilité locale (proposition 2)

En linéarisant le système (4.11)-(4.12) dans un voisinage de l'état stationnaire, on obtient :

$$(1 - N(\sigma_5 F_{11} + \sigma_6 F_{13}))dK_{t+1} = N(\sigma_2 F_{12} + \sigma_3 F_{13})dK_t + N\sigma_8 dP_t + N\sigma_9 dP_{t+1}$$

et,

$$dP_{t+1} = (1 - \Gamma)dP_t$$

La matrice jacobienne s'écrit :

$$J = \begin{pmatrix} \frac{N(\sigma_2 F_{12}+\sigma_3 F_{13})}{1-N(\sigma_5 F_{11}+\sigma_6 F_{13})} & \frac{N(\sigma_8+(1-\Gamma)\sigma_9)}{1-N(\sigma_5 F_{11}+\sigma_6 F_{13})} \\ 0 & 1-\Gamma \end{pmatrix}$$

La stabilité de l'équilibre exige que les deux racines du polynôme caractéristique, $P(\lambda) = \lambda^2 - trace(J)\lambda + det(J)$, soient à l'intérieur du cercle unité.

Nous savons que la trace (*resp.* le déterminant) correspond à la somme (*resp.* le produit) des racines du polynôme. La détermination de la valeur des racines est immédiate : $\lambda_1 = 1 - \Gamma < 1$ et

$$\lambda_2 = \frac{N(\sigma_2 F_{12} + \sigma_3 F_{13})}{1 - N(\sigma_5 F_{11} + \sigma_6 F_{13})}$$

reste à étudier cette seconde racine λ_2. A l'équilibre stationnaire, les consommations peuvent s'écrire

$$c(\theta, w, R, \phi, \bar{E}, P) = w + \theta\phi\bar{E} - \sigma(\theta, w, \phi, \bar{E}, R, \phi, \bar{E}, P, P)$$

$$d(\theta, w, R, \phi, \bar{E}, P) = R\sigma(\theta, w, \phi, \bar{E}, R, \phi, \bar{E}, P, P) + (1-\theta)\phi\bar{E}$$

Sous l'hypothèse de normalité des consommations, nous avons : $c_2 = 1 - \sigma_2 > 0$ et $d_2 = R\sigma_2 > 0$, soit, $0 < \sigma_2 < 1$. Sous l'hypothèse de substituabilité des consommations, la consommation de première période c est une fonction non décroissante du prix $1/R$ de la consommation d dans la contrainte budgétaire intertemporelle, $c + d/R = w + \theta\phi\bar{E} + (1-\theta)\phi\bar{E}/R$ (voir De la Croix et Michel [2002]), ce qui implique que $c_3 = -\sigma_5 \leq 0 \leftrightarrow \sigma_5 \geq 0$. En outre, appliquer le théorème des fonctions implicites à la condition (4.9), à l'équilibre stationnaire, donne :

$$\sigma_3 = \frac{\theta\bar{E}(U_{11} - RU_{13})}{U_{11} - 2RU_{13} + R^2 U_{33}} > 0$$

$$\sigma_6 = \frac{(1-\theta)\bar{E}(U_{13} - RU_{33})}{U_{11} - 2RU_{13} + R^2 U_{33}} < 0$$

Par conséquent, nous savons que la seconde racine λ_2 est positive. Dès lors, une condition nécessaire et suffisante à la stabilité est $\lambda_2 < 1$ ce qui équivaut à :

$$1 - N(\sigma_2 F_{12} + \sigma_5 F_{11} + (\sigma_3 + \sigma_6) F_{13}) > 0$$

C. Existence de la règle d'or (proposition 3) :

L'allocation de la règle d'or $(K^*, E^*, c^*, d^*, P^*)$ est solution du système de cinq équations suivant :

$$U_1(c, P, d, P) = U_3(c, P, d, P) \tag{4.43}$$

$$F_1(K, N, E) = 1 \tag{4.44}$$

$$\frac{N}{\Gamma}(U_2(c, P, d, P) + U_4(c, P, d, P)) + F_3(K, N, E) U_1(c, P, d, P) = 0 \tag{4.45}$$

$$F(K, N, E) = Nc + Nd + K \tag{4.46}$$

$$P = \frac{E}{\Gamma} \tag{4.47}$$

D'après le théorème des fonctions implicites, on déduit de (4.44) : $K = K(E)$ avec $K'(E) = -F_{13}/F_{11} > 0$. Substituer cette expression dans (4.46) donne : $d = \bar{d}(c, E)$ avec $\bar{d}_1 = -1$ et $\bar{d}_2 = F_3/N > 0$. Nous remplaçons ensuite cette fonction dans (4.43). Sachant (4.47), on obtient :

$$U_1(c, \frac{E}{\Gamma}, \bar{d}(c, E), \frac{E}{\Gamma}) = U_3(c, \frac{E}{\Gamma}, \bar{d}(c, E), \frac{E}{\Gamma})$$

Appliquer le théorème des fonctions implicites à cette équation permet d'exprimer c comme une fonction de E : $c = c(E)$ avec :

$$c'(E) = -\frac{F_3/N(U_{13} - U_{33}) + 1/\Gamma(U_{12} + U_{14} - U_{32} - U_{34})}{U_{11} - 2U_{13} + U_{33}}$$

La consommation d peut finalement s'écrire comme une fonction de E : $d = d(E)$ avec :

$$d'(E) = -\frac{F_3/N(U_{13} - U_{11}) + 1/\Gamma(U_{32} + U_{34} - U_{12} - U_{14})}{U_{11} - 2U_{13} + U_{33}}$$

Nous notons que le dénominateur de ces deux dérivées est négatif et que le premier terme au numérateur est positif. Seul le signe du terme $U_{12} + U_{14} - U_{32} - U_{34}$ est *a priori* inconnu.

Nous remplaçons enfin ces solutions intermédiaires dans (4.45) et on obtient une équation du type $X(E) = 0$ avec :

$$X(E) = \begin{cases} \frac{N}{\Gamma}\left(U_2(c(E), \frac{E}{\Gamma}, d(E), \frac{E}{\Gamma}) + U_4(c(E), \frac{E}{\Gamma}, d(E), \frac{E}{\Gamma})\right) \\ +F_3(K(E), N, E)U_1(c(E), \frac{E}{\Gamma}, d(E), \frac{E}{\Gamma}) \end{cases}$$

L'étude de l'existence se résume alors à démontrer que l'équation $X(E) = 0$ admet une unique solution positive. La dérivée de la fonction $X()$ s'écrit[12] :

$$X'(E) = \left(\frac{N}{\Gamma}\Phi + U_1\Delta + F_3\Theta\right)$$

où,

$$\Phi = c'(E)(U_{12} + U_{14}) + d'(E)(U_{32} + U_{34}) + \frac{1}{\Gamma}(U_{22} + 2U_{24} + U_{44})$$

$$\Delta = K'(E)F_{31} + F_{33}$$

$$\Theta = c'(E)U_{11} + d'(E)U_{13} + \frac{1}{\Gamma}(U_{12} + U_{14})$$

Le second terme, qui peut se réécrire,

$$\Delta = \frac{F_{33}F_{11} - (F_{31})^2}{F_{11}}$$

est négatif sous l'hypothèse que la fonction de production est concave par rapport aux arguments K et E (puisque, dans ce cas le numérateur est positif).

Le troisième terme, qui peut se réécrire

$$\Theta = -\frac{F_3/N((U_{13})^2 - U_{11}U_{33}) + \Omega/\Gamma}{U_{11} - 2U_{13} + U_{33}}$$

avec,

$$\Omega = (U_{13} - U_{33})(U_{12} + U_{14}) + (U_{13} - U_{11})(U_{32} + U_{34}) < 0$$

est négatif dès que $(U_{13})^2 - U_{11}U_{33} \leq 0$.

La stricte concavité de la fonction d'utilité impose que sa matrice hessienne (4×4) soit définie négative. Cette matrice s'écrit :

$$H = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} & U_{24} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} & U_{34} \\ U_{41} & U_{42} & U_{43} & U_{44} \end{bmatrix}$$

Une matrice est définie négative lorsque ses mineurs principaux alternent en signe le premier étant négatif. Or, il apparaît que cette inégalité est une condition nécessaire

[12] Dans un souci de lisibilité, nous omettons à présent les arguments des dérivées partielles premières et secondes.

pour que le mineur d'ordre 3 soit négatif. Elle est donc satisfaite sous l'hypothèse de stricte concavité.

Le développement du premier terme donne :

$$\Phi = -\frac{F_3/N((U_{13}-U_{33})(U_{12}+U_{14})+(U_{13}-U_{11})(U_{32}+U_{34}))+\Lambda/\Gamma}{U_{11}-2U_{13}+U_{33}}$$

avec,

$$\Lambda = ((U_{12}+U_{14})-(U_{32}+U_{34}))^2-(U_{11}-2U_{13}+U_{33})(U_{22}+2U_{24}+U_{44})$$

Les (6) conditions suivantes suffisent pour déterminer le signe du coefficient Λ :

$$\begin{cases} U_{11}U_{ij}-U_{1i}U_{1j}\geq 0 \\ U_{33}U_{ij}-U_{3i}U_{3j}\geq 0 \end{cases} \text{pour } i,j=2,4$$

Il est important de noter que l'inégalité $U_{11}U_{22}-(U_{12})^2\geq 0$ est une condition nécessaire et suffisante pour avoir un mineur d'ordre 2 positif. De même, la condition $U_{33}U_{22}-(U_{23})^2\geq 0$ est aussi nécessaire pour garantir que le mineur d'ordre 3 soit négatif. Ces inégalités sont donc vérifiées sous l'hypothèse de stricte concavité. Enfin, les quatre autres conditions renvoient à la signature du mineur d'ordre 4 qui doit être positif. Ces conditions ne sont ni des conditions nécessaires ni des conditions suffisantes pour avoir un mineur positif bien qu'elles "aillent dans le sens" de la validation de cette hypothèse. Nous devons donc imposer :

$$\begin{cases} U_{11}U_{i4}-U_{1i}U_{14}\geq 0 \\ U_{33}U_{i4}-U_{3i}U_{34}\geq 0 \end{cases} \text{pour } i=2,4$$

ce qui garantit $\Lambda<0$ et nous permet de signer Φ : $\Phi<0$.

Sous ces hypothèses, nous avons finalement $X'(E)<0$. Reste maintenant à étudier le comportement aux bornes de cette fonction. Nous savons que : $F(K,N,0)=0$. D'après (4.46), cela signifie que $c(0)=d(0)=K(0)=0$.

Sous l'hypothèse $\lim_{c\to 0}U_1(c,P,d,P)=+\infty\ \forall d,P\geq 0$ et sachant que $\lim_{E\to 0}F_3(K,N,E)>0\ \forall K\geq 0$, nous avons donc :

$$\lim_{E\to 0}F_3(K(E),N,E)U_1(c(E),\frac{E}{\Gamma},d(E),\frac{E}{\Gamma})=+\infty$$

Si maintenant nous nous référons à la condition $\lim_{P\to 0}|U_j(c,P,d,P)|<\infty\ \forall c,d\geq 0$ pour $j=2,4$ alors, nous connaissons la limite de la fonction $X()$ dans un voisinage de $E=0$: $\lim_{E\to 0}X(E)=+\infty$.

Ainsi, il suffit d'imposer la condition suivante à l'autre bord :

$$\lim_{E\to+\infty}X(E)<0$$

pour s'assurer de l'existence d'une unique solution à l'équation $X(E) = 0$ et montrer que le problème de la règle d'or "verte" admet une unique solution . Cette condition s'obtient sous des conditions raisonnables (mais superflues pour le reste de notre analyse). En effet, imposer le respect des conditions d'Inada pour les dérivées partielles U_1 et F_3 (et en particulier que la limite à l'infini soit nulle) et supposer que $\lim_{P \to +\infty} U_j(c, P, d, P) < 0$ suffit à vérifier cette inégalité.

D. Démonstration de la proposition 5 :

Le problème de l'agence s'écrit :

$$\max_{\{E_t^M\}} \sum_{t=-1}^{+\infty} \beta^t NU(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})$$

sous contrainte,

$$\begin{cases} Nw_t + \theta(\phi_t(\bar{E} - E_t^M) + q_t(E_t^M - E_{t-1}^M)) = Nc_t + Ns_t + q_t E_t^M \\ Nd_{t+1} = NR_{t+1}s_t + q_{t+1}E_t^M + (1-\theta)(\phi_{t+1}(\bar{E} - E_{t+1}^M) + q_{t+1}(E_{t+1}^M - E_t^M)) \\ P_t = \bar{E} - E_t^M + (1-\Gamma)P_{t-1} \end{cases}$$

Afin de résoudre ce problème d'optimisation, nous définissons le Lagrangien généralisé suivant, avec λ_t le multiplicateur associé à la dynamique du stock de pollution P_t,

$$\sum_{t=0}^{+\infty} \beta^t \left\{ \begin{array}{l} NU[\frac{Nw_t + \theta(\phi_t(\bar{E} - E_t^M) + q_t(E_t^M - E_{t-1}^M)) - Ns_t - q_t E_t^M}{N}, P_t, \\ \frac{NR_{t+1}s_t + q_{t+1}E_t^M + (1-\theta)(\phi_{t+1}(\bar{E} - E_{t+1}^M) + q_{t+1}(E_{t+1}^M - E_t^M))}{N}, P_{t+1}] \\ +\lambda_t(P_t - \bar{E} + E_t^M - (1-\Gamma)P_{t-1}) \end{array} \right\}$$

La maximisation du Lagrangien donne deux conditions du premier ordre :

$$\lambda_t = \begin{cases} -\frac{(1-\theta)(q_t - \phi_t)}{\beta} U_3(c_{t-1}, P_{t-1}, d_t, P_t) + ((1-\theta)q_t + \theta\phi_t)U_1(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1}) \\ -\theta q_{t+1} U_3(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1}) + \beta\theta q_{t+1} U_1(c_{t+1}, P_{t+1}, d_{t+2}, P_{t+2}) \end{cases}$$

$$\lambda_t = \beta(1-\Gamma)\lambda_{t+1} - N\left(\frac{1}{\beta}U_4(c_{t-1}, P_{t-1}, d_t, P_t) + U_2(c_t, P_t, d_{t+1}, P_{t+1})\right)$$

En stationnaire, sachant que les conditions d'équilibre des ménages sont,

$$R = 1$$

$$U_1(c, P, d, P) = U_3(c, P, d, P)$$

ces conditions deviennent

$$\lambda = -\frac{(1-\theta(1-\beta))((1-\beta)q - \phi)}{\beta} U_1(c, P, d, P)$$

$$\lambda = -\frac{N}{\beta(1-\beta(1-\Gamma))} \left(\beta U_2(c, P, d, P) + U_4(c, P, d, P)\right)$$

Leur combinaison donne la condition d'équilibre de l'agence :

$$(1-\theta(1-\beta))((1-\beta)q-\phi)U_1(c,P,d,P) = \frac{N}{1-\beta(1-\Gamma)}\left(\beta U_2(c,P,d,P)+U_4(c,P,d,P)\right)$$

D1. Détermination de l'équilibre stationnaire :

La première étape de la démonstration consiste à montrer que l'équilibre stationnaire est déterminé grâce à l'intervention de l'agence[13]. Pour étudier la détermination de l'équilibre stationnaire, on doit ajouter aux condition d'équilibre des ménages et de l'agence, les conditions de la maximisation des profits, les conditions d'équilibre des marchés, les contraintes budgétaires et l'équation fixant le niveau de pollution stationnaire. Nous obtenons alors le système de 6 équations suivant :

$$U_1(c,P,d,P) = U_3(c,P,d,P) \tag{4.48}$$

$$F_1(K,N,\bar{E}-E^M) = 1 \tag{4.49}$$

$$NF_2(K,N,\bar{E}-E^M) + \theta F_3(K,N,\bar{E}-E^M)(\bar{E}-E^M) = Nc + K + qE^M \tag{4.50}$$

$$Nd = F_1(K,N,\bar{E}-E^M)K + qE^M + (1-\theta)F_3(K,N,\bar{E}-E^M)(\bar{E}-E^M) \tag{4.51}$$

$$P = \frac{\bar{E}-E^M}{\Gamma} \tag{4.52}$$

$$(1-\theta(1-\beta))((1-\beta)q-\phi)U_1(c,P,d,P) = \frac{N}{1-\beta(1-\Gamma)}\left(\beta U_2(c,P,d,P)+U_4(c,P,d,P)\right) \tag{4.53}$$

à 6 inconnues : K, E^M, c, d, P et q sachant que θ, N et $\bar{E}$ sont des données exogènes.

Le principe de résolution est le suivant : nous utilisons d'abord les cinq premières équations pour exprimer tour à tour les variables K, c, d, P et q comme des fonctions de E^M (et éventuellement des paramètres). Ensuite, nous remplaçons ces solutions intermédiaires dans (4.53) pour déterminer E^M.

D'après les équations (4.49) et (4.52), il est possible d'exprimer K et P comme des fonctions de E^M :

$$K = K(\underset{-}{E^M}) \tag{4.54}$$

$$P = P(\underset{-}{E^M}) \tag{4.55}$$

Ensuite, remplacer (4.54) dans les contraintes budgétaires (4.50) et (4.51), donne les consommations c et d comme des fonctions de q et E^M (et θ) :

$$c = \frac{NF_2(K(E^M),N,\bar{E}-E^M) + \theta F_3(K(E^M),N,\bar{E}-E^M)(\bar{E}-E^M) - K(E^M) - qE^M}{N}$$

[13]Il faut noter que si les ménages choisissaient eux-même le montant de l'épargne en permis, l'équilibre serait indéterminé dans la mesure où les agents seraient indifférents entre les deux supports de l'épargne (qui procurent le même rendement à l'équilibre en vertu de la relation (4.31)).

soit,

$$c = c(\underset{+}{\theta}, \underset{-}{q}, E^M) \tag{4.56}$$

De même,

$$d = \frac{F_1(K(E^M), N, \bar{E} - E^M)K(E^M) + qE^M + F_3(K(E^M), N, \bar{E} - E^M)(\bar{E} - E^M)}{N}$$

Donc :

$$d = d(\underset{-}{\theta}, \underset{+}{q}, E^M) \tag{4.57}$$

En substituant ces expressions (4.56) et (4.57) dans (4.48), on obtient :

$$U_1(c(\theta, q, E^M), P(E^M), d(\theta, q, E^M), P(E^M)) = U_3(c(\theta, q, E^M), P(E^M), d(\theta, q, E^M), P(E^M))$$

et, grâce au théorème des fonctions implicites, on peut alors exprimer q comme une fonction de θ et E^M[14] :

$$q = q(\underset{+}{\theta}, E^M) \tag{4.58}$$

Remplacer (4.58) dans (4.56) et (4.57) donne c et d comme des fonctions de θ et E^M.

Reste finalement à remplacer toutes nos solutions intermédiaires dans la condition de l'agence (4.53) afin de déterminer E^M. La condition devient :

$$(1 - \theta(1-\beta))((1-\beta)q(\theta, E^M) - F_3(K(E^M), N, \bar{E} - E^M)) =$$

$$\frac{N\left(\beta U_2(c(\theta, E^M), P(E^M), d(\theta, E^M), P(E^M)) + U_4(c(\theta, E^M), P(E^M), d(\theta, E^M), P(E^M))\right)}{(1 - \beta(1-\Gamma))U_1(c(\theta, E^M), P(E^M), d(\theta, E^M), P(E^M))}$$

Nous obtenons donc une équation du type $H(\theta, E^M) = 0$ qui, sous les bonnes propriétés, définit une (unique) solution E^M comme fonction du paramètre θ[15]. Connaissant cette solution, on peut finalement déterminer tour à tour toutes les variables de l'équilibre stationnaire. L'équilibre stationnaire est donc déterminé.

Plutôt que de se donner des conditions formelles (comme, par exemple, des conditions aux bords) pour garantir l'existence et l'unicité de l'équilibre stationnaire, nous étudions, dans la seconde partie de la démonstration, les conditions sous lesquelles cet équilibre correspond à l'allocation de la règle d'or $(c^*, d^*, K^*, E^*, P^*)$ telle que nous l'avons définie précédemment.

D2. Décentralisation de la règle d'or :

[14] Faire apparaître, pour c et d puis q, θ comme argument servira lors de la seconde étape de l'analyse.

[15] E^M dépend évidemment des autres paramètres du modèle mais nous voulons surtout insister sur la dépendance vis à vis de l'instrument de politique θ.

Rappelons d'abord les trois conditions de la règle d'or :

$$U_1(c^*, P^*, d^*, P^*) = U_3(c^*, P^*, d^*, P^*) \tag{4.59}$$

$$F_1(K^*, N, E^*) = 1 \tag{4.60}$$

$$\frac{N}{\Gamma}\left(U_2(c^*, P^*, d^*, P^*) + U_4(c^*, P^*, d^*, P^*)\right) + F_3(K^*, N, E^*)U_1(c^*, P^*, d^*, P^*) = 0 \tag{4.61}$$

Nous cherchons à savoir s'il est possible d'atteindre cette règle d'or à partir de l'équilibre. Nous notons d'abord que les deux conditions d'équilibre des ménages ((4.48) et (4.49)), correspondent formellement aux deux premières conditions de la règle d'or. De plus, les équations définissant la pollution stationnaire sont identiques à l'équilibre et à l'optimum stationnaire. Enfin, la combinaison des deux contraintes budgétaires agrégées ((4.50) et (4.51)) donne la contrainte de ressources de l'économie utilisée à la règle d'or.

Dès lors, la question étudiée revient à se demander sous quelles conditions l'équation définissant la répartition du quota global $\bar{E}$ par l'agence (4.53) coïncide avec la condition de la règle d'or pour la détermination du niveau d'émission optimal.

Plaçons-nous d'abord dans le cas où l'agence n'actualise pas son objectif (soit $\beta = 1$). La condition d'équilibre de l'agence devient :

$$-F_3(K(E^M), N, \bar{E} - E^M)U_1(c, P, d, P) = \frac{N}{\Gamma}\left(U_2(c, P, d, P) + U_4(c, P, d, P)\right)$$

et correspond précisément à la condition (4.61). Autrement dit, sous couvert que le prix des permis vendus aux ménages évalué pour le niveau d'émission E^* soit positif, les variables de l'équilibre sont bien, en stationnaire, identiques à l'allocation de la règle d'or.

Supposons maintenant que $\beta < 1$, il convient de savoir s'il est possible d'identifier la condition de l'agence à la condition de la règle d'or grâce au choix du paramètre de distribution de la rente θ. La condition de l'agence peut se réécrire[16] :

$$\frac{U_1}{N} = \frac{(\beta U_2 + U_4)}{(1 - \beta(1 - \Gamma))(1 - \theta(1 - \beta))((1 - \beta)q - F_3)} \tag{4.62}$$

et, pour la condition d'optimalité (4.61), nous avons :

$$\frac{U_1}{N} = -\frac{(U_2 + U_4)}{\Gamma F_3}$$

Identifier ces conditions revient donc à choisir θ de telle sorte que :

$$\frac{(\beta U_2 + U_4)}{(1 - \beta(1 - \Gamma))(1 - \theta(1 - \beta))((1 - \beta)q - F_3)} = -\frac{(U_2 + U_4)}{\Gamma F_3}$$

[16] Nous devrons vérifier *ex post* que le terme de droite est positif.

ce qui donne, après quelques manipulations (si $q \neq F_3/(1-\beta)$),

$$\theta = \frac{1}{1-\beta}\left(1 + \frac{\Gamma F_3(*)\,(\beta U_2(*) + U_4(*))}{(1-\beta(1-\Gamma))((1-\beta)q(\theta, \bar{E}-E^*) - F_3(*))(U_2(*) + U_4(*))}\right) \tag{4.63}$$

Nous devons alors étudier une relation du type :

$$\theta = G(\theta)$$

où les formes fonctionnelles sont évaluées à l'allocation de la règle d'or. Par exemple, $U_2(*) = U_2(c^*, P^*, d^*, P^*)$.

Sachant que le prix q est croissant en θ, la condition suivante :

$$(1-\beta)q(0) > F_3 \tag{4.64}$$

suffit à garantir que la fonction $G(.)$ est monotone décroissante en θ et prend des valeurs positives. En particulier, on sait que $\frac{1}{1-\beta} < G(0) < \infty$ ce qui permet de conclure qu'il existe un unique $\theta > 0$ tel que la condition d'optimalité pour le choix E^* soit décentralisée à l'équilibre.

De même, on a $G(\theta) > \frac{1}{1-\beta}\ \forall\theta \geq 0$ puisque l'inégalité (4.64) implique que le second terme entre parenthèses dans (4.63) est positif. Par conséquent, cette fonction croisera la bissectrice pour la valeur $\theta^* > \frac{1}{1-\beta}(> 1)$. On vérifie alors que le terme de droite de l'équation (4.62) est positif puisque $1 - \theta(1-\beta) < 0$.

Conclusion générale

Nous abordons, dans cet exposé, deux thèmes récurrents de l'économie de l'environnement. Nous nous intéressons tout d'abord aux caractéristiques de la relation entre croissance et environnement. Puis, nous appréhendons la question indissociable de la performance des instruments de contrôle de la pollution.

Dans un premier temps, nous faisons le lien entre deux pans de la littérature *a priori* disjoints. La première catégorie de travaux emprunte les outils de la théorie de la croissance afin de déterminer les facteurs explicatifs de l'émergence de sentiers de croissance ayant les propriétés qualitatives de la courbe de Kuznets environnementale (CKE). Typiquement, dans ces études, les mécanismes en jeu sont des changements de régime qui peuvent concerner des activités de dépollution ou bien encore le secteur de production avec l'adoption de technologies plus ou moins polluantes (John et Pecchenino [1994], Selden et Song [1995] ou Stokey [1998]). La seconde littérature d'intérêt se compose de contributions qui s'efforcent, à partir de modèles de contrôle optimal[17], de mesurer les répercussions sur la prise de décision et les propriétés de l'équilibre d'une modélisation plus fine, et plus conforme à l'évidence empirique, de la loi d'évolution de la pollution. Le principal attrait de ces études est ainsi de rompre avec l'approche retenue systématiquement dans les travaux qui introduisent une dynamique de la pollution et qui consiste à supposer que le taux d'assimilation de la pollution par la nature est exponentiel constant. L'apport de cette littérature réside au contraire dans la prise en compte de la possible irréversibilité des dommages occasionnés par l'homme à l'environnement.

Le choix de mettre en balance les notions de CKE et d'irréversibilité de la pollution nous a été dicté par la mise en garde de Dasgupta et Mäler [2002]. Selon ces auteurs, considérer que la CKE témoigne en faveur de la légitimation d'une croissance à tout rompre, puisque de toute façon il sera toujours possible de faire marche arrière du point de vue des dégradations causées à l'environnement, est une vision dangereuse dès qu'on reconnaît la potentielle irréversibilité des dommages environnementaux.

Dans le second chapitre, notre volonté est précisément d'isoler les raisons pour lesquelles l'irréversibilité de la pollution est susceptible de remettre en cause l'émergence de la CKE. Pour ce faire, nous proposons un modèle à générations imbriquées où la dynamique de la pollution exhibe le phénomène d'irréversibilité : au delà d'un certain niveau de pollution, la nature n'est plus capable d'assimiler la pollution. La justification du choix d'un modèle à générations imbriquées s'explique par l'omniprésence de la dimension intergénérationnelle dans les problèmes liés à la pollution. Ce constat est

[17] voir notamment Forster [1975] et, plus récemment, Cesar et de Zeeuw [1994], Tahvonen et Withagen [1996] ou Chevé [2000] dont l'étude présente la particularité d'être menée dans un modèle de croissance endogène.

d'autant plus vrai dans notre cadre d'analyse que les décisions des générations présentes, du fait de l'irréversibilité, font courir le risque aux générations futures de subir les conséquences d'un environnement irrémédiablement dégradé.

Notre analyse a permis de mettre en lumière les résultats suivants. Introduire l'irréversibilité dans un modèle de croissance implique que le développement économique, en l'absence de contrôle de la pollution (produit fatal de l'activité), peut entraîner le dépassement du niveau critique de pollution au delà duquel la nature n'est plus capable de se régénérer. Dès lors, une fois franchi le seuil d'irréversibilité, l'économie polluante se révèle incapable, par ses propres moyens, de faire marche arrière. Les agents sont contraints de consacrer une part toujours plus grande de leurs ressources afin de lutter contre la pollution et sacrifient, en conséquence, l'épargne en capital physique. Mais, cet effort se révèle insuffisant et, l'économie converge finalement vers un état de long terme ayant les caractéristiques d'une trappe de pauvreté à la fois économique et écologique. De plus, nous constatons que le sentier de croissance menant vers cette trappe a l'allure d'une CKE dégénérée.

Ainsi, il est possible d'avoir deux niveaux de lecture de nos résultats. D'abord, cette étude participe à la littérature qui se focalise sur les causes de l'apparition de trappes de pauvreté (voir Azariadis et Stachurski [2005] pour un survol). Ici, l'existence d'une trappe découle de l'effet de seuil opérant au niveau de la capacité naturelle d'assimilation de la pollution. Le dépassement du seuil d'irréversibilité provoque le basculement d'un régime dynamique vers un autre et se traduit par la possible convergence vers une trappe. Ensuite, nous vérifions l'intuition selon laquelle la CKE n'est plus forcément la règle quand on tient compte de l'irréversibilité. Dans notre modèle, il se produit bien un changement de régime relatif à l'activité de dépollution. La première phase de développement, pour un niveau de capital bas et une qualité de l'environnement élevée, est d'ailleurs assez conforme à celle repérée par John et Pecchenino [1994] : les agents n'ont pas suffisamment d'incitations à dépolluer et la croissance s'accompagne d'une dégradation de l'environnement. Toutefois, contrairement à leur étude, il apparaît que l'engagement dans une activité de dépollution n'est pas une condition suffisante pour obtenir une relation croissante entre capital et environnement dans la seconde phase. La raison en est que le passif environnemental accumulé durant les premières étapes du développement prédispose à l'effondrement de la qualité de l'environnement qui condamne, en retour, l'économie à connaître une phase de récession et d'appauvrissement.

Dans un second temps, les conclusions du chapitre 2 nous amènent à reconsidérer le rôle de la politique environnementale et sa capacité, au delà de la mission stricte du contrôle des activités polluantes, à conduire l'économie vers un sentier de croissance durable. En préalable à l'analyse, nous avons dû trancher quant au choix de l'instrument de régulation sur lequel baser notre exposé : taxe sur les émissions ou permis de pollution. Compte tenu de l'intérêt grandissant, aussi bien dans les sphères politique qu'académique, pour les permis à polluer, notre choix s'est logiquement porté sur cet instrument.

Dans le chapitre 3, nous nous posons d'abord la question de savoir si une régulation de la pollution par les permis est susceptible de protéger l'économie de l'accession, à long terme, à une trappe de pauvreté. La question sous-jacente étant : quelles recommandations doit-on formuler à l'encontre de cet instrument afin de garantir sa performance ?

A partir d'un cadre d'analyse formellement identique à celui du second chapitre, à l'exception du fait que ce sont les firmes et non plus les ménages qui sont responsables des émissions polluantes, nous retrouvons d'abord un résultat assez proche du précédent. Nous montrons l'existence d'équilibres multiples dont certains s'apparentent *a priori* à des trappes de pauvreté. Toutefois, il apparaît que la manipulation de l'instrument de régulation permet d'exclure la convergence de l'économie vers un tel état. Plus précisément, imposer le quota le plus bas possible au delà d'un niveau critique déterminé assure non seulement que l'économie ne pourra pas se stabiliser à hauteur d'une trappe stationnaire mais aussi, qu'elle ne sera pas happée, au cours de son processus de développement, par une trappe asymptotique se manifestant par une érosion continue des ressources financières et environnementales.

Forts de ce résultat, nous cherchons ensuite à mesurer les répercussions d'une réforme de la politique environnementale sur les variables macroéconomiques et la croissance (conformément aux travaux apparentés de Bovenberg et Smulders [1995], [1996] ou Ono [2002], [2003]). L'analyse révèle alors que l'impact d'un renforcement du système de permis (c'est-à-dire d'une baisse du quota global d'émission) varie selon le type d'équilibre considéré. Lorsque, à l'équilibre, seul l'instrument permis est opérant, la baisse du quota constitue un frein à l'accumulation du capital puisqu'elle implique, toutes choses égales par ailleurs, une diminution du revenu global des agents défavorable à l'épargne en capital physique. Quand les agents ont également l'opportunité de s'engager dans une activité de dépollution, les conséquences du renforcement sont moins définitives. En particulier, si l'économie se situe, avant la réforme, en un équilibre haut (riche et peu pollué), alors l'effet revenu négatif, inhérent à la baisse du quota, est plus que compensé par un effet de substitution. Celui-ci joue par le biais de l'effet de la réduction des émissions sur la contrainte financière, les agents ayant relativement moins de ressources à consacrer à la dépollution au profit de l'épargne. Finalement la réforme profite doublement à l'économie qui atteint un état de long terme plus riche et moins pollué.

En conclusion de ce chapitre, nous avons démontré, dans un cadre théorique, qu'une régulation par les permis constituait une solution au problème posé par l'irréversibilité de la pollution et ses conséquences, à savoir, la convergence vers une trappe de pauvreté. De plus, nous apportons un démenti à tous ceux qui s'engagent à reculons dans la lutte contre la pollution, sous le prétexte que cette politique pénaliserait trop leur croissance, en soulignant qu'une réforme de la politique environnementale peut procurer un double dividende.

La dernière partie de cet exposé est toujours consacrée à la question de savoir si l'instauration d'un marché de permis à polluer est une politique performante et efficace mais, cette fois-ci, nous nous plaçons dans une optique de maximisation du bien-être. Depuis l'avènement du système alliant la fixation d'un effort de dépollution à la création d'un marché de permis comme l'instrument du contrôle international de la pollution, plusieurs études ont soulevé le problème de la définition de la norme initiale de pollution. Yu [2005] montre, par exemple, que le processus de décision aboutissant à la fixation du quota global d'émission peut être "parasité" par l'action de groupes de pression (lobbies écologistes et plus sûrement industriels) et, conduit à des choix sous-optimaux. Reconnaître cette éventualité oblige inévitablement à tempérer les conclusions des travaux qui, dans le cadre de modèles à générations imbriquées, se focalisent sur les modalités d'une régulation par les permis (Beltratti [1995b], Jouvet, Michel et Vidal [2002a] ou Jouvet, Michel et Rotillon [2005]). En effet, ces contributions démontrent, sous certaines conditions, que le recours à l'instrument permis peut permettre à l'économie décentralisée d'atteindre l'optimum social. Mais, elles ignorent précisément la potentielle inadéquation entre le quota imposé à l'économie et son propre besoin de pollution.

Dans le quatrième chapitre, nous nous focalisons sur l'analyse de ce problème délicat. Afin de ne pas cumuler les difficultés, le choix est fait de laisser de côté nos préoccupations relatives à l'irréversibilité de la pollution et de revenir à l'hypothèse d'une assimilation à taux constant des polluants. Toutefois, nous considérons toujours un modèle à générations imbriquées dans lequel les émissions polluantes des firmes sont régulées par un système de permis. Partant du principe que l'économie se voit imposer un quota d'émission exogène qui n'a aucune raison de correspondre à sa cible de pollution (définie par l'optimum social), l'enjeu de cette étude est de répondre à la question suivante : par quels moyens est-il possible de dépasser la rigidité imposée par le caractère exogène du quota et même de pallier l'inefficacité induite par cette politique ?

Dans le cas particulier où la politique de quota est trop "laxiste", notre contribution consiste à montrer qu'une solution peut être apportée en conférant aux ménages un rôle d'acteur sur le marché des permis. Leur participation au marché se justifie par le fait que les permis constituent un actif financier dont la propriété procure à ses détenteurs un revenu, au même titre que l'épargne en capital physique. Surtout, l'acquisition de permis par les ménages est un moyen de repousser l'utilisation, dans le secteur de production, d'une partie du stock dont est dotée l'économie à chaque période. L'achat de permis pour un motif d'épargne n'est pas pour autant la garantie d'un niveau d'émission optimal dans la mesure où les ménages perçoivent la pollution comme une externalité. Dès lors, nous supposons la mise en place d'une agence de gestion de la dotation en permis de l'économie. En choisissant le montant de permis à épargner pour le compte des ménages, elle procède finalement à une répartition du quota global entre les deux types de demandeurs, firmes et ménages, qui se base sur les répercussions environnementales de l'usage qu'ils en ont : pollution immédiate contre pollution différée. Même si le choix de l'agence ne s'identifie pas à la condition d'optimalité pour le niveau d'émission, nous montrons qu'il est possible, grâce au recours à l'instrument de redistribution de la rente environnementale (procurée par la vente de permis aux firmes), de corriger sa décision afin de décentraliser la règle d'or "verte" à l'équilibre stationnaire.

Avant de clore cet exposé, nous mettons l'accent sur plusieurs pistes de recherche constituant des prolongements directs des travaux présentés dans la thèse.

La première série de réflexions porte sur des développements autour de la notion d'irréversibilité.

Tout d'abord, un prolongement naturel du cadre d'analyse proposé dans le second chapitre serait d'introduire les conditions requises pour la croissance endogène. A la manière de Michel [1993] ou d'Ono [2003] (pour des modèles à générations imbriquées), nous pouvons supposer l'existence d'un effet d'apprentissage *à la* Arrow [1962] opérant dans le secteur de production et se manifestant par des rendements d'échelle constants au niveau social. A partir de ce modèle simple, il convient de répondre à la question suivante : la croissance endogène est-elle possible en présence d'irréversibilité de la pollution ? Etant donné le risque d'irréversibilité, la pression exercée par les dommages environnementaux a de fortes chances de constituer une limite à la croissance. Il est également intéressant de "retourner" cette interrogation pour se demander si les conditions d'une croissance soutenue sont susceptibles, en facilitant l'accumulation de richesses donc l'augmentation des ressources disponibles pour combattre la pollution, d'empêcher l'économie d'être piégée dans une trappe.

Ensuite, nous avons montré que l'effet de seuil affectant le processus de régénération de la nature expliquait l'émergence de trappes de pauvreté. Nous pouvons ajouter d'autres types de "discontinuités" dans la modélisation afin de savoir si la propriété d'existence de trappe s'en trouve renforcée ou, au contraire, atténuée. Notre attention porte plus précisément sur l'activité de dépollution qui, jusqu'à présent, a simplement été formulée comme une fonction linéaire, à rendements constants, de la dépense. L'idée serait de considérer plutôt l'existence d'un secteur de dépollution à part entière, utilisant les facteurs capital et/ou travail (ce qui suppose notamment d'étudier un problème avec offre de travail endogène), soumis lui aussi à une externalité de seuil. En s'inspirant des travaux d'Azariadis et Drazen [1990] ou Xepapadeas [1997], la technologie de dépollution pourrait être à rendements décroissants en deçà d'un certain niveau d'investissement puis à rendements constants voire croissants au delà. Notons que les préférences sont aussi potentiellement sujettes à des discontinuités dès que l'on reconnaît l'existence d'un niveau de consommation de subsistance ou encore, à la manière de Tahvonen et Salo [1996], d'une fonction de dommage convexe-concave (le dommage causé par la pollution étant alors supposé borné).

Enfin, dans la thèse, nous nous sommes essentiellement focalisés sur les problèmes liés à la pollution. Cependant, une approche particulièrement intéressante consiste à transformer le problème du chapitre 2 avec irréversibilité de la pollution en un problème de gestion d'une ressource naturelle renouvelable présentant un risque d'extinction. Pour ce faire, il est nécessaire de substituer à la fonction d'assimilation de la pollution une loi de reproduction de la ressource exhibant un seuil critique en deçà duquel l'espèce serait vouée à disparaître (voir l'ouvrage de référence de Clark [1990] et, plus précisément, le premier chapitre sur les lois de croissance des ressources et le concept de *depensation*). Cette ressource peut être appréhendée en tant qu'input de production et éventuellement comme argument des préférences. Dans ce contexte, nous chercherons d'abord à savoir si une exploitation non contrôlée peut conduire à l'extinction de la ressource et à l'apparition de trappes. Notre préoccupation est proche de celle de Clark [1973] mais, les effets d'équilibre général sont susceptibles d'apporter des résultats nouveaux. En cas de réponse affirmative à la première question, il sera ensuite temps d'envisager quelles sont les politiques publiques capables de promouvoir sa conservation.

D'autres prolongements de nos recherches se rapportent plus particulièrement au volet politique environnementale de la thèse.

Dans le troisième chapitre, nous abordons la question de la capacité de l'instrument permis à prémunir l'économie polluante contre la convergence vers une trappe puis, nous mesurons les effets d'une réforme du système de permis sur les variables macroéconomiques. Une approche alternative réside dans l'étude du problème de croissance optimale. Cette analyse représente déjà un défi technique car peu de travaux, à notre connaissance, traitent de programmes d'optimisation, en temps discret, incorporant des non convexités. Au delà de cette considération, une telle étude devrait nous permettre de savoir s'il est optimal, dans une optique de maximisation du bien-être, de laisser l'environnement se dégrader perpétuellement. La réponse à cette question dépendra notamment de la manière dont sont valorisées les générations futures, leur poids dans l'objectif social étant décrit par l'importance du facteur d'actualisation. Si, à l'optimum, l'environnement est sauvegardé (rien ne garantit *a priori* l'unicité de la solution optimale), alors il faudra également déterminer quels types d'instruments de politique économique peuvent être employés pour orienter l'économie sur la voie de la croissance durable.

A la manière des contributions successives d'Ono [2002] puis [2003], une extension directe du chapitre 3 est de procéder à une analyse similaire à partir de l'instrument de la taxe. La mise en perspective des résultats des deux études, en supposant que nous obtenions des conclusions différentes, est un moyen de comparer les performances respectives des deux outils de régulation de la pollution que sont la taxe sur les émissions et les permis à polluer et, de participer au débat sur la supériorité de l'un ou l'autre de ces instruments de marché.

Concernant les développements du dernier chapitre, nous pouvons en dénombrer au moins deux.

Le premier a trait à une limite de notre étude. Pour aborder le problème inhérent à la rigidité imposée par un quota exogène, nous avons restreint notre approche à une analyse stationnaire. Or, l'aspect dynamique est pourtant central dès que l'on évoque le problème du contrôle de la pollution. Dès lors, un prolongement de ce chapitre consiste précisément à enrichir l'analyse dynamique par l'introduction de mécanismes de flexibilité comme, par exemple, la possibilité de stockage ou d'emprunt de permis. Le principe est de permettre à l'économie de faire fluctuer, à chaque période, son niveau d'émission de part et d'autre du quota exogène et ce, conformément à ses propres objectifs (tout en respectant éventuellement une contrainte globale sur les émissions, sur l'horizon de décision).

La seconde extension porte sur le comportement des agents. Supposer que les agents prennent la pollution comme une donnée nous a obligé à considérer l'existence d'une agence, sorte de planificateur bienveillant, chargée de la coordination de leurs décisions en matière d'achat de permis à polluer. Une approche différente réside dans la correction de la "myopie" des agents. L'idée serait de reconnaître que les agents intègrent, au moins partiellement, l'effet de leur décision sur la pollution. Bien évidemment, nous devrions être logiquement confrontés à un problème de sous contribution au bien public car les ménages n'ont *a priori* aucune raison de tenir compte des répercussions de l'achat de permis aussi bien sur leurs contemporains que sur les générations futures. Toutefois, dans ce contexte, nous pourrions éviter de recourir à l'agence et, au contraire, nous concentrer sur l'étude des instruments susceptibles d'influencer les choix des agents dans le sens de l'optimalité. Il est possible d'envisager une solution passant par la différenciation des rendements procurés par les deux supports de l'épargne avec, par exemple, une taxe sur le rendement du capital ou une subvention à l'achat de permis, la finalité étant d'accroître l'incitation des ménages à acquérir des permis. Nous pouvons également compléter l'étude en formulant l'hypothèse d'agents altruistes. Même si Jouvet, Michel et Vidal [2000] ont montré que l'altruisme n'était pas le remède à toutes les inefficacités de l'équilibre, il implique malgré tout une meilleure prise en compte des externalités intergénérationnelles.

Pour conclure, nous avons noté, dans la revue de littérature, qu'aucun des travaux présentés ne considère simultanément les deux facteurs principaux à l'origine de la pollution : la production et la consommation. Or, pour l'exemple des émissions de gaz à effet de serre, si les rejets de polluants par les industries concernées sont importants, la part des émissions imputable à la consommation des ménages (pour cause de déplacement, de chauffage...) est loin d'être négligeable. Par conséquent, notre souhait est de développer un cadre d'analyse permettant d'intégrer simultanément ces deux sources de pollution. Baser notre étude sur un modèle à un seul secteur n'aurait pas grand intérêt puisqu'il n'y a formellement aucune différence entre consommation et production. L'originalité serait plutôt d'adapter le modèle à générations imbriquées à deux secteurs (voir notamment les contributions de Galor [1992] et Venditti [2005]) à nos préoccupations environnementales. Cette approche est sans nul doute un moyen de dissocier la pollution provenant de la consommation de celle due à la production : la production du bien de consommation pouvant être, par exemple, non polluante à la différence de la consommation (une illustration est donnée par le rejet d'ordures ménagères) et de la production du bien d'investissement. Dans ce cadre d'étude, il conviendra de discuter des instruments de politique les plus à même de corriger les externalités environnementales. Il faudra notamment se poser la question de savoir s'il est préférable de soumettre les firmes et les ménages au même régime de régulation (par l'obligation d'acheter des permis de pollution) ou bien, au contraire, s'il est possible de procéder à un traitement différencié avec la combinaison de plusieurs instruments (taxe et permis).

Bibliographie

Bibliographie

[1] Allais, M., 1947, *Economie et Intérêt*, Paris, Imprimerie Nationale.

[2] Aghion, P. et P. Howitt, 1992, "A model of growth through creative destruction", *Econometrica*, vol. 60, p. 323-351.

[3] Aghion, P. et P. Howitt, 1998, *Endogenous Growth Theory*, chap. 4, MIT Press, Cambridge, MA.

[4] Andreoni, J. et A. Levinson, 2001, "The simple analytics of the environmental Kuznets Curve", *Journal of Public Economics*, vol. 80, p. 269-286.

[5] Arrow, K., 1962, "The Economic Implications of Learning by doing", *Review of Economic Studies*, vol. 80, p. 155-173.

[6] Arrow, K., B. Brolin, R. Costanza, P. Dasgupta, C. Folke, C.S Holling, B-O Janson, S. Levin, K-G Mäler, C. Perrings et D. Pimentel, 1995, "Economic growth, carrying capacity and the environment", *Ecological Economics*, vol. 15, p. 91-95.

[7] Ayong le Kama, A., 2001, "Substainable Growth, Renewable Resources and Pollution", *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 25, p. 1911-1918.

[8] Azariadis, C. et A. Drazen, 1990, "Threshold externalities in economic development", *The Quaterly Journal of Economics*, vol. 105, p. 501-526.

[9] Azariadis, C. et J. Stachurski, 2005, "Poverty Traps", dans *Handbook of Economic Growth*, chap. 5, vol.1, p. 294-384.

[10] Barro, R.J. , 1974, "Are Government Bonds Net Wealth ?", *Journal of Political Economy*, vol. 93, p. 223-247.

[11] Barro, R., 1990, "Government Spending in a Simple Model of Endogenous Growth", *Journal of Political Economy*, vol. 98, p. 103-125.

[12] Bartlett, B., 1994, "The high cost of turning green", *Wall Street Journal* (14 septembre), p. 18.

[13] Baumol W.J., et W.E Oates, 1988, *The Theory of Environmental Policy*, Cambridge University Press, 2^e édition.

[14] Becker, R.A., 1982, "Intergenerational equity : the capital-environment tradeoff", *Journal of environmental Economics and Management*, vol. 9, p. 165-185.

[15] Beckerman, W., 1992, "Economic growth and the environment : Whose Growth ? Whose Environment ?", *World Development*, vol. 20, p. 481-496.

[16] Beltratti, A., 1995a, "Growth with Natural and Environmental Resources", document de travail *Fondazione Eni E. Mattei*, no.58.95.

[17] Beltratti, A., 1995b, "Emissions permits in a dynamic model with overlapping generations", *Nota di Lavoro* 4395.

[18] Beltratti, A., G. Chichiliniski et G. Heal, 1995, "Substainable growth and the green golden rule", *Economic Letters*, vol. 49, p. 175-179.

[19] Blanchard O.J et S. Fisher, 1989, *Lectures on Macroeconomics*, MIT Press.

[20] Bohm, H. et R. Deacon, 2000, "Ownership risk, investment, and use of natural resources", *American Economic Review*, vol. 90, p. 526-549.

[21] Bovenberg., A. et B.J. Heijdra, 1998, "Environmental tax policy and intergenerational distribution", *Journal of Public Economics*, vol. 67, p. 1-24.

[22] Bovenberg., A. et R. de Mooij, 1997, "Environmental tax reform and endogenous growth", *Journal of Public Economics*, vol. 63, p. 207-237.

[23] Bovenberg, A. et S. Smulders, 1995, "Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-sector endogenous growth model", *Journal of Public Economics*, vol. 57, p. 369-391.

[24] Bovenberg, A. et S. Smulders, 1996, "Transitional Impacts of Environmental Policy in an Endogenous Growth Model", *International Economic Review*, vol. 37, no. 4, p. 861-893.

[25] Brock, W., 1977, "A polluted golden age", dans *Economics of Natural and Environmental Resources*, Smith V. eds, Gordon and Breach.

[26] Brock, W. et M. Taylor, 2004, "Economic growth and the environment : a review of theory and empirics", *NBER working paper series*, no. 10854.

[27] Carson, R.T., Y. Jeon et R. McCubbin, 1997, "The relationship between air pollution emissions and income : US data", *Environment and Development Economics*, vol. 2, p. 433-450.

[28] Cass, D., 1965, "Optimum growth in an aggregative model of capital accumulation", *Review of Economic Study*, vol. 32, p. 233-240.

[29] Cesar, H. et A. de Zeeuw, 1994, "Substainability and the greenhouse effect : Robustness analysis of the assimilation function", dans *Control and Game Theoretical Models of the Environment*, J. Filar et C. Carraro Eds, Birkhäuser, Boston.

[30] Chevé, M., 2000, "Irreversibility of Pollution Accumulation", *Environmental and Resource Economics*, vol. 16, p. 93-104.

[31] Chevé, M. et K. Schubert, 2002, "La croissance endogène d'une économie polluante : Durabilité économique versus durabilité écologique", *Annales d'Economie et de Statistique*, no. 65, p. 117-136.

[32] Chichilnisky, G., 1994, "North-South Trade and the Global Environment", *American Economic Review*, vol. 84, p. 851-874.

[33] Clark, C., 1971, "Economically optimal policies for the utilization of biologically renewable resources", *Mathematical Biosciences*, vol. 12, p. 245-260.

[34] Clark, C., 1973, "Profit maximization and the extinction of animal species", *Journal of Political Economics*, vol. 81, p. 950-961.

[35] Clark, C., 1990, "Mathematical Bioeconomics : The Optimal Management of Renewable Resources", 2nd Edition, a Wiley-Interscience publication.

[36] Coase, R., 1960, "The Problem of Social Cost", *Journal of Law and Economics*, vol. 3, p. 1-44.

[37] Comolli, P., 1977, "Pollution control in a simplified general equilibrium model with production externalities", *Journal of environmental Economics and Management*, vol. 4, p. 289-304.

[38] Copeland, B. et M. Taylor, 2003, "Trade, growth and the environment", *NBER working papers series*, no. 9823.

[39] Crettez, B., C. Loupias et P. Michel, 1997, "Croissance et modes de propriété des terres", *Annales d'Economie et de Statistique*, no. 48, p.119-146.

[40] Dasgupta, P., 1982, *The Control of Resources*, Basil Blackwell, Oxford.

[41] Dasgupta, P. et G. Heal, 1974, "The Optimal Depletion of Exhaustible Resources", *The Review of Economic Studies*, vol. 41, p. 3-28.

[42] Dasgupta, P. et G. Heal, 1979, *Economic Theory and Exhaustible Resources*, Cambridge University Press.

[43] Dasgupta, P. et K-G Mäler, 2002, "The Economics of Non-Convex Ecosystems : Introduction", *Environmental and Resource Economics*, vol. 26, p. 499-525.

[44] Dasgupta, S., B. Laplante, H. Wang et D. Wheeler, 2002, "Confronting the Environmental Kuznets Curve", *Journal of Economics Perspectives*, vol. 16, no. 1, p. 147-168.

[45] Dawid, H. et M. Kopel, 1997, "On the economically optimal exploitation of a renewable resource : the case of a convex environment and a convex return function", *Journal of Economic Theory*, vol. 76, p. 272-297.

[46] de Bruyn, S., J. van den Bergh et J. Opschoor, 1998, "Economic growth and emissions : reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curve", *Ecological Economics*, vol. 25, p. 191-175.

[47] Dechert, W. et K. Nishimura, 1983, "A complete characterization of optimal growth paths in an aggregated model with non-concave production function", *Journal of Economic Theory*, vol. 31, p. 332-354.

[48] De La Croix D. et P. Michel, 2002, *A Theory of Economic Growth*, Cambridge University Press.

[49] Den Butter, F. et M. Hofkes, 1995 "Substainable Development wtih Extractive and Non- Extractive Use of the Environnement in Production", *Environmental and Resource Economics*, vol. 6, p. 341-358.

[50] Diamond, P.A, 1965, "National Debt in a Neoclassical Growth Model", *American Economic Review*, vol. 55, no. 5, p. 1126-1150.

[51] Dinda, S., 2004, "Environmental Kuznets curve hypothesis : a survey", *Ecological Economics*, vol. 49, p. 431-455.

[52] Elbasha, E. et T. Roe, 1996, "Endogenous Growth : the implications of environmental externalities", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 31, p. 240-268.

[53] Fisher E. et C. van Marrewijk, 1998, "Pollution and economic growth", *The Journal of International Trade and Economic Development*, vol. 7, no. 1, p. 55-69.

[54] Forster B., 1973, "Optimal Capital Accumulation in a Polluted Environment", *Southern Economic Journal*, vol. 39, p. 544-547.

[55] Forster, B., 1975, "Optimal Pollution Control with Nonconstant Exponential Rate of Decay", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 2, p. 1-6.

[56] Fredriksson P.G. et T. Sterner, 2005, "The political economy of refunded emissions payment programs", *Economics Letters*, 87, p. 113-119.

[57] Gale, L. et J. Mendez, 1998, "The empirical relationship between trade, growth and the environment", *International Review of Economics and Finance*, vol. 7, p. 53-61.

[58] Galor, O., 1992, "A Two-Sector Overlapping-Generations Model : a Global Characterization of the Dynamical System", *Econometrica*, vol. 60, p. 1351-1386

[59] Galor, O. et H. Ryder, 1989, "Existence, uniqueness and stability of equilibrium in an overlapping generations model with productive capital", *Journal of Economic Theory*, vol. 49, p. 360-375.

[60] Gradus, R. et S. Smulders, 1993, "The Trade-off between Environmental Care and Long-term Growth : Pollution in three Prototype Growth Models", *Journal of Economics*, vol. 58, p. 25-51.

[61] Grimaud, A., 1999, "Pollution Permits and Sustainable Growth in a Schumpeterian Model", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 38, p. 249-266.

[62] Grimaud, A. et F. Ricci, 2004, "The growth-environment trade-off : horizontal vs vertical innovations", *The ICFAI Journal of Environmental Economics*, vol. 2, p. 7-39.

[63] Grossman, G et E. Helpman, 1991, "Innovation and Growth in the Global Economy", MA : MIT Press, Cambridge.

[64] Grossman, G. et A. Krueger, 1993, "Environmental Impacts of North American Free Trade Agreement", dans *The U.S-Mexico Free Trade Agreement*, P. Garber ed., MA : MIT Press, Cambridge.

[65] Grossman, G. et A. Krueger, 1995, "Economic Growth and the environment", *The Quaterly Journal of Economics*, p. 353-376.

[66] Gruver, G., 1976, "Optimal Investment and Pollution Control in a Neoclassical Growth Context", *Journal of environmental Economics and Management*, vol. 5, p. 165-177.

[67] Hartman, R. et Kwon, O.S, 2005, "Substainable growth and the environmental Kuznets Curve", *Journal of Economic Dynamics and Control,* vol. 29, p. 1701-1736.

[68] Heal, G., 1976, "The relationship between price and extraction cost for a resource with backstop technology", *Bell Journal of Economics*, vol. 7, p. 371-378.

[69] Heal, G., 1982, "The use of common property resources", dans *Explorations in Natural Resources Economics*, Smith V.K et Krutilla J.V eds, Johns Hopkins University Press, Baltimore.

[70] Hilton, F. et A. Levinson, 1998, "Factoring the environmental Kuznets curve : evidence from automative lead emissions", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 35, p. 126-141.

[71] Hoel M., 2005, “The triple inefficiency of uncoordinated environmental policies", *Scandinavian Journal of Economics*, 107, p. 157-173.

[72] Holling, C., 1973, "Resilience and stability of ecological systems", *Review of Ecological System*, vol. 4, p. 1-23.

[73] Holtz-Eakin, D. et T. Selden, 1992, "Stoking the Fires : CO_2 Emissions and Economic Growth", *Journal of Public Economics*, vol. 57, p. 85-101.

[74] Howarth, R., 1991, "Intertemporal equilibria and exhaustible resources : an overlapping generations approach", *Ecological Economics*, vol. 4, p. 237-252.

[75] Howarth, R. et R. Norgaard, 1992, "Environmental Valuation under Substainable Development ", *American Economic Review*, vol. 82, no. 2, p. 473-477.

[76] Howarth, R. et R. Norgaard, 1995, "Intergenerational choices under global environmental change", dans *The Handbook of Environmental Economics*, Blackwell handbooks in economics, p. 111-128.

[77] John, A. et R. Pecchenino, 1994, "An overlapping generations model of growth and the environment", *The Economic Journal*, vol. 104, p. 1393-1410.

[78] John, A., R. Pecchenino, D. Schimmelpfennig, S. Schreft, 1995, "Short lived agents and long-lived environment", *Journal of Public Economics*, vol. 58, p. 127-141.

[79] Jones, L. et R. Manuelli, 2001, "Endogenous Policy Choice : The Case of Pollution anbd Growth", *Review of Economic Dynamics*, vol. 4, p. 369-405.

[80] Jouvet, P-A, P. Michel et J.P Vidal, 2000, "Intergenerational Altruism and the Environment", *Scandinavian Journal of Economics*, vol. 102, p. 135-150.

[81] Jouvet, P-A, P. Michel et J.P Vidal, 2002a, "Droits de propriétés sur l'environnement et accumulation de capital : une perspective coasienne", *Annales d'Economie et Statistiques*, no. 65, p. 137-151.

[82] Jouvet P-A., P. Michel et J.P. Vidal, 2002b, "Effets des permis de pollution sur l'accumulation du capital dans le cadre des modèles à générations imbriquées", *Economie et Prévision*, 156, p. 63-72.

[83] Jouvet, P-A, Michel, P. et G. Rotillon, 2005, "Optimal Growth with Pollution : How to use Pollution Permits ?", *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 29, p. 1597-1609.

[84] Jouvet, P-A. et G. Rotillon, 2005, "Ressources renouvelables et quotas d'exploitation dans un modèle à générations imbriquées", *Recherches Economiques de Louvain*, vol. 71, p. 117-130.

[85] Keeler, E., M. Spence et R. Zeckhauser, 1971, "The Optimal Control of Pollution", *Journal of Economic Theory*, vol. 4, 19-34.

[86] Kelly, L., 2003, "On environmental Kuznets curves arising from stock externalities", *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 27, p. 1367-1390.

[87] Kemp, M et N. Long, 1980, "The underexploitation of natural resources : A model with overlapping generations", dans M. Kemp et N. Long, eds., *Exhaustible Resources, Optimality and Trade*, North-Holland, Amsterdam.

[88] Kolstad C.D., 2005, "Piercing the veil of uncertainty in transboundary pollution agreements", *Environmental and Resource Economics*, 31, p. 21-34.

[89] Koopmans, T., 1965, "On the concept of optimal economic growth", dans *Econometric Approach to Development Planning*, North-Holland publishing (Amsterdam), chap. 4, p. 228-287.

[90] Kuznets, P. et P. Simon, 1955, "Economic growth and income inequality", *American Economic Review*, vol. 45, p. 1-28.

[91] Lambrecht, S., P. Michel et J-P Vidal, 2005, "Public pension and growth", *European Economic Review*, vol. 49, p. 1261-1281.

[92] Lewis, T.R. et R. Schmalensee, 1979, "Non-convexity and optimal harvesting strategies for renewable resources", *The Canadian Journal of Economics*, vol. 12, no. 4, p.677-691.

[93] Lieb, C.M, 2004, "The environmental Kuznets Curve and Flow versus Stock Pollution : The Neglect of future Damages", *Environmental and Resource Economics*, vol. 29, p. 483-506.

[94] Lighart, J. et F. Van der Ploeg, 1994, "Pollution, the cost of public funds and endogenous growth", *Economics Letters*, vol. 46, p. 351-361.

[95] Lucas, R., 1988, "On the Mechanics of Economic Development", *Journal of Monetary Economics*, vol. 22, 3-42.

[96] Mäler, K-G., 1974, *Environmental Economics : A theoretical Inquiry*, Johns Hopkins, University Press, Baltimore.

[97] Meadows, D.H, D.L Meadows, J. Rangers et W. Behrens, 1972, *Halte à la croissance : rapport sur les limites de la croissance*, Fayard, Paris.

[98] Michel, P., 1990, "Criticism of the social time-preference hypothesis in optimal growth", CORE discussion paper no. 90.39.

[99] Michel, P., 1993, "Pollution and Growth towards the Ecolgical Paradise", document de travail *Fondazione Eni E. Mattei*, no. 80.93.

[100] Michel, P. et G. Rotillon, 1995, "Disutility of Pollution and Endogenous growth", *Environmental and Resource Economics*, vol. 6, p. 279-300.

[101] Mohtadi, H., 1996, "Environment, growth, and optimal policy design", *Journal of Public Economics*, vol. 63, p. 119-140.

[102] Montgomery, D.W, 1972, "Markets in licenses and efficient pollution control programs", *Journal of Economic Theory*, vol. 5, 395-418.

[103] Mourmouras, A., 1991, "Competitive equilibria and substainable growth in life-cycle model with natural resources", *Scandinavian Journal of Economics*, vol. 93, no. 4, 585-591.

[104] Mourmouras, A., 1993, "Conservationist government policies and intergenerational equity in an overlapping generations model with renewable resources", *Journal of Public Economics*, vol. 51, p. 249-268.

[105] Musu, I., 1995, "Transitional dynamics to optimal sustainable growth", document de travail *Fondazione E. Enrico Mattei*, no. 50.95.

[106] Musu, I. et M. Lines, 1995, "Endogenous Growth and the Environmental Preservation", dans *Environmental Economics*, F. Boero et A. Silberston eds., Mc Millan, Londres.

[107] Nordhaus, W., 1973, "The allocation of energy reserves", *Brooking Papers on Economic Activity*, vol. 3, p. 529-570.

[108] Olson, L. et S. Roy, 1996, "On conservation of Renewable resources with stock-dependent return and non concave production", *Journal of Economic Theory*, vol. 76, p. 272-297.

[109] Ono, T., 1996, "Optimal tax schemes and the environmental externality", *Economics Letters*, vol. 53, p. 283-289.

[110] Ono, T., 2002, "Effects of emission permits on growth and the environment", *Environmental and Resource Economics*, vol. 21, p. 75-87.

[111] Ono, T., 2003, "Environmental Tax Policy and Long-run Economic Growth", *The Japanese Economic Review*, vol. 54, p. 203-217.

[112] Panayotou, T., 1993, "Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development", ILO, Technology and Employment Programme, Geneva.

[113] Paudel, K.P, H. Zapata et D. Susanto, 2005, "An empirical test of environmental Kuznets curve for water pollution", *Environmental and Resource Economics*, 31, p. 325-348.

[114] Perman, R. et D. Stern, 2003, "Evidence from panel unit root and cointegration tests that the environmental Kuznets curve does not exist", *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics.*

[115] Peterman, R., 1980, "Influence of ecosystem structure and perturbation history on recovery process" dans *The Recovery Process in Damaged Ecosystems*, J. Cairns Jr ed., Ann Arbor Science, Michigan.

[116] Phelps, E., 1961, "The golden rule of accumulation : a fable for growthmen", *American Economic Review*, vol. 51, p. 638-643.

[117] Ramsey, F., 1928, "A Mathematical Theory of Saving", *Economic Journal*, p. 534-559.

[118] Rebelo, S., 1991, "Long-Run Policy Analysis and Long-Run Growth", *Journal of Political Economy*, vol. 99, p.500-521.

[119] Romer, P., 1986, "Increasing Returns and Long-Run Growth", *Journal of Political Economy*, vol. 94, no. 5, p. 1002-1035.

[120] Romer, P., 1989, "Capital Accumulation in the Theory of Long-Run Growth", dans *Modern Business Cycle Theory*, R.J Barro (ed.).

[121] Romer, P., 1990, "Endogenous Technological Change", *Journal of Political Economy*, vol. 98, p. 71-102.

[122] Samuelson, P., 1958, "An exact consumption-loan model of interest with or without the social contrivance of money", *Journal of political Economy*, vol. 66, p. 467-482.

[123] Schmalensee, R., T.M Stocker et R.A Judson, 1998, "World carbon dioxyde emissions : 1950-2050", *Review of Economics and Statistics*, vol. 80, p. 15-27.

[124] Schubert, K. et P. Zagamé, 1998, *L'environnement. Une nouvelle dimension de l'analyse économique*, Vuibert, Paris.

[125] Selden, T. et D. Song, 1994, "Environmental Quality and development : is there a Kuznets curve for air pollution emissions", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 27, p.147-162.

[126] Selden, T.M et D. Song, 1995, "Neoclassical Growth, the J curve for Abatement and the Inverted U Curve for Pollution", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 29, p.162-168.

[127] Shafik, N., 1994, "Economic development and environmental quality : An econometric analysis", *Oxford Economic Papers* no. 46, p. 757-773.

[128] Skiba, A.K, 1978, "Optimal growth with a convex-concave production function", *Econometrica*, vol. 46, no. 3, p. 527-539.

[129] Smulders, S. et R. Gradus, 1996, "Pollution Abatement and Long-term Growth", *European Journal of Political Economy*, vol. 12, 505-532.

[130] Solow, R., 1986, "On the intergenerational allocation of nature resources", *Scandinavian journal of Economics*, vol. 88, p. 141-149.

[131] Stern, D., 1998, "Progress on the environmental Kuznets curve ?", *Environment and Development Economics*, vol. 3, p. 173-196.

[132] Stern, D., 2003, "The rise and fall of the environmental Kuznets curve", *Rensselaer working papers,* no. 0302.

[133] Stokey, N., 1998, "Are there limits to growth", *International Economic Rewiew*, vol. 39, p. 1-31.

[134] Suri, V. et D. Chapman, 1998, "Economic growth, trade and energy : implications for the environmental Kuznets curve", *Ecological Economics*, vol. 25, p.195-208.

[135] Tahvonen, O. et J. Kuuluvainen, 1993, "Economic Growth, Pollution ans Renewable Resources", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 24, p.101-118.

[136] Tahvonen, O. et S. Salo, 1996, "Non convexities in optimal pollution accumulation", *European Economic Review*, vol. 45, p. 1379-1398.

[137] Tahvonen, O. et C. Withagen, 1996, "Optimality of irreversible pollution accumulation", *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 20, p. 1775-1795.

[138] Tanguay G.A.,P. Lanoie, J.Moreau, 2004, Environmental policy, public interest and political market, *Public Choice*, 120, p. 1-27.

[139] Thomson, P. et L. Sholm, 1996, "Trade and environmental quality : a review of evidences", *Journal of Environment and Development*, vol. 5, no. 4, p. 363-385.

[140] Toman, M. et C. Withagen, 2000, "Accumulative pollution, "clean technology" and policy design", *Resource and Energy Economics*, vol. 22, p.367-384.

[141] UNFCCC, 2005, "Caring for climate - A guide to the climate change convention and the Kyoto protocol". United Nations Climate Change Secretariat, Bonn, Germany.

[142] Van der Ploeg, F. et C. Withagen, 1991, "Pollution Control and the Ramsey Problem", *Environmental and Resources Economics*, vol. 1, p.215-236.

[143] Venditti, A., 2005, "The Two Sector Overlapping Generations Model : a Simple Formulation", *Research in Economics*, vol. 59, p. 164-188.

[144] Wirl, F., 2003, "Substainable Growth, Renewable Resources and Pollution : Thresholds and Cycles", *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 28, p. 1149-1157.

[145] Withagen, C., 1995, "Pollution, Abatement and Balanced Growth", *Environmental and Resource Economics*, vol. 5, p. 1-8.

[146] World Bank, 1992, *World Bank development report 1992 : Development and the Environment.*

[147] World Commission on Environment and Development (WCED), 1987, *Our Common Future* (rapport Bruntland), Oxford University Press.

[148] Xepapadeas, A., 1997, "Economic Development and Environmental Pollution : Traps and Growth", *Structural Change and Economic Dynamic*, vol. 8, p. 327-350.

[149] Yu, Z.H., 2005, “Environmental protection : A theory of direct and indirect competition for political influence", *Review of Economic Studies*, 72, p. 269-286.

Résumé

Afin d'aborder les problématiques environnementales d'importance, nous recourons au modèle de croissance à générations imbriquées. Notre objectif est d'abord de reconnaître que le processus de régénération de la nature s'épuise avec le franchissement de seuils critiques de dommages. La prise en compte de la potentielle irréversibilité de la pollution implique qu'un développement économique non régulé peut conduire l'économie polluante vers une trappe de pauvreté. De plus, les fondements théoriques de l'émergence de la courbe de Kuznets environnementale sont clairement remis en cause. L'engagement des agents privés dans une activité dépollution se révèle insuffisant pour guider l'économie sur un sentier de croissance durable. Nous démontrons ensuite qu'une régulation par les permis est une politique performante, à condition de respecter des règles précises pour la fixation du quota global d'émission, du point de vue de sa faculté à protéger l'économie de la convergence vers une trappe de pauvreté. Une fois placé dans le contexte d'absence de trappes, nous montrons également que la politique environnementale n'est pas forcément synonyme d'un ralentissement de la croissance, son renforcement pouvant même engendrer un double dividende. Enfin, nous appréhendons le problème posé par la définition du quota d'émission. Le principe consiste à supposer que l'engagement de l'économie dans le contrôle de la pollution se traduit par l'imposition d'un quota exogène. Lorsque la politique est insuffisamment stricte, nous montrons qu'il est possible de dépasser la rigidité imposée par le quota et même d'atteindre l'optimum social par le recours à une politique de segmentation du marché des permis.
Mots clés : croissance, générations imbriquées, irréversibilité de la pollution, trappe de pauvreté, permis de pollution

Abstract

In this study, we deal with topical environmental issues by having recourse to the overlapping generations model of growth. First, our purpose is to recognize that the recovery process of nature is finite and vanishes beyond a critical threshold of damage. Considering the potential irreversibility of pollution implies that the development process can drive the polluting economy to a poverty trap. Moreover, the theoretical explanations of the environmental Kuznets curve are seriously challenged since the private agents' investment in abatement fails to promote sustainable growth. Then, we show that regulating pollution with permits is an effective policy, provided that some precise rules concerning the choice of the global quota on emissions are respected, from the view point of its ability to protect the economy against the convergence toward a poverty trap. Once we have set conditions excluding traps, we also prove that environmental policy does not necessarily mean a slackening in growth. Its reinforcement can even produce a double dividend. Finally, we address the issue of the definition of the emission quota. We assume that the economy's commitment in pollution control goes through the setting of an exogenous quota. When the permits system is too latitudinarian, it is possible to exceed the rigidity imposed by the quota and to achieve the social optimum by implementing a policy consisting in the segmentation of the permits market.
key words : overlapping generations, growth, irreversible pollution, poverty trap, pollution permits