

Mémoire : Modèle de Solow Vert

CHEN Yipeng
LANGLE Maxime
DIAS Perrine

Table des matières

Introduction	2
(A). Problématique étudiée par Brock et Taylor	3
(A0). Le modèle de base	15
(A1). Sentier de Croissance Équilibrée (SCE)	20
(A2). Green Solow et EKC	22
(A3). Rendements décroissants et Dynamique de la transition	27
(B). Modélisation retenue et Validation empirique	39
(B01). Modélisation retenue	39
(B02). Estimation de l'Équation	41
(B1). Validation empirique	48
(B2). Preuve internationale	53
(B3). Fiabilité des résultats	55
(B4). Optimisation et formes fonctionnelles	57
(B5). Apport du Green Solow à la littérature macroéconomique	58
Conclusion générale de l'étude	58
(C). Débat Actuel	61
(C1). Un argument alternatif du Modèle de Solow Vert dans un contexte de l'économie en développement	61
(C2). Faut-il croire à la croissance verte ?	65
(D). Annexe	67
(D1). Taux de croissance	67
(D2). Le modèle de Solow	68
(E). Références	71

Introduction

Il est connu depuis fort longtemps que la croissance économique mue aux travers d'une accumulation du capital finalement prédatrice de l'environnement finissant lui-même par s'autodétruire. Dès lors, il nous est possible de remettre en cause la compatibilité de la croissance économique avec la préservation de l'environnement. En effet, à l'heure actuelle notre croissance ne serait-elle pas confrontée à des divers obstacles tels que la disponibilité des ressources naturelles ou la capacité limite de la planète à absorber les pollutions ? En effet, avec la raréfaction des ressources naturelles et la survenue des crises pétrolières des années 1970, l'économie néoclassique a considéré après les Trente Glorieuses, les biens et services écologiques comme issus des stocks de capital naturel tels que par exemple « la population des poissons dans l'océan qui génère le flux de pêche allant dans le marché » ou encore « les réserves de pétrole dans le sol dont l'exploitation fournit le flux de pétrole à la pompe » (*Daly, 1994*). Le fait d'intégrer le capital naturel dans des modèles de croissance intégrant la logique de Solow permet de déterminer un sentier de croissance appelé soutenabilité faible constituant un choix optimal pour la société. C'est tout l'enjeu de la croissance verte, ce mode de croissance permettant d'échapper à de telles situations en constituant une alternative à la décroissance ou à la stagnation largement dominantes au sein des modèles de croissance historiques. La mise en œuvre de la croissance verte consiste donc à redéployer l'effort d'investissement en intégrant le capital parmi les facteurs de production. Le présent travail consiste en l'étude du modèle dit « Green Solow » générant une relation EKC entre les flux d'émissions polluantes et le PIB per capita ainsi que le stock de qualité environnementale et le revenu per capita. En effet, la courbe de Kuznets environnementale constitue effectivement un sous-produit nécessaire de la convergence vers une trajectoire de croissance durable. Le modèle de Solow vert n'est donc en effet qu'une variante du modèle de Solow initial. Il permet en effet d'intégrer le progrès technique qui joue un rôle prépondérant dans la réduction des émissions polluantes. Nous détaillons ensuite la méthode empirique développée par les auteurs de l'article de référence sur lequel nous appuyons nos propos. La méthode empirique évoquée se lie de manière étroite aux tests de convergence des revenus déjà employés dans la littérature macroéconomique. Ces tests empiriques s'apparentent principalement à des tests de prédictions réalisés à partir de données concernant les pays de l'OCDE. Nous achèverons in fine ce travail en postant un argument alternatif au modèle de Solow Vert dans un contexte de l'économie en développement.

(A). Problématique étudiée par *Brock et Taylor*

La Courbe Environnementale de Kuznets (EKC) et le modèle central de la macroéconomie moderne (le modèle de *Solow*) sont intimement liées. Une fois que nous avons modifié le modèle de *Solow* pour intégrer le progrès technique dans la dépollution, la courbe environnementale de Kuznets est un sous-produit nécessaire de la convergence vers une trajectoire de croissance durable.

Le modèle modifié, que nous appelons le "Green Solow", génère une relation de EKC entre le flux des émissions de pollution et le revenu par habitant, ainsi que le stock de qualité de l'environnement et le revenu par habitant.

Les deux auteurs *Brock et Taylor* expliquent pourquoi les méthodes actuelles de l'estimation d'une Courbe Environnementale de Kuznets sont susceptibles d'échouer chaque fois qu'elle ne tient pas compte de l'hétérogénéité entre les pays soit dans les conditions initiales, soit dans les paramètres profonds.

Ils développent ensuite une méthode empirique alternative étroitement liée aux tests de convergence des revenus employés dans la théorie macroéconomique.

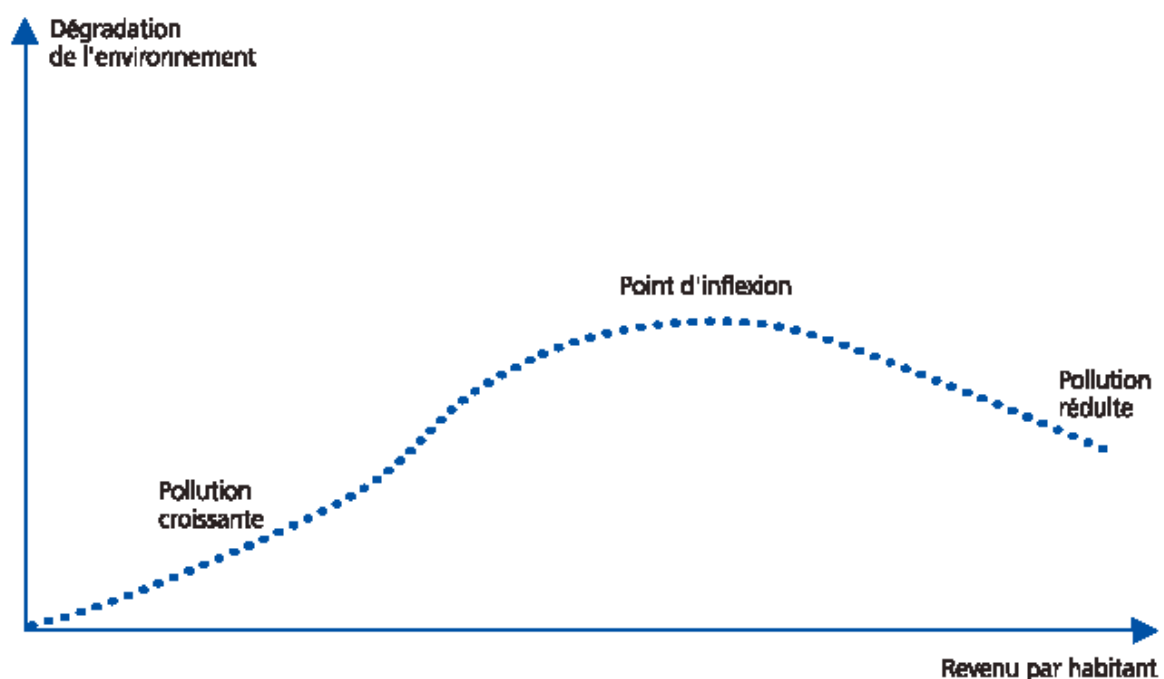
Les tests préliminaires des prévisions du modèle sont étudiés à l'aide des données des pays de l'OCDE.

Avant tout, il nous faut expliquer ce que c'est la

Courbe Environnementale de Kuznets (EKC).

L'enrichissement des populations dans les pays développés s'accompagne généralement d'une demande d'un environnement plus sain. Ce constat a conduit à formuler l'hypothèse suivante :

la croissance serait nocive pour l'environnement dans les premiers stades du développement ; puis, au-delà d'un certain seuil de revenu par habitant, la croissance entraînerait une amélioration de la qualité de l'environnement.



Simon Kuznets en 1955, avait envisagé une corrélation entre la réduction des inégalités de revenu et le niveau du PIB/habitant, selon une même forme de courbe en U inversé. Cela explique l'emploi fréquent dans la littérature économique de l'expression « Courbe Environnementale de Kuznets ». Cette affirmation repose sur l'idée que l'environnement serait un « bien supérieur », c'est-à-dire un bien dont la demande augmente avec le revenu (à l'instar de la santé ou des loisirs).

Brock et Taylor présentent au lecteur un modèle de croissance très simple étroitement lié au modèle avec un secteur de *Solow*.

Ils montrent comment ce modèle modifié génère des prédictions étroitement conformes aux données sur les émissions, les intensités d'émission et les coûts de réduction de la pollution.

Ils utilisent ensuite ce modèle pour dériver une équation d'estimation simple en reliant une mesure de la croissance des émissions aux niveaux d'émission initiaux et à d'autres contrôles tirés de la théorie.

Les tests préliminaires du modèle sont encourageants et bien en accord avec les prédictions théoriques du modèle de « Green Solow ».

Leur travail est lié aux récentes tentatives d'explication de la Courbe Environnementale de Kuznets (EKC) mais diffère des autres contributions en deux façons.

Tout d'abord, ils essaient d'ajuster plus de fonctionnalités des données que la simple EKC et d'utiliser des données sur les coûts de réduction de la pollution et les intensités d'émission afin d'identifier les principales caractéristiques des données qui sont largement incompatibles avec les théories existantes.

Deuxièmement, ils dérivent une équation d'estimation directement à partir de leur théorie.

En faisant ceci, ils fournissent le premier lien rigoureusement développé entre la théorie et les travaux empiriques dans ce domaine.

Les modèles d'effets de seuil ne prédisent aucune politique de pollution sur certaines périodes initiales suivie d'une période de régulation active.

En conséquence, la baisse du ratio (émissions / production) se produit simultanément avec la réduction du niveau global de pollution.

Cette corrélation temporelle est cependant fortement contredite par les données.

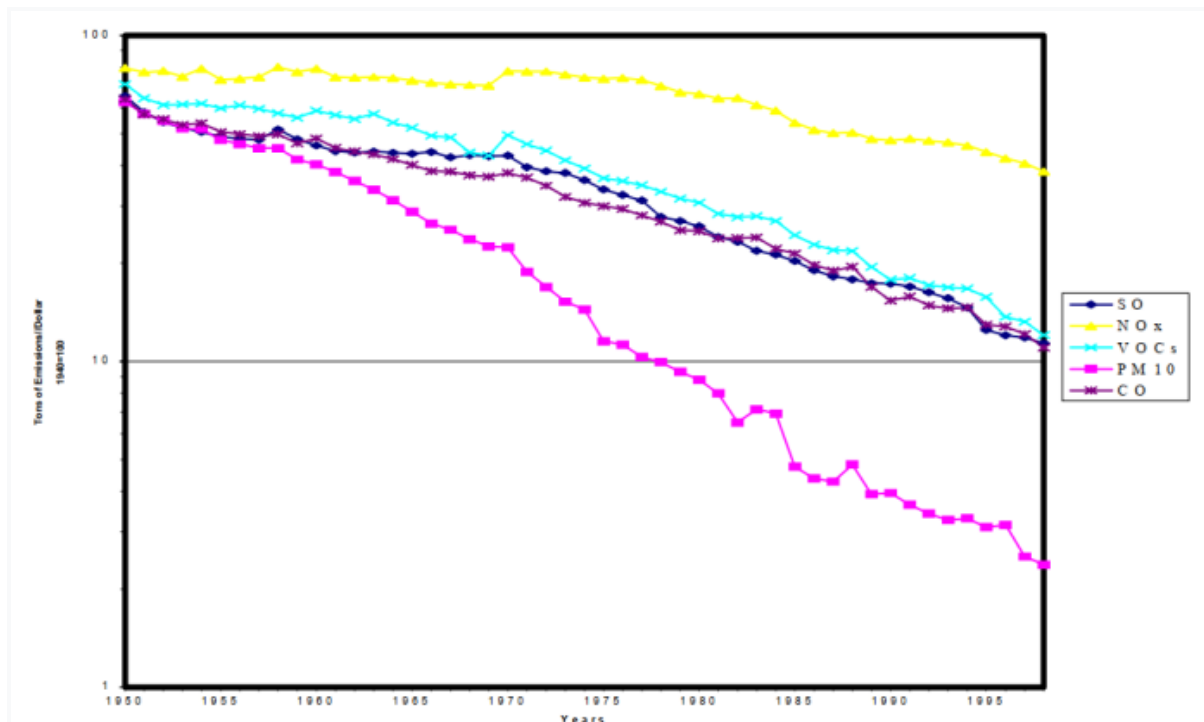


Figure 1: Emission Intensities

Dans la Figure 1, *Brock et Taylor* représentent les données américaines donnant les émissions par dollar de PIB (réel) sur la période de 1950 à 2001. Pour faciliter la lecture, ils ont adopté une échelle logarithmique.

Il existe deux caractéristiques importantes dans la figure.

Le premier est simplement que le rapport (émission / production) est en baisse depuis le début de la période en 1950.

La seconde est que (compte tenu de l'échelle logarithmique des émissions par dollar de production) le taux de déclin en pourcentage a été à peu près constant au cours de la période des années 1950.

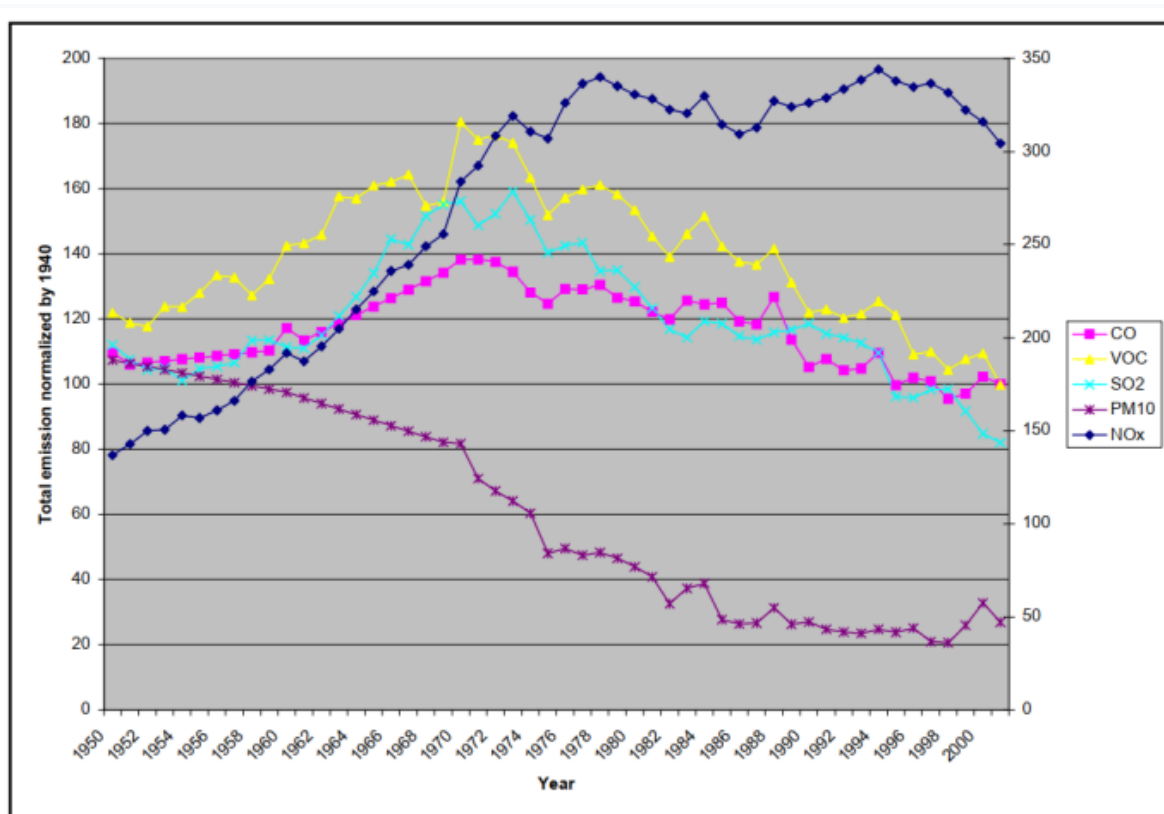


Figure 2: Emission Levels

Dans la Figure 2, *Brock et Taylor* représentent les niveaux d'émission correspondants pour ces mêmes polluants sur la même période.

La Figure 2 montre une tendance générale des émissions à augmenter puis à baisser avec le temps. Le modèle de EKC est visible dans les données pour tous les polluants à l'exception des oxydes d'azote qui peuvent à l'heure actuelle approcher un pic, et les particules qui ont atteint un pic avant la période d'échantillonnage.

Si nous considérons le début des années 1970 comme le début d'une réglementation sérieuse sur la pollution, alors les théories de seuil prédisent une ligne inchangée et donc horizontale pour le ratio (émissions / production) jusqu'au milieu des années 1970, puis une forte baisse de ce ratio qui force les émissions globales à diminuer.

Ce n'est pas ce que montrent les Figures 1 et 2. Les pics dans ces profils de pollution - dans la mesure où ils ont tous culminé - se produisent beaucoup trop tard par rapport à la baisse des intensités d'émission.

Une deuxième caractéristique des données qui est difficile à concilier avec de nombreuses théories est l'ampleur des coûts de réduction de la pollution. Les théories qui reposent sur la montée des revenus qui réduisent les émissions grâce à une politique de pollution plus stricte doivent évaluer des réductions d'émissions très fortes avec des très faibles coûts de réduction de la pollution.

Les théories qui reposent sur le resserrement de la politique environnementale prévoient une augmentation constante des coûts de dépollution, car les émissions par unité de production doivent diminuer plus rapidement que la production globale pour contenir la pollution.

Dans un monde sans progrès technique de la dépollution, cela nécessite des investissements de plus en plus importants dans la gestion de pollution.

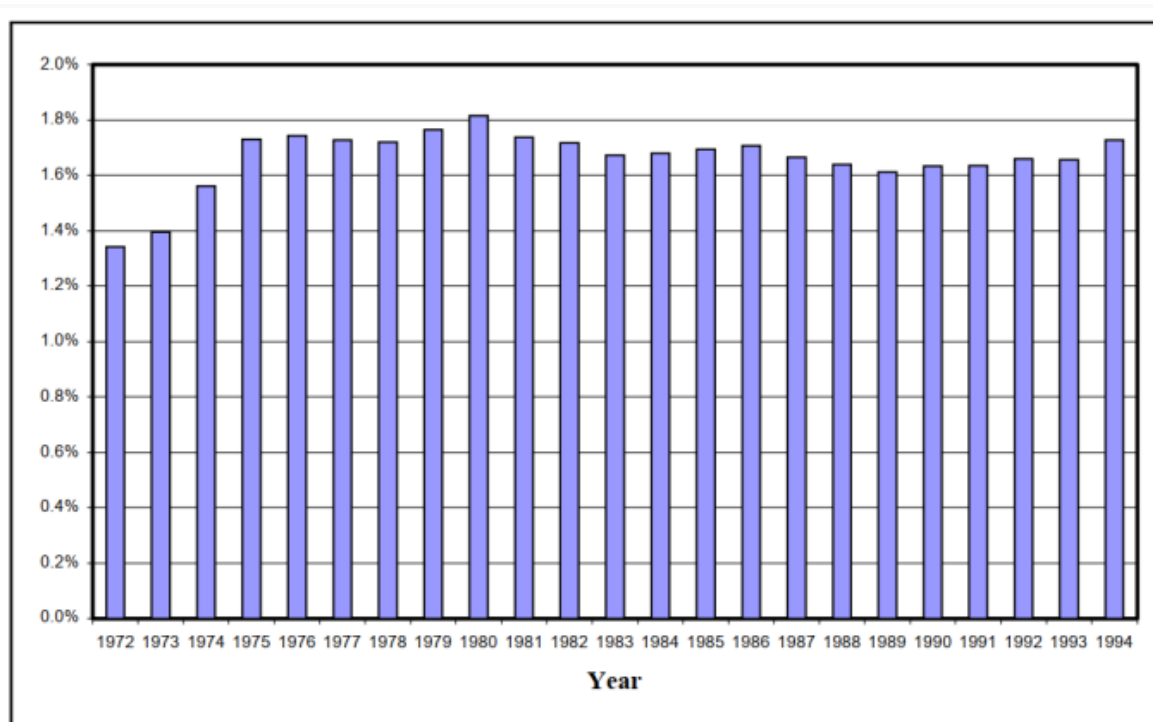


Figure 3: US Abatement Costs/GDP

Dans la Figure 3, *Brock et Taylor* représentent les dépenses des entreprises sur les coûts de réduction de la pollution par dollar de PIB pendant la période 1972-1994.

Comme indiqué, les coûts de réduction de la pollution en tant que fraction du PIB augmentent assez rapidement jusqu'en 1975, puis restent relativement constants. En tant que fraction de la production globale, ces coûts sont faibles. Alternativement, si nous considérons que les coûts de réduction de la pollution sont spécifiquement dirigés vers les six principaux polluants atmosphériques avec l'échelle en fonction de la production américaine réelle, le ratio est ensuite incroyablement petit - environ un demi d'1% du PIB - et est resté ainsi pendant plus de vingt ans.

Les données des autres pays appuient la conclusion générale selon laquelle **les coûts de réduction de la pollution représentent une petite fraction du PIB et montrent au mieux une légère tendance à la hausse.**

Les changements dans la composition de la production vers des biens moins polluants peuvent réduire les émissions à moyen terme, mais à long terme, les dépollutions ne peuvent se produire que si les émissions par unité de production dans les biens les plus propres diminuent.

Cela nous ramène à la question initiale : **Comment réduire les émissions par unité de production sans jamais augmenter les coûts ?**

Pour *Brock et Taylor*, les données de pollution et les travaux empiriques connexes sur **EKC** présentent 3 problèmes qui doivent être résolus par toute théorie réussie.

Le premier problème est de savoir comment concilier les très importantes réductions des intensités d'émissions illustrées à la Figure 1 avec les coûts de réduction de la pollution relativement faibles illustrés à la Figure 3 ?

Le deuxième problème est **EKC**: qu'est-ce qui est responsable de la forme du profil de pollution dans la Figure 2 ?

Le troisième problème provient de la théorie empirique elle-même. Qu'est-ce qui explique la déconnexion actuelle entre les preuves de **EKC** présentes dans les parcelles des données comme la Figure 2, et la difficulté des chercheurs empiriques à estimer les relations de **EKC** ?

Il est maintenant bien connu que les estimations empiriques de EKC et les régressions peuvent varier considérablement selon l'échantillon utilisé et la procédure d'estimation.

Comment donner un sens à la recherche d'une EKC dans les données brutes au niveau des pays montrées dans la Figure 2, et les fragiles résultats empiriques transnationaux qui sont maintenant banales dans la théorie ?

Brock et Taylor montrent que le modèle de "Green Solow" fournit une explication simple des 3 problèmes précédemment mentionnés.

Leur explication commence par les observations dans les Figures 1 et 3. Ils mettent au carré les intensités d'émission en baisse rapide illustrées dans la Figure 1 avec les coûts constants de réduction de la pollution dans la Figure 3 en supposant un progrès technique durable en terme de dépollution.

Pour retenir cette possibilité, ils introduisent le progrès technique exogène dans une fonction de dépollution standard et puis combinent cette fonction de dépollution avec le modèle de *Solow* où le taux d'épargne standard est fixé.

Le "modèle de Solow Vert" résultant génère alors un modèle de revenu par habitant et pollution conforme à la Figure 2 ; C'est-à-dire qu'il génère une EKC.

La logique est simple : le progrès technique durable fait la réduction d'émissions par unité de production tendre vers le bas à un taux constant à la fois dans et hors de l'état stationnaire (comme la Figure 1). Au départ, la croissance initiale rapide du modèle de *Solow* dépasse les progrès de la dépollution pour produire une période des niveaux d'émission initialement croissants.

Les émissions globales augmentent même si les émissions par unité de production diminuent (comme la Figure 2). Cependant, les progrès techniques en terme de dépollution finissent par submerger le ralentissement de la croissance de la production à mesure que l'économie s'approche de son sentier de croissance équilibrée (SCE).

Les émissions globales commencent à diminuer tandis que les émissions par unité de production continuent à baisser. Tout au long du modèle, la mesure des coûts de réduction de la pollution en tant que fraction du PIB est constante (comme la Figure 3).

Brock et Taylor proposent ces caractéristiques du modèle comme explications potentielles des 2 premiers problèmes dans les données.

Un autre modèle de prédiction est que la trajectoire des émissions, le niveau maximal des émissions et le revenu par habitant au maximum des émissions seront généralement spécifiques d'après les différents pays.

Même les pays qui partagent des valeurs de paramètres identiques présenteront des modèles de EKC différents s'ils diffèrent des conditions initiales.

Une hétérogénéité supplémentaire entre les pays est introduite par des différences dans les taux d'épargne, les taux de croissance démographique ou les intensités de dépollution. Ne pas tenir compte de cette hétérogénéité pourrait être responsable des échecs des tests empiriques et de la sensibilité des estimations à l'échantillon.

Brock et Taylor prennent cette caractéristique du modèle comme une explication potentielle du troisième problème - la déconnexion actuelle entre les parcelles de données brutes montrant une EKC au sein des pays, et la fragilité des résultats empiriques transnationaux. Tandis qu'une grande partie des travaux empiriques actuels sur EKC comprennent des contrôles sur l'hétérogénéité transnationale, ces contrôles sont généralement des variables en niveaux telles que la densité de la population, l'ouverture au commerce ou des mesures de la démocratie.

Enfin, pour compléter leur argumentation, *Brock et Taylor* fournissent des preuves empiriques à l'appui de leur approche à partir de sources extérieures à l'ensemble de données qu'ils ont cherché à expliquer.

Puisque leurs travaux théoriques montrent que les profils de EKC ne sont pas uniques, ils se concentrent sur un modèle de prédiction qui tient plus généralement : la convergence dans une mesure d'émissions

par habitant. En empruntant les techniques utilisées dans la théorie macroéconomique sur la convergence des revenus, *Brock et Taylor* obtiennent une simple équation d'estimation linéaire liant la croissance des émissions par habitant sur une période de temps et un ensemble limité de contrôles. Ces contrôles incluent des régresseurs de type Solow de base tels que la croissance démographique et les taux d'épargne, mais ils incluent également une mesure des coûts de réduction de la pollution et un indicateur du progrès technique en terme de dépollution.

Pour démontrer l'utilité potentielle de leur approche, *Brock et Taylor* estiment leur spécification sur les données de l'OCDE.

Les résultats sont encourageants.

Maintenant, nous allons comprendre comment *Brock et Taylor* mettent en place le modèle de base et développent 3 propositions concernant son comportement.

(A0). Le modèle de base

Brock et Taylor développent un modèle de *Solow augmenté* où le progrès technique exogène à la fois dans la production de biens et la dépollution conduit à une croissance continue avec une augmentation de qualité environnementale. Ils développent le modèle en supposant que les taux d'épargne et les intensités de dépollution sont fixés dans le temps.

Ils présentent la spécification la plus simple où les choix d'épargne et les choix de dépollution sont fixés de manière exogène.

L'hypothèse du taux d'épargne fixe est couramment utilisée dans le modèle de *Solow* et est souvent inoffensive ; L'hypothèse d'une intensité de réduction fixe nous aide à démontrer comment les changements d'intensité de réduction n'ont pas besoin de jouer un rôle dans la création d'une EKC.

Ensemble, *Brock et Taylor* rendent le modèle simple et traitable.

Ils considèrent le modèle de *Solow standard* à un secteur

avec un taux d'épargne fixe : s

L'output est produit via un rendement d'échelle constant et une fonction de production strictement concave utilisant le travail efficace et le capital pour produire l'output : Y

Le capital s'accumule via l'épargne et se déprécie au taux : δ

Brock et Taylor supposent que le taux de croissance du progrès technique qui augmente le travail est donné par : g

Tout cela implique que :

$$\begin{aligned} Y &= F(K, BL), \dot{K} = sY - \delta K \\ \dot{L} &= nL, \dot{B} = gB \end{aligned} \tag{1}$$

Avec

B : progrès technique qui augmente le travail

n : taux de croissance de la population

Pour modéliser l'impact de la pollution, *Brock et Taylor* suivent la théorie de *Copeland* (1994) en supposant que chaque unité d'activité économique : F , génère Ω unités de pollution en tant qu'un produit conjoint de l'output.

La quantité de pollution rejetée dans l'atmosphère peut différer de la quantité produite en cas de dépollution. *Brock et Taylor* supposent que la dépollution est un rendement d'échelle constant en terme de l'activité et ils écrivent le montant de la pollution diminuée comme une fonction croissante et strictement concave de l'échelle total de l'activité économique : F , et les efforts de l'économie à la dépollution :

F^A

Si la dépollution au niveau A , supprime les ΩA unités de pollution de la pollution totale créée, ils obtient :

$$\text{pollution emitted} = \text{pollution created} - \text{pollution abated} \quad (2)$$

$$E = \Omega F - \Omega A(F, F^A)$$

$$E = \Omega F [1 - A(1, F^A/F)]$$

$$E = \Omega F a(\theta),$$

$$\text{where } a(\theta) \equiv [1 - A(1, F^A/F)] \text{ and } \theta = F^A/F$$

Où la troisième ligne découle de l'homogénéité linéaire de A ,
et la quatrième ligne est la définition de θ comme la fraction de
l'activité économique consacrée à la dépollution.

En supposant que la fonction de dépollution intensive satisfait $a(0) = 1$
et en notant que $a'(\theta) < 0$ et $a''(\theta) > 0$ par convexité,
le coût de dépollution a un impact marginal positif mais décroissant
sur la réduction de la pollution.

Dans certains cas, *Brock et Taylor* adoptent la forme spécifique :

$$a(\theta) = (1 - \theta)^\varepsilon \quad \text{avec } \varepsilon > 1$$

Premièrement, la relation en (2) montre que les émissions sont
déterminées par l'échelle de l'activité économique : F
et que les techniques de production sont capturées par : $\Omega a(\theta)$

Les techniques peuvent être influencées par des changements dans
l'intensité de la dépollution : θ , ou par le progrès technique qui abaisse
le paramètre : Ω au fil du temps.

Même l'activité de la dépollution elle-même pollue, puisque

$$F^A$$

est inclu dans F .

Deuxièmement, la dépollution utilise des facteurs dans la même proportion que l'output final. Par conséquent, *Brock et Taylor* ont pu penser que la fraction θ du capital et de la main-d'œuvre efficace soit directement affectée à la dépollution avec le reste de fraction $(1 - \theta)$ disponible pour la production de biens de consommation ou d'investissement.

Enfin, il est important de noter qu'une intensité de dépollution fixe : θ , ne correspond pas à une situation de politique environnementale statique ou inexistante. *Brock et Taylor* ont montré que θ reste constant dans le temps si les gouvernements établissent les normes technologiques lentement au fil du temps.

Pour combiner les hypothèses sur la pollution en (2) avec le modèle de *Solow*, *Brock et Taylor* notent qu'une fois que l'on tient compte de la dépollution, l'output disponible pour la consommation ou l'investissement : Y , devient alors : $Y = [1 - \theta]F$

Puisqu'ils souhaitent générer des prévisions à la fois sur la qualité de l'environnement et les émissions, *Brock et Taylor* ont adopté une hypothèse concernant la régénération naturelle. La forme la plus simple a une dissipation exponentielle de la pollution de sorte que le stock de pollution : X est liée au flux des émissions : E selon :

$$\dot{X} = E - \eta X \quad (3)$$

Où $\eta > 0$ est le taux naturel de régénération

et $X = 0$ représente un parfait environnement avec un stock de zéro pollution.

Enfin, pour correspondre aux progrès techniques exogènes du modèle de *Solow* en production de biens augmentant la main-d'oeuvre efficace au taux : g , *Brock et Taylor* supposent un progrès technique exogène en dépollution qui fait diminuer Ω au taux :

$$g^A > 0$$

En mettant ces hypothèses ensemble et en transformant les mesures de la production, du capital et de la pollution en unités intensives, le "modèle de Solow Vert" devient :

$$y = f(k)[1 - \theta] \quad (4)$$

$$\dot{k} = sf(k)[1 - \theta] - [\delta + n + g]k \quad (5)$$

$$e = f(k)\Omega a(\theta) \quad (6)$$

where $k = K/BL$, $y = Y/BL$, $e = E/BL$ and $f(k) = F(k, 1)$.

(A1). Sentier de Croissance Équilibrée (SCE)

En supposant que les conditions d'Inada soient valables pour F ,

puis avec θ fixe en partant de n'importe quel $k(0) > 0$,

l'économie converge vers un k^* unique

comme dans le modèle de *Solow*.

Lorsque l'économie s'approche de son sentier de croissance équilibrée (**SCE**), la production totale, la consommation et le capital croissent tous au même taux : $g + n$ tandis que leurs niveaux par habitant augmentent au taux de : g

En utilisant la notation standard pour la croissance en niveau par habitant, sur le sentier de croissance équilibrée (**SCE**),

Brock et Taylor doivent obtenir l'égalité suivante :

$$g_y = g_k = g_c = g > 0$$

Cependant, un environnement potentiellement en détérioration menace cette existence. Puisque k se rapproche de la constante k^* sur le sentier de croissance équilibrée (**SCE**), *Brock et Taylor* ont pu déduire de (6) que le taux de croissance de l'agrégat des émissions sur le sentier de croissance équilibrée (**SCE**) : G_E , peut être positif ou négatif :

$$G_E = g + n - g_A \quad (7)$$

Les deux premiers termes sur (7) représentent l'effet d'échelle de la croissance sur les émissions lorsque la production globale croît au taux : $g + n$ sur le sentier de croissance équilibrée (**SCE**).

Le terme second est un effet technique créé par le progrès technique en terme de dépollution. En utilisant ces informations et en se basant sur (3), il est facile de voir que la croissance constante dans X sur le sentier de croissance équilibrée (**SCE**) se produit lorsque $G_X = G_E$

En définissant la croissance durable comme un sentier de croissance équilibrée (**SCE**) générant une augmentation de la consommation par habitant et un environnement amélioré, la croissance durable est garantie par :

$$g > 0 \text{ and } g_A > g + n \quad (8)$$

Le progrès technique dans la production des biens est nécessaire pour générer la croissance du revenu par habitant. Le progrès technique en terme de dépollution doit dépasser la croissance de la production globale afin que la pollution diminue et que l'environnement s'améliore.

(A2). Green Solow et EKC

Le "modèle de Solow Vert", bien que simple, génère une explication très convenable pour une grande partie des preuves empiriques reliant les niveaux de revenu à la qualité d'environnement. Malgré le fait que l'intensité de la dépollution est fixée, il n'y a pas d'effets de composition et pas d'économie politique ni des conflits intergénérationnels à résoudre, le "modèle de Solow Vert" produit une trajectoire pour le revenu par habitant et la qualité environnementale qui retrace **la Courbe Environnementale de Kuznets (EKC)**.

Cela est vrai même que nous mesurons la qualité de l'environnement via notre variable de stock : X ou le flux d'émissions : E

Ce résultat est illustré à la Figure 4. Dans la Figure 4, *Brock et Taylor* présentent les trajectoires de deux économies identiques à tous les égards sauf leur allocation à la dépollution : θ

Ils représentent les émissions : E et le stock de pollution : X en même temps. Chaque économie part d'un environnement sain au début et un petit stock initial de capital, $k(0) > 0$.

Une économie distribue 5% de sa production à la dépollution que *Brock et Taylor* appellent le cas de la forte réduction ; L'autre économie est le cas de réduction faible car elle n'alloue que 0.5% de sa production à la dépollution. Les paramètres ont été choisis à des fins d'illustration.

Ils ont pris $f(k)$ pour Cobb-Douglas avec une part du capital de 0.35.

Le revenu par habitant augmente au taux de 1.5% sur le sentier de croissance équilibrée (**SCE**), la population augmente au taux de 1% et le progrès technique de dépollution s'améliore au taux de 3%.

Ces paramètres garantissent qu'une croissance durable est possible.

Le taux d'épargne est de 25%, le taux de dépréciation est de 3.5%, la régénération est fixée à 0.03, ce qui implique un taux de dissipation de X de 3% par unité de temps.

Comme indiqué dans la Figure 4, l'environnement s'aggrave dans un premier temps avec l'augmentation de X et de E

Les émissions commencent à baisser environ 40 ans après.

Le stock de pollution : X commence à baisser environ 90 ans après et l'économie converge vers son sentier de croissance équilibrée (SCE).

En utilisant (7), sur le sentier de croissance équilibrée (SCE), les émissions diminuent au taux de 0.5% par an.

En dehors du sentier de croissance équilibrée (SCE), la croissance des émissions est sûrement positive pendant une longue période.

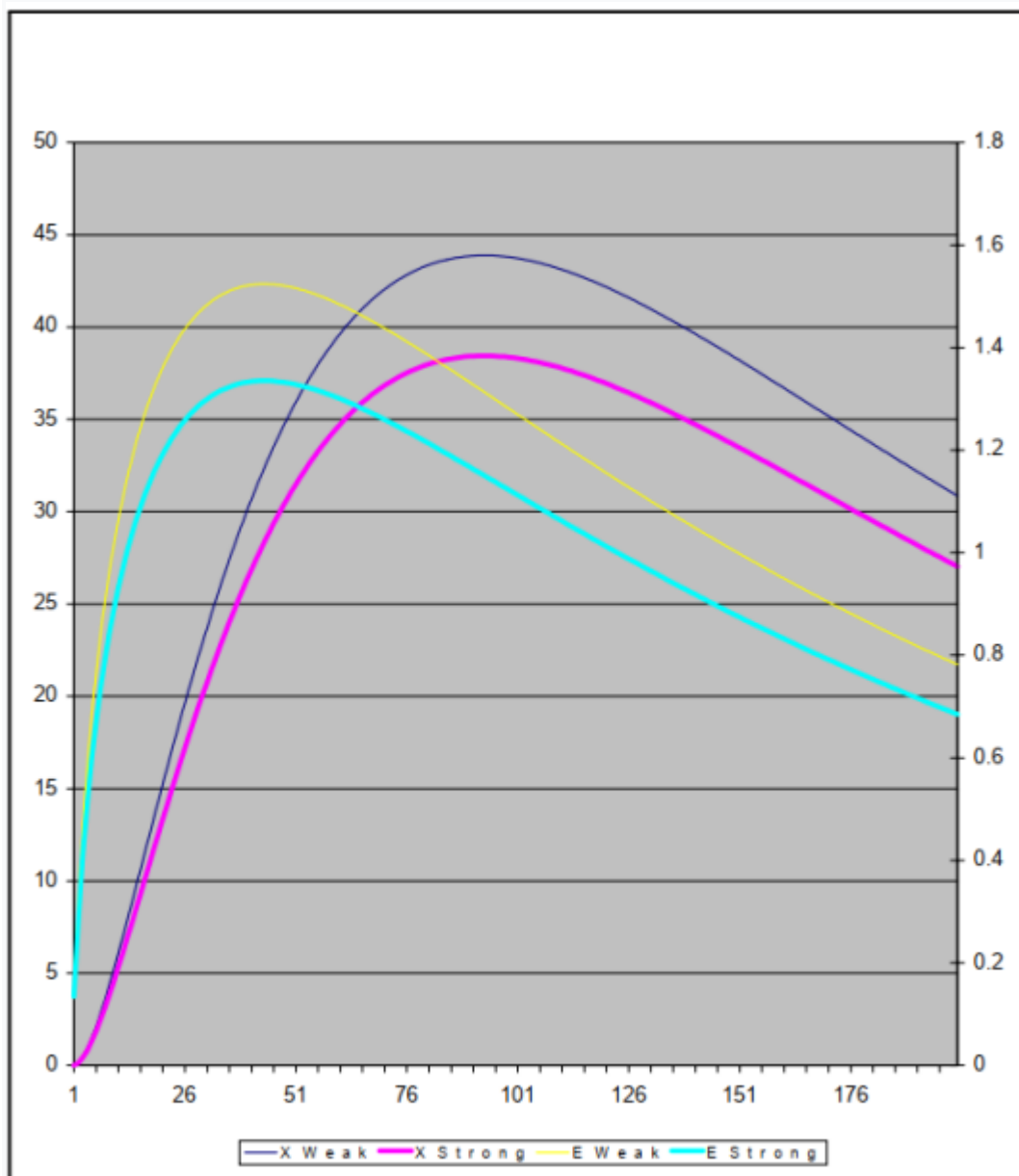


Figure 4: The EKC

Les propriétés de convergence du modèle de *Solow* impliquent que la croissance de la production est d'abord très rapide mais elle ralentit à mesure que k s'approche de son niveau de croissance équilibrée k^* .

Les émissions de pollution augmentent rapidement au début mais plus lentement plus tard. Pendant la phase de transition et après, les émissions par unité de production diminuent à un taux constant : g_A en

raison du progrès technique de dépollution. Cela fonctionne pour réduire les émissions. Enfin, *Brock et Taylor* ont supposé que la croissance était durable à long terme, de sorte que :

$$g_A > g + n$$

L'interaction du progrès technique et des rendements décroissants génère une **EKC**. En fait, le ralentissement de la croissance est la cause de la baisse des émissions et non l'inverse. Puisque le modèle prédit que les émissions par unité de production diminuent à un rythme constant à la fois pendant la période de transition et sur le sentier de croissance équilibrée (**SCE**), **les émissions par unité de production diminuent bien avant le pic du flux des émissions ou le pic du stock de pollution.**

Il est donc intéressant de construire l'analogie du modèle aux intensités d'émission représentées dans la Figure 1 et aux niveaux de pollution représentés dans la Figure 2.

Brock et Taylor construisent un tel graphique pour le cas de la forte dépollution et le présentent dans la Figure 5.

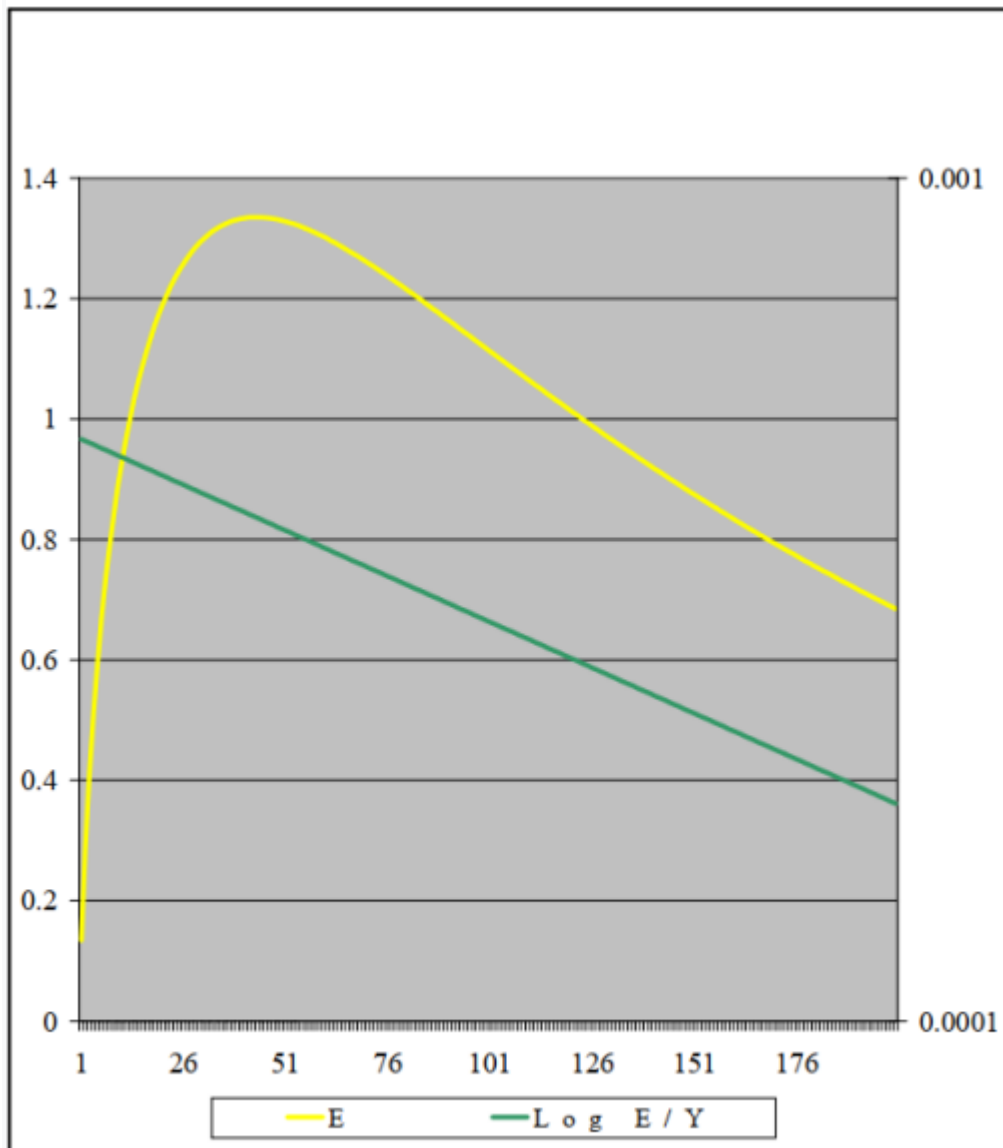


Figure 5: Matching E and E/Y

Jusqu'à présent, *Brock et Taylor* ont illustré les propriétés de *Green Solow* par simulation.

(A3). Rendements décroissants et Dynamique de la transition

Brock et Taylor examinent la dynamique transitionnelle à l'aide de deux diagrammes.

Le premier diagramme trace le taux de croissance des émissions et le taux de croissance du capital par rapport au capital par travail efficace. Et il est très similaire aux représentations graphiques du modèle de *Solow*. Le deuxième découle du premier diagramme et trace le niveau des émissions en fonction du capital par travail efficace. Et il est très similaire aux représentations de *EKC*.

Pour commencer, *Brock et Taylor* ont développé une équation différentielle des émissions. Pour ce faire, ils écrivent les émissions à tout moment t comme :

$$E = B(0)L(0)\Omega(0)a(\theta) \exp[G_E t]k^\alpha \quad (9)$$

Où $B(0)$, $L(0)$, et $\Omega(0)$ sont des conditions initiales, et G_E a été donné plus tôt.

Il faut dériver E par rapport au temps pour obtenir le taux de croissance des émissions :

$$\frac{\dot{E}}{E} = G_E + \alpha \frac{\dot{k}}{k} \quad (10)$$

Où l'on note que le taux de variation du capital par travail efficace est :

$$\frac{\dot{k}}{k} = sk^{\alpha-1}(1-\theta) - (\delta + n + g) \quad (11)$$

En utilisant ces deux expressions, *Brock et Taylor* décrivent la dynamique dans les deux parties de Figure 6 :

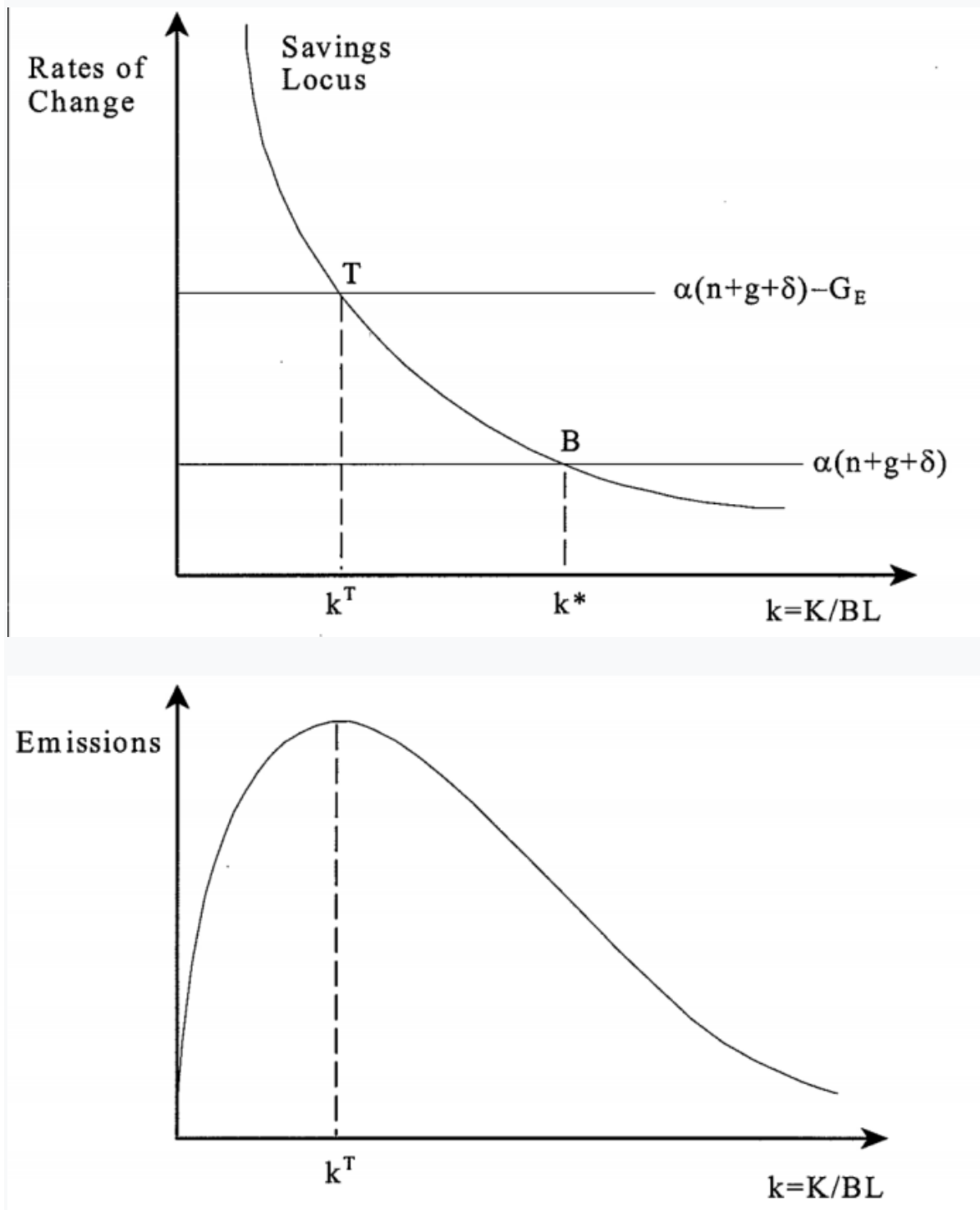


Figure 6: The Green Solow Model

Dans la Figure 6, *Brock et Taylor* représentent

(α fois) le taux de croissance du capital par travail efficace :

$$\alpha \frac{\dot{k}}{k}$$

le taux de croissance des émissions agrégées :

$$\frac{\dot{E}}{E}$$

sur l'axe des ordonnées

et le capital par travail efficace k sur l'axe des abscisses.

En dessinant cette figure, *Brock et Taylor* ont implicitement supposé que la croissance était durable. Ils se réfèrent à la courbe décroissante (convexe) comme le lieu d'épargne puisqu'elle est donnée par :

$$\alpha s k^{\alpha-1} [1 - \theta]$$

Et elle se décale avec le taux d'épargne : s

Le lieu d'épargne commence à $+\infty$ et s'approche de 0 lorsque k devient grand ; Par conséquent, il doit couper les deux lignes horizontales aux points T et B

À partir de (11), il est clair que la distance verticale entre

$$\alpha s k^{\alpha-1} [1 - \theta]$$

et la ligne horizontale de hauteur : $\alpha[\delta + n + g]$ est juste

α fois le taux de croissance du capital par travail efficace :

$$\alpha \frac{\dot{k}}{k}$$

Le capital par travail efficace augmente en tous points à gauche de B et diminue en tous points à droite de B

Comme on le sait, l'intersection au point B nous donne l'état stationnaire du capital par travail efficace : k^*

La croissance est la plus rapide pour les petits k et diminue à mesure que k s'approche de son niveau de croissance équilibrée k^*

Lorsque l'économie rentre dans son sentier de croissance équilibrée (**SCE**) :

$$\dot{k} = 0$$

La production globale et le capital de l'économie croissent au taux de $g + n$

Pour déterminer la trajectoire temporelle des émissions, rappelons que G_E est constant. Et donc à partir de (10), *Brock et Taylor* concluent que le taux de croissance des émissions hérite de la plupart des propriétés du taux de croissance du capital. Plus significativement, le taux de croissance des émissions est très rapide pour les petits k et diminue de façon monotone à mesure que l'économie s'approche de son sentier de croissance équilibrée (**SCE**).

Brock et Taylor exploiteront cette propriété plus tard lorsqu'ils dérivent une équation d'estimation prédisant la convergence des émissions à travers des pays. Mais pour l'instant, il est important de reconnaître que le taux de croissance des émissions diminue indépendamment du fait que la croissance soit durable ou non.

Pour déterminer le niveau maximal des émissions, ils utilisent (10) et (11). Par construction, la distance verticale entre le lieu d'épargne :

$$\alpha s k^{\alpha-1} [1 - \theta]$$

et la ligne horizontale de hauteur :

$$\alpha [\delta + n + g] - G_E$$

est égal au taux de croissance en pourcentage des émissions :

$$\frac{\dot{E}}{E}$$

Par conséquent, au point T , le taux de croissance des émissions est nul :

$$\dot{E} = 0$$

Le point T représente un tournant des émissions comme indiqué dans la Figure 6. En supposant que la croissance est durable, alors $G_E < 0$, et le point T se trouve à gauche de B ; Quand la croissance n'est pas durable, alors $G_E > 0$, et le point T se trouve à droite de B

La figure illustre plusieurs caractéristiques du modèle. Elle montre que si un sentier de croissance de l'économie n'est pas durable, alors les émissions augmenteront infiniment même si l'économie s'approche de son sentier de croissance équilibrée (**SCE**).

Mais même dans le cas non-durable, le taux de croissance des émissions diminue au long du chemin de transition jusqu'à ce qu'il s'approche de son taux de croissance équilibrée par le haut. Si la croissance est durable, alors T se trouve à gauche de B . Et le profil temporel des niveaux d'émission dépend de la localisation de $k(0)$ par rapport au point T . Si une économie commence par un petit stock initial de capital, alors les émissions augmenteront premièrement puis diminueront au fur et à mesure du développement : c'est-à-dire un profil de **EKC** pour les émissions. Si le capital initial est plus grand, il est possible que le niveau des émissions diminue de manière monotone à mesure que l'économie se dirige vers son sentier de croissance durable.

Il est important de noter que lorsque le niveau des émissions peut augmenter puis diminuer avec le temps, le taux de croissance des émissions est en déclin monotone. Cela est évident car la croissance des émissions est rapide pour les pays éloignés du point B , et plus lent pour ceux proches de B quel que soit la localisation de T . Enfin, lorsque le pic d'émissions dépend de la relation entre les points T et B .

Par exemple, si $-G_E$ est petit, alors T et B diffèrent très peu.

Et les émissions ne feront que culminer à mesure que l'économie se rapproche de son sentier de croissance équilibrée (**SCE**) qui peut sûrement prendre beaucoup de temps.

Puisque ce sont les résultats principaux, *Brock et Taylor* les enregistrent sous forme de propositions.

Proposition 1: Si la croissance est durable et $k^T > k(0)$, alors le taux de croissance des émissions est d'abord positif mais devient négatif en temps fini. Si la croissance est durable et $k(0) > k^T$, alors le taux de croissance des émissions est négatif pour tout t . Si la croissance n'est pas durable, alors la croissance des émissions diminue avec le temps mais reste positif pour tout t .

La **proposition 1** nous renseigne sur la forme du profil d'émissions et de revenus mais nous dit très peu sur le niveau des émissions et le revenu par habitant au tournant. Bien que le modèle soit simple, il peut être trompeur à cet égard. Par exemple, c'est simple de savoir que k^T est unique à une hypothèse selon laquelle le revenu par habitant au tournant est unique. De même, il est facile de supposer que le **sentier de croissance** des revenus et des émissions est le même pour les pays qui partagent le taux d'épargne, le taux de croissance démographique, etc.

Ces deux hypothèses sont fausses : même si k^T est unique, le revenu par habitant et le niveau d'émissions associés à k^T ne le sont pas.

Proposition 2 : Les économies avec des valeurs de paramètres identiques mais des conditions initiales différentes produisent des revenus par habitant et des profils d'émissions différents au fil du temps. Le niveau maximal des émissions et le niveau de revenu par habitant associé au niveau maximal des émissions ne sont pas uniques.

La **proposition 2** offre une explication simple de l'incohérence apparente entre les données nationales et les résultats empiriques transnationaux. Si les profils de **EKC** pour des pays même très similaires ne sont pas uniques en raison des conditions initiales différentes, alors l'hétérogénéité non observée est sûrement un problème. L'hétérogénéité non observée pourrait alors expliquer les erreurs-types importantes sur les tournants et la sensibilité des résultats à l'échantillon. Malgré qu'en théorie le conditionnement sur les caractéristiques des pays pourraient éliminer le problème de l'hétérogénéité non observée, les travaux existants se sont concentrés sur des contrôles supplémentaires qui sont des variables en niveaux et non le taux de variation des variables suggéré par la théorie de *Brock et Taylor*.

Pour être plus précis, concernant les pics d'émission et les niveaux de revenu, *Brock et Taylor* écrivent le revenu par habitant à tout moment t comme :

$$y^c(t) = k(t)^\alpha B(0)[1 - \theta] \exp[gt] \quad (12)$$

qui est une fonction de $k(t)$, du temps, de dépollution et de la condition initiale : $B(0)$

Au tournant, la croissance des émissions est nulle.

Le k^T identifié dans la Figure 6 est :

$$k^T = \left[\frac{s(1-\theta)}{n+g+\delta - G_E/\alpha} \right]^{1/(1-\alpha)} \quad (13)$$

Le capital par travail efficace de l'économie qui atteint k^T résout l'équation différentielle pour $k(t)$:

$$k(t) = \left[k^{*(1-\alpha)}(1 - \exp[-\lambda t]) + k(0)^{(1-\alpha)} \exp[-\lambda t] \right]^{1/(1-\alpha)} \quad (14)$$

$$k^* = \left[\frac{s(1-\theta)}{n+g+\delta} \right]^{1/(1-\alpha)} \quad (15)$$

Comme prévu, $k(t)$ est une moyenne exponentiellement pondérée du capital initial par travailleur $k(0)$ et son sentier de croissance équilibrée (**SCE**) au niveau k^* où le poids donné aux positions initiales par rapport aux positions finales est déterminé par la vitesse d'ajustement dans le Modèle de *Solow* :

$$\lambda = [1-\alpha][n+g+\delta]$$

En fixant $k(t)$ à k^T et en donnant une équation implicite du temps nécessaire pour atteindre le niveau maximal des émissions,

T est défini par :

$$T : k^T = \left[k^{*(1-\alpha)}(1 - \exp[-\lambda T]) + k(0)^{(1-\alpha)} \exp[-\lambda T] \right]^{1/(1-\alpha)} \quad (16)$$

Avec

$$k(0) = K(0)/B(0)L(0)$$

Malgré quelques indéterminations, il reste vrai que chaque économie suivra un modèle **EKC** comme ce qui est indiqué dans la **proposition 1**.

D'ailleurs, il est utile de faire le lien entre la théorie et les travaux empiriques existants :

$$\begin{aligned} E(t) &= c_0 \exp[G_E t] \left[\left[k^{*(1-\alpha)} (1 - \exp[-\lambda t]) + k(0)^{(1-\alpha)} \exp[-\lambda t] \right]^{\alpha/(1-\alpha)} \right] \\ c_0 &= B(0)L(0)\Omega(0)a(\theta) \end{aligned} \quad (17)$$

Cela nous donne une relation paramétrique entre les émissions agrégées et le revenu par habitant.

Proposition 3 : Il existe une relation paramétrique entre les émissions : E et le revenu par habitant : y^c que nous considérons comme une **EKC**.

Si $k^* > k^T > k(0)$, alors les émissions augmentent d'abord puis diminuent avec le revenu par habitant.

Si $k^* > k(0) > k^T$, alors les émissions chutent de façon monotone avec le revenu par habitant.

La proposition 3 est importante pour assurer que le "**modèle de Solow Vert**" reproduit une **EKC** reliant les émissions au revenu par habitant.

Cette EKC peut prendre une forme monotone en déclin comme certains auteurs ont trouvé pour quelques polluants. Il est cependant important de reconnaître que le revenu par habitant et les émissions sont tous des fonctions de déterminants préalables tels que les conditions initiales, le taux d'épargne, etc.

Même si une relation de EKC existe dans le " modèle de Solow Vert ", il n'y a pas de causalité entre le revenu par habitant et les niveaux d'émissions. Par conséquent, les processus typiques qui entraînent une EKC peuvent être peu fiables, voire inexistantes et pourtant les chercheurs ont observé un modèle EKC dans les données.

Selon *Brock et Taylor*, aucun travail empirique examinant la relation entre la croissance et l'environnement a utilisé les taux d'épargne, les taux de croissance démographique, etc. Cela serait suggéré par leur analyse. Mais même avec des informations sur les paramètres, ils ont déjà montré que puisque le profil de EKC est dépendant des conditions initiales, les problèmes d'estimation subsistent. Une alternative qui se présente est de se concentrer sur des prédictions de modèle étroitement liées aux paramètres : c'est-à-dire la concentration sur la relation parmi le taux de croissance des émissions le long du chemin de la transition plutôt que la relation paramétrique entre le niveau des émissions et le revenu.

(B). Modélisation retenue et Validation empirique

(B01). Modélisation retenue

Nous avons vu qu'il est difficile d'estimer correctement la relation d'EKC. Ceci est notamment dû à la différence des profils en fonction des pays.

Ainsi les critiques sont nombreuses mais les alternatives beaucoup moins.

Dans cette section, nous présentons une méthode alternative pour étudier la relation entre croissance et environnement qui s'appuie sur les travaux existants en macroéconomie sur la convergence absolue et conditionnelle.

Deux objectifs :

- développer un lien explicite entre la théorie et l'estimation empirique.

- démontrer la capacité de Green Solow à expliquer les modèles de croissance des émissions entre les pays avec relativement peu de variables.

Le modèle de Green Solow contient deux prédictions empiriques concernant la convergence des émissions :

- Un groupe de pays partageant les mêmes valeurs de paramètres (taux d'épargne, intensités de réduction, taux de progrès technologique, etc.) mais qui diffèrent dans les conditions initiales présenteront une convergence dans une mesure de leurs émissions.

- Un groupe disparate de pays présentera à la fois des profils de pollution et de revenu très différents et ne présentera pas de CAE.

Nous nous concentrons ici sur les prédictions du modèle pour l'ACE au sein d'un échantillon de pays de l'OCDE, mais nous étudions également comment nos résultats changent lorsque nous permettons aux pays de dicter les taux d'épargne, etc. Afin de créer une équation testable qui pourrait être utile à d'autres chercheurs.

Nous menons notre travail empirique avec des données sur les émissions de dioxyde de carbone car il y a un grand nombre de données et sur un nombre de pays important et cette grande couverture internationale permet de démontrer que l'ACE ne tient pas sur tous les pays.

Les données carbone étant souvent très élevées et très variables elles correspondent donc parfaitement à un polluant qui peut ne pas suivre une EKC et c'est pourquoi les chercheurs ont beaucoup de mal à les interpréter. Compte tenu de ces difficultés, les émissions de dioxyde de carbone constituent un bon terrain d'essai pour notre approche.

Enfin, il y a eu très peu de réduction directe des émissions de carbone.

Et même si le carbone est différent des autres polluants parce qu'il n'est

pas réglementé, il ressemble beaucoup aux autres polluants atmosphériques dans la mesure où il est étroitement lié à l'utilisation de l'énergie.

(B02). Estimation de l'Équation

En écrivant l'équation (9) en terme d'émissions de CO2 par personne, on obtient :

$$e^c(t) = E(t)/L(t)$$

$$y^c(t) = F(t)[1 - \theta]/L(t)$$

ce qui va nous donner : (19)

$$e^c(t) = \Omega(t)a(\theta)y^c(t)$$

En différenciant par rapport au temps, on obtient : (20)

$$\frac{\dot{e}^c}{e^c} = -g_A + \frac{\dot{y}^c}{y^c}$$

Nous avons utilisé notre hypothèse selon laquelle la fraction des ressources globales consacrée à la réduction d'émission de CO2 est constante dans le temps. Comme on le voit, la croissance des émissions par personne est la somme du progrès technologique en matière de

réduction et de la croissance du revenu par habitant. Sur le sentier de croissance équilibrée, cette somme est égale à $-g_A + g$ qui peut être positif, négatif ou nul ; en dehors du sentier de croissance équilibrée, nous ferons une approximation du taux de croissance.

Nous rendons l'équation (20) opérationnelle en trois étapes. Premièrement, nous approximations le taux de croissance du revenu par habitant et des émissions de CO₂ par personne sur une période discrète de taille N par leur logarithme moyen et réécrivons l'équation comme suit (21) :

$$[1/N] \log[e_t^c/e_{t-N}^c] = -g_A + [1/N] \log[y_t^c/y_{t-N}^c]$$

Deuxièmement, nous approximations le taux de croissance discret du revenu par habitant sur N périodes à proximité de l'état stationnaire du modèle via une linéarisation logarithmique pour obtenir (22):

$$[1/N] \log[y_t^c/y_{t-N}^c] = b - \frac{[1 - \exp[-\lambda N]]}{N} \log[y_{t-N}^c]$$

Où b est une constante et $\lambda = [1-\alpha][n+g+\delta]$ est la vitesse de convergence des modèles de Solow vers k^* .

Enfin, on remplace la croissance des revenus en (21) par (22) et on remplace le revenu par habitant de la période initiale par

$$y_{t-N}^c = e_{t-N}/\Omega_{t-N} \tilde{a}(\theta) \quad \text{venant de l'équation (19).}$$

En effectuant ces remplacements, nous obtenons une équation linéaire simple adaptée aux travaux empiriques entre pays.

Nous écrivons ceci comme une régression linéaire simple avec le terme d'erreur μ_{it} :

$$[1/N] \log[e_{it}^c/e_{it-N}^c] = \beta_0 + \beta_1 \log[e_{it-N}^c] + \mu_{it} \quad (23)$$

$$\beta_0 = g - g_A + \frac{[1 - \exp[-\lambda N]]}{N} \log[y^* a(\theta) \bar{\Omega}_{t-N} \bar{B}_{t-N}]$$

$$\beta_1 = -\frac{[1 - \exp[-\lambda N]]}{N} < 0$$

$$\mu_{it} = \frac{[1 - \exp[-\lambda N]]}{N} \log [\Omega_{i,t-N} B_{i,t-N} - \bar{\Omega}_{t-N} \bar{B}_{t-N}]$$

Nous désignons la spécification en (23) comme la spécification courte.

Pour estimer (23) il est nécessaire de faire quelques hypothèses afin que ce soit cohérent avec les MCO.

Par exemple, si nous supposons que les pays partagent le même état stationnaire y^* , alors les pays peuvent seulement différer dans leurs niveaux technologiques initiaux $\Omega_{(t-N)}$ et $B_{(t-N)}$.

Cette hypothèse est très critiquée car la variation inobservée de la technologie initiale dans $B_{i,t-N}$, à travers i peut être corrélée à d'autres variables de droite déterminant y^* .

Bien que l'hétérogénéité non observée soit certainement une possibilité ici aussi, elle peut poser moins de problème dans notre contexte. La raison en est simplement qu'une technologie de biens productifs implique un grand B_{t-N} , tandis qu'une technologie d'émissions productives implique un petit Ω_{t-N} . Par conséquent, un pays technologiquement sophistiqué à T - N peut avoir le même $\Omega_{t-N} B_{t-N}$ qu'un pays technologiquement en retard à T - N, ce qui rend moins problématique l'hétérogénéité non observée des niveaux technologiques initiaux.

Nous utilisons cet argument pour justifier notre décomposition des produits inobservables spécifiques au pays $\Omega_{t-N} B_{t-N}$ en une moyenne globale transnationale que nous désignons par $\overline{\Omega_{t-N} B_{t-N}}$ plus un écart spécifique au pays. Si on ajoute l'erreur d'approximation à cet écart nous obtenons ce qui est contenue dans μ_{it} .

Les éléments individuels composant le terme constant de (23) n'étant pas identifiés, nous n'avons aucune prédiction concernant le signe. Le taux de croissance des émissions par personne devrait cependant diminuer lorsque les émissions par personne de la période initiale sont plus élevées, et ceci est reflété dans la prédiction de $\beta_1 > 1$.

Si les niveaux de technologie et l'intensité de la réduction d'émissions de CO2 restent inchangés, une réduction des émissions de CO2 par personne e_{t-N}^c correspond à un capital initial plus faible par travailleur

effectif k_{t-N} . Cela implique alors un taux de croissance rapide des émissions globales E et donc un taux de croissance rapide des émissions de CO2 par personne.

On peut aussi noter que N étant donné n'importe quelle estimation de β_1 porte une estimation implicite du taux de convergence du modèle de Solow, λ .

Si la spécification courte est simple, elle est aussi insatisfaisante car les prédictions clés de Green Solow sur les émissions découlent du nouvel élément g_A et de la dépendance de y^* et $\alpha(\theta)$ sur la réduction d'émission de CO2.

Précédemment nous supposions g_A et θ constantes et sans variation entre les pays. Mais les données transnationales sur la part des coûts de réduction de la pollution dans le PIB montrent que θ varie peu dans le temps, mais présentent d'importantes variations entre les pays. De plus g_A est égal au taux de diminution des émissions de carbone par rapport à la production dans le temps et ce ratio est observable et varie selon les pays.

Afin d'inclure ces informations nous allons construire la spécification longue de notre équation d'estimation. Nous allons supposer $a(\theta) = (1 - \theta)^\epsilon$

avec $\epsilon > 1$. Ainsi en partant de l'équation (23) nous y ajoutons ce qui varie entre les pays, l'épargne, la diminution d'émission de CO2, g_A et le taux de dépréciation effectif $(n+g+\delta)$ (24) :

$$\begin{aligned}
[1/N] \log[e_{it}^c/e_{it-N}^c] &= \beta_0 + \beta_1 \log[e_{it-N}^c] + \beta_2 [g_A i] \\
&\quad + \beta_3 \log[s_i] + \beta_4 \log[1 - \theta]_i \\
&\quad + \beta_5 \log[(n + g + \delta)]_i + \mu_{it} \\
\beta_0 &= g + \frac{[1 - \exp[-\lambda N]]}{N} [\log \bar{\Omega}_{t-N} B_{t-N}] \\
\beta_1 &= -\frac{[1 - \exp[-\lambda N]]}{N} < 0, \\
\beta_2 &= -1 < 0 \\
\beta_3 &= [\alpha/(1 - \alpha)] \frac{[1 - \exp[-\lambda N]]}{N} > 0 \\
\beta_4 &= [\alpha/(1 - \alpha) + \epsilon - 1] \frac{[1 - \exp[-\lambda N]]}{N} > 0 \\
\beta_5 &= -\beta_3 < 0
\end{aligned}$$

En plus des ajouts vus précédemment pour la spécification longue, elle ajoute aussi de nouveaux paramètres à estimer ce qui nous fournit deux nouvelles restrictions testables.

Il devrait être évident qu'une augmentation de l'épargne accroît le taux de croissance des émissions de CO2 par habitant en augmentant le stock de capital en régime permanent.

Cet effet positif de l'épargne sur la croissance des émissions est capturé par $\beta_3 > 0$. Puisqu'une réduction des coûts augmente l'intensité du capital de l'économie à l'état d'équilibre et augmente les émissions, nous avons également $\beta_4 > 0$. Le signe de β_5 découle directement du rôle que joue la dépréciation effective dans la détermination de l'intensité capitalistique en régime permanent d'un pays.

Le modèle de Green Solow contient la restriction supplémentaire d'un coefficient unitaire sur g_A et sur $\beta_4 - \beta_3 > 0$.

La spécification longue introduit néanmoins quelques problèmes.

Nous ne possédons pas de données sur g et δ et nous allons donc construire $(n+g+\delta)$ en utilisant des moyens alternatifs. Nous allons définir que $g+\delta=0.05$ et y ajouter n mais là apparaît encore une nouvelle complication dans le paramètre λ car dans ce dernier nous allons devoir admettre les différences entre les pays. Nous allons à nouveau suivre la littérature et définir λ comme constant.

Puisque le progrès technologique en matière de réduction d'émission de CO2 est un élément clé nous allons construire une mesure de $g_{i,A}$ qui est exogène. Afin de contrer cette exogénéité nous allons considérer que l'intensité de la réduction d'émission de CO2 est fixe et qu'on pourrait donc obtenir une estimation pour $g_{i,A}$ en régressant $\ln(E_{it}/Y_{it})$ sur une constante et une tendance temporelle.

Nous allons utiliser un des facteurs qui est le plus important pour nous, le prix de l'énergie et nous allons considérer qu'il impact l'intensité de carbone émis par la production.

On obtient comme estimateur (en utilisant les MCO):

$$\log(E/Y)_{it} = \gamma_{i0} + \gamma_{i1} \log p_{oil,t}^w + \gamma_{i2} time + \epsilon_{it}$$

où γ_{i0} est égal à $\log[\Omega_{iT_i} N^a(\theta_{iT_i} N)]$, $g_{i,A}$ est donné par $-\widehat{\gamma_{i2}}$, $P_{oil,t}^w$ est le prix en dollars américain du pétrole et $(E/Y)_{it}$ représente les émissions de CO2 par dollar de PIB réel.

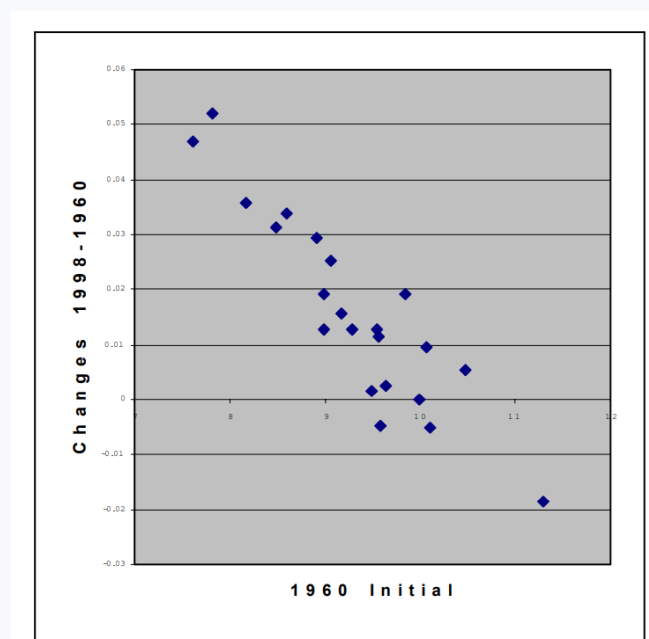
(B1). Validation empirique

Dans cette sous-section, nous nous intéressons à la mise en œuvre empirique du modèle de Solow vert permettant d'étudier la relation existant entre la croissance économique et l'environnement en proposant une méthode se basant sur des travaux déjà existants à propos des notions de convergences absolue et conditionnelle. La méthode de validation empirique constitue en effet un réel atout dans la validation des modèles puisqu'elle permet effectivement d'établir un lien entre la théorie et les données empiriques. La mise en œuvre empirique permet également d'expliquer simplement et avec peu de variables les schémas de croissance des émissions polluantes qui diffèrent d'un pays à l'autre notamment par leurs conditions initiales (eg. croissance démographique ou encore le taux d'épargne). Nous

abordons à présent la structuration du test empirique du modèle de Solow vert. Le test se base sur deux prédictions concernant la convergence des émissions polluantes. La première prédiction est en fait une prédiction de convergence absolue des émissions polluantes (ACE) si nous partons de l'hypothèse que les pays possèdent des valeurs de paramètres identiques (tels que le taux d'épargne, les intensités de réduction ou encore le taux de progrès). Cette prédiction s'appuie donc sur les forces des rendements décroissants et sur le fait que l'on suppose que les pays partagent tous le même état stationnaire. Maintenant, nous nous intéressons à la seconde prédiction constituant la validation empirique du Green Solow. Cette prédiction prend en compte le fait qu'un groupe de pays tous distincts présentent à la fois des revenus et des profils de pollution extrêmement différents les uns des autres. Par conséquent, il n'y a pas de convergence absolue (ACE) mais une convergence conditionnelle des émissions polluantes. En effet, les états connaîtront une croissance se situant en dehors de l'état d'équilibre. Au sein du document de document référence, les auteurs se concentrent sur les prévision du modèle de Solow vert pour la convergence absolue sur la base des données disponibles sur les émissions de dioxyde de carbone pour les pays de l'OCDE. Compte-tenu du fait que le carbone est un polluant inapte à suivre un sentier de croissance équilibré, le choix de données sur les émissions en dioxyde de carbone confère donc un choix d'expérimentation tout à fait judicieux puisqu'il n'y a qu'une faible réduction des émissions de dioxyde de carbone. De plus, les réductions d'émissions de dioxyde de carbone sont elles-mêmes le

résultat de d'autres formes de pollution. Cependant, nous retenons que la tendance majeure des émissions de dioxyde de carbone par unité de production est inévitablement liée aux changements d'intensité énergétique des économies. Nous rendons maintenant compte des résultats obtenus.

Les auteurs commencent tout d'abord par étudier les possibilités d'une convergence absolue des émissions de pollution et trouvent une relation peu apparente entre la moyenne annuelle des logarithmes des changements d'émissions par personne par rapport au logarithmes des niveaux initiaux pour 139 pays. Ensuite *Brock et Taylor* procèdent de manière similaire en considérant un échantillon de pays de l'OCDE et parviennent à mettre en évidence une relation fortement négative et très étroite entre la croissance des émissions par personne sur la période 1960-1998 et émissions de 1960 par habitant.



Convergence des pays de l'OCDE

Ce nuage de points montre que de faibles émissions par habitant ont connu une croissance rapide des émissions tandis que ceux avec des émissions importantes par habitant ont augmenté beaucoup plus lentement.

Enfin, *Brock et Taylor* ont expérimenté leurs spécifications longue et courte. Dans la spécification courte, ils trouvent aussi que les émissions initiales par habitant ont un effet négatif sur la croissance (comme dans le nuage de points précédent). En revanche, la variation des émissions par habitant s'explique par les émissions initiales par habitant dans plus de 80% des cas et c'est bien au-dessus du pouvoir explicatif des régressions de Solow classiques. Nous portons à présent notre intérêt sur la longue spécification de *Brock et Taylor*. Dans cette spécification, les auteurs prennent comme variable dépendante le taux de croissance moyen des émissions par habitant sur la période 1998-1960 et ajoutent des variables explicatives telles que la mesure du progrès technique en matière de réduction des émissions polluantes (colonne 2 de la grille de résultats ci-après). Cette variable entre négativement de manière significative dans l'explication du taux de croissance moyen des émissions polluantes par habitant sur la période d'étude considérée. Une autre variable explicative entre en jeu dans la régression de la spécification longue. Il s'agit du taux d'épargne (colonne 3) qui est positivement significatif dans l'explication de la variable dépendante. Enfin une quatrième variable explicative (les coûts de réduction de la pollution: colonne 4) prend part à l'explication

du taux de croissance moyen des émissions polluantes par habitant (VD). Ces coûts agissent positivement sur la variable dépendante comme prévu dans la théorie. Mais la mesure des coûts de réductions effectuée par les auteurs n'est pas statistiquement différente de zéro (donc non significative). Finalement est ajouté un régresseur de Solow dans la colonne 5 afin de modéliser un amortissement effectif. Ce régresseur n'est pas significatif mais il entre négativement en jeu dans l'explication de la variable dépendante.

Finalement, l'ajout du progrès technologique dans la réduction des émissions de pollution apporte quelque chose au pouvoir explicatif du modèle mais les autres régresseurs abaissent le R^2 ajusté.

Table 1: Convergence Across the OECD

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
cons	.045	.041	.005	-.025	.014
	(18.5)	(14.6)	(.11)	(-.58)	(.25)
$\log e_{t,N}^c$	-.018	-.011	-.010	-.010	-.009
	(-11.9)	(-4.1)	(-3.5)	(-3.4)	(-2.5)
$\log A$..	-.49	-.49	-.49	-.54
		(-2.7)	(-2.8)	(-2.7)	(-2.8)
$\log s$.010	.011	.015
			(.75)	(.79)	(.93)
$\log[1 - \theta]$.30	.33
				(.98)	(1.1)
$\log(n + g + \delta)$					-.012
					(-.47)
No. obs	22	22	22	22	22
Adj. R^2	.82	.88	.88	.88	.87

La majeure partie des estimations trouvées sont négatives mais pas toutes (par exemple celles de la Grèce ou du Portugal). Cela permet de dire que d'autres facteurs différents des prix du pétrole et du progrès technologique prennent part dans le ratio émissions / production dans certaines de ces économies.

Conclusion sur les résultats:

Les pays riches et à émissions par habitant relativement élevées connaissent une croissance plus faible et un abandon de l'industrie lourde. Cela implique donc que les prédictions de convergence du modèle peuvent être renforcées par des évolutions en matière de niveau de développement des pays. En adoptant la logique inverse, nous déduisons donc que des pays relativement pauvres (faible niveau de développement) peuvent se montrer relativement lent à assimiler et à élaborer de nouvelles technologies de réduction de la pollution. Dans cette optique, les pays à faible revenu connaissent donc une forte augmentation des émissions de carbone par habitant en raison d'une croissance relativement rapide mais des progrès relativement lents dans l'adoption de nouvelles technologies de réduction des émissions polluantes.

(B2). Preuve internationale

Initialement, l'analyse se base sur trois observations prises au sein de données américaines. Ce choix semble effectivement judicieux puisqu'effectivement les émissions polluantes par unité de production ont tendance à diminuer depuis de longues périodes. Ces réductions sont donc antérieures aux réductions du niveau absolu des émissions (en considérant tous les pays) et la réduction de ces coûts représente une part très faible de l'activité économique globale américaine. Afin de palier à une limitation des données, les auteurs n'ont présenté que les données concernant les pays européens en se basant sur les mêmes statistiques et les quatre polluants (oxydes d'azote, dioxyde de soufre, dioxyde de carbone et composés organiques volatils) que pour les données américaines. Voici la table obtenue par les auteurs:

Countries	NOx	Peak	SOx	Peak	CO	Peak	VOC	Peak	θ Share
Austria	-2.8	<1980	-13.4	<1980	-5.5	<1980	-4.2	1990	1.6
Finland	-3.8	1990	-11.6	<1980	-2.9	<1980	-3.8	1990	1.4
Czech Rep.	-7.6	<1980	-18.6	1985	-4.8	1990	-6.5	1990	2.0
France	-3.8	<1980	-10.0	<1980	-6.4	<1980	-4.2	1985	1.2
Germany	-5.4	<1980	-3.1	<1980	-7.0	<1980	-2.6	1985	1.6
Italy	-2.7	1990	-9.5	<1980	-3.7	1990	-3.8	1995	.9
Ireland	-2.7	2000	-7.8	<1980	-7.0	1990	-6.3	1990	.6
Poland	-7.5	1985	-9.9	1985	-10.1	1990	-6.6	<1980	1.6
Slovak Rep.	-4.7	1990	-10.0	<1980	-4.2	1990	-7.5	1985	1.5
Sweden	-4.2	1985	-12.1	<1980	-3.4	1990	-5.1	1985	1.0
Switzerland	-4.4	1985	-9.5	<1980	-6.9	<1980	-5.1	1985	2.1
Netherlands	-4.1	1985	-10.6	<1980	-6.5	<1980	-6.1	<1980	1.7
Hungary	-3.0	<1980	-7.7	<1980	-3.7	<1980	-2.3	1985	.6
Portugal	1.0	2000	-2.5	1999	-3.4	1995	1.1	1997	.6
U.K.	-4.5	<1980	-9.4	<1980	-5.9	<1980	-4.9	1990	1.5
Average	-4.0	n.a.	-9.7	n.a.	-5.4	n.a.	-4.5	n.a.	1.3

Nous constatons sur ce tableau, l'ensemble des statistiques récapitulatives concernant la variation annuelle moyenne en

pourcentage des émissions par unité de PIB au cours de la période 1980-2001 obtenues pour les pays européens pris en compte dans l'étude. Ces données rendent bien compte de l'année au cours de laquelle les émissions polluantes ont atteint leur maximum (colonnes Peak). Sur cette période d'étude, nous constatons aisément une réduction massive des émissions polluantes par unité de production sur cette période. Finalement les coûts de lutte contre la pollution ne représentent qu'une faible part du PIB (dernière colonne). Nous comprenons donc que le modèle de Solow vert est un modèle très puissant au pouvoir explicatif important. Cependant il n'est pas possible de tirer des conclusions solides de ces résultats étant donné que la qualité des données brutes peut bien évidemment être remise en cause; eg. avec la couverture par pays parfaitement incomplète à propos des données sur la par des coûts de réduction de la pollution dans le PIB pour de nombreux pays de l'OCDE. Nous portons un regard critique quant à la validité empirique des résultats dans la sous-section suivante.

(B3). Fiabilité des résultats

La méthode de validation empirique employée par *Brock & Taylor* dans cette étude est commune à celles déjà utilisées dans la littérature macroéconomique traitant de problèmes de croissance ce qui suggère qu'elle puisse être controversée. Dans le présent cas, la convergence absolue trouvée résulte de l'interaction des rendements décroissants avec le progrès technologique issue des politiques environnementales dont le moteur est la convergence des revenus au sein des pays de

l'OCDE. Il n'y a donc pas d'erreur de sélection de l'échantillon (*DeLong, 1988*) étant donné que l'échantillon sélectionné par *Brock et Taylor* prend en compte les pays riches de l'OCDE mais aussi les plus pauvres. Les auteurs de cette étude ont également fait face à l'erreur économétrique de mesure puisqu'ils ont pris des données qui ne couvrent que la période 1960-1998 et ont exclu l'année 1870; dont la qualité des données était tout à fait incertaine ce qui biaisait auparavant la notion de convergence absolue. Finalement *Brock et Taylor* ont également résolu le problème de régression vers la moyenne (régression fallacieuse) évoqué par *Friedman* en 1992. En effet, *Friedman* note que si la régression vers la moyenne était la seule force opérant alors un nuage de points des taux de croissance contre les valeurs terminales de 1998 devraient montrer une forte relation positive. Afin de faire face à ce problème, les chercheurs ayant conçu cette étude ont pu tracer un nuage de points des taux de croissance des émissions polluantes par habitant par rapport aux niveaux observés en 1998 et ils ont observé que cette relation était toujours fortement négative. L'étude d'autres moments de la distribution de ces taux de croissance des émissions par habitant met toujours en exergue un phénomène de convergence. Pour cela il suffit de considérer les logarithmes des émissions et de calculer des variances ponctuelles. Une grande convergence des taux de croissance des émissions est tout de même présente. Pris ensemble, tous ces éléments témoignent donc que la convergence trouvée dans les données ne résulte pas d'une erreur de sélection de l'échantillon, ni d'un problème de régression vers la

moyenne ou d'une erreur de mesure. A priori les résultats donnés par cette méthode empirique sont valides et expliquent assez bien les faits. Il n'y a donc à priori aucune erreur méthodologique dans cette étude mais la qualité des données peut être remise en cause. Nous pouvons enfin porter une critique quant à l'utilisation de la variable G_a . Cette variable est en effet une mesure agrégée du progrès technique et comme tout agrégat économique cela masque vraisemblablement certains processus oeuvrant pleinement dans l'économie tels que des changements présents dans la composition nationale, de la consommation privée ou de la qualité des facteurs de production au fil du temps qui sont tous en partie responsables du problème temporel des émissions par rapport au PIB.

(B4). Optimisation et formes fonctionnelles

La prise en considération de la consommation optimale complexifie les choses mais ne remet pas en cause les propriétés de convergence du modèle de Solow. Si l'on considère la consommation optimale, nous avons le taux d'épargne qui varie tout au long de la transition et cela peut réduire ou accélérer la vitesse d'ajustement d'état d'équilibre. Dans un cadre de d'optimisation de la consommation des ressources rares, il convient de rajouter des forces supplémentaires sur la dépollution telles qu'une variable modélisant la dépollution (qui garantit que la croissance n'est pas trop rapide), une variable sur la consommation (pour que la croissance ne soit pas trop rapide) ainsi que des dommages marginaux dus aux émissions qui permettent de contrôler les réponses face à l'augmentation de la pollution. Si les dommages dus aux émissions polluantes sont convexes (*Brock et Taylor, 2003*) alors nous avons uniquement la première hausse des émissions

polluantes qui peut être compensée par une réduction de ces dernières ou bien par une combinaison de réduction des émissions polluantes et du progrès technique dans le futur. Toutefois, il est également possible de laisser la fonction de réduction des émissions satisfaire les conditions d'Inada afin que la réduction soit toujours mise en oeuvre et ensuite adopter les hypothèses satisfaisant le fait que les sacrifices opérés dans la consommation ne soient pas trop coûteux et que la pollution ne soit pas trop dommageable de façon à affaiblir les réponses gouvernementales. En prenant tout cela en compte, la relation EKC résulte quand même bien de l'interaction des rendements décroissants et des progrès techniques mis en oeuvre dans la réduction des émissions polluantes.

(B5). Apport du Green Solow à la littérature macroéconomique

Ce modèle permet de rendre compte d'une structure théorique liant la force de la convergence des émissions polluantes aux variables directement observables. Cela met bien en exergue une nouvelle méthode d'étude sur la relation existant entre la croissance et l'environnement. Cette théorie très simple permet de lier les taux de croissance aux niveaux de revenus et à la qualité environnementale.

Conclusion générale de l'étude

Le modèle de Solow vert s'apparente donc à un modèle simple liant le taux de croissance économique à la pollution (ie. aux résultats environnementaux). Ce modèle a largement dominé la manière dont les économistes et les décideurs pouvaient penser l'interaction entre

l'environnement et le taux de croissance économique. Un tel modèle s'inscrit donc dans le cadre de la régularité empirique. De plus, la relation EKC et le modèle de Solow initial sont très intimement liés. En effet, les forces de diminution des émissions polluantes et le progrès technologique identifiés par Solow comme “moteurs” de la croissance économique sont également des éléments fondamentaux de l'EKC. La relation EKC n'est donc qu'une simple extension du modèle de Solow au sein de laquelle les rendements décroissants de la formation du capital et le progrès technique impactent sur le taux d'émissions polluantes et leurs coûts de réduction. Enfin la méthodologie empirique développée dans l'étude a permis l'estimation de paramètres clés. Par conséquent, le modèle parvient bien à identifier le progrès technique oeuvrant dans la réduction des émissions polluantes comme une potentielle clé dans l'explication des données sur les revenus et la pollution. En revanche, il n'y a pas de théorie de l'innovation ni de régulation optimale dans ce modèle. Mais le modèle de Solow s'inscrit bien dans le cadre d'un monde au sein duquel les gouvernements resserrent progressivement leurs normes concernant les émissions polluantes en proposant une approche d'estimation du progrès technique dans un but de dépollution. Ce travail témoigne donc d'une possibilité d'activation des leviers d'une croissance verte sur le court, le moyen et le long terme. Les analyses historiques, théoriques et pratiques conduisent alors à repenser les modes de production en incluant les gains engendrés par l'environnement dans les choix productifs. Actuellement, ce travail suggère qu'il est possible d'impulser une dynamique de croissance verte

en trouvant la juste rémunération des facteurs de production afin de conduire à une politique de redistribution et par conséquent assurer l'équité. Afin que cette croissance soit plus profitable, il convient également d'identifier les innovations techniques qui garantissent un gain d'efficacité sur toutes les ressources et qui permettent aussi de mettre en place les modes de financement permettant de diffuser ces ressources le plus rapidement possible. Nous pouvons donc entendre la croissance verte comme une transformation des processus de production et de la consommation afin de préserver ou reconstituer ces fonctions régulatrices du capital naturel. A l'heure actuelle, le concept de croissance verte est soumis à de nombreux débats.

En effet, la croissance verte constitue-t-elle un idéal ou est-elle simplement illusoire ?

(C). Débat Actuel

(C1). Un argument alternatif du Modèle de Solow Vert dans un contexte de l'économie en développement

En nous basant sur l'article de *Santosh K. Sahu et Arjun Shatrunjay* en 2017, il est important pour nous de comprendre la signification du "modèle de Solow Vert" dans le contexte d'un pays en voie de développement. Cet article donne l'importance particulière du rôle de la densité de population dans la compréhension des inconvénients du "modèle de Solow Vert".

Le modèle EKC et Le modèle de *Solow* ont une base commune, et les interrelations entre ces deux modèles distincts ont été étudiées dans le "modèle de Solow Vert" (*Brock et Taylor*).

Le "modèle de Solow Vert" visait à expliquer le comportement empirique des revenus, des émissions et des coûts de dépollution. La plupart des résultats empiriques sont publiés dans le contexte des économies développées telles que les États-Unis. Et les études sur l'économie en développement sont rares.

Ainsi, d'après *Santosh K. Sahu et Arjun Shatrunjay*, c'est impératif de tester la validité du "modèle de Solow Vert" dans le contexte d'un pays en voie de développement comme l'Inde.

La motivation pour effectuer une telle analyse est que premièrement, la production augmente avec la population jusqu'à ce qu'elle soit restreinte par des limites environnementales, comme proposé par *Malthus*.

Deuxièmement, la population a tendance à s'adapter à l'évolution des conditions environnementales, comme le propose *Darwin*, dont les limites environnementales peuvent être repoussées, et il y a peut-être plus de place pour la croissance.

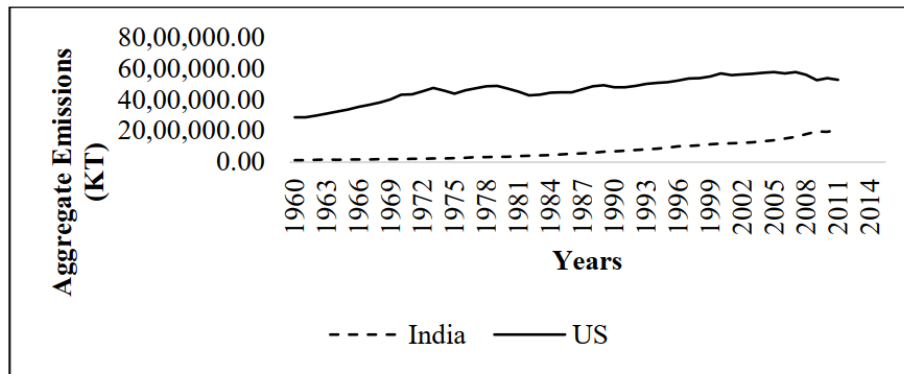
Finalement, l'évolution culturelle, qui comprend des changements dans l'organisation sociale et le comportement humain, peut potentiellement repousser les limites environnementales.

En effet, il existe certaines limites avec le "modèle de Solow Vert" dans le contexte d'un pays en voie de développement.

D'une part, le "modèle de Solow Vert" n'illustre pas clairement le rôle de la technologie dans le processus de production. D'autre part, il ne montre pas non plus son effet sur les émissions globales d'un pays.

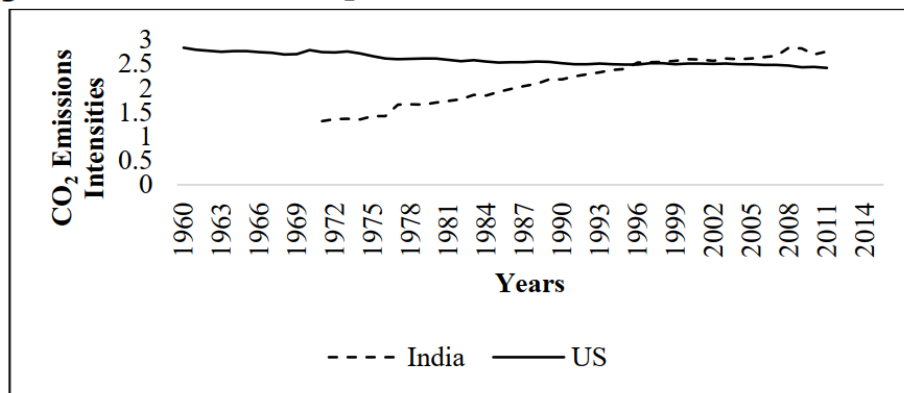
De même, il ne montre pas les impacts sur le bien-être en ajoutant des réglementations afin de contrôler le flux des émissions.

Figure 1: Trends in the Aggregate Emissions of the US and India



Source: WDI, The World Bank.

Figure 2: Trends in the CO₂ Emission Intensities of the US and India



Source: WDI, The World Bank.

Dans le cas de l'Inde, les émissions globales ne diminuent pas et sont en fait en augmentation constante. Elles ne montrent aucun signe de chute. De même, les données de l'intensité d'émission illustrent également une hausse.

Le " modèle de Solow Vert " a été formulé pour expliquer le comportement des données américaines. Comme les tendances aux États-Unis et les tendances indiennes sont radicalement différentes, le " modèle de Solow Vert " n'est pas valable pour le cas indien.

Dans le cas des États-Unis, il existe certainement une possibilité de réduire les émissions sans perte significative de bien-être.

Dans le cas indien, ce n'est pas vrai.

En résumé, l'Inde a le plus à gagner en important des technologies. La réduction des émissions dans le cas indien est particulièrement difficile. Et tout développement est probablement un processus lent et graduel. Le gouvernement indien est obligé de choisir entre assurer des avantages à court terme pour les pauvres ou garantir la durabilité environnementale à long terme pour la nation.

Par conséquent, la capacité de l'Inde à respecter les réglementations mises en place par la communauté internationale dépend de plusieurs facteurs, et il y a de fortes chances que l'Inde aura besoin d'une plus grande liberté à cet égard, afin de garantir le bien-être de sa société.

Il devient évident que le développement des technologies modernes coûte cher dans le cas indien.

(C2). Faut-il croire à la croissance verte ?

La **croissance verte** est une idée relativement récente issue de la conférence "Rio+20" en 2012. Avec le concept de croissance verte, l'ONU a proposé un horizon se fondant sur les bases d'une économie verte qui garantit une croissance économique soutenue. Dès lors, le concept de croissance verte constitue la réponse systématique face au changement climatique et à la dégradation des écosystèmes.

La **croissance verte** postule qu'une expansion économique continue et durable est compatible avec une utilisation durable des ressources environnementales. Par conséquent, la croissance du PIB peut être dissociée de l'utilisation des ressources environnementales et des émissions de carbone de façon à prendre en compte les changements climatiques et la destruction des écosystèmes.

Ce concept s'inscrit dans le cadre du développement durable (rapport *Brundtland* de 1987) qui vise à concilier une augmentation du PIB tout en préservant les ressources offertes par l'environnement. Cette idée est bien entendu utopique compte-tenu du fait que les ressources naturelles sont limitées. Cela conduit donc à de nombreuses controverses. En effet, dissocier la croissance économique de l'exploitation des ressources naturelles et des émissions de carbone est impossible suivant l'étude de *Jason Hickel* « *Is **Green Growth** possible ?* », 2019.

En effet, une forte réduction de l'utilisation des ressources n'est possible qu'avec une croissance annuelle du PIB inférieure à 1%. De plus, afin de contenir les émissions polluantes (eg. dioxyde de carbone) dans les limites compatibles avec un réchauffement climatique inférieur à 1.5°C, il faut mettre en œuvre des stratégies de décroissance. Or la décroissance part du principe que la croissance économique n'est pas compatible avec le respect de l'environnement puisqu'elle nécessite une diminution de la production et de la consommation de biens et services. La préservation de l'environnement et la croissance économique semblent donc être deux notions antagonistes donc incompatibles. Par conséquent, l'idée que puisse exister une croissance économique réellement respectueuse de l'environnement n'est pas plausible pour les altermondialistes décroissants.

En revanche, pour les libéraux techno-optimistes, la croissance verte est possible puisqu'elle offre techniquement un moyen de produire massivement de l'énergie décarbonée (qui n'est pas renouvelable) avec le progrès technique. Cependant, la transition vers une société post-carbone apparaît complexe étant donné qu'elle nécessite une parfaite coordination de tous les états et pose des défis technologiques dans l'élaboration d'énergies dites « propres ». Il faut également repenser les modes de consommation. Les stratégies en faveur de la **croissance verte** doivent donc être adaptées aux spécificités de chaque pays. Cela suggère qu'il n'y a donc pas de formule universelle pour promouvoir la **croissance verte**.

(D). Annexe

(D1). Taux de croissance

Taux de croissance Si nous considérons le temps comme une variable continue, nous pouvons caractériser de la manière suivante la variation de l'agrégat Y à chaque moment du temps

$$\dot{Y} = \frac{dY}{dt} \quad (1.2)$$

Taux de croissance instantané de Y est alors donné par :

$$\gamma_Y = \frac{dY/dt}{Y} = \frac{\dot{Y}}{Y} = \frac{d}{dt} \ln(Y) \quad (1.3)$$

Si γ est le taux de croissance de Y , Y_0 sa valeur initiale (en $t = 0$), la valeur de Y à la période T peut être calculée :

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Y}}{Y} = \gamma &\Leftrightarrow \frac{d}{dt} \ln(Y) = \gamma \\ &\Leftrightarrow \ln(Y) = \int \gamma dt = \gamma t \\ Y_T \equiv Y(T) &= e^{[\gamma \times T - \gamma \times 0] + C_0} = e^{\gamma T + C_0} \\ Y_0 \equiv Y(0) &= e^{C_0} \Leftrightarrow Y_T = Y_0 e^{\gamma T} \end{aligned}$$

(D2). Le modèle de Solow

Le modèle de Solow

Solow, Robert, 1956, *A Contribution to the Theory of Economic Growth*, Quarterly Journal of Economics, 70, 65-94. (Prix Nobel : 1987)

2.1 Le modèle de base

Le modèle fait un certain nombre d'hypothèses :

- (H1) Les pays produisent et consomment un seul bien homogène (le produit Y) ;
- (H2) La production se fait en concurrence parfaite ;
- (H3) La technologie est *exogène* ;
- (H4) La technologie peut être représentée par une fonction de production de type *néo-classique* basée sur des facteurs substituables : le capital (K) et le travail (L) ;
- (H5) La consommation agrégée est représentée par une fonction keynésienne :

$$C = c \cdot Y \Rightarrow S = (1 - c) Y = s \cdot Y \quad (2.1)$$

- (H6) Le taux participation à l'emploi de la population est constant. Si la population croît au taux n , l'offre de travail (L) augmente aussi à ce taux n :

$$\frac{d \log(L)}{dt} = \frac{dL/dt}{L} = \frac{\dot{L}}{L} = n \quad (2.2)$$

Une fonction de production est dite *néo-classique* si elle vérifie les trois propriétés suivantes :

1. Productivités marginales décroissantes

$$\forall K > 0, L > 0, \quad \frac{\partial F}{\partial K} > 0, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial K^2} < 0 \quad (2.3)$$
$$\frac{\partial F}{\partial L} > 0, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial L^2} < 0.$$

2. Rendements d'échelle constants

$$F(\lambda K, \lambda L) = \lambda F(K, L), \quad \forall \lambda > 0. \quad (2.4)$$

(F est homogène de degré 1)

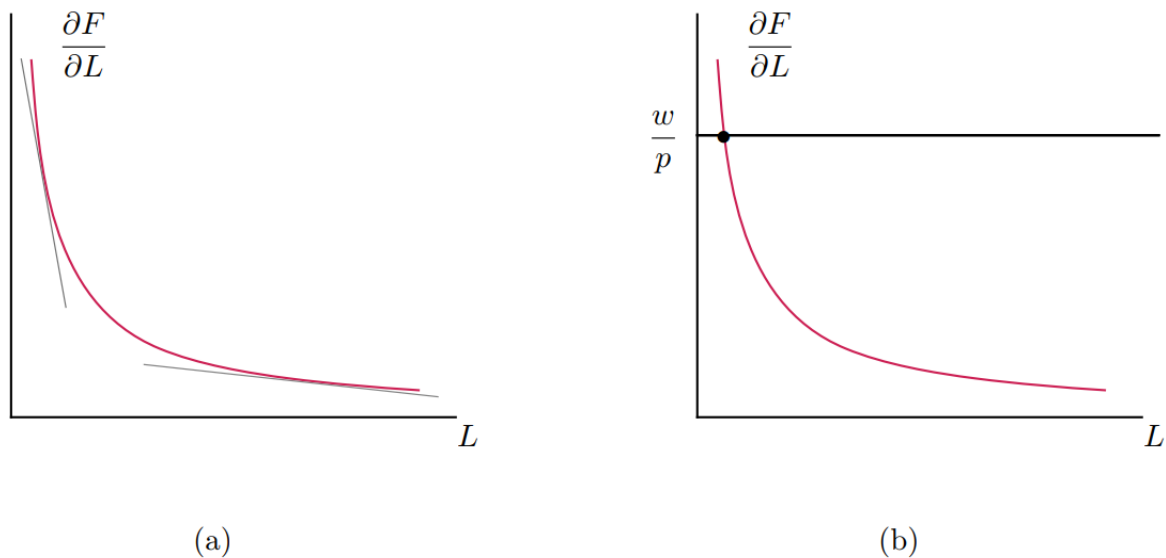


FIGURE 2.1 – Productivité marginale du travail (a) et optimisation du profit (b)

3. Conditions d'Inada (Inada(1963))

$$\begin{aligned} \lim_{K \rightarrow 0} F_K &= \lim_{L \rightarrow 0} F_L = \infty, \\ \lim_{K \rightarrow \infty} F_K &= \lim_{L \rightarrow \infty} F_L = 0. \end{aligned} \quad (2.5)$$

(F_K et F_L sont de type hyperbolique). Fig. 2.1 illustre les conséquences de ces conditions d'Inada sur la résolution du problème de maximisation de profit de la firme concurrentielle.

$$Y = F(K, L) = K^\alpha L^{(1-\alpha)}, \quad \alpha \in [0, 1]. \quad (2.6)$$

Les rendements d'échelle sont donc constants ($\alpha + (1 - \alpha) = 1$). En concurrence parfaite, les firmes sont preneuses de prix et elles maximisent le profit

$$\max_{K, L} F(K, L) - rK - wL$$

où r est le taux d'intérêt réel et w , le salaire réel. La maximisation de profit implique

$$\begin{aligned} w &= \frac{\partial F}{\partial L} = (1 - \alpha) \frac{Y}{L} \\ r &= \frac{\partial F}{\partial K} = \alpha \frac{Y}{K} \end{aligned}$$

De plus,

$$wL + rK = Y$$

$$\begin{aligned} k &\equiv \frac{K}{L} \quad (\text{avec } \frac{L}{L} = 1), \quad y \equiv \frac{Y}{L} = F\left(\frac{K}{L}, 1\right) \equiv f(k) \\ f(k) &= \frac{F(K, L)}{L} = \frac{K^\alpha L^{(1-\alpha)}}{L} = \left(\frac{K}{L}\right)^\alpha = k^\alpha \\ y &= f(k) = k^\alpha \end{aligned} \quad (2.7)$$

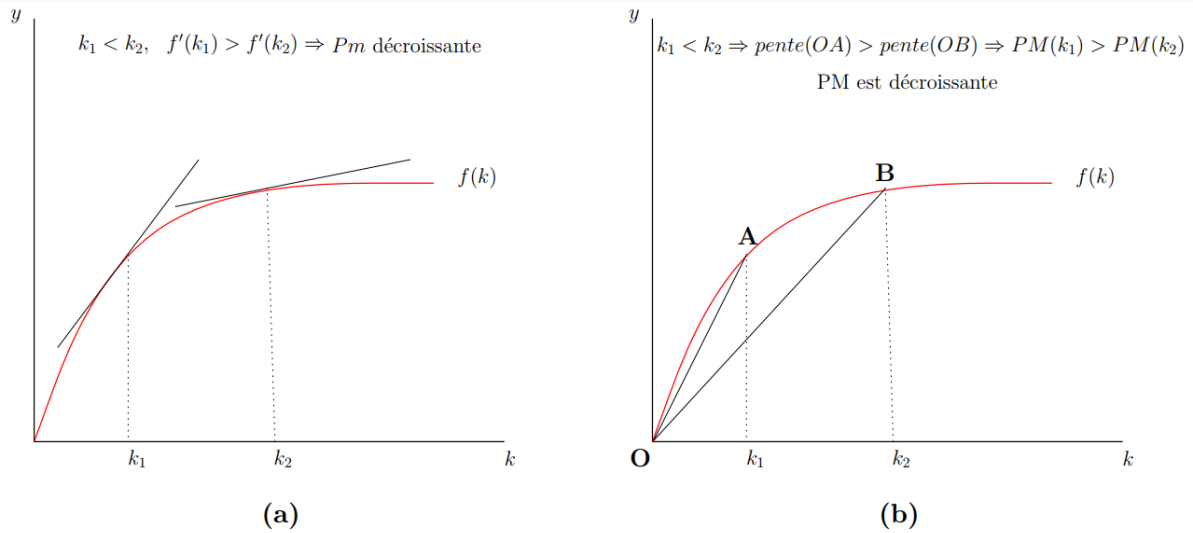


FIGURE 2.2 – Fonction de production per capita, productivités marginale (a) et moyenne (b)

Ce graphique fait clairement apparaître les rendements décroissants du capital par ouvrier.

La seconde équation fondamentale du modèle de Solow concerne l'accumulation du capital et donc la dynamique :

$$\dot{K} \equiv \frac{dK}{dt} = I - \delta K \quad (2.8)$$

la variation du capital est égale à la différence entre investissement et la dépréciation du capital (au taux constant δ).

Comme nous avons une économie fermée, l'investissement est nécessairement égal à l'épargne (équilibre du marché des biens) :

$$I = S = s \cdot Y \quad (2.9)$$

$$\dot{K} = sY - \delta K \quad (2.10)$$

D'autre part, nous avons :

$$\begin{aligned} k &= \frac{K}{L} \Rightarrow \log(k) = \log(K) - \log(L) \\ \Rightarrow \frac{d \log(k)}{dt} &= \frac{\dot{k}}{k} = \frac{\dot{K}}{K} - \frac{\dot{L}}{L} = \frac{sY - \delta K}{K} - \frac{\dot{L}}{L} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Or, l'équation 2.2 nous donne le taux de croissance du facteur travail (du fait de l'équilibre du marché de travail)

$$\begin{aligned} \frac{\dot{L}}{L} &= n \Rightarrow \frac{d \log(L)}{dt} = n \Rightarrow \log(L) = \int n dt = nt + C_0 \\ \Rightarrow L(t) &= e^{nt+C_0}. \quad L(0) = e^{C_0} = L_0. \\ L(t) &= L_0 e^{nt}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

L'équation 2.11 devient donc

$$\frac{\dot{k}}{k} = \frac{sY}{K} - \delta - n = \frac{sy}{k} - \delta - n.$$

Ce qui nous donne l'équation dynamique fondamentale du capital

$$\dot{k} = s \cdot f(k) - (\delta + n) \cdot k, \quad (2.13)$$

(E). Références

William A. Brock and M. Scott Taylor (2004)

THE GREEN SOLOW MODEL



<https://www.nber.org/papers/w10557>

Santosh K. Sahu and Arjun Shatrunjay (2017)

An Alternative Argument of Green Solow Model in Developing Economy Context



<https://www.mse.ac.in/wp-content/uploads/2017/03/Working-Paper-160-.pdf>

Faut-il croire à la croissance verte ? (2019)



<https://ledrenche.ouest-france.fr/une-croissance-verte-est-elle-possible/>

La croissance verte, idéal ou illusion ? (2019)



<https://www.usinenouvelle.com/blogs/julien-fosse/la-croissance-verte-ideal-ou-illusion.N853460>

Une croissance verte est-elle possible ? (2020)



<https://fr.weforum.org/agenda/2020/01/une-croissance-verte-est-elle-possible/>

Pierre-André Jouvét et Christian de Perthuis (2017)

La croissance verte : de l'intention à la mise en œuvre



<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01504973/document>