12ème colloque
de l'Association de comptabilité nationale
Paris, 4-6 juin 2008

Session n° 3
Au-delà du PIB, à la recherche d'indicateurs synthétiques –
Les relations entre environnement et développement durable

Le concept d'épargne véritable est-il adapté pour mesurer la durabilité du développement économique ?

Antoine d'Autume et Katheline Schubert
Université Paris 1 et PSE

Le concept d'épargne véritable est-il adapté pour mesurer la durabilité du développement économique ?

Antoine d'Autume et Katheline Schubert
Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et Paris School of Economics

May 31, 2008

Abstract

Les concepts d'épargne et de produit national net, ou vert, apparaissent de plus en plus comme des outils utiles pour apprécier la durabilité de la croissance. L'objectif de l'article est de montrer que la théorie de la croissance en présence de ressources naturelles contribue effectivement à leur donner un fondement, mais qu'elle se heurte aussi à des difficultés pratiques notamment du point de vue de la disponibilité des données. La règle de Hartwick est ici la référence fondamentale. Elle montre que la nullité de l'épargne véritable assure la durabilité de la croissance, dès lors que tous les stocks de capital pertinents ont été pris en compte dans sa définition. Nous mettons en évidence cette propriété dans le modèle canonique de Dasgupta-Heal-Solow, élargi par la prise en compte de l'aménité du capital naturel. Nous élargissons ensuite notre point de vue en supposant que l'environnement économique n'est plus stationnaire : le progrès technique ou la croissance de la population affectent les capacités de production ; les échanges internationaux élargissent le domaine des possibles pour un pays. Nous montrons que des formes adaptées de la règle de Hartwick restent alors valides, mais qu'elles ne se réduisent pas à la nullité de l'épargne véritable usuelle et que leur mise en oeuvre pratique pose des problèmes accrus de disponibilité des données.
.

1 Introduction

Pourquoi cherche-t-on à étendre les comptes nationaux ? Tout d'abord, pour disposer d'une mesure du bien-être social qui ne souffre pas des défauts bien connus du PIB. Il s'agit de prendre en compte tous les stocks de capital qui comptent pour les possibilités de production, de consommation, de création de bien-être futurs : le capital naturel, les ressources non renouvelables et renouvelables, le capital humain, les connaissances... Ensuite, pour disposer d'un indicateur de la durabilité de la croissance économique. Les deux questions ne coïncident pas totalement, mais nous allons voir que la théorie nous oblige à les examiner ensemble car la mesure du bien-être social et celle de la durabilité sont intimement liées.

La littérature théorique sur le sujet est très abondante. La très grande majorité des contributions se place dans un cadre d'optimum et postule que la société dispose d'un critère de bien-être social intertemporel qu'elle désire maximiser, sous les contraintes techniques d'accumulation des stocks de capital manufacturé, technologique, humain, et d'évolution des stocks de capital naturel. Le critère de bien-être social est la plupart du temps utilitariste escompté. Toutefois, les contributions qui s'intéressent spécifiquement à la question de la durabilité adoptent souvent un autre critère, utilitariste non escompté ou maximin, pour prendre en compte dès ce stade le souci de traitement équitable de toutes les générations, c'est-à-dire la préoccupation de durabilité de la croissance. Quelques contributions récentes (cf. Dasgupta et Mäler [2000]) s'affranchissent du cadre de la croissance optimale au motif que les gouvernements des économies réelles ne sont pas obligatoirement optimisateurs, et que si l'on veut disposer d'une théorie opératoire, permettant la mesure, il faut autant que possible se placer dans un cadre plus général.

Nous pensons cependant que faire référence à la théorie de l'équilibre et de l'optimum et, en particulier, aux modèles d'optimisation intertemporelle, éclaire beaucoup la question des indicateurs. Cette démarche fournit un cadre d'analyse systématique et cohérent. Elle amène à distinguer les effets passant par la production de ceux passant directement par l'utilité ; le réchauffement climatique, par exemple, doit être pris en compte dans ces deux dimensions puisqu'il influence à la fois les conditions de production, par exemple agricoles, et les conditions de vie, peut-être très fortement à travers l'élévation du niveau de la mer. La démarche force à réfléchir aux prix qu'il est nécessaire d'utiliser pour agréger les différents biens. Les théorèmes du bien-être fondent la recommandation d'utiliser les prix de marché autant qu'il est possible. Mais la présence de biens et services non-marchands et d'externalités amène à introduire des prix fictifs. Ils ne correspondent à aucun prix de marché et il est très difficile de les évaluer, mais leur prise en compte est absolument nécessaire pour construire des indicateurs pertinents. L'analyse de l'équilibre et du bien-être, enfin, est a priori une démarche fondée sur les comportements et les utilités individuelles. Elle amène inévitablement à poser les questions d'inégalité et de choix collectifs.

Ces arguments généraux prennent un sens particulier lorsque l'on se place dans un cadre intertemporel. La définition exhaustive des stocks et leur valorisation apparaît comme un préalable à une définition correcte de l'investissement. La nécessité de prendre en compte les gains ou pertes en capital résultant des variations de prix des actifs s'impose. Tous ces éléments seront, comme nous le verrons, à la base de l'analyse de l'épargne véritable et du produit national net.

Nous présentons dans cette contribution les fondements théoriques de l'épargne véritable, à travers tout d'abord un modèle simple à deux stocks de capital, le capital manufacturé et un capital naturel non renouvelable. Ce modèle canonique de Dasgupta et Heal [1974] et Solow [1974] sert aujourd'hui de référence. A la suite de Krautkraemer [1985] et de d'Autume et Schubert [2008], nous le modifions en considérant que le capital naturel présente une aménité pour les agents et qu'il intervient directement dans leur fonction d'utilité. Ceci nous amène à considérer une consommation élargie, où l'aménité du capital naturel intervient à côté de la consommation de biens physiques. Ce modèle peut être étendu aux autres formes de capital naturel (ressources renouvelables, stocks de pollution) ainsi qu'au capital humain ou au capital de connaissances.

Nous mettons en évidence les atouts de l'épargne véritable comme indicateur de durabilité : (1) une épargne véritable nulle à toute date indique que l'utilité reste constante le long du sentier de croissance (règle de Hartwick [1977]), (2) une épargne véritable négative à une date donnée indique que le taux de croissance de la consommation va devenir négatif dans le futur et que la croissance n'est donc pas durable, (3) une épargne véritable positive à une date donnée indique que le bien-être intertemporel est non décroissant à cette date.

Nous définissons ensuite le produit national net et montrons pourquoi il constitue une bonne définition du revenu national, et en quoi il peut constituer un indicateur de durabilité.

Nous terminons par les critiques qui sont adressées à l'épargne véritable en tant qu'indicateur de durabilité. La plus immédiate est qu'il faut disposer des "bons" prix pour que son calcul ait un sens. D'autres critiques qu'il s'agit d'évaluer concernent le fait que le signe de l'épargne véritable n'est plus pertinent dès lors que l'environnement économique n'est plus stationnaire, et particulièrement en présence de progrès technique exogène, en économie ouverte ou quand la population n'est pas constante.

2 L'épargne véritable : fondements théoriques

2.1 La représentation des choix collectifs

L'approche intertemporelle des choix de consommation repose habituellement sur la maximisation d'un critère utilitariste escompté :

$$\max \int_0^\infty e^{-\rho t} U(C_t) dt, \qquad U(C) = C^{1-1/\sigma}/(1-1/\sigma)$$

Dans le cadre le plus simple, l'utilité instantanée $U(C)$ dépend seulement de la consommation, mais il est possible d'introduire d'autres arguments dans la fonction d'utilité et de retenir la formulation étendue

$$\max \int_0^\infty e^{-\rho t} U\left[u(C_t, X_t)\right] dt, \qquad U = u^{1-1/\sigma}/(1-1/\sigma)$$

où X représente un ensemble de variables influençant l'utilité instantanée.

Deux paramètres seulement interviennent dans la formulation la plus simple et jouent aussi un rôle essentiel dans la formulation étendue : le taux de préférence pour le présent ρ et l'élasticité intertemporelle de substitution σ. Le premier mesure le poids que la société attribue à la satisfaction des générations futures. Le choix usuel d'un taux d'escompte ρ positif revient à attribuer plus d'importance à la génération présente qu'aux générations futures, ce qui constitue bien sûr un choix criticable sur le plan éthique. Une approche en termes de développement durable incite donc à retenir un taux d'escompte nul. Mais le second paramètre joue également un rôle important. Les générations futures sont objectivement favorisées du point de vue des possibles. Elles bénéficeront des avancées du progrès technique. Même en son absence, elles pourront bénéficier de l'accumulation du capital. L'épuisement des ressources naturelles non renouvelables joue a priori en sens inverse, au désavantage des générations futures, mais ce désavantage peut être compensé par l'accumulation du capital. Il est donc en général possible de substituer des consommations futures aux consommations présentes à des termes avantageux pour elles. Le paramètre σ décrit le degré auquel la société est prête à accepter cette substitution. Une valeur élevée signifie que le sentier optimal pourra être caractérisé par une croissance de l'utilité au cours du temps. Une valeur nulle impose que toutes les générations atteignent le même niveau d'utilité. Ceci revient à retenir le critère maximin où l'on maximise, dans un esprit rawlsien, l'utilité de la génération la plus mal lotie.

2.2 Epargne véritable et règle de Hartwick

Le modèle canonique de Dasgupta et Heal [1974] et Solow [1974] considère deux stocks de capital, le capital manufacturé (K) et le capital naturel (X), ici un stock de ressource non renouvelable. Il n'y a ni croissance de la population ni progrès technologique.

L'équation d'accumulation du capital manufacturé est :

$$\dot{K} = F(K, N, R) - \delta K - C \tag{1}$$

où C est la consommation, N l'emploi, R l'extraction de la ressource naturelle, $F(K, N, R)$ la fonction de production de l'économie, δ le taux de dépréciation du capital manufacturé. L'évolution du stock de ressource non renouvelable est quant à elle donnée par :

$$\dot{X} = -R \tag{2}$$

Enfin, l'économie est soumise à des conditions initiales : les stocks K_0 et X_0 sont donnés.

L'hypothèse cruciale concernant la technologie et celle de substituabilité entre le capital manufacturé et la ressource naturelle. Les controverses sur ce point sont abondantes dans la littérature sur la durabilité de la croissance.

On suppose vérifiée la règle de Hotelling :

$$\dot{F}'_R = (F'_K - \delta)F'_R$$

qui indique que la productivité marginale de la ressource naturelle croît au taux d'intérêt de l'économie. Elle s'écrit encore, en notant $q = F'_R$ et $r = F'_K - \delta$:

$$\dot{q} = rq \tag{3}$$

L'épargne véritable (genuine saving)[1], ou encore l'investissement net, est définie comme la somme des investissements en valeur en capital manufacturé et en capital naturel, le numéraire étant le bien de consommation :

$$G = \dot{K} + q\dot{X} = \dot{K} - qR \tag{4}$$

On montre (annexe A) qu'on a alors

$$\dot{G} = rG - \dot{C} \tag{5}$$

Ainsi, si l'épargne véritable est nulle à tout instant, la consommation est constante. Ceci est la règle de Hartwick (Hartwick [1977]). Elle indique en

[1] Le terme "genuine saving" a été introduit par Hamilton et Clemens [1999].

d'autres termes qu'une société qui investit les rentes issues de l'extraction de ses ressources épuisables en accumulation de capital manufacturé suit un sentier de croissance équitable – et durable – au sens où le même niveau de consommation est assuré à toutes les générations, présentes et futures. Cette règle peut être étendue au cas où l'utilité instantanée des agents dépend non seulement de leur consommation mais aussi de la satisfaction qu'ils retirent de l'existence des ressources naturelles (leur valeur d'aménité). Dans ce cas, une société ayant une épargne véritable nulle à tout instant garantit une utilité constante à l'ensemble des générations, avec une consommation croissante et des aménités décroissantes, au fur et à mesure que le capital manufacturé se substitue au capital naturel. Formellement, si l'utilité instantanée est $U(C_t, X_t)$, la règle de Hotelling doit être modifiée pour incorporer la valeur d'aménité de la ressource et s'écrit :

$$\dot{q} = rq - p, \qquad \text{avec } p = \frac{U'_X}{U'_C} \tag{6}$$

Le prix p est le prix (fictif) des services d'aménité fournis par le capital naturel. Il est égal au taux marginal de substitution entre ces services et la consommation physique.

On montre alors facilement qu'il faut remplacer l'équation (5) par

$$\dot{G} = rG - \frac{\dot{U}}{U'_C} \tag{7}$$

Revenons au cas simple où seule la consommation procure de l'utilité. On peut intégrer l'équation (5) en

$$G_t = \int_t^{\infty} \dot{C}_s e^{-\int_t^s r(x)dx} ds \tag{8}$$

qui indique que l'épargne véritable est à chaque instant égale à la valeur présente actualisée (par la productivité marginale nette du capital) des variations de consommation futures. C'est cette équation qui justifie véritablement, dans les travaux appliqués, l'utilisation de l'épargne véritable comme indicateur de durabilité. En effet, elle montre que si à un instant donné l'épargne véritable est négative, alors le taux de croissance de la consommation va forcément devenir négatif dans le futur, et la croissance ne sera pas durable. Cependant l'indication donnée par l'épargne véritable sur la durabilité de la croissance n'est que partielle : il est clair qu'une épargne véritable positive à un instant donné ne permet pas de conclure que la croissance est durable (c'est-à-dire que $G < 0$ implique la non durabilité, mais $G > 0$ n'implique pas la durabilité).

Bien attendu, cette analyse suppose que les autres conditions d'optimalité comme la règle de Hotelling soit vérifiéee. Elle suppose aussi que les prix soient les bons, soit parce que les prix de marché assurent l'efficacité, soit parce qu'on a mis en place un système de taxes et subventions.

3 Richesse, épargne véritable et produit national net

Nous revenons maintenant à la question de l'extension des comptes nationaux. Il s'agit de disposer d'une mesure du revenu national qui ne souffre pas des défauts bien connus du PIB. Un candidat est le Produit National Net, que nous définissons et dont nous montrons l'intérêt. Nous adoptons tout d'abord une approche comptable, puis nous plaçons dans un cadre théorique de croissance optimale afin de mettre en évidence les liens entre Produit National Net, richesse et bien-être social.

3.1 Les égalités comptables

Nous supposons les rendements d'échelle de la fonction de production constants par rapport aux trois facteurs, capital, travail et ressource naturelle.

Les égalités comptables sont les suivantes :

$$C + \dot{K} = Y = wN + rK + qR \tag{9}$$

où w est la productivité marginale du travail, qui s'écrit encore

$$C + \underbrace{(\dot{K} + q\dot{X})}_{G} = \underbrace{Y + q\dot{X}}_{\text{PNN}} = \underbrace{wN + rK}_{\text{revenu national net}} \tag{10}$$

En ajoutant l'aménité, on a encore

$$\underbrace{(C + pX)}_{\widetilde{C}\text{, conso. élargie}} + G = \underbrace{Y + q\dot{X} + pX}_{\text{PNN élargi}} = wN + rK + pX \tag{11}$$

La comptabilité usuelle, représentée par l'équation (9), surestime le Produit, l'Investissement et le Revenu puisqu'elle ne déduit pas la destruction du capital naturel. La comptabilité en termes de Produit National Net (PNN) corrige ce défaut (équation (10)). La comptabilité élargie va plus loin en incluant l'aménité du capital naturel dans la consommation élargie, le Produit National Net élargi et le Revenu National Net élargi (équation (11)).

Prenons maintenant en compte les gains en capital, qui se réduisent ici à la variation de la valeur du capital naturel.

La richesse de l'économie est :

$$W = K + qX \tag{12}$$

On en déduit, en utilisant la définition de l'épargne véritable,

$$\dot{W} = \dot{K} + q\dot{X} + \dot{q}X = G + \dot{q}X \tag{13}$$

La variation de la richesse au cours du temps est donc la somme de l'épargne véritable et du gain en capital sur le stock de ressource.

En utilisant la règle de Hotelling (6), on obtient la relation suivante à partir de (11) :

$$\widetilde{C} + \dot{W} = \underbrace{Y + q\dot{X} + pX}_{\text{PNN élargi}} + \underbrace{\dot{q}X}_{\text{gain en capital}} = \underbrace{wN + rW}_{\text{revenu national élargi}} \tag{14}$$

Le Revenu National élargi est la somme du Produit National Net élargi et du gain en capital réalisé sur la valeur des actifs. La règle de Hotelling revient à poser l'égalité des taux de rendements des différents actifs. Elle assure ainsi la cohérence des comptes nationaux de production et de revenu. Le Revenu National élargi apparaît alors comme la masse salariale augmentée des intérêts rapportés par l'ensemble des actifs qui constituent la richesse nationale.

Ce type d'analyse, développé ici pour prendre en compte les aménités environnementales et le rôle productif des ressources naturelles, peut être simplement étendu à d'autres éléments comme la prise en compte de la désutilité du travail, du capital humain, du capital de connaissances...

3.2 Optimisation intertemporelle et Produit National Net

Pourquoi le PNN (ou le PNN élargi) a-t-il un intérêt ? Constitue-t-il la bonne définition du revenu national ? Donne-t-il des indications sur la durabilité de l'économie ? La recherche théorique d'un sentier de croissance optimale permet de donner une réponse - théorique, elle aussi - à ces questions.

Un sentier de croissance optimal sur le plan de la production et de l'allocation des ressources maximise la valeur présente des consommations, calculée en prenant le taux d'intérêt monétaire comme taux d'actualisation.

Appelons V la valeur optimale de ce problème. Elle vérifie la relation suivante :

$$rV - \frac{\partial V}{\partial t} = (C + pX) + (\dot{K} + q\dot{X}) \tag{15}$$

Le second membre de cette relation n'est autre que le PNN élargi, somme de la consommation élargie $\tilde{C}$ et de l'épargne véritable G. Il est aussi égal au hamiltonien du problème d'optimisation, ce qui n'est pas surprenant puisque cet outil mathématique est conçu pour prendre en compte simultanément le gain instantané et les gains futurs dans le problème d'optimisation étudié.

Considérons maintenant le problème d'optimisation sociale, qui consiste à maximiser la valeur actualisée de l'utilité sous l'ensemble des contraintes techniques. Appelons V^u la valeur optimale de ce problème. Elle vérifie la relation suivante :

$$\rho V^u = U(C, X) + \lambda \left(\dot{K} + q\dot{X}\right), \qquad \text{avec } \lambda = U_C \tag{16}$$

Cette nouvelle relation fait de nouveau intervenir l'épargne véritable, mais elle doit être multipliée par la variable λ représentant l'utilité marginale de la consommation. Cette relation revient en effet à tenir une comptabilité en termes d'utilité. L'utilité marginale λ représente le prix du bien en termes d'utilité.

On remarque aussi que le terme représentant la dérivée de la valeur par rapport au temps a disparu. La raison en est que nous avons maintenant affaire à un problème d'optimisation autonome, où l'environnement dans lequel l'agent représentatif prend ses décisions ne dépend pas de la date considérée. Il dépend seulement du niveau des stocks à cette date.

L'équation (16) peut être interprétée de différentes façons.

L'expression ρV^u du membre de gauche est l'utilité constante équivalente. La référence au revenu permanent peut éclairer cette remarque. On sait que le revenu permanent est le revenu constant équivalent, en valeur actualisée, à la richesse de l'agent. En horizon infini il est égal aux intérêts rapportés par la richesse. De la même façon, dans le cas présent, l'utilité constante équivalente est égale aux intérêts associés à la valeur V^u, calculés en utilisant le taux ρ de préférence pour le présent dont la fonction est d'actualiser les utilités.

Le membre de droite est le hamiltonien du problème. C'est lui qui permet de calculer l'utilité constante équivalente et apparaît donc comme un indicateur de durabilité. Mais comme le font remarquer Dasgupta et Mäler [2000], ceci est de peu d'utilité pratique, car le hamiltonien n'est pas linéaire en les quantités et n'est donc pas facile à calculer concrètement, contrairement au PNN[2].

Weitzman [1976], dans un papier influent, interprète le PNN comme étant la consommation constante équivalente. Il ne prend pas en compte l'aménité du capital naturel et fait l'hypothèse très forte d'une utilité fonction linéaire

[2]Hartwick [1990, 1990] et Weitzman [2000, 2000] proposent alors d'utiliser un hamiltonien linéarisé.

de la consommation de biens. On a donc $U(C) = C$ et $\lambda = U_C = 1$. La relation (16) devient

$$\rho V^W = C + \left(\dot{K} + q\dot{X}\right)$$

On retrouve dans le membre de droite le Produit National Net qui apparaît ainsi comme un bon indicateur de durabilité. Cette méthode est tentante par sa simplicité mais est discutable car elle semble suggérer que l'on peut se contenter de raisonner en termes de niveau de consommation agrégé en échappant à la nécessité de mesurer directement le bien-être ou, indirectement, d'utiliser des prix . Elle est pourtant très limitée. Dès qu'existent plusieurs biens de consommation, dès qu'on prend en compte le loisir ou les aménités environnementales, on doit bien faire intervenir des prix.

La relation (16) apparaît bien en définitive comme incontournable. Bien que faisant référence à une utilité inobservable, elle permet de dégager des conclusions utiles. Supposons qu'on adopte comme définition de la durabilité le fait que le bien-être social intertemporel soit non-décroissant à chaque instant, i.e. $dV_t^u/dt \geq 0\ \forall t$ (Dasgupta [2001]). Alors

$$\frac{dV_t^u}{dt} \geq 0 \Leftrightarrow \lambda_t\left(\dot{K}_t + q_t\dot{X}_t\right) \geq 0 \Leftrightarrow G_t \geq 0$$

Une épargne véritable courante positive à un instant donné indique donc que le bien-être intertemporel est non-décroissant à cet instant. Evidemment, ceci ne garantit pas que le bien-être social ne décroîtra jamais à l'avenir et que la croissance sera ainsi durable. Mais cela donne néanmoins un critère d'appréciation de la situation courante.

Sefton et Weale [1996] ont aussi pris le problème autrement en définissant de manière générale le PNN de la manière suivante :

$$\mathrm{PNN}_t = \int_t^{\infty} r_\tau C_\tau e^{-\int_t^\tau r_s ds} d\tau \tag{17}$$

ce qui entraîne

$$\frac{d}{dt}\mathrm{PNN}_t = r_t(C_t - \mathrm{PNN}_t) \tag{18}$$

On retrouve ainsi l'idée que la constance du PNN est équivalente à la règle consistant à avoir une consommation égale au PNN[3].

[3] Weitzman [1976] définit le Produit National Net comme l'équivalent stationnaire des consommations futures (la consommation constante équivalente) :

$$Y_t^W = r_t \int_t^{\infty} C_\tau e^{-\int_t^\tau r_s ds} d\tau$$

Sa définition n'est donc identique à celle de Sefton et Weale que si le taux d'intérêt réel r est constant.

Le PNN ainsi défini est identique à celui qui émerge de notre modèle. Il est facile en effet de vérifier que la définition PNN $= F(K, R) + q\dot{X}$ et la règle de Hotelling impliquent les relations (17) et (18).

4 Epargne véritable et environnement non stationnaire

La section précédente a montré que l'épargne véritable et le PNN constituaient une référence utile pour apprécier la durabilité de la croissance. Mais ces résultats étaient tributaires de l'hypothèse d'un environnement économique stationnaire. Qu'en est-il si le progrès technique modifie la fonction de production, si l'économie est ouverte et que les termes de l'échange se modifient, ou encore si la population n'est pas constante ?

4.1 Progrès technique exogène

Considérons tout d'abord le cas où un progrès technique exogène, au taux constant γ, vient déformer au cours du temps la fonction de production. Celle-ci s'écrit

$$Y = F(A, K, N, R), \qquad \dot{A}/A = \gamma, \qquad A_0 = 1$$

où A est le progrès technique. Nous ne spécifions pas davantage la forme qu'il peut prendre (productivité globale des facteurs, progrès technique augmentant le travail...).

Pour être en cohérence avec l'approche que nous avons adoptée ici, il faut définir l'épargne véritable en traitant formellement le progrès technique comme un stock de capital. Il faut donc définir le prix implicite de ce stock en termes de biens de consommation. Notons q_A ce prix. La définition de l'épargne véritable est alors

$$G = \dot{K} + q\dot{X} + q_A\dot{A} \tag{19}$$

L'annexe B montre que le prix implicite q_A et la valeur (fictive) $Q_A = q_A A$ du stock de progrès technique satisfont les conditions suivantes :

$$\dot{q}_A = (r - \gamma)q_A - F'_A \tag{20}$$

$$\dot{Q}_A = rQ_A - F'_A A \tag{21}$$

Pour interpréter plus concrètement ces relations, considérons le stock technologique A comme un stock de capital humain et q_A comme la valeur d'une unité de capital humain. F'_A est alors le salaire mesuré en unités efficaces et $F'_A A$ la masse salariale. Le rendement d'une unité de capital humain est la somme du salaire F'_A, de la valeur $q_A \gamma$ de la croissance exogène du capital humain et du gain en capital $\dot{q}_A$. Ce rendement doit être égal au taux d'intérêt r. Enfin, la richesse humaine Q_A est la valeur actualisée des salaires futurs.

Bien que cette interprétation soit séduisante, elle se heurte, dans le cas d'un progrès technique purement exogène, au problème de la mesure des valeurs q_A et Q_A.

Enfin, on a (annexe B)

$$\dot{G} - rG = -\frac{\dot{U}}{U'_C}$$

et une épargne véritable nulle entraîne une utilité constante : la règle de Hartwick tient. Elle s'écrit encore

$$\dot{K} = qR - \gamma Q_A$$

En présence de progrès technique donc, il est nécesaire d'investir moins que les rentes provenant de l'extraction de la ressource naturelle pour maintenir l'utilité constante.

4.2 Economie ouverte

On considère une économie mondiale composée de deux pays, 1 et 2. Le pays 1 possède tout le stock mondial d'une ressource non renouvelable - disons le pétrole -, et exporte une partie de ce stock vers le pays 2. Les deux économies sont concurrentielles, peuvent échanger des biens et de la ressource, et il existe un marché financier mondial. Les agents des deux pays considèrent comme donnés les prix établis sur les marchés mondiaux. Nous supposons que la ressource n'a pas d'aménité pour les consommateurs, hypothèse naturelle dans le cas du pétrole. Il n'y a alors pas de problème d'évaluation du prix de la ressource. Son prix de marché assure l'efficacité de son usage.

Le pays 1 produit du bien de consommation avec du capital manufacturé et de la ressource épuisable (R_1). Il exporte de la ressource épuisable (R_2) au prix q donné, importe du bien de consommation (M) achète sur le marché financier international des titres (H_1) rapportant le taux d'intérêt r. Il reviendrait au même de supposer qu'il acquiert du capital étranger. Les hypothèses sur la fonction de production sont habituelles.

Examinons tout d'abord dans ce cadre ce que deviennent les relations comptables mises en évidence en économie fermée.

Comptabilité standard pour les pays 1 et 2 :

$$C_1 + \dot{K}_1 + \underbrace{qR_2}_{\text{exports}} = \underbrace{(Y_1 - qR_1)}_{\text{VA branche biens conso}} + \underbrace{q(R_1 + R_2)}_{\text{VA branche ressource}} + \underbrace{M}_{\text{imports}}$$

$$C_2 + \dot{K}_2 + \underbrace{M}_{\text{exports}} = \underbrace{(Y_2 - qR_2)}_{\text{VA branche biens conso}} + \underbrace{qR_2}_{\text{imports}}$$

Comptabilité Produit National Net :

$$C_1 + (\dot{K}_1 + q\dot{X}) + qR_2 = \underbrace{(Y_1 - qR_1)}_{\text{PNN}} + M$$

$$C_2 + \dot{K}_2 + M = \underbrace{(Y_2 - qR_2)}_{\text{PNN}} + \underbrace{qR_2}_{\text{imports}}$$

Balance des paiements :

$$\underbrace{qR_2}_{\text{exports}} - \underbrace{M}_{\text{imports}} + \underbrace{rH_1}_{\text{transferts}} - \underbrace{\dot{H}_1}_{\text{bal. capitaux}} = 0$$

$$M - qR_2 + rH_2 - \dot{H}_2 = 0$$

$$H_1 + H_2 = 0$$

Comptabilité Revenu Net :

$$C_1 + \underbrace{(\dot{K}_1 + q\dot{X} + \dot{H}_1)}_{\text{épargne véritable}} = \underbrace{(Y_1 - qR_1 + rH_1)}_{\text{revenu national net}}$$

$$C_2 + \underbrace{(\dot{K}_2 + \dot{H}_2)}_{\text{épargne véritable}} = \underbrace{(Y_2 - qR_2 + rH_2)}_{\text{revenu national net}}$$

Dans la comptabilité usuelle, le PIB du pays exportateur de pétrole est la somme de la VA de la branche non-pétrole et de la VA de la branche extractrice de pétrole. Il est sur-estimé car il ne prend pas en compte la destruction des ressources de pétrole. La comptabilité en termes de Produit Net et d'Investissement Net corrige ce défaut.

En revanche, la comptabilité usuelle évalue correctement le Produit net du pays importateur de pétrole puisqu'elle n'évalue que la valeur ajoutée d'une branche non-pétrole.

On déduit un Revenu National Net du Produit National Net en lui ajoutant les intérêts reçus de l'étranger.

Nous nous posons maintenant la question de savoir s'il est souhaitable que chaque pays ait comme objectif d'avoir une épargne véritable nulle.

La réponse est positive au niveau mondial. Dans un cadre parfaitement concurrentiel un monde constitué de deux pays se comporte comme un pays unique. Le respect de la règle de Hartwick au niveau mondial a donc les mêmes mérites que dans un pays isolé. Elle garantit la soutenabilité du niveau de consommation ou d'utilité.

Les épargnes véritables des deux pays sont

$$G_1 = \dot{K}_1 + \dot{H}_1 + q\dot{X} \tag{22}$$

$$G_2 = \dot{K}_2 + \dot{H}_2 \tag{23}$$

et l'épargne véritable mondiale est

$$G = G_1 + G_2 = \dot{K}_1 + \dot{K}_2 + q\dot{X} = 0$$

La question est de déterminer les niveaux souhaitables de G_1 et G_2, sachant que leur somme doit être nulle. Les niveaux souhaitables d'investissement, de production et d'utilisation des ressources dans les deux pays sont déterminés par des considérations d'efficacité productive ou, ce qui revient au même dans le cadre standard où nous nous situons, par le fonctionnement des marchés. La question est donc de déterminer les niveaux de $\dot{H}_1$ et $\dot{H}_2$, c'est-à-dire les échanges de capitaux entre les deux pays. Ceux-ci dépendent évidemment des situations initiales, créancière ou débitrice, des deux pays.

Les contraintes budgétaires des deux pays peuvent s'écrire sous la forme

$$\dot{H}_1 = rH_1 - \dot{K}_1 + Y_1 + qR_2 - C_1 \tag{24}$$

$$\dot{H}_2 = rH_2 - \dot{K}_2 + Y_2 - qR_2 - C_2 \tag{25}$$

Supposons pour simplifier que les deux pays aient la même population. Ils sont alors amenés à choisir les mêmes niveaux de production, d'investissement et d'utilisation de la ressource. Supposons aussi que les deux pays partent d'une situation symétrique, où tous deux ont les mêmes niveaux de capital physique et une position financière externe nulle. Une solution vraisemblable est que H_1 et H_2 restent nuls par la suite. Dans une optique de développement durable, chaque pays maintiendra sa consommation constante, mais la consommation C_1 du pays exportateur de pétrole sera supérieure à celle, C_2, du pays importateur. La raison en est simplement que le premier bénéficie de la valeur de ses exportations alors que le second doit financer ses importations[4].

Les épargnes véritables des deux pays sont alors, avec $\dot{K}_1 = \dot{K}_2 = \dot{K}$,

$$G_1 = \dot{K} + q\dot{X} = \dot{K} - q(R_1 + R_2) < 0$$

$$G_2 = \dot{K} > 0$$

Le pays exportateur a une épargne véritable négative et le pays importateur une épargne véritable positive.

Ce résultat assez naturel est en accord avec les données observées. Il convient pourtant de le mettre dans une juste perspective. Il dépend en effet crucialement des situations financières initiales des deux pays. Dans une situation concurrentielle et en présence de marchés financiers parfaits les décisions d'organisation productive sont indépendantes des décisions de consommation et d'épargne. La règle de Hartwick ressortit du premier niveau. Elle devrait s'imposer au niveau mondial. La répartition des épargnes véritables entre les différents pays dépend en revanche des choix de profils de consommation et d'épargne choisis par les différents pays. Aucune logique générale ne s'impose donc. Il n'y a pas de raison en tous cas de prôner une épargne véritable nulle au niveau de chaque pays.

Dans le cadre général que nous avons retenu jusqu'alors, on peut montrer (annexe C) que l'on a

$$\dot{G}_1 - rG_1 = -\dot{C}_1 + \dot{r}H_1 + rqR_2 \tag{26}$$

Deux effets apparaissent en économie ouverte qui n'apparaissent pas (se compensent) en économie fermée : l'effet des termes de l'échange intertemporels sur les actifs détenus par l'économie à l'étranger et l'effet termes de l'échange externe, dû au fait que le prix du stock de ressource augmente (selon la terminologie de Sefton et Weale [2006]). Sefton et Weale estiment que le premier effet est en général négligeable face au second. Alors, si le pays exportateur de ressource épuisable suit la règle de Hartwick, il n'obtient pas une consommation constante mais croissante :

$$G_1 = 0 \Rightarrow \dot{C}_1 = rqR_2$$

Comme le prix de la ressource naturelle exportée q augmente au cours du temps, le pays exportateur voit augmenter sa consommation sans avoir investi.

[4] Cette solution est celle qui émerge d'un modèle où chaque pays met en oeuvre sa stratégie maximin optimale. Comme on le sait depuis Solow [1974], la stratégie optimale consiste alors à avoir un montant d'investissement physique constant et le capital physique croît donc de manière linéraire, en se substituant à l'utilisation de la ressource.

Si on utilise la définition générale du PNN de Sefton et Weale [1996] (équation (17)), on obtient, pour le pays exportateur,

$$\mathrm{PNN}_{1t} = C_{1t} + G_{1t} + \int_t^{\infty} r_\tau q_\tau R_{2\tau} e^{-\int_t^\tau r_s ds} d\tau + \int_t^{\infty} \dot{r}_\tau H_{1\tau} e^{-\int_t^\tau r_s ds} d\tau \quad (27)$$

Notons que l'effet termes de l'échange externe rend le PNN d'une économie exportatrice de ressources naturelles ainsi calculé plus élevé que le PNN habituel. C'est l'inverse pour une économie importatrice.

Le problème avec cette expression est qu'elle est peu opératoire. L'intérêt du PNN habituel est qu'il est facilement calculable car il est linéaire en les quantités courantes, ce qui permet de remplacer l'estimation d'une grandeur intertemporelle, le bien-être social, par celle d'une grandeur courante. Ici apparaissent deux termes intertemporels peu faciles à évaluer.

4.3 Croissance de la population

Nous avons jusqu'à présent considéré que la population est constante. Cette hypothèse n'est cependant pas valide à court terme, surtout dans le cas des pays en développement. Faut-il alors utiliser l'épargne véritable par tête comme indicateur de durabilité ?

Supposons à la suite de Arrow, Dasgupta et Mäler [2003] que le bien-être social est fonction de l'utilité totale de la population à chaque instant, c'est-à-dire à la fois de l'utilité par tête et de la taille de la population.

L'utilité totale est $N_t U(c_t, \frac{X_t}{N_t})$, où c_t est la consommation par tête et $\frac{X_t}{N_t}$ le stock de ressource non renouvelable par tête[5]. La fonction de production est $Y_t = F(K_t, N_t, R_t)$. La population est formellement traitée comme un stock de capital. Son évolution est donnée par

$$\dot{N}_t = \phi(N_t) \quad (28)$$

On définit l'épargne véritable de la façon habituelle comme la somme des investissement nets en valeur :

$$G_t = \dot{K}_t + q_t \dot{X}_t + \pi_t \dot{N}_t$$

π est le prix implicite de la population en terme de prix du bien de consommation.

[5] Pour que cette écriture ait un sens il faut que l'aménité pertinente soit bien une aménité par tête. Le cas du changement climatique et plus généralement des pollutions globales nécessite un traitement différent.

La difficulté pratique consiste à évaluer ce prix, qui ne peut a priori pas être obtenu comme un prix de marché. On montre (annexe D) qu'il évolue au cours du temps de la façon suivante (en notant $x = X/N$) :

$$\dot{\pi} = (r - \phi'(N))\,\pi - \left(\frac{U}{U'_c} - px + w - c\right) \tag{29}$$

Le deuxième terme du membre de droite représente l'apport net d'un individu supplémentaire à l'utilité et à la production. Si la fonction d'utilité U est homogène de degré 1, $U = U'_c c + U'_x x$ et l'équation (29) se simplifie en :

$$\dot{\pi} = (r - \phi'(N))\,\pi - w \tag{30}$$

L'apport d'un individu supplémentaire est alors simplement son apport productif, et le prix implicite de la population (en termes de bien de consommation) est la somme actualisée au taux $r - \phi'(N)$ des taux de salaire futurs.

On montre (annexe D) que

$$\dot{G} - rG = -\frac{NU}{U'_c}\left(\frac{\dot{U}}{U} + \frac{\dot{N}}{N}\right)$$

Donc une économie suivant la règle de Hartwick obtient une utilité totale (NU) constante.

Mais quelle est la bonne fonction de bien-être social à considérer quand la population n'est pas constante ? Du point de vue de la durabilité, s'intéresser seulement à l'utilité par tête et non pas à l'utilité totale n'est pas absurde (Asheim [2004]).

References

[2003] Arrow, K. J., P. Dasgupta et K.-G. Mäler, 2003, The genuine savings criterion and the value of population, *Economic Theory*, 20, 217–225.

[2000] Asheim, G., 2000, Green national accounting: why and how? *Environment and Development Economics*, 5, 25–48.

[2004] Asheim, G., 2004, Green national accounting with a changing population, *Economic Theory*, 23, 601–619.

[2007] Asheim, G., 2007, Can NNP be used for welfare comparisons? *Environment and Development Economics*, 12, 11–31.

[2008] D'Autume, A. et K. Schubert, 2008, Hartwick's rule and maximin paths when the exhaustible resource has an amenity value, *Journal of Environmental Economics and Management*, à paraître.

[1974] Dasgupta, P. et G. Heal, 1974, The optimal depletion of exhaustible resources, *Review of Economic Studies* (symposium), 3–28.

[2001] Dasgupta, P., 2001, *Human well-being and the natural environment*, Oxford University Press.

[2000] Dasgupta, P. et K.-G. Mäler, 2000, Net national product, wealth, and social well-being, *Environment and Development Economics*, 5, 69–93.

[1999] Hamilton, K. et M. Clemens, 1999, Genuine saving in developing countries, *World Bank Economic Review*, 13, 33–56.

[1977] Hartwick, J., 1977, Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources, *American Economic Review*, 66(5), 972–974.

[1990] Hartwick, J., 1990, Natural resources, national accounting and economic depreciation, *Journal of Public Economics*, 43, 291–304.

[1985] Krautkraemer, J.A., 1985, Optimal growth, resource amenities and the preservation of natural environments, *Review of Economic Studies*, 52, 153–170.

[1996] Sefton, J. A. et M.R. Weale, 1996, The net national product and exhaustible resources: The effects of foreign trade, *Journal of Public Economics*, 61, 21–47.

[2006] Sefton, J. A. et M.R. Weale, 2006, The concept of income in a general equilibrium, *Review of Economic Studies*, 73, 219–219.

[1974] Solow, R., 1974, Intergenerational equity and exhaustible resources, *Review of Economic Studies* (symposium), 29–45.

[1976] Weitzman, M., 1976, On the welfare significance of National Product in a dynamic economy, *Quarterly Journal of Economics*, 99, 156–162.

[2000] Weitzman, M., 2000, The linearized Hamiltonian as a comprehensive NDP, *Environment and Development Economics*, 5, 55–68.

Annexe

A. La règle de Hartwick

On dérive alors par rapport au temps l'équation d'accumulation du capital (1), en supposant la population constante :

$$\begin{aligned}
\ddot{K} &= F'_K\dot{K} + F'_R\dot{R} - \delta\dot{K} - \dot{C} \\
&= r\dot{K} + q\dot{R} - \dot{C} + \dot{q}R - \dot{q}R \\
&= r\dot{K} + q\dot{R} - \dot{C} + \dot{q}R - rqR \\
&= r\left(\dot{K} - qR\right) + q\dot{R} - \dot{C} + \dot{q}R
\end{aligned}$$

dont on déduit

$$\frac{d\left(\dot{K} - qR\right)}{dt} = r\left(\dot{K} - qR\right) - \dot{C}$$

c'est-à-dire

$$\dot{G} = rG - \dot{C}$$

B. Progrès technique exogène

Le programme du planificateur est (en ne prenant pas en compte les aménités pour simplifier) :

$$\max \int_0^\infty e^{-\rho t} U(C_t, X_t)dt$$

$$\begin{aligned}
\dot{K}_t &= F(A_t, K_t, N_t, R_t) - C_t \\
\dot{X}_t &= -R_t \\
\dot{A}_t &= \gamma A_t
\end{aligned}$$

Le hamiltonien courant s'écrit :

$$\mathcal{H} = U(C, X) + \lambda\left(F(A, K, N, R) - C\right) - \mu R + \omega\gamma A$$

et les conditions du premier ordre sont (en omettant la condition portant sur le travail) :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial C} &= U'(C) - \lambda = 0 \\
\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial R} &= \lambda F'_R - \mu = 0 \\
-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial K} &= -\lambda F_K = \dot{\lambda} - \rho\lambda \\
-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial X} &= -U'_X = \dot{\mu} - \rho\mu \\
-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial A} &= -\lambda F'_A - \gamma\omega = \dot{\omega} - \rho\omega
\end{aligned}$$

dont on déduit, en notant $q = \mu/\lambda$ et $q_A = \omega/\lambda$:

$$\begin{aligned}
F_R &= q, \\
\dot{q} + p &= rq, \\
\dot{q}_A &= (r - \gamma)q_A - F_A
\end{aligned}$$

On dérive par rapport au temps les équations d'accumulation du capital et d'évolution du stock de ressource, et on obtient

$$\ddot{K} = r\dot{K} + q\dot{R} + F'_A\dot{A} - \dot{C} = r\dot{K} - q\ddot{X} + F'_A\dot{A} - \dot{C}$$

i.e.

$$\ddot{K} = r\dot{K} - q\ddot{X} + F'_A\dot{A} - \dot{C} = r\dot{K} - q\ddot{X} + F'_A\dot{A} - \dot{C} + (rq - \dot{q} - p)\dot{X} + ((r-\gamma)q_A - \dot{q}_A - F'_A)\dot{A}$$

ou encore, avec $\dot{C} = \frac{\dot{U}}{U'_C} - p\dot{X}$,

$$\ddot{K} = r\dot{K} - q\ddot{X} - \frac{\dot{U}}{U'_C} + (rq - \dot{q})\dot{X} + ((r-\gamma)q_A - \dot{q}_A)\dot{A}$$

i.e.

$$\ddot{K} + q\ddot{X} + \dot{q}\dot{X} + q_A\ddot{A} + \dot{q}_A\dot{A} = r\left(\dot{K} + q\dot{X} + q_A\dot{A}\right) - \frac{\dot{U}}{U'_C}$$

i.e.

$$\frac{d}{dt}\left(\dot{K} + q\dot{X} + q_A\dot{A}\right) = r\left(\dot{K} + q\dot{X} + q_A\dot{A}\right) - \frac{\dot{U}}{U'_C}$$

C. Economie ouverte

D'après l'équation (24) du texte,

$$\dot{K}_1 + \dot{H}_1 = F(K_1, R_1) + rH_1 + qR_2 - C_1$$

$$\ddot{K}_1 + \ddot{H}_1 = r\dot{K}_1 + q\dot{R}_1 + r\dot{H}_1 + q\dot{R}_2 + \dot{r}H_1 + \dot{q}R_2 - \dot{C}_1 = r(\dot{K}_1 + \dot{H}_1) - q\ddot{X} + \dot{r}H_1 + \dot{q}R_2 - \dot{C}_1$$

i.e.

$$\begin{aligned} \ddot{K}_1 + \ddot{H}_1 + q\ddot{X} + \dot{q}\dot{X} &= r(\dot{K}_1 + \dot{H}_1) + \dot{r}H_1 + \dot{q}R_2 + \dot{q}\dot{X} - \dot{C}_1 \\ &= r(\dot{K}_1 + \dot{H}_1) + \dot{r}H_1 + rq(\dot{X} + R_2) - \dot{C}_1 \end{aligned}$$

i.e.

$$\frac{d}{dt}\left(\dot{K}_1 + \dot{H}_1 + q\dot{X}\right) = r(\dot{K}_1 + \dot{H}_1 + q\dot{X}) + \dot{r}H_1 + rqR_2 - \dot{C}_1$$

i.e.

$$\dot{G}_1 - rG_1 = \dot{r}H_1 + rqR_2 - \dot{C}_1$$

D. Croissance de la population

Le programme du planificateur est

$$\begin{aligned} & \max \int_0^\infty e^{-\rho t} N_t U\left(c_t, \frac{X_t}{N_t}\right) dt \\ \dot{K}_t &= F(K_t, N_t, R_t) - N_t c_t \\ \dot{X}_t &= -R_t \\ \dot{N}_t &= \phi(N_t) \\ & K_0, X_0, N_0 \text{ donnés} \end{aligned}$$

Hamiltonien courant :

$$\mathcal{H} = NU\left(c, \frac{X}{N}\right) + \lambda\left(F(K, N, R) - Nc\right) - \mu R + \gamma\phi(N)$$

Conditions du premier ordre :

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial c} &= NU_c' - \lambda N = 0 \\
\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial R} &= \lambda F_R' - \mu = 0 \\
-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial K} &= -\lambda F_K' = \dot{\lambda} - \rho\lambda \\
-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial X} &= -U_x' = \dot{\mu} - \rho\mu \\
-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial N} &= -U\left(c, \frac{X}{N}\right) + U_x' \frac{X}{N} - \lambda\left(F_N' - c\right) - \gamma\phi'(N) = \dot{\gamma} - \rho\gamma
\end{aligned}
$$

Définition de l'épargne véritable :

$$
G_t = \dot{K}_t + q_t \dot{X}_t + \pi_t \dot{N}_t
$$

avec $q = \mu/\lambda$ et $\pi = \gamma/\lambda$ et, d'après les conditions d'optimalité précédentes (avec les notations habituelles et $x = X/N$),

$$
\begin{aligned}
\lambda &= U_c' \\
q &= F_R' \qquad \dot{q} = rq - p \\
\dot{\pi} &= \left(r - \phi'(N)\right)\pi - \left(\frac{U}{U_c'} - px + w - c\right)
\end{aligned}
$$

On a :

$$
\begin{aligned}
G &= \dot{K} - qR + \pi\dot{N} \\
\ddot{K} &= r\dot{K} + w\dot{N} + q\dot{R} - c\dot{N} - N\dot{c} \\
\ddot{N} &= \phi'(N)\dot{N} \\
\dot{G} &= \ddot{K} - q\dot{R} - \dot{q}R + \dot{\pi}\dot{N} + \pi\ddot{N}
\end{aligned}
$$

d'où, en remplaçant et en utilisant les conditions du premier ordre et $R = -\dot{X} = -\left(\dot{x}N + x\dot{N}\right)$,

$$
\begin{aligned}
\dot{G} - rG &= -N\left(\dot{c} + p\dot{x}\right) - \frac{U}{U_c'}\dot{N} \\
&= -\frac{NU}{U_c'}\left(\frac{\dot{U}}{U} + \frac{\dot{N}}{N}\right)
\end{aligned}
$$