



Croissance durable : mesurons-nous bien le défi ?

Michel Aglietta

DANS **REVUE D'ÉCONOMIE DU DÉVELOPPEMENT** 2011/2 Vol. 19 , PAGES 199 À 250
ÉDITIONS **DE BOECK SUPÉRIEUR**

ISSN 1245-4060

ISBN 9782804165031

DOI 10.3917/edd.252.0199

Date de mise en ligne : 16/11/2011

Article disponible en ligne à l'adresse

<https://shs.cairn.info/revue-d-economie-du-developpement-2011-2-page-199?lang=fr>



Découvrir le sommaire de ce numéro, suivre la revue par email, s'abonner...
Scannez ce QR Code pour accéder à la page de ce numéro sur Cairn.info.



Distribution électronique Cairn.info pour De Boeck Supérieur.

Vous avez l'autorisation de reproduire cet article dans les limites des conditions d'utilisation de Cairn.info ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Détails et conditions sur cairn.info/copyright.

Sauf dispositions légales contraires, les usages numériques à des fins pédagogiques des présentes ressources sont soumises à l'autorisation de l'Éditeur ou, le cas échéant, de l'organisme de gestion collective habilité à cet effet. Il en est ainsi notamment en France avec le CFC qui est l'organisme agréé en la matière.

Croissance durable : mesurons-nous bien le défi ?

Sustainable Growth: Do We Really Measure the Challenge?

Michel Aglietta
Université Paris Ouest (EconomiX), Cepii et Groupama-am

La mesure des agrégats macroéconomiques est un processus long et ardu qui touche au système de comptabilité nationale. La difficulté est liée aux exigences de la politique économique. Nous avons besoin aujourd'hui d'une croissance soutenable alliant préoccupations environnementales et politique de développement. Cela demande de radicalement transformer la comptabilité nationale, aujourd'hui système de comptes de recettes et de dépenses axé sur le PIB, en un système de comptabilité de la richesse, qui met en avant un concept du capital étendu englobant tous les actifs contribuant au bien-être social et associant une mesure de l'épargne « authentique ».

L'article analyse ensuite les problèmes soulevés par la mesure de différents types de capital que les règles classiques de la comptabilité nationale ignorent ou traitent peu en tant que tels. Pourtant, dans les pays développés, les actifs immatériels sont aussi conséquents que le capital fixe productif et ce sont les principaux facteurs de croissance de l'économie du savoir. Par ailleurs, le capital naturel doit être évalué sur la base de sa rareté du point de vue de ses fonctions de source de ressources primaires, d'absorption des gaz à effet de serre et de préservation de la biodiversité. Parce que la nature intrinsèque de ces types de capital conduit à les mesurer à la valeur actualisée des rentes futures, le choix du taux d'actualisation joue un rôle critique dans le processus d'évaluation. Le taux d'actualisation est aussi important pour l'évaluation de l'engagement social des pensions qu'il l'est pour l'estimation du coût de l'épuisement des ressources non renouvelables et des dommages causés par la production anthropique de dioxyde de carbone.

L'article montre que le processus d'évaluation des différents types de capital et d'estimation de leur substituabilité dans la production de bien-être social est entaché d'une radicale incertitude. En effet, de multiples sentiers de croissance présentent une soutenabilité incertaine en raison des « inconnues inconnues » inhérentes aux interactions entre les facteurs économiques et écologiques qui pourraient être associées à des rétroactions perturbatrices fortement non linéaires. Dès lors, le choix des taux d'actualisation est profondément éthique et doit s'inscrire dans un principe de précaution généralisé puisqu'il concerne le sort des générations futures. Ce principe est valide tant qu'existent des situations possibles d'exposition à des risques illimités. Les sociétés confrontées à une crise catastrophique de probabilité inconnue doivent débattre immédiatement des modalités souhaitables d'organisation des décisions collectives afin d'engager les politiques opportunes.

Macro-measurement is a long and arduous process that involves the system of national accounts. The challenge it raises is driven by the requirements of economic policy. Today, there is a need for a sustainable growth path that couples environmental concerns and development policy. This calls for nothing less than a sea change in national accounting, implying a shift from a system of income and expenditure accounts focused on GDP to a system of wealth accounts. The latter lays emphasis on an extended concept of capital, encompassing all assets that contribute to social well-being and an associated measure of “genuine” saving.

This paper analyses the problems involved in measuring different types of capital that are either ignored or barely dealt with per se by the accepted rules of national accounting. Yet, in developed countries, intangible assets are worth as much as productive fixed capital and constitute the most important factors of growth for the knowledge economy. Moreover, natural capital needs to be priced according to its scarcity given its function as a source of primary resources, an absorber of greenhouse gases and a means of conserving biodiversity.

Since the inherent nature of these types of capital means that they are measured at the discounted value of future rents, the choice of discount rates is critical to the valuing process. The discount rate is as important for estimating the cost of depleting non-renewable resources and the damage due to anthropogenic production of carbon dioxide as it is for valuing pension liabilities. The paper shows that the process of valuing the different types of capital and estimating their substitutability in the production of social welfare is beset with radical uncertainty. There are multiple growth paths whose sustainability is open to question due to “unknown unknowns” in the interactions between economic and ecological factors, which may be linked to disruptive highly non-linear feedbacks. Therefore, the choice of discount rates is a deeply ethical matter and needs to espouse a widely applied precautionary principle, given that the future of the generations to come is at stake. This principle holds true as long as there are situations of exposure to unlimited risk. Societies facing a catastrophic crisis of unknown probability need to engage immediate discussions about how to organise collective decisions on the appropriate policies to adopt.

INTRODUCTION : LES GRANDES ÉTAPES DE LA MESURE DES AGRÉGATS ÉCONOMIQUES

Du XII^e au XIX^e siècle, de multiples tentatives d'estimation du revenu national ont été effectuées, précurseurs des quantifications macroéconomiques et démographiques. Ces tentatives se sont pourtant inscrites dans des recherches individuelles, qui visaient à évaluer et comparer la puissance des pays et s'inspiraient largement de la doctrine mercantiliste. En Grande-Bretagne, le pionnier de ce type de recherches a été William Petty (1623-87) en 1665, suivi de Gregory King (1648-1712). En France, Boisguilbert (1646-1714) a été le premier à conduire ce type de recherches. Dans son ouvrage « *Le détail de la France* », il dresse un bilan très pessimiste du Royaume sous Louis XIV en raison de sa structure fiscale extrêmement inéquitable.

Ces recherches érudites ne sont jamais devenues des outils d'analyse de politique économique. On s'en est même désintéressé à l'époque libérale du XIX^e siècle et l'importance économique des agrégats a même été mise en doute après le milieu du siècle. On considérait que les ajustements économiques intervenant dans le cycle conjoncturel découlaient des interactions de marché

entre des agents individuels et ne nécessitaient pas d'intervention publique. Même la Première Guerre mondiale n'a pas modifié cette conception de l'économie.

La comptabilité nationale et la macroéconomie sont nées de la Grande Dépression et de la Seconde Guerre mondiale. La Grande Dépression a eu une influence cruciale avec son chômage de masse persistant, qui a donné lieu à la Théorie générale de Keynes. La Seconde Guerre mondiale a donné l'impulsion définitive avec la croissance colossale des recettes et des dépenses publiques et l'impératif de mobiliser et de réaffecter les ressources au niveau national. La mesure d'agrégats économiques imbriqués était devenue impérieuse pour la détermination du niveau global de l'activité économique.

C'est donc dans les années 1940 que la mesure des grandeurs macroéconomiques a pris sa place parmi les outils de politique économique. Deux ouvrages fondamentaux parus en 1940 ont été à l'origine de son développement pour la gestion macroéconomique et pour l'interprétation de l'Histoire : « *How to pay for the war* » de J. M. Keynes et « *The conditions of economic progress* » de C. Clark. Tout un ensemble d'auteurs ont suivi, emmenés par S. Kuznets, pionnier de l'histoire économique quantitative d'une part, et par J. Meade et R. Stone, qui ont contribué à standardiser la comptabilité nationale, d'autre part. À la suggestion de Keynes, ils ont publié ensemble un article fondateur dans l'*Economic Journal* (mai-septembre 1941) : « *The construction of tables of national income, expenditure, savings and investment* ». Cet article, qui présentait la structure de la comptabilité nationale qu'ils avaient élaborée ensemble, a été la pierre angulaire du mémorandum de 1945 publié par les Nations Unies en 1947. La comptabilité nationale, la macroéconomie keynésienne et la régulation de la demande agrégée sont donc les trois piliers de la mesure des agrégats économiques.

Parallèlement aux investigations sur la comptabilité nationale mais indépendamment de celles-ci, Wassily Leontief a introduit l'analyse entrées-sorties à Harvard, à compter de 1932. En 1941, il a réuni les résultats de plusieurs années de recherche dans un livre publié par Harvard University Press : « *The structure of the American Economy 1919-1929 : an empirical application of equilibrium analysis* ». Cependant, le tableau entrées-sorties n'a pas été intégré au corps principal de la comptabilité nationale standard ; il a été utilisé par le BLS qui a conçu le tableau pour l'année 1947. Ces travaux ont néanmoins pris fin avec la guerre de Corée en 1950.

Après 1950 s'est engagé un long processus vers la normalisation, la comparabilité internationale et enfin, l'unification dans le système de comptabilité nationale de 1968, et plus complètement dans le système de 1993 sous les

auspices des Nations Unies. Les principaux problèmes à surmonter étaient le champ de l'activité économique à considérer pour l'estimation du PIB, l'ajustement au titre des variations de prix pour présenter des volumes dans l'estimation de la croissance du PIB et le convertisseur pour les parités de pouvoir d'achat (PPA) afin de mesurer les niveaux de PIB réel aux prix internationaux afin de permettre une comparabilité internationale.

Le PIB était considéré comme le croisement de trois approches du revenu national dans ce qui est apparu comme le développement d'une comptabilité de flux. Côté demande, il était défini comme la somme des dépenses finales. Côté revenu, c'était la somme des salaires, bénéfices et loyers. Côté production, c'était la somme des valeurs ajoutées sectorielles. Les critères normalisés conçus par Richard Stone ont été mis en avant par Milton Gilbert à l'OEEC, qui a convaincu les bureaux statistiques des pays membres de les adopter pour en faire la base du Plan Marshall.

Cependant, la vision anglo-saxonne n'a pas prévalu très longtemps. L'URSS avait une conception beaucoup plus restrictive de la production économique, reposant sur la production matérielle ; sa comptabilité était ancrée dans les balances matières. Hormis cette vision liée à la planification centrale dans une société étrangère à l'économie de marché, il y avait une approche française. La comptabilité nationale française utilisait elle aussi un concept plus restrictif de la production, quoique plus large que le concept soviétique, concernant le problème d'imputation de valeur aux services non marchands. D'autre part, le système français utilisait des tableaux entrées-sorties pour une analyse plus fine de la structure de production et décrivait les transactions financières. Il décrivait en outre le comportement de groupes d'agents économiques, qui articulait les comptes d'exploitation, de transfert et de capital. Le rapprochement entre les agrégats nationaux et les comptes des agents était effectué dans le « *tableau économique d'ensemble* ».

Il a fallu attendre 1968 pour qu'un rapprochement entre les systèmes français et anglo-saxon soit entrepris sous l'égide de l'ONU. Le système français a élargi son concept de production pour y englober la production des administrations, le système anglo-saxon s'est ouvert aux comptes d'agents. Le débat qui se prolonge depuis des années porte en grande partie sur la manière de déflater les valeurs nominales. Des indices concurrents peuvent être utilisés. L'introduction de prix hédoniques pour tenir compte des changements de qualité des marchandises n'a jamais fait l'unanimité.

Au problème de la variation des prix dans le temps fait écho celui des comparaisons spatiales, qui font appel aux PPA. La difficulté réside dans la définition de prix internationaux, qui suppose d'établir un panier de biens standard

international et de mener des enquêtes internationales très étendues pour mesurer les prix de biens identiques dans un vaste ensemble de pays. La combinaison des PPA conçues pour éliminer les écarts de prix entre pays et des estimations de volume dans le temps a donné lieu à des comparaisons spatio-temporelles. Les premières études en la matière ont été réalisées en 1954 par Milton Gilbert et Irving Kravis, qui ont comparé les niveaux de dépense réelle dans sept pays d'Europe de l'Ouest et aux États-Unis. Plus tard, en 1968, Kravis, Heston et Summers ont lancé à l'université de Pennsylvanie un projet de comparaison internationale qui se poursuit à ce jour. L'Office statistique de l'ONU l'a étendu et l'OCDE procède régulièrement à des comparaisons.

Entre-temps, l'utilisation la plus remarquable des comparaisons spatio-temporelles du PIB a été l'œuvre monumentale d'Angus Maddison à l'OCDE, qui a construit des séries du PIB mondial et des principales régions remontant jusqu'à l'an 1000 afin d'évaluer les étapes historiques du développement économique, les inégalités de distribution du revenu mondial, les rattrapages et les déclin relatifs.

À partir de ces bases, d'importantes avancées ont été réalisées afin de surmonter les nombreux problèmes inhérents à l'élaboration du système de comptabilité nationale et de mieux appréhender les liens entre bien-être social et activité économique, tout au moins l'aspect du bien-être social qui peut être approché par une valeur économique. Appelons-le bien-être économique.

1 REVENU NATIONAL ET BIEN-ÊTRE SOCIAL : UN PROBLÈME PERSISTANT

Dans son ouvrage « *The Economics of Welfare* », Pigou a explicitement formulé la question en 1920 : le revenu national (RN) ou produit national (PN) peut-il être considéré comme un indicateur du bien-être économique ? Pour cela, les valeurs économiques doivent être interprétées dans le cadre de la théorie de l'utilité. Pour sa part, Kuznets préconisait de considérer les finalités poursuivies par l'activité économique.

Chacune de ces approches se heurte à de formidables obstacles. L'approche de l'utilité tente d'utiliser les prix pour intégrer les mesures données par la comptabilité nationale dans le bien-être. Mais la relation entre les prix de marché et l'utilité marginale est extrêmement problématique, surtout si l'on veut une mesure cardinale de l'utilité pour agréger les préférences individuelles, notamment parce que la comparaison des utilités personnelles est semée d'embûches insurmontables. Dès 1890, dans son ouvrage « *Principles of*

Economics », Alfred Marshall doutait qu'il soit possible d'appréhender la valeur d'utilité en dehors des prix de marché. L'autre approche n'est pas très prometteuse pour une mesure agrégée du bien-être économique car elle doit énoncer les objectifs finaux et rechercher de multiples standards « objectifs » de mesure physique, dont l'intégration en un agrégat unique est soit impossible, soit très arbitraire.

Admettant qu'il est impossible de se débarrasser des prix, Pigou pensait qu'il est vain d'espérer une mesure absolue de bien-être à partir du RN, mais qu'on peut faire quelque chose si on limite ses ambitions à *mesurer la variation du RN* dans des hypothèses restrictives. Si les goûts des individus et la distribution de leur pouvoir d'achat au sein d'un groupe de personnes sont inchangés entre les dates t et $t+1$, le bien-être économique du groupe s'est accru entre t et $t+1$ si son revenu total a augmenté. Appliqué à la nation, le bien-être économique peut être mesuré par la variation du RN car on peut supposer que les préférences sous-jacentes structurelles et la distribution du revenu ne changent pas beaucoup à court terme.

Cependant, si on s'intéresse aux politiques sociales visant à réduire les inégalités et à améliorer le bien-être des personnes à faible revenu, condition d'une meilleure cohésion sociale de la nation, il faut adopter un horizon plus long. Non seulement la distribution du revenu peut changer, mais la réduction des inégalités de revenu pourrait être considérée comme un moyen très efficace d'améliorer le bien-être social.

Hicks est entré dans le débat avec un célèbre article publié dans *Economica* (mai 1940) sur l'évaluation du revenu social (« *The valuation of social income* »). Partant du budget d'un individu dont les goûts restent constants, qui consomme des quantités (q) de différents biens (i) valorisés aux prix (p), cet individu est dans une meilleure situation en $t+1$ qu'en t si : $\sum p_{t+1}q_{t+1} > \sum p_{t+1}q_t$. L'individu aurait encore les moyens d'acheter le panier q_t mais il préfère q_{t+1} . Inversement, l'individu est dans une meilleure situation en t si : $\sum p_t q_t > \sum p_t q_{t+1}$. Toutefois, le classement des deux situations est ambigu si :

$$\sum p_{t+1}q_{t+1} < \sum p_{t+1}q_t$$

Hicks étend la comparaison du revenu à l'ensemble de la société. Si les deux premières inégalités sont satisfaites ensemble, les hypothèses de goûts constants ne tiennent pas. Même si $t+1$ est une meilleure situation que t , son application à l'ensemble de la société suppose d'admettre l'impossibilité que chacun puisse être placé en t dans une situation aussi satisfaisante que dans $t+1$ par une redistribution des quantités acquises en t .

La contribution de Hicks a été suivie de nombreuses tentatives pour découvrir des indices de bien-être qui pourraient échapper à tout critère éthique dans une possible réallocation des biens. Cependant, dans le cadre de nouvelles recherches, Hicks a admis qu'il n'existe pas d'indices de cette nature. Suivant une approche opposée, Amartya Sen, dans un article (« *Real national income* ») publié dans la *Review of economic studies* en février 1976, a utilisé un cadre ordinal. Il a montré que le dollar marginal possédé par un pauvre a une valeur marginale plus élevée que le même dollar possédé par un individu plus riche. Il est donc nécessaire de tenir compte de la distribution du revenu, et de la structure et de la taille de la population sur la base de jugements explicitement porteurs de valeurs éthiques.

Sur ce fondement théorique incertain, que peut faire la comptabilité nationale pour mesurer le bien-être social économique ? Il faut se contenter d'une vision édulcorée du bien-être qui assimile la satisfaction des besoins aux finalités de l'activité économique. Les principales questions pour la mesure sont les suivantes : comment traiter les services publics qui ne sont pas directement dédiés aux individus, les dépenses publiques dites défensives ? Comment traiter les dépenses des ménages induites par les contraintes de la vie urbaine ? Comment tenir compte des coûts et dépenses environnementaux ?

Le Rapport de 2009 de la Commission sur la mesure de la performance économique et du progrès social, présidée par Joseph Stiglitz, est la contribution la plus récente et la plus complète. Il s'inscrit dans un débat général et prend acte d'une série de choix opérés dans le système de comptabilité nationale (SCN) depuis les années 1970.

Le SCN de 1993 affirme clairement que le PIB n'est pas un indicateur de bien-être. Cependant, s'inspirant de la longue tradition théorique remontant à Pigou et Hicks, il observe qu'il existe une relation entre les variations de la production ou de la consommation totale et les variations du bien-être économique. Quels prix faut-il utiliser pour calculer les agrégats de manière à ce qu'ils expriment mieux cette relation ? Lorsque les prix changent, l'indice du coût de la vie doit être égal au montant dont le revenu d'un consommateur sera modifié pour qu'il se trouve dans la même situation économique qu'avant le changement de prix. C'est l'indice théorique du coût de la vie. On peut démontrer que si les préférences du consommateur sont homothétiques et leur fonction d'utilité quadratique, l'indice de Fischer (moyenne géométrique des indices de Laspeyres et Paasche) coïncide avec l'indice théorique. Cependant, si les préférences des consommateurs sont hétérogènes, le volume de la consommation finale n'approche pas le bien-être économique. Deux obstacles demeurent : l'agrégation des préférences et l'impact des externalités. Quelle est la meilleure solution si l'on souhaite un agrégat pertinent ?

En 1970, William Nordhaus et James Tobin ont écrit un article fondateur (« *Is growth obsolete?* », reproduit dans Milton Moss éd., *The measurement of economic and social performance*, Columbia university Press, 1973) qui a donné le coup d'envoi à toute une série d'études. Ces travaux n'entraient pas dans le cadre de la comptabilité nationale et il a fallu attendre la révision de 1993 pour que certains résultats soient intégrés au système. Dans cet article, nous nous attachons aux dépenses publiques défensives et aux externalités environnementales.

1.1 Dépenses publiques défensives

Les dépenses publiques défensives ne sont pas des services directs aux ménages et n'entrent pas dans la consommation totale actuelle parce qu'elles produisent des flux de services qui couvrent de longues périodes. Elles doivent être traitées comme des investissements publics que l'on peut classer en trois catégories : les dépenses de sécurité (police, prisons et armée) sont des investissements en capital social ; les dépenses d'expansion et d'amélioration du système de santé sont des investissements en capital humain ; enfin, les dépenses environnementales visant à atténuer le changement climatique et à faire face à celui-ci, à substituer d'autres ressources aux ressources en énergies fossiles en voie d'épuisement et à préserver la diversité des espèces vivantes, sont des investissements en capital naturel.

L'impact de l'activité économique, qui diminue la qualité et la quantité de ces actifs, sera traité comme une dépréciation générale du capital et un épuisement du stock de capital entraînant une réduction du revenu national net.

Cependant, certaines dépenses défensives imputées aux ménages ne peuvent être comptabilisées comme des investissements. C'est le cas par exemple des dépenses de déplacement domicile-travail liées aux contraintes de la vie urbaine. Elles produisent des services qui utilisent du capital et du travail sans être elles-mêmes des investissements. Elles doivent entrer dans une définition étendue de la production des ménages qui n'est pas financée par les entreprises dans l'organisation sociale actuelle. Il s'agit donc d'un transfert de valeur ajoutée des ménages aux entreprises.

1.2 Services environnementaux

Dans la mesure où les agents économiques considèrent le capital naturel comme un bien gratuit, les coûts sociaux induits par l'épuisement ne sont pas imputés à l'activité économique. Il y a diminution incontrôlée et non compta-

bilisée du bien-être économique. Il faut donc mesurer les pertes résultant de la dégradation de la qualité des services environnementaux liée à l'activité économique, principalement la pollution. Ce sont des pertes de valeur du capital naturel.

Cependant, les flux de services environnementaux, tout en entrant dans le bien-être économique, n'entrent pas dans la consommation finale, parce qu'on ne connaît pas leur élasticité de substitution avec des biens économiques, qui permettrait de les agréger avec les services marchands. Dans cet article, ils seront considérés comme une variable distincte, entrant dans la fonction cardinale de bien-être économique aux côtés de la consommation finale, l'élasticité de substitution étant un paramètre inconnu.

1.3 Du bien-être social à la soutenabilité économique

La solution consiste donc à élargir le concept de capital à l'ensemble des actifs concourant au maintien et à l'expansion du bien-être économique de l'ensemble de la société dans le temps. Il s'agit essentiellement d'un concept dynamique de la *soutenabilité*.

Dans une conception aussi large du capital, les services publics sont des biens publics non rivaux et non exclusifs, produits par des actifs matériels et immatériels, qui peuvent être utilisés par tous les agents économiques. Ces actifs collectifs appartiennent à l'ensemble de la société.

Les avantages de l'élargissement du concept de capital pour l'étude du développement sont considérables. On peut analyser systématiquement les relations entre revenu et valeur des actifs. Par exemple, dans quelle mesure le capital investi dans la santé influence-t-il la productivité du travail et la croissance du revenu réel, alimentant un cercle vertueux durable ? Inversement, dans quelle mesure la pollution déprécie-t-elle le capital humain du fait de la dégradation de la santé qu'elle entraîne ? Si l'environnement est dégradé, il faut distinguer entre l'impact initial, qui engendre des pertes affectant inégalement le compte de capital des agents économiques, et les investissements de réparation des pertes, qui sont des dépenses courantes apparaissant dans les comptes de flux.

Le changement de perspective induit par l'approche de la soutenabilité soulève des questions relatives à la propriété intellectuelle du capital qui induisent à leur tour des réimputations comptables. Des éléments traditionnellement traités comme des intrants intermédiaires doivent être reclassés comme des investissements en capital. C'est principalement le cas des dépenses

de R&D, anciennement considérées comme un intrant intermédiaire et récemment reclassées en investissement en capital immatériel dans le système de 2008. C'est aussi le cas de la prospection minière, qui produit de nouvelles connaissances sur les réserves primaires du sous-sol.

La soutenabilité est ainsi la nouvelle frontière en matière de développement. Pendant des décennies, l'accumulation capitaliste s'est fondée sur l'hypothèse que l'utilisation des ressources non renouvelables était bon marché, que le stock des ressources non utilisées était gratuit et que la croissance était illimitée. Ce modèle grossier a progressivement perdu de sa pertinence, d'autant plus que le colossal essor des services a souligné le rôle primordial du capital immatériel en tant que source de productivité. Entre-temps, l'épuisement du capital naturel a fait l'objet d'une appropriation de rentes oligopolistiques et de manœuvres géopolitiques visant à sécuriser les approvisionnements. En outre, les coûts du changement climatique sont si incertains et si menaçants dans les scénarios les plus défavorables que l'avenir de l'humanité telle que nous la connaissons est en jeu.

La définition et le développement du concept de croissance soutenable visent à couvrir tous les aspects afin de réformer profondément les politiques économiques. La croissance soutenable induira une révolution de la pensée économique, de la comptabilité, des politiques publiques et de l'organisation des finances. Schématiquement, elle intègre la protection à long terme de l'environnement, et donc le bien-être des générations futures, au régime de croissance. Une comptabilité de flux visant à mesurer et à renforcer la croissance du PIB doit être complétée par une comptabilité de flux de stocks visant à mesurer le capital réel (c'est-à-dire la richesse totale) à la base de la production de bien-être social futur, et donc à renforcer l'accumulation de la richesse totale.

2 LE DÉFI DE LA SOUTENABILITÉ : DE LA COMPTABILITÉ DU REVENU À LA COMPTABILITÉ DE LA RICHESSE

Les premières tentatives ponctuelles pour mesurer la richesse nationale ont été réalisées dans les années 1950 et présentées et débattues lors de la conférence de l'IARIW (International Association for Research in Income and Wealth) de 1957. On doit les premières séries longues sur les États-Unis (1945-58) aux recherches de Raymond Goldsmith publiées en 1962 et 1963. Les comptes sectoriels couvraient les actifs matériels et les gisements. Les

actifs immatériels se limitaient aux actifs financiers, l'ensemble étant calculé par la méthode de l'inventaire permanent. Le champ de ces tentatives était trop étroit et leur mesure trop incertaine pour envisager leur intégration dans le système de comptabilité normalisé.

Au milieu des années 1960, John Kendrick a entrepris une vaste étude historique, publiée en 1976, sur les stocks totaux de capital aux États-Unis, capital humain et R&D compris. Il y a inclus les investissements immatériels dans l'éducation, la santé et la mobilité sociale, la R&D étant comptabilisée séparément. Le résultat de Kendrick a été on ne peut plus étonnant : il a montré que la valeur du capital humain égalait celle de tous les autres actifs dès 1929 et qu'elle était supérieure de 15 % en 1969. Il s'ensuit que la comptabilité nationale classique, et pis encore, la comptabilité des entreprises privées, sous-estiment grossièrement les facteurs de croissance.

Dans les années 1980, la modélisation formelle de la théorie de la croissance endogène entreprise par Romer et d'autres a donné une motivation théorique à l'amélioration de la mesure du capital. Les travaux d'Aghion et Howitt ont élargi cette approche pour rendre compte de l'innovation schumpétérienne. Cependant, l'intégration des variations de capital dues aux investissements de productivité est restée parcimonieuse. Les logiciels ont été pris en compte, mais l'intégration des dépenses de R&D s'est heurtée à une forte résistance de la part des comptables nationaux. Des problèmes se posaient également pour les dépenses d'exploration minière et pétrolière : elles ne représentaient pas la valeur des mines et des champs pétroliers calculée à partir de la valeur de la rente après soustraction de tous les coûts, amortissement des dépenses d'exploration compris. Plus généralement, le principe d'évaluation d'un actif par actualisation des futurs flux de revenus attendus s'est heurté aux réticences des comptables quant à la nature insaisissable des anticipations et au caractère arbitraire du taux d'actualisation.

Les objections, les pièges et les obstacles ne sont pas surprenants. La comptabilisation de la richesse nationale suppose de mesurer des actifs et des passifs. Mesurer la richesse est une entreprise semée d'embûches. Les postes de richesse s'étendent sur des périodes considérables et différenciées. Deux problèmes connexes apparaissent : comment évaluer la richesse ? Comment articuler les comptes de stock et les comptes de flux ? Telle que nous la connaissons, une mesure économique est définie en termes de valeur, c'est-à-dire la contribution sociale d'une activité utilisant les ressources disponibles. Cependant, la prise en compte des variables de stocks conduit à mélanger des valeurs de statut différent dans la mesure : valeur réalisée contre paiement d'une somme d'argent, valeur imputée, valeur actualisée (c'est-à-dire anticipée),

valeur substituée (coût d'opportunité). Étant donné la disparité des statuts, l'intégration des comptes de revenu (flux) et des comptes de patrimoine (stock) ne peut aller sans conventions et approximations.

Les comptes de patrimoine intégrés n'ont été envisagés que dans le système de comptabilité nationale de 1993. Dans sa grande histoire de la comptabilité nationale publiée en 2002, André Vanoli a expliqué qu'outre les flux relatifs aux opérations économiques normalisées en comptabilité nationale, d'autres flux doivent être décrits dans deux comptes d'accumulation. L'un est le compte des *autres changements de volume des actifs*, qui répertorie les changements dans la substance du patrimoine qui ne résultent pas de la production, le revenu primaire, les transferts de capital et la variation du prix des actifs. L'autre est le compte de *réévaluation d'actifs*, qui présente les gains ou pertes de détention réels résultant de la variation de prix spécifiques relativement aux variations du niveau général des prix.

Si ces estimations ont été effectuées, il est possible d'établir un lien entre l'épargne et la variation de la valeur nette du patrimoine :

$$\text{Épargne nette} = \Delta(\text{valeur réelle nette du patrimoine}) - \text{recettes nettes de transferts en capital} - \text{autres changements nets de volume d'actifs} - \text{gains réels ou} + \text{pertes réelles de détention de patrimoine}$$

La Banque mondiale est l'institution qui a le plus travaillé sur la mesure de la richesse totale en tant qu'outil d'évaluation de la soutenabilité des sentiers de croissance dans les économies développées et en développement. Elle s'est inspirée d'un travail pionnier de Pearce et Atkinson, « *Capital theory and the measurement of sustainable development : an indicator of weak sustainability* », publié en 1993 par la revue *Ecological Economics*. De son premier rapport en 1995 (« *Monitoring environmental progress* ») à son rapport majeur de 2006 (« *Where is the wealth of nations? Measuring capital for the 21st century* »), la Banque mondiale a exploré une méthodologie et conduit des investigations empiriques visant à changer les politiques de développement. Mais aujourd'hui, les gouvernements nationaux doivent prendre la relève.

Les politiques de développement peuvent être liées à la soutenabilité dans la mesure où elles sont interprétées comme des stratégies généralisées de gestion de portefeuille. Pour mettre en œuvre ces stratégies, le gouvernement d'une nation doit redéployer son arsenal statistique dans un effort collectif pour estimer les changements de taille et de composition intervenus dans la richesse totale de la nation. C'est un effort considérable, aussi exigeant que celui qui a conduit aux bases de la comptabilité nationale entre 1940 et 1950. Seule une menace extrême imposant une mobilisation des ressources nationales

peut amener un gouvernement à entreprendre un effort collectif de changement de politique nécessitant l'élaboration de nouveaux outils. La Seconde Guerre mondiale était cette menace immédiate et la coopération des nations démocratiques était vitale.

Le problème aujourd'hui réside dans une menace mondiale dont l'échelle temporelle est tout autre. Le changement climatique, l'épuisement des forêts tropicales et la rareté imminente des ressources aquatiques et fossiles sont des défis à long terme qui portent la menace d'événements extrêmes à l'horizon de plusieurs décennies ou du siècle prochain. Cette menace concerne donc les générations futures plus encore que les générations présentes. Les enjeux dépassent de loin l'horizon des questions abordées dans le débat politique des démocraties électives. Il en est ainsi parce que le système écologique intègre une forte composante d'inertie ; mais il peut devenir vulnérable à des rétroactions divergentes incontrôlables si des seuils inconnus sont dépassés. L'humanité est ainsi confrontée à un monde d'inconnues inconnues qui dépendent néanmoins de son propre comportement dans les prochaines décennies.

Les gouvernements engageront-ils une politique d'investissement massif en innovation radicale aux dépens de la consommation présente et à court terme, dans l'espoir que les investissements en énergies renouvelables accroissent la substituabilité des biens environnementaux et économiques à plus long terme ? Ou attendront-ils dans l'espoir d'obtenir plus d'informations sur les développements en matière de changement climatique et l'épuisement du capital naturel au risque de laisser se produire des dommages irréversibles ? Pour mieux apprécier le dilemme, les gouvernements doivent développer leurs connaissances sur les processus qui conduisent à la soutenabilité ou à l'insoutenabilité de leur économie, qu'ils ont le devoir de diriger et de réguler dans des scénarios très différenciés.

En outre, les économies avancées ont été sérieusement affaiblies par les répercussions continues des crises financières. Les réactions immédiates à la crise ont opéré des transferts massifs de dettes et des risques de solvabilité associés du secteur financier privé au secteur public. Entre-temps, le vieillissement de la population a accumulé des passifs éventuels futurs qui se sont aggravés dans de nombreux pays où les fonds de pension souffrent d'un profond déficit de financement. Pourtant, faire face au défi environnemental demandera un effort soutenu d'investissement public pour modifier la taille et la composition du capital total, afin de diminuer sa vulnérabilité aux futurs chocs de ressources et événements climatiques catastrophiques. Il s'ensuit que la soutenabilité de la dette publique requiert des programmes crédibles de consolidation à court ou moyen terme qui ne compromettent pas les investis-

sements nécessaires à un futur développement soutenable de l'économie tout entière. La soutenabilité des finances publiques est néanmoins la priorité de la prochaine décennie dans de nombreux pays avancés dont les choix environnementaux sont également cruciaux pour la soutenabilité économique globale dans les pays développés et en développement. Toutes les politiques dédiées à la soutenabilité reposant sur la simulation de sentiers futurs incertains, elles rencontrent des problèmes de mesure communs. C'est pourquoi cet article se propose de dégager les enjeux de la soutenabilité des finances publiques avant d'aborder la question plus générale de la soutenabilité des régimes de croissance.

Définition de la richesse totale et de la soutenabilité

Le développement dépend de la richesse totale, c'est-à-dire du capital produit, humain, social et naturel. Le maintien de la richesse totale est la clé des régimes de croissance viables. Les différentes formes de capital sont définies comme suit :

Capital produit (matériel) = équipement + structures + terrains urbains
 Capital immatériel = capital humain + infrastructures institutionnelles + capital social + actifs financiers étrangers nets
 Capital naturel = gisements + ressources forestières en bois + autres ressources forestières + zones protégées + terres cultivées + pâturages

La somme de ces trois composantes est la richesse réelle de la nation. En l'état présent de nos connaissances, elle est loin d'être mesurée de manière complète. Seul un effort statistique massif mobilisant les ressources publiques et une coordination internationale permettront une avancée décisive. Les perspectives de croissance future sont liées aux variations de la richesse réelle, lesquelles ont été désignées épargne nette ajustée (ou *épargne authentique*). Comme on l'a vu plus haut, il existe un lien lâche entre les variations de la richesse réelle et celles du bien-être futur, c'est-à-dire du bien-être social en fonction des ajustements au titre des dépenses publiques défensives, de la production des ménages et des services environnementaux. Un lien étroit exigerait des hypothèses restrictives pour la permanence des préférences individuelles, la distribution du revenu et les prix relatifs reflétant les utilités marginales. L'encadré 1 décrit la mathématique de la condition de soutenabilité à partir de la fonction de bien-être sous hypothèse de forte soutenabilité. Cependant, même si elle ne peut pas donner lieu à une mesure, elle aide à comprendre la signification des approximations que l'on est amené à effectuer lorsqu'on élabore une méthodologie de mesure. L'encadré 1 résume la dériva-

tion de la condition de soutenabilité à partir d'une fonction cardinale du bien-être social.

S'il est possible de mesurer les différents types de capital qui forment la base productive de l'économie au sens écologique et économique général, la variation de la richesse totale par habitant est la somme de la croissance de la productivité totale des facteurs et de la croissance agrégée du volume des différents types de capital (encadré 1).

Encadré 1. Du bien-être social à la soutenabilité économique

Comme il est expliqué dans la discussion sur les relations entre comptabilité nationale et économie du bien-être, les services environnementaux ne sont pas parfaitement substituables à la consommation privée dans une fonction cardinale de bien-être. La modélisation de l'élasticité limitée et très incertaine de la substitution entre consommation privée et services environnementaux est identique à celle proposée dans une récente contribution de Olivier Guéant, Roger Guesnerie et Jean-Michel Lasry (« *Ecological intuition versus economic reason* », mai 2010)

Définition de la fonction de bien-être

V est une fonction de bien-être social en temps continu, fonction de deux variables :

$C(\tau)$ un agrégat de la consommation privée étendue, représentant aussi la valeur des services sociaux qui sont directement alloués aux ménages et consommés sur la même période, en rappelant que les dépenses défensives non environnementales sont comptabilisées comme un investissement public en capital humain ou social.

$E(\tau)$ les services d'environnement qui découlent du capital naturel.

V est une fonction cardinale intertemporelle :

$$V(t) = \frac{1}{1-\eta} \int_t^{\infty} U[C(\tau), E(\tau)]^{1-\eta} e^{-\delta(\tau-t)} d\tau$$

δ est le taux de préférence pure pour le présent et η est le taux de l'aversion au risque relative.

La substituabilité imparfaite entre la consommation privée et les services d'environnement est décrite par une fonction CES dont l'élasticité limitée est σ :

$$U[C(t), E(t)] = [C(t)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + E(t)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

Critère de soutenabilité

Le fort critère de soutenabilité est que V ne diminue pas :

$$dV/dt \geq 0$$

Les biens et services finaux fournissant une utilité, soit à partir de la consommation, soit à partir de l'environnement, sont produits par des combinaisons de tous les types de capital définis plus haut en fonction des meilleures technologies disponibles. Les différents types de capital sont diminués par leur utilisation dans la production et augmentés par l'investissement (capital productif et humain), par la reconstitution naturelle s'ils sont renouvelables (forêts) ou irréversiblement diminués par l'extraction s'ils ne sont pas renouvelables (ressources fossiles du sous-sol). La production résultant de la combinaison de tous les types de capital est composée de la consommation, des services de l'environnement et de l'investissement en capital reproductible. L'allocation de la production dépend du taux ajusté de l'épargne (épargne authentique) et de la règle publique qui détermine les quantités des services environnementaux mis à disposition. On suppose que le mécanisme d'allocation est tel que *V n'est pas une fonction explicite du temps*. Il s'ensuit que

les stocks des différents types de capital en $t+1$ sont déterminés par les stocks en t et par le mécanisme d'allocation permanent. Cette hypothèse n'est pas anodine car elle élimine l'incertitude pour ce qui concerne le mécanisme d'allocation.

Dans cette hypothèse, on peut procéder de période en période et déterminer en principe toute l'évolution future des stocks des différents types de capital et des flux de consommation et de services environnementaux. S'il y a n stocks de capital K_i au moment t ($i=1, \dots, n$), les valeurs des variables macroéconomiques sont déterminées à tous les moments futurs $\tau > t$. Il s'ensuit que U est déterminé pour $\tau \geq t$ et que $V(t)$ est également déterminé. On peut écrire :

$$V(t) = V[K_1(t), K_2(t), \dots, K_n(t)]$$

La condition de forte soutenabilité impose :

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\partial V}{\partial K_{it}} \right) \left(\frac{dK_{it}}{dt} \right) = \sum_{i=1}^{i=n} p_{it} I_{it}$$

Où p_i est la contribution du type i de capital au bien-être intertemporel, c'est-à-dire le prix théorique du capital K_i et I_i l'investissement net dans ce type de capital.

La condition de forte soutenabilité signifie que si le capital est évalué à son « juste prix », la variation de la richesse sociale en t est égale à la variation du bien-être social intertemporel. *Le critère de la soutenabilité est que la richesse réelle ne diminue pas, c'est-à-dire que l'épargne authentique est ≥ 0 .*

Cette condition est très générale. Elle n'exige pas que la fonction de bien-être soit de la forme analytique choisie plus haut pour montrer que les services environnementaux peuvent être traités séparément de la consommation des ménages. Il n'est pas nécessaire de calculer la valeur absolue de V ; c'est la variation de la richesse réelle qui doit être calculée. Cependant, pour que la forte soutenabilité s'applique, ce sont les prix fictifs qu'il faut utiliser pour calculer les composantes de la richesse. Les prix fictifs ne sont pas les prix observables, ce sont ceux qui seraient pratiqués si tous les types de richesse étaient des marchandises échangées sur des marchés concurrentiels dans un contexte de prévision parfaite. Étant donné que de nombreux types de capital ne sont pas du tout des marchandises échangées, ils sont en partie calculés comme des *rentes actualisées*, c'est-à-dire le prix à payer pour la rareté de la ressource. C'est là que les problèmes de mesure se compliquent.

En outre, dans l'équation ci-dessus, les prix fictifs sont mesurés en unités d'utilité par unité de capital. Ce n'est pas commode pour des fins empiriques. Un type de capital ayant un prix de marché observé peut être considéré comme du *numéraire*. Supposons que c'est $i=1$. Le prix est supposé égal à 1. Les prix des autres types de capital, exprimés dans ce numéraire, deviennent des indices de prix. Appelons W la valeur totale de la richesse exprimée dans ce système de prix :

$$W_t = \sum_{i=1}^n p_{it} K_{it} \text{ et } \frac{dW}{dt} = \sum_{i=1}^n p_{it} I_{it}$$

La condition de soutenabilité est : $dW/dt \geq 0$. Elle peut être utilisée pour mesurer une soutenabilité faible où l'éventail des différents types de capital est le plus étendu qu'on puisse mesurer et où les prix sont les meilleures approximations possibles des prix fictifs.

Progrès technique et croissance de la population

La condition de soutenabilité peut être définie un peu différemment. En divisant les deux termes de l'équation par la valeur du premier type de capital, on obtient :

$$\left(\frac{dV}{dt} \right) \left(\frac{1}{p_1 K_1} \right) = \left(\frac{1}{K_1} \right) \left(\frac{dK_1}{dt} \right) + \left(\frac{p_2 K_2}{p_1 K_1} \right) \left(\frac{1}{K_2} \right) \left(\frac{dK_2}{dt} \right) + \dots + \left(\frac{p_n K_n}{p_1 K_1} \right) \left(\frac{1}{K_n} \right) \left(\frac{dK_n}{dt} \right)$$

L'économie est soutenable si la somme de la croissance en volume des différents types de capital, pondérée par leur élasticité de substitution avec le type retenu comme numéraire, n'est pas négative.

Supposons maintenant un progrès technique neutre Hicks. On peut l'interpréter comme le taux de croissance des « connaissances » considérées comme numéraire. Le taux de croissance est le taux de croissance (γ) de la productivité totale des facteurs (PTF). Avec un progrès technique neutre, l'élasticité de la production aux connaissances est de 1. Par conséquent, le taux de croissance de la richesse réelle devient simplement la somme de la croissance de la PTF et des taux de croissance des autres types de capital :

$$\frac{1}{W} \frac{dW}{dt} = \gamma + \sum_{i=2}^n \frac{1}{K_i} \frac{dK_i}{dt}$$

On mesure la croissance en volume des différents types de capital, y compris la croissance de la PTF, et on additionne les valeurs obtenues.

La formule est valide si la population reste constante. Si la population augmente au taux g , le critère de soutenabilité doit être appliqué dans le calcul de la croissance de la richesse réelle par habitant, sous réserve d'une croissance constante de la population et de l'indépendance de la distribution de la richesse sur l'évolution de la population :

$$\frac{1}{W} \frac{dW}{dt} - g = \gamma + \sum_{i=2}^n \frac{1}{K_i} \frac{dK_i}{dt}$$

Puisque la variation de la richesse réelle nette totale ou *richesse authentique* est l'investissement net de la société, la condition de soutenabilité est qu'elle ne détruit pas sa richesse en générant suffisamment d'épargne ajustée, ou épargne authentique, pour correspondre à l'investissement net. La condition de soutenabilité devient donc la suivante : *le sentier de développement d'une économie est soutenable si, à tout moment, l'épargne sociale ajustée (ou épargne authentique) n'est pas négative*. Si elle devient négative, la société détruit sa richesse.

L'épargne authentique est définie comme suit :

Épargne authentique = épargne brute économique de la nation – dépréciation du capital productif fixe + variation de la valeur du capital humain + variation de la valeur du capital social – épuisement des ressources fossiles minérales et énergétiques – diminution nette des forêts – dommages dus à la pollution en \approx CO₂

Le cadre théorique des politiques de développement dédiées à l'objectif à long terme de croissance soutenable a été posé. Des obstacles considérables s'opposent à la mise en œuvre d'une transformation aussi radicale des politiques par rapport aux pratiques actuelles qui ont abouti à une dynamique de crédit non soutenable dans le système financier, à des menaces sur la soutenabilité des dettes publiques, à une distribution faussée du revenu et à des périls écologiques grandissants. Du point de vue de la mesure, la gestion des finances publiques est aujourd'hui la priorité, car elles seront indispensables au

financement des investissements nécessaires à l'accumulation à long terme de la richesse réelle. Ensuite, la mesure des types de capital qui ont été écartés dans les systèmes de comptabilité nationale est une condition préalable de l'élaboration de politiques d'investissement appropriées. Ce n'est pas qu'une question de statistiques. Le choix du facteur d'actualisation à long terme, crucial pour mesurer la plupart des types de capital, pose de très difficiles questions éthiques.

3 SOUTENABILITÉ DES FINANCES PUBLIQUES

La soutenabilité de la dette publique pose de complexes problèmes de mesure. Faut-il considérer la dette brute ou la dette nette ? Si on pense que la dette nette est pertinente, quels actifs faut-il accepter de l'autre côté du bilan ? Côté passif, certains passifs éventuels n'apparaissent pas ni dans la comptabilité budgétaire annuelle, ni dans les comptes nationaux. Faut-il les imputer à la dette publique ? Comment les évaluer ? Ce problème a été exagéré et a suscité de violentes controverses sur la soutenabilité future des systèmes publics de retraite par répartition. À supposer que ces problèmes soient résolus, quel est le critère de soutenabilité approprié ? La politique consistant à imposer une limite arbitraire (60 % du PIB dans la zone euro) est-elle pertinente et légitime ?

Pour répondre à ces questions, il faut d'abord se familiariser avec la comptabilité de la dette publique (encadré 2).

Encadré 2. Comptabilité de la dette publique

Le compte de dépenses et de recettes du budget de l'exercice s'analyse comme suit :

$$H - T + iF_{-1} = \Delta D + \Delta M$$

H est le montant des dépenses publiques, T le montant des recettes fiscales, D le stock d'obligations souveraines, ΔD le flux annuel net et ΔM la monétisation du déficit public. Le côté gauche est donc le déficit, tandis que le côté droit est le financement.

Cette équation comptable peut être exprimée en pourcentage du PIB nominal :

$$h - \tau + (i - \pi - g)d_{-1} = \Delta d + \Delta m + (\pi + g)m_{-1}$$

Le déficit primaire en pourcentage du PIB ne dépend pas du marché des capitaux :

$$b = h - \tau - \Delta m - (\pi + g)m_{-1}$$

où $(\pi + g)m_{-1}$, est le seignuriage.

On peut définir le taux d'intérêt réel ex post ajusté à la croissance :

$$\rho = i - \pi - g$$

La dynamique de la dette est décrite par l'équation différentielle en temps discret :

$$b + \rho d_{-1} = \Delta d$$

Cette équation est résolue par itération pour une dette durant n périodes :

$$d_t = E_t \delta_{t,n} d_{t+n} - E_t \sum_{j=1}^{j=n} \delta_{t,j} b_{t+j}$$

Le facteur d'actualisation dans n périodes dans le futur est :

$$\delta_{t,n} = \prod_{s=1}^{s=n} (1 + \rho_{t+s})^{-1}$$

On peut remarquer que *le taux d'actualisation de la dette publique est égal à la différence entre le taux d'intérêt réel moyen payé sur la dette en circulation (fonction de la structure de la dette) et le taux de croissance de l'économie*. La valeur actualisée de la dette en t est donc égale à la valeur anticipée actualisée de la dette en t+n moins la valeur actualisée des déficits primaires entre t et t+n.

La condition de soutenabilité est obtenue en laissant $n \rightarrow \infty$.

La dette publique est soutenable si sa valeur actualisée $\rightarrow 0$ dès lors que l'horizon de la dette tend vers l'infini. La condition est la suivante :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E_t \delta_{t+n} d_{t+n} = 0$$

C'est la condition de transversalité, qui signifie que le ratio dette/PIB doit suivre une tendance stationnaire pour que les finances publiques soient soutenables. Il n'est pas nécessaire qu'il converge vers un maximum prédéterminé (60 % ou un autre chiffre). Sa valeur dépend du profil des excédents primaires futurs :

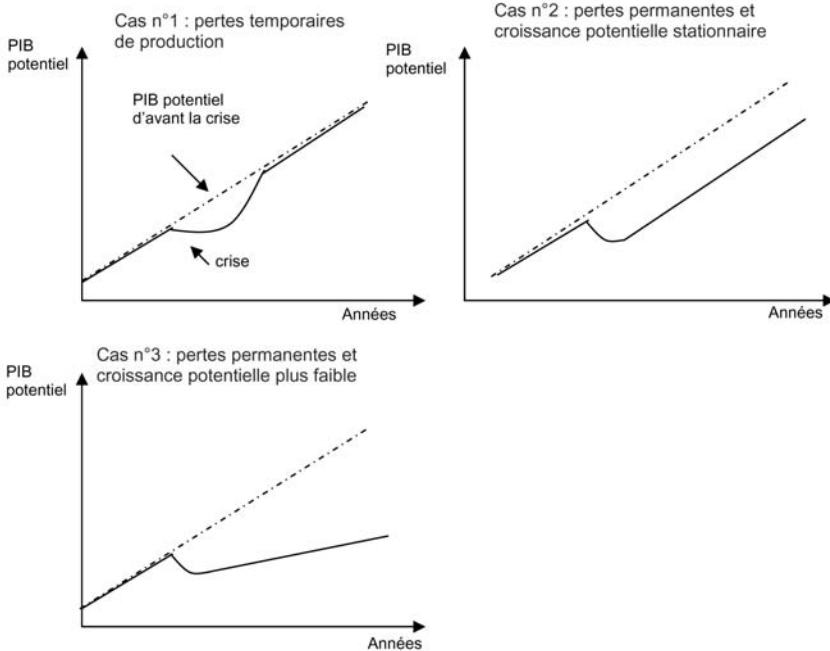
$$d^* = -\lim_{n \rightarrow \infty} E_t \sum_{j=1}^{j=n} \delta_{t,j} b_{t+j}$$

L'encadré 2 montre que la valeur actualisée de la dette soutenable brute en équilibre de long terme est la somme des futurs excédents primaires anticipés actualisés qui la financent. Le taux d'actualisation est des plus importants. Plus le facteur d'actualisation est bas, c'est-à-dire plus est élevé le taux d'actualisation égal à la différence entre le taux d'intérêt réel payé sur la dette publique et le taux de croissance de l'économie ($r-g$), moins les futurs excédents distants comptent dans la valeur de la dette soutenable. Dans ce cas, la condition de soutenabilité implique une consolidation à court terme des finances publiques. Un cercle vicieux peut cependant s'installer. Après une crise financière, par exemple, un important montant de dette a été transféré du secteur privé au secteur public. Un effort budgétaire trop lourd et trop rapide pourrait diminuer le taux de croissance tendanciel de l'économie pendant une période considérable, ce qui abaisserait le facteur d'actualisation, d'autant plus que le sentier de la dette future devient insoutenable et qu'une défaillance devient inévitable. L'opposé se produit si $r-g$ est faible. À la limite, selon la règle d'or ($r=g$), le taux d'actualisation est nul, ce qui signifie que tous les futurs excédents primaires sont équivalents. Le gouvernement dispose d'un délai infini pour rééquilibrer ses finances. Bien entendu, si $r < g$, la dette publique est soutenable même si le gouvernement laisse filer les déficits primaires, parce que les futures recettes fiscales croissent plus vite que le coût du service de la dette.

Par conséquent, le facteur d'actualisation lie la soutenabilité de la dette publique à la condition plus large de la soutenabilité du régime de croissance défini plus haut.

La figure 1 présente trois scénarios qui auront des conséquences très différentes pour l'avenir des finances publiques dans les pays de l'OCDE les plus touchés par la crise financière. Afin de concevoir un programme à moyen terme crédible pour les futurs équilibres primaires, les gouvernements doivent déduire de l'histoire des crises financières ce que sera le futur sentier de croissance le plus probable. À son tour, la croissance future dépendra de la capacité des politiques publiques à exercer une influence endogène sur la croissance.

Figure 1 : *Scénarios de croissance potentielle future*



Pour définir leur plan de consolidation à moyen terme, les gouvernements doivent avoir un objectif d^*_{t+n} du niveau soutenable de leur dette à l'horizon $(t+n)$ de leur plan. Cet objectif de dette ne doit pas être ridiculement bas. Ce que la Commission européenne propose actuellement, revenir au plafond arbitraire de 60 % du PIB par exemple, serait sûrement un objectif contre-productif qui détruirait la crédibilité des gouvernements. Quoiqu'il en soit, une fois l'objectif fixé, la condition de soutenabilité définie dans l'encadré 1 s'applique comme suit :

$$d_t - E_t \delta_{t+n} d_{t+n}^* = -E_t \sum_{j=1}^{j=n} \delta_{t,j} b_{t+j}$$

Le côté gauche est la variation désirée de la valeur actuelle de la dette publique. Le côté droit est le flux actualisé des excédents primaires qu'il faudra générer pour la financer. Tant que l'équation reste vérifiée, la soutenabilité est respectée à l'objectif fixé.

L'effort budgétaire à accomplir pour satisfaire à la contrainte budgétaire intertemporelle ci-dessus est la différence entre deux ratios de recettes budgétaires/PIB : la pression budgétaire requise moins la pression budgétaire actuelle ($\tau^* - \tau$). Elle est déterminée par l'équation suivante :

$$\tau^* - \tau = [E_t \sum_{j=1}^{j=n} \delta_{t,j}]^{-1} [d_t - E_t d_{t+n}^* + E_t \sum_{j=1}^{j=n} \delta_{t,j} b_{t+j}]$$

Elle est telle que la valeur actualisée des excédents de revenu dus à l'effort budgétaire en $(t, t+n)$ est égale à la différence entre la valeur actualisée de la variation désirée de la dette et la valeur actuelle des futurs excédents primaires qui auraient été enregistrés si la politique passée avait été prolongée. Ni le système fiscal ni les dépenses d'approvisionnement n'étant malléables à la volonté du gouvernement, le niveau visé ne doit pas être arbitraire. Il doit résulter d'un arbitrage entre l'exigence de soutenabilité et la faisabilité politique d'un changement de politique. Plus la période d'ajustement est longue, et donc plus le taux d'actualisation est faible, plus le gouvernement dispose d'une marge de manœuvre pour mettre en œuvre un programme crédible.

Dès lors que la soutenabilité guide la politique menée après un budget dégradé et une forte augmentation de la dette publique, un effort budgétaire doit être consenti puisque $\tau^* > \tau$. Pour déterminer des excédents primaires futurs réalistes, un bilan complet du secteur des administrations publiques est utile. C'est là que les futurs passifs éventuels et les actifs du secteur public doivent entrer en jeu (tableau 1).

Tableau 1 : *Bilan des administrations publiques*

Postes	Actif	Passif
Actifs et passifs budgétaires	Valeur actuelle nette des futures recettes fiscales	Valeur actuelle nette des futures dépenses primaires
Actifs et passifs financiers	Participations dans des entreprises du secteur public Autres actifs financiers	Dette publique brute
Capital de la nation	Actifs immobiliers	Valeur nette du secteur public
Richesse publique	Total	Total

Cette présentation est un cadre de comptabilisation de la richesse proche d'un bilan d'entreprise. La nation tout entière est la communauté des « actionnaires » du secteur public. La valeur nette du secteur public est donc analogue aux fonds propres implicites de la population représentant la nation. La valeur nette est une mesure de la solvabilité de la nation, plus large que la mesure du ratio dette brute/PIB et conforme à la problématique de la soutenabilité.

Dès lors que la valeur nette est positive, le gouvernement peut abaisser les impôts, ce qui accroît le patrimoine net des ménages, ou augmenter les investissements, ce qui accroît la richesse publique et améliore les services publics sans nuire aux droits des porteurs d'obligations. Si la valeur nette est négative, les finances publiques ne sont pas soutenables. Si une défaillance pure et simple est déclarée, les porteurs d'obligations subiront des pertes financières. Si une politique de consolidation est mise en œuvre pour retrouver une valeur nette positive, les contribuables verront leur patrimoine réduit par l'augmentation de leur charge fiscale ou bien les bénéficiaires des services publics subiront une perte de bien-être due à la dégradation des services publics.

Dans les prochaines années, la valeur nette des administrations publiques dans les pays avancés subira les effets persistants de la crise financière et la perte permanente de production si le scénario 2, ou *a fortiori* le scénario 3, de la figure 1 s'applique. De plus, le vieillissement créera graduellement des passifs éventuels par augmentation des dépenses de santé et de retraite. Le coût du vieillissement pour les finances publiques dépend étroitement des perspectives démographiques et de croissance à long terme ; ces perspectives sont elles-mêmes liées au potentiel de croissance soutenable, dont l'estimation repose à son tour sur la mesure du capital authentique. Si on admet que la méthodologie de l'inventaire permanent offre des procédures raisonnablement précises pour mesurer le capital productif fixe, la tâche la plus difficile est la mesure du capital immatériel et du capital naturel.

4 CROISSANCE SOUTENABLE : MESURE DU CAPITAL IMMATÉRIEL

La mesure des actifs immatériels est un problème ancien, plus encore dans les entreprises qu'en comptabilité nationale. Dans les entreprises, le concept de capital est très restrictif. Ce qu'on appelle le « goodwill intrinsèque » de l'entreprise est une sorte de trou noir, une source de rentabilité devinée et affichée sur les marchés financiers en cas de fusion-acquisition. D'autre part,

les comptes nationaux ont été réticents à capitaliser les dépenses immatérielles. La procédure acceptée consiste à traiter ces dépenses comme des dépenses intermédiaires, et non comme des investissements qui se rattachent au PIB.

Cependant, la révolution des technologies de l'information a donné un tel essor aux actifs immatériels qu'on leur accorde une bien plus grande attention depuis vingt ans. On se rappellera le paradoxe de Solow à la fin des années 1980 : « la révolution informatique est visible partout sauf dans les données de la productivité ». La révolution informatique a développé les secteurs de services où la mesure de la productivité dépend de la capacité des indices de prix à rendre compte du changement qualitatif des nouveaux produits. Les prix dits hédoniques ont tenté de remédier à cette insuffisance dans certains pays, mais les conventions adoptées pour les établir sont sujettes à controverses. Les choses ont commencé à changer au milieu des années 1990, mais on persistait à penser que le traitement comptable des actifs immatériels en tant que produits intermédiaires sous-estimait la productivité du travail.

Une estimation grossière des actifs immatériels pour 1999 aux États-Unis comprenant les dépenses de logiciels, la R&D, le capital humain etc. a produit un résultat surprenant. L'investissement en actifs immatériels avoisinait 1 000 milliards d'USD, soit le montant des investissements en capital matériel à l'époque (Corrado, Hulten et Sichel, 2005). Mis en évidence, les actifs immatériels masqués dans les comptes nationaux avaient un effet important sur le PIB, le taux d'investissement et la productivité du travail. Les questions soulevées par cette estimation ponctuelle étaient les suivantes : les biais résultant de la non-prise en compte d'un montant de capital aussi important affectent-ils seulement les niveaux ou les taux de croissance sur lesquels ils jouent ? Si cette dernière hypothèse était vraie, quelle est la mesure de croissance non prise en compte du fait de l'omission du capital immatériel ? Quelle est la contribution du capital immatériel à la croissance globale ? Quelle est l'importance relative de l'accumulation de capital et de la PTF lorsque les actifs immatériels sont pris en compte ? Ces questions sont importantes au plan méthodologique car la PTF est une valeur résiduelle, la mesure de nos lacunes dans la compréhension du processus de croissance. Diminuer ce qui est imputé à la PTF revient à mieux comprendre la croissance. Entre-temps, le système de comptabilité nationale a évolué, tout d'abord en capitalisant les logiciels, puis en acceptant la R&D scientifique comme une dépense en capital. Pourtant, ce n'est que la pointe de l'iceberg. Pour comprendre les problèmes posés dans l'évaluation du capital immatériel, qui suscitent les réticences des comptables, il faut expliquer pourquoi les actifs immatériels tiennent une

place particulière dans la production et quelles catégories d'intrants définissent le domaine étudié.

4.1 Estimation des actifs immatériels

Les actifs immatériels sont notés pour leur caractère non vérifiable et non visible, ce qui complique et rend parfois impossible l'application de la méthodologie de l'inventaire permanent. Certains actifs immatériels sont non rivaux ou produisent des rendements non appropriables. Leur production étant souvent réalisée en interne, on ne peut s'appuyer sur aucune transaction dans des conditions normales de concurrence pour les quantifier. C'est le cas de la promotion de marques par la publicité ou d'autres moyens (capital marque) ou des règles de gestion des sociétés. D'autre part, il n'est pas facile de distinguer les composantes prix et quantités et même trouver une unité de mesure ne va pas de soi. En l'absence de prix de marché observables, on utilise les coûts des intrants pour contourner l'obstacle de l'absence d'observation directe. Une autre méthode d'approximation est l'utilisation d'un déflateur générique de la production, par exemple le déflateur des prix des produits non agricoles, tant que des déflateurs de prix spécifiques ne sont pas disponibles. Ce peut être une meilleure approximation si le travail n'est pas le seul facteur entrant dans la production de l'actif immatériel. Le manque de visibilité découle de l'absence de support physique lié au savoir par exemple. S'il est comptabilisé comme du capital, le lien entre les dépenses d'investissement et le stock de capital est difficile à dégager parce que les taux de dépréciation sont difficiles à saisir. Cependant, cette caractéristique n'a pas d'effet sur la façon dont le savoir est utilisé dans le temps.

La non-rivalité pose le problème de la mesure du produit marginal de ce type de capital – il pourrait être nul dans la production directe du produit – mais il améliore l'efficacité du processus de production et la qualité des produits. La non-appropriabilité du rendement de certaines propriétés intellectuelles implique que leur produit marginal ne reflète que les bénéfices et les coûts privés. Cependant, les principes du calcul marginal doivent s'appliquer à leur évaluation. Ils doivent être évalués en fonction de la valeur actuelle du revenu futur attendu qu'ils produisent. La raison tient à ce qui a été dit plus haut à propos de la théorie du bien-être. *L'investissement est défini comme toute utilisation d'une ressource qui réduit la consommation actuelle en vue d'accroître la consommation future.* Par conséquent, toutes les catégories de capital doivent être évaluées symétriquement, qu'il s'agisse de dépenses de R&D, de formation des salariés ou d'immobilisations corporelles. Cela signifie

que le côté de la consommation doit l'emporter dans l'unification des principes d'évaluation, indépendamment des différences de production et des difficultés pratiques de mise en œuvre.

En quoi le traitement des actifs immatériels en tant que produits intermédiaires ou en tant que variation du capital modifie-t-il le revenu national ? Si les dépenses en capital immatériel sont exclues de l'investissement, elles n'apparaissent pas dans l'identité du revenu national qui mesure le flux des rentes sur le capital par la valeur résiduelle :

$$p_K K = p_C C + p_I I - p_L L$$

Appelons N le volume des dépenses en capital immatériel sur une période donnée et p_N son prix, R le volume du capital immatériel et p_R son coût d'usage. L'identité du revenu national est la suivante :

$$p_K K + p_R R = p_C C + p_I I + p_N N - p_L L$$

Le côté gauche de l'identité représente les montants hors main-d'œuvre payés au capital matériel et immatériel. Le profit global payé au capital matériel et immatériel est donc plus élevé.

Pour estimer le volume du capital immatériel d'une catégorie définie en utilisant la méthode de l'inventaire permanent, on doit calculer l'investissement réel en divisant le flux d'investissement nominal sur une période donnée, soit par le coût du travail moyen, soit par le déflateur des prix non agricoles, selon la nature de la catégorie.

Le capital humain est incorporé dans les personnes. Dans le cas du capital humain, on peut supposer que le processus d'éducation rapporte le taux d'intérêt du marché pendant le temps passé en formation. Puisqu'on peut approcher l'investissement en capital humain par le nombre d'années d'éducation (en faisant abstraction du problème insurmontable des différences de qualité), le capital humain par travailleur est défini en état stable par : $H = he^{\rho A}$, où H est le capital humain par travailleur, ρ le taux d'intérêt approprié, he la valeur réelle des dépenses annuelles d'éducation par travailleur et A le nombre d'années d'études.

Le stock de capital humain est :

Capital humain total = (capital humain par travailleur)(nombre de travailleurs), le nombre de travailleurs étant ajusté de la mortalité pendant la vie active. Sur les marchés concurrentiels, la productivité marginale du capital est égale à son prix fictif, lequel est égal au salaire réel. On obtient donc : prix fictif (masse salariale totale)/(stock de capital humain)

Pour les catégories d'actifs immatériels qui s'apparentent plus au capital matériel, il est possible d'utiliser la méthode de l'inventaire permanent. L'investissement réel N est estimé en divisant l'investissement nominal par le déflateur des prix des produits non agricoles. En appliquant l'identité d'accumulation du capital, le stock de capital R est déterminé par :

$$R(t) = N(t) + (1 - \delta_R)R(t-1)$$

Comment choisir δ et $R(0)$? Si δ est relativement élevé, les experts peuvent choisir une année de référence où $R(0)=0$. Les taux de dépréciation sont des estimations des experts du terrain.

Il reste à calculer le coût d'usage du capital en fonction de la formule standard de Hall et Jorgenson pour chaque catégorie (i) :

$$p_{R,i} = [r + \delta_i - \pi_i] p_{N,i}$$

R est le taux compétitif de rendement du capital, δ_i est le taux de dépréciation de l'actif I , π_i la plus- ou moins-value anticipée sur l'actif i et $p_{N,i}$ est le déflateur du prix de l'investissement.

4.2 Classification des actifs immatériels

La vision microéconomique de l'entreprise et la vision macroéconomique du développement se différencient nettement par la liste des postes classés en investissements immatériels. Au niveau de l'entreprise, la préoccupation est l'innovation, la gouvernance et la responsabilité sociale. Au niveau macroéconomique s'appliquant à la politique de développement, la Banque mondiale inclut des catégories qui sont très imprégnées d'idéologie et ont été promues par le Consensus de Washington. Certaines ne sont pas mesurables et ne servent qu'à affirmer qu'il n'y a qu'une voie optimale : le capitalisme à l'occidentale !

Bien entendu, le capital humain figure dans les deux listes. La gouvernance apparaît dans les deux mais elle y revêt des significations très différentes. Dans la gouvernance d'entreprise, la capacité à intégrer les fonctions de l'entreprise dans un seul objectif et à contrôler le processus managérial est en jeu. Dans la gouvernance vue par la Banque mondiale, l'aune est fournie par les institutions américaines. Les investissements institutionnels dans les autres pays sont classés en fonction de leur éloignement par rapport au modèle américain. Ce préjugé met en valeur les institutions formelles. La règle de droit se voit parée de toutes les vertus : cohésion sociale, légitimité politique et effica-

cité des administrations publiques. Ce préjugé fait totalement l'impasse sur les réseaux informels de coopération sociale comme les « guanxi » chinois.

Tableau 2 : *Catégories d'investissement et de capital immatériel*

Investissements immatériels des entreprises	Investissements immatériels du point de vue du développement
Information informatisée	Capital humain
Propriété innovante : -R&D basée sur les connaissances scientifiques -R&D commerciale non scientifique	Capital social : -degré de confiance au sein de la société -capacité à œuvrer à un but commun
Investissements en capacités organisationnelles : -planification stratégique -révision de la conception des produits existants -investissements en noms de marques	Gouvernance : -système judiciaire -droits de propriété -légitimité des gouvernements
Investissements en capacités humaines spécifiques à l'entreprise (direction et cadres)	Autres actifs : ANF + omissions dans l'évaluation d'autres formes de capital

4.3 Impact du capital immatériel des entreprises sur la croissance

Dans cette partie, nous suivons les travaux de Corrado, Hulten et Sichel sur les États-Unis (« *Intangible capital and economic growth* »), l'une des recherches les plus avancées jusqu'ici. Ils comparent les niveaux de PIB et les taux de croissance en comptabilité nationale, dans laquelle la plupart des actifs immatériels sont traités comme des produits intermédiaires, aux chiffres que l'on aurait pu obtenir si la comptabilité avait considéré les actifs immatériels comme des biens productifs. Leur méthodologie est décrite dans l'encadré 3.

L'exercice de comptabilisation de la croissance donne des résultats remarquables. Capitaliser les actifs immatériels augmente le taux de croissance de la production horaire sur les périodes 1973-1995 et 1995-2003, si bien que le niveau est de 20 % plus élevé que dans les comptes de la nation à la fin de la première période et de 11 % plus élevé à la fin de la seconde.

Le rôle du capital dans la productivité du travail est fortement accru lorsqu'on considère les actifs immatériels. Inversement, la croissance de la PTF diminue. Le paradoxe de Solow est résolu puisque le rôle du capital dans l'accélération de la croissance de la productivité liée à la révolution informatique est bien plus important avec le capital immatériel.

Dernier point mais non le moindre et contrairement à des croyances qui ont la vie dure, ce sont les ressources spécifiques à l'entreprise (capacités organisationnelles, capacités humaines propres à l'entreprise et propriété

innovante commerciale) qui ont eu le plus d'impact, tandis que la R&D scientifique a eu une importance bien moindre.

Encadré 3. Capital immatériel et comptabilisation de la croissance

Les notations ont été définies plus haut. Deux approches de la comptabilisation de la croissance sont comparées : la première considère les actifs immatériels comme des intrants intermédiaires, tandis que la seconde les considère comme du capital.

Actifs immatériels en tant qu'intrants intermédiaires

Trois branches de l'économie produisent C, I et N avec deux facteurs de production L, K dans toutes les branches et N dans C et I.

Les fonctions de production sont les suivantes :

$$N = F_N(L_N, K_N)$$

$$I = F_I(L_I, K_I, N_I)$$

$$C = F_C(L_C, K_C, N_C)$$

En supposant que les facteurs de production sont payés à leur productivité marginale, les identités de revenu sont les suivantes :

$$p_N N = p_L L_N + p_K K_N$$

$$p_I I = p_L L_I + p_K K_I + p_N N_I$$

$$p_C C = p_L L_C + p_K K_C + p_N N_C$$

Dans l'hypothèse où tous les marchés d'intrants intermédiaires sont à l'équilibre, N est à la fois un produit et un intrant pour la production d'autres marchandises. Il disparaît dans l'identité du PIB agrégé :

$$p_Y Y = p_C C + p_I I = p_L L + p_K K$$

En comptabilité nationale traditionnelle, le taux de croissance du PIB (g_Y) est la somme du taux de croissance de la PTF (γ) et des sommes pondérées des contributions des taux de croissance des facteurs de production. Les poids sont leurs parts du PIB supposées égales aux élasticités de la production correspondantes.

$$g_Y = s_C g_C + s_I g_I = s_L g_L + s_K g_K + \gamma$$

Actifs immatériels en tant que capital

La production d'actifs immatériels apparaît dans la fonction de production de C, I, N en tant que stock cumulatif R.

Les fonctions de production sont les suivantes :

$$N = F_N(L_N, K_N, R_N)$$

$$I = F_I(L_I, K_I, R_I)$$

$$C = F_C(L_C, K_C, R_C)$$

Les identités de revenu dans les trois branches sont les suivantes :

$$p_N N = p_L L_N + p_K K_N + p_R R_N$$

$$p_I I = p_L L_I + p_K K_I + p_R R_I$$

$$p_C C = p_L L_C + p_K K_C + p_R R_C$$

L'identité du PIB :

$$p_Y Y = p_C C + p_I I + p_N N = p_L L + p_K K + p_R R$$

Le PIB est étendu à la production des actifs immatériels nouvellement produits côté production et au flux des services provenant du stock d'actifs immatériels côté revenu. P_R est le coût d'usage associé aux services du stock immatériel. C'est une source de revenu absente du traitement des actifs immatériels en tant qu'intrants intermédiaires. Le PIB est ainsi plus complet et englobe plus d'éléments. De ce fait, les parts des facteurs de production sont recalculées.

$$g_Y = s'_C g_C + s'_I g_I + s'_N g_N = s'_L g_L + s'_K g_K + s'_R g_R + \gamma'$$

La croissance de la PTF et la part du travail sont inférieures à ce qu'elles étaient avec les précédentes règles comptables. Elles sont réduites par le coefficient

$$\lambda = \frac{p_C C + p_I I}{p_C C + p_I I + p_N N}$$

La part du capital est plus conséquente parce qu'elle comprend la part du revenu revenant au capital immatériel ; le revenu salarial en capital humain est comptabilisé en revenu du capital.

5 CROISSANCE SOUTENABLE : MESURE DU CAPITAL NATUREL

Le capital naturel est extraordinairement diversifié. La Banque mondiale distingue les gisements, les forêts et les terrains. Les gisements sont des dépôts fossiles non renouvelables : charbon, pétrole, gaz et minéraux ; les terrains se composent des terres cultivées, des pâturages et des zones protégées. Les forêts comprennent les ressources forestières en bois et les autres ressources forestières. Il est impossible d'attribuer une valeur monétaire aux autres ressources naturelles comme l'air et l'eau. Des tentatives sont faites pour les comptabiliser en stocks de matières énergétiques : flore et faune sauvages, poissons sauvages des océans, eaux continentales, etc...

Les principaux problèmes dont il faut rendre compte sont l'épuisement des ressources naturelles et la dégradation du patrimoine naturel non marchand. En ce qui concerne ce dernier, l'évaluation monétaire dans le compte satellite concerne les atteintes à la biodiversité résultant de l'activité économique. Les ressources naturelles marchandes sont soit non renouvelables (énergie et minéraux), soit renouvelables (forêts et poissons).

Avant 1993, les ressources non renouvelables des gisements étaient comptabilisées en production à la date de l'extraction. Au contraire, les ressources nouvellement découvertes n'étaient pas comptabilisées à la date de la découverte. Dans le système de comptabilité nationale de 1993, les découvertes et les prélèvements sur les actifs non produits sont enregistrés au compte des autres changements de volume.

Toutes les ressources non renouvelables génèrent des rentes, qui servent de base à leur évaluation. Dans le cas des ressources renouvelables, la durée du stock est infinie et la valeur intrinsèque de la ressource prélevée est nulle si la quantité du prélèvement est inférieure à la croissance naturelle. Dans ce cas, la valeur totale de la vente des quantités prélevées sur le stock est imputée à la production forestière ou halieutique. Dans le cas contraire, lorsque l'épuisement du stock dépasse la croissance naturelle, l'exploitation de la ressource n'est pas soutenable.

Par conséquent, l'investissement net en forêts est égal à : croissance naturelle + (plantations – quantité utilisée)

Une rente apparaît si : quantité utilisée > croissance naturelle.

La ressource acquiert une valeur de rareté intrinsèque, c'est-à-dire une rente monétaire positive. Elle doit être traitée de la même façon que la rente des ressources non renouvelables (Vanoli, 1995). Le stock de poissons est exclu de cette analyse parce qu'un excédent de prélèvement sur le stock pourrait être dû à une demande excédentaire temporaire par rapport aux capacités de pêche. Ce n'est pas la rente intrinsèque qui augmente mais les coûts tant que la ressource est épuisée.

Globalement, la valeur de rareté d'une ressource renouvelable peut être mesurée par le coût économique de la reconstitution de l'actif au niveau qui précédait immédiatement le prélèvement excédentaire. Ce coût est la valeur actualisée de la perte de revenu due à la limitation des prélèvements ou à leur absence pendant la reconstitution de la ressource.

Dans le cadre adopté dans cet article pour modéliser la croissance en relation avec le bien-être social, il convient de mesurer le capital naturel parce que l'activité économique s'accompagne d'une décroissance en qualité et en quantité des services environnementaux qu'il fournit. *L'épuisement du stock de ressources non renouvelables, le prélèvement excessif de ressources renouvelables et la pollution engendrent une perte de valeur des actifs naturels qui réduit l'épargne authentique.* Ils ont donc un impact sur la variation du bien-être social intertemporel.

5.1 Mesure de la valeur des actifs non renouvelables

La valeur des gisements doit être estimée indirectement parce qu'aucune transaction ne porte sur la quantité totale de pétrole ou de minéraux enfouis dans les champs pétroliers ou les mines. Il faut calculer la rente économique de la ressource, qui est la recette nette d'exploitation de la ressource souter-

rairie sur la période totale d'extraction. Il faut ensuite actualiser les flux de valeur à la date actuelle.

La rente est la différence entre la valeur de marché de la ressource primaire après extraction et le total des coûts exposés pour la prospection, le développement et l'extraction, y compris le rendement normal du capital productif investi dans l'exploitation.

La rente est une pure valeur de rareté. Contrairement à un intrant produit, la rente d'un intrant non produit ne rémunère aucun facteur de production, puisqu'aucun facteur n'a produit les ressources fossiles. C'est la valeur d'un don de la nature créée par l'activité humaine qui l'utilise. Dans son rapport de 1997 (« *Expanding the measure of wealth. Indicators of environmentally sustainable development* »), la Banque mondiale définit ainsi la rente économique d'un capital naturel : c'est la plus-value intrinsèque réalisée à l'extraction ou à la collecte d'une ressource primaire. C'est pourquoi elle est dite valeur intrinsèque de la ressource indépendamment du propriétaire, à condition que le propriétaire (public ou privé), celui qui prospecte et celui qui procède à l'extraction soient soigneusement distingués. Cette rente « absolue » ne doit pas être confondue avec les rentes différentielles dues aux écarts de productivité résidant dans les coûts des procédés et lieux d'extraction.

En comptabilité nationale, la rente est mesurée comme suit (Eurostat 2000, *Accounts for subsoil assets*) :

Rente = valeur d'extraction au prix de base – intrants intermédiaires – salaires – impôts nets sur la production – dépréciation du capital fixe – rendement normal du capital fixe (y compris actifs immatériels pour les dépenses de prospection).

Les impôts à imputer sont des impôts non spécifiques au secteur. Les impôts spécifiques font partie de la rente. Le principal problème d'estimation concerne le stock net de capital fixe dans l'industrie d'extraction et le choix des taux de rendement « normal » pour ce stock. Lorsqu'on calcule la rente totale, on détermine la part qui revient à l'État, la part qui est appropriée par les entreprises d'extraction est obtenue par soustraction.

La valeur du stock (V) est la valeur actuelle des rentes annuelles actualisées (R) sur toute la période d'extraction :

$$V_t = \sum_{\tau=t}^{t+n} \frac{R_\tau}{(1+r)^{\tau-t+1}}$$

L'hypothèse cruciale est le taux d'actualisation. La Banque mondiale a choisi un taux de rendement social contestable : $r = \delta + \eta g$ où δ est le taux de

préférence pure pour le présent, η l'élasticité de l'utilité marginale du revenu et g le taux de croissance potentielle de la consommation par habitant. Eurostat prête encore plus le flanc aux critiques en choisissant un taux proche du rendement moyen des obligations souveraines dans les pays avancés. La dernière partie de cet article reviendra sur le taux d'actualisation.

Il existe un moyen simple et naïf de neutraliser l'influence du taux d'actualisation. C'est la règle d'Hotelling, qui suppose que le prix relatif de la ressource rare augmente à un rythme égal au taux d'actualisation. Dans ce cas, la valeur du stock est simplement : $V = \rho Q$ où Q est la quantité qui a été extraite et ρ la rente unitaire.

Plus généralement, la rente a l'effet pervers de transférer la valeur aux non-producteurs. Les plus-values des rentiers sont :

Plus-values = (taux d'augmentation de la rente réelle) (stock de ressources)
 Total des plus-values = Σ plus-values sur pays détenteurs de ressources = moins-values mondiales des consommateurs

La rente a toujours été une malédiction pour le développement du capitalisme. L'augmentation de la valeur réelle des rentes dans le temps accroît le prix réel de la ressource pour les utilisateurs. De ce fait leur richesse réelle diminue, ce qui implique un effet de richesse négatif sur la consommation. C'est aussi une malédiction pour les pays qui possèdent les ressources primaires. En effet, la plupart des pays qui ont une part importante de rentes de ressources, comme le Nigeria, la Zambie ou le Venezuela, ont vu leur revenu réel par habitant décliner sur longue période, tandis que les pays asiatiques qui ont de très faibles ressources épuisables comme la Corée, la Thaïlande ou l'Inde, ont enregistré des taux élevés d'accumulation du capital et de croissance du revenu.

Des rentes élevées peuvent avoir trois effets négatifs. Le premier est le syndrome hollandais, c'est-à-dire la surévaluation de la monnaie, qui nuit à la rentabilité de l'industrie, engendre des taux d'investissement faibles et une productivité du travail molle. Le deuxième est le frein aux réformes. Le pouvoir des rentiers fait obstacle à la formation d'une classe d'entrepreneurs et gaspille la valeur de la rente au lieu d'investir dans l'éducation, la santé et l'infrastructure. Le troisième est la volatilité du prix de la ressource, qui inhibe l'investissement en exploration et en amélioration technologique de l'extraction et de la transformation. Les pays ne tombent pas tous dans ce piège. Le gouvernement norvégien conduit une politique délibérée et généralisée de réinvestissement de la rente afin de substituer du capital immatériel (secteurs financier et à fort contenu de savoir) au capital naturel (gisements pétroliers).

Les terres agricoles sont mesurées de la même manière que les ressources du sous-sol :

Valeur des terres agricoles = valeur actualisée des rentes foncières
 Valeur des pâturages = coût d'opportunité de la préservation des terres pour les pâturages

Les terrains urbains sont traités différemment : ils sont généralement calculés en pourcentage du capital productif total.

5.2 Mesure des dommages causés au capital environnemental

Toutes les catégories de dommages doivent être mesurées et déduites de l'accumulation de richesse afin d'obtenir une mesure satisfaisante de l'épargne authentique. Cependant, dans la situation présente de blocus opposé par de puissants intérêts commerciaux et de réticences des gouvernements à admettre la gravité des risques, les dommages causés par l'épuisement des ressources naturelles et la pollution de l'air et de l'eau sont gravement sous-estimés.

L'épuisement des ressources le moins reconnu est lié à la destruction des forêts ombrophiles tropicales qui sont les puits de carbone les plus importants avec les océans. Cependant, comme le remarquait un récent rapport de *The Economist* (« *Seeing the wood* », 25 septembre 2010), « *l'importance que joue la capacité des plantes à stocker le carbone dans l'habitabilité de la planète n'est pas encore pleinement appréciée* ». Environ la moitié des surfaces forestières primaires ont été défrichées et le rythme de déforestation s'est accéléré au cours des soixante dernières années. Les forêts ombrophiles jouent un rôle fondamental dans la pérennité des écosystèmes. Elles captent et stockent le dioxyde de carbone, et ce d'autant plus que la teneur en carbone de l'atmosphère est élevée ; c'est l'effet fertilisant du carbone. Elles abritent plus de la moitié des espèces animales et végétales de la planète. Elles procurent un vaste ensemble d'aliments de base et de plantes médicinales. Elles régulent le ruissellement des eaux et atténuent ainsi les risques d'inondation et de sécheresse, car les arbres augmentent la pluviosité et la déforestation la réduit.

La dégradation des forêts s'accroît encore dans les régions tropicales (Amazonie, Indonésie, Congo) et dans la taïga boréale. Les forêts sont menacées par le réchauffement climatique et l'irresponsabilité des gouvernements. Le réchauffement climatique provoque la fonte du permafrost et libère des milliards de tonnes de méthane. Il provoque aussi des calamités particulièrement dangereuses pour l'intégrité des forêts : aridité, sécheresse, prédateurs et incendies. Ces calamités entraînent une déforestation qui les renforce par des rétroactions auto-entretenues. De tels cercles vicieux peuvent amener les

forêts ombrophiles près de ce qu'on appelle les « points de bascule » où elles perdent leur viabilité écologique.

En outre, les gouvernements ne conduisent pas de politiques démographiques, si bien que la population mondiale, de 6 milliards aujourd'hui, atteindra 9 milliards dans quarante ans. Compte tenu du faible niveau actuel de la productivité agricole en Afrique, de l'augmentation de la demande de biocarburants, huile de palme et de soja, de l'essor de la demande d'aliments aggravé par l'adoption de la viande dans le régime alimentaire des classes moyennes des pays émergents, les pressions pour la déforestation afin de libérer des terres cultivables et de pâturage seront encore plus fortes.

Pour faire face à ce défi, les Nations Unies ont lancé le beaucoup trop modeste programme REDD (*Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation*). L'idée est juste : les pays riches doivent payer les pays pauvres pour ne pas couper les arbres. Ils doivent le faire parce qu'ils ont besoin des forêts ombrophiles pour contrôler leur propre climat. Mais les fonds alloués au programme REDD aujourd'hui sont très insuffisants (4,5 milliards d'USD) pour avoir un impact significatif sur les dizaines de millions d'exploitations qui s'installent dans les forêts ou à proximité.

Pour réellement mettre un terme à la destruction des forêts, sans même parler de réparer les dommages irréversibles déjà causés, des changements radicaux doivent être introduits dans les politiques nationales : une nette amélioration de la gestion des forêts, une réforme foncière, des efforts affirmés pour améliorer la productivité de l'agriculture et des mesures beaucoup plus strictes pour faire respecter les lois. Aucune de ces transformations ne peut intervenir si les forêts ne sont pas évaluées correctement.

Or aujourd'hui, la comptabilité nationale valorise la destruction des arbres, mais pas les arbres sur pied ! C'est une comptabilité insensée qui affecte une valeur positive à la déforestation et ne tient pas compte des multiples coûts des externalités qui en sont les effets secondaires. Un air propre et des pluies non acides sont des biens publics que tout le monde veut et que personne n'est prêt à payer. C'est aux gouvernements de fixer un prix aux arbres pour ne pas les couper. *Cette valeur de non-usage doit être définie comme le coût d'opportunité de leur abattage et de leur vente.* En principe, le coût d'opportunité doit représenter tous les services environnementaux fournis par les forêts ombrophiles, de la régulation aquatique au piégeage du carbone et à la protection de la biodiversité.

Une solution pour évaluer au moins en partie ce coût d'opportunité en vue d'arrêter la déforestation consiste à donner un prix à une au moins des princi-

pales externalités négatives, la libération du dioxyde de carbone. Supposons qu'un agriculteur veuille défricher un hectare de forêts pour en faire des pâturages. On peut calculer la quantité de carbone libérée dans l'atmosphère par la destruction de ce puits de carbone. Pour un prix du carbone donné, il est possible de déterminer le coût qui serait à la charge de l'agriculteur s'il devait payer l'augmentation marginale des émissions. Si ce coût était plus élevé que le gain prospectif de l'exploitation projetée, la forêt tropicale serait protégée. Cependant, ce dispositif ne peut pas fonctionner dans toutes les situations. En Afrique, la déforestation est une affaire de survie pour des personnes extrêmement pauvres qui en ont besoin pour manger et se chauffer. Les crédits carbone peuvent indirectement amener des ressources à ces populations pour financer des microprojets de développement, mais d'autres instruments sont nécessaires pour concevoir et mettre en œuvre les microprojets (Christian de Perthuis, « *Et pour quelques degrés de plus* », 2010).

Les crédits carbone sont des instruments financiers de redistribution des coûts des dommages mondiaux causés par le changement climatique. Toutes les émissions contribuent au réchauffement climatique, mais l'impact de l'élévation moyenne de la température mondiale est fonction de la latitude. Il y a donc un seul coût social du carbone. Des mécanismes financiers doivent être convenus à l'international pour financer la réduction du carbone là où elle est la plus nécessaire.

Parce que les émissions de CO₂ sont une externalité mondiale qui contribue au réchauffement climatique indépendamment du lieu d'émission, le coût social marginal du carbone est la somme pondérée des futurs dommages marginaux générés par l'émission d'une unité supplémentaire d'équivalent-CO₂ à la date t . Les coefficients pondérés dépendent du taux d'actualisation et du taux d'absorption naturelle du carbone des puits de carbone. Le coût marginal du carbone est une valeur croissante de la quantité d'émissions. Le coût marginal de réduction des émissions (coût de dépollution marginal) est le coût exposé pour diminuer le volume d'émission de gaz à effet de serre d'une unité supplémentaire. C'est une fonction décroissante de la quantité d'émissions. L'analyse coûts-avantages compare le dommage marginal et le coût de dépollution marginal pour chaque niveau de réduction. À l'équilibre : *dommage marginal = coût de dépollution marginal*. Le prix donné par l'équilibre est le *coût social du carbone*. C'est sur ce coût qu'une taxe carbone doit être assise et que la rentabilité des innovations dans l'abattement des émissions de gaz à effets de serre et dans l'adaptation au changement climatique par les aménagements dans l'habitat et les transports doit être calculée.

5.3 La valeur sociale du carbone

Le problème est la quantification pratique de la fonction de dommage marginal et de la fonction de coût de dépollution des émissions parce que c'est une entreprise semée d'incertitudes considérables, qui limitent la validité de l'analyse coûts-avantages dans les modèles d'évaluation intégrés. Pour tenir compte de l'incertitude relative aux dommages, le rapport Stern a simulé de nombreux scénarios. Une autre méthode consiste à appliquer le principe de précaution pour définir une valeur d'option qui tient compte de l'irréversibilité du changement climatique. Avec le temps, on disposera de nouvelles informations qui devront être exploitées pour structurer un processus de décision séquentiel. Le calcul du coût social des émissions de carbone, l'élaboration de scénarios alternatifs et le processus de décision pour tenir compte de la valeur d'option de l'irréversibilité dépendent de manière cruciale du taux d'actualisation.

L'idée est que la valeur sociale du carbone est universelle [Quinet, 2008]. Idéalement elle devrait être fixée à l'occasion d'une conférence climat sous l'égide de l'ONU. Il importe d'en bien comprendre la signification. C'est un prix notionnel qui donne une valeur monétaire à un bien public qui est l'amélioration du service de l'environnement sous la forme d'une tonne supplémentaire d'émission de CO₂ évitée. C'est donc un prix qu'il faut incorporer dans le calcul de la rentabilité des projets d'investissement à long terme pour révéler leur rentabilité sociale. Mais comment en faire une convention commune alors que les attitudes concernant le changement climatique sont très diverses et qu'aucun accord international formel n'est envisageable dans le futur proche ? Comment le déterminer ? Comment en faire une référence commune pour le financement des investissements de réduction des émissions de CO₂ ?

La plupart des résultats théoriques sont peu utiles d'un point de vue opérationnel parce que les modélisations sont conduites en univers certain et que le progrès technique est supposé exogène. Ils sont néanmoins des bases pour comprendre les variables qui jouent un rôle crucial et pour déterminer les contraintes dans l'optimisation de la fonction d'utilité sociale. A partir de cette base théorique, il faut introduire deux types de complexité : d'une part le passage à l'incertitude, d'autre part le progrès technique endogène qui permet de prendre en compte l'innovation. Cette incertitude est redoutable parce que le contrôle optimal conduit à prendre des décisions face à des irréversibilités opposées. L'irréversibilité environnementale résulte d'effets de seuils inconnus et de rétroactions catastrophiques possibles dans le système écologique, lorsque les niveaux de concentration de GES dépassent ces seuils. Elle conduit donc à préconiser des actions précoces à cause de coûts de dommage convexes.

L'irréversibilité du progrès technique, au contraire, fournit une valeur d'option d'attendre la disponibilité de techniques plus performantes. Elle incite donc à un effort initial faible.

Les modèles à univers certain et progrès technique exogène ne se posent pas ces problèmes. Ils appartiennent à deux approches, selon que l'on est capable de calculer les dommages futurs ou non. La première approche est dite *coûts-avantages* ou *Pigouvienne*. La valeur sociale du carbone résulte de l'égalisation du coût marginal de réduction de l'émission d'une tonne de CO₂ supplémentaire et de la valeur actualisée des dommages marginaux futurs qui résultent de l'addition de cette tonne de CO₂ supplémentaire dans l'atmosphère. Cette approche permet de calculer la valeur sociale du carbone à toute date sur une trajectoire qui dépend de la spécification des fonctions d'évolution de la concentration des gaz à effets de serre, de l'impact de cette concentration sur la hausse de la température moyenne du monde et de l'effet de cette hausse sur les dommages économiques et sociaux. La seconde approche est dite *coûts-efficacité*. Elle renonce à calculer les dommages et introduit une contrainte de concentration maximale à ne pas dépasser à une date future prédéterminée. Elle recherche la manière d'atteindre cet objectif au coût le plus faible pour la collectivité. Cette approche détermine le rythme d'évolution de la valeur sociale du carbone. Mais elle a le défaut de laisser la valeur initiale indéterminée. Les principaux résultats sont rassemblés dans l'encadré 4.

Encadré 4. La valeur sociale du carbone en univers certain

Approche coûts-avantages

La fonction de concentration des GES dans l'atmosphère dépend du stock issu des émissions passées accumulées et non capturées.

Soit X_t le stock au temps t , x_{t-s} les émissions à la date $t-s$ et a le taux d'absorption naturel dans le cycle du carbone. Le niveau du stock en t est :
$$X_t = \int_0^{\infty} e^{-as} x_{t-s} ds$$

Soit $D(X_t)$ la fonction de dommage qui résulte de la concentration de GES et δ le taux social d'actualisation. La valeur sociale optimale du carbone (prix fondamental du CO₂)

doit être égale au coût du dommage marginal :
$$V_t^{CO_2} = \int_0^{\infty} e^{-(\delta+a)s} D'(X_{t+s}) ds$$

Connaître la fonction de dommage est crucial. Stern retient une fonction convexe :

$D'(X) = \epsilon X^\gamma$ où $\gamma > 1$ désigne la convexité des dommages. Sous l'hypothèse que les émissions croissent exponentiellement au taux g , on peut calculer le niveau de la valeur sociale du carbone à toute date :

$$V_t^{CO_2} = \epsilon \int_0^{\infty} e^{(\gamma - (\delta+a))s} ds = \frac{\epsilon X_0^\gamma}{\delta + a - \gamma g} e^{\gamma g t}$$

elle croît au taux $\gamma g > g$ qui est le rythme de croissance de la concentration. Son niveau initial est, en outre, d'autant plus bas que le taux d'actualisation et le taux d'absorption naturelle sont élevés.

Approche coûts-efficacité

La réduction des émissions de CO2 est liée à l'épuisement des énergies fossiles. Soit Z le plafond de concentration dont l'objectif est qu'il soit atteint à une date T₁ (par exemple 2050) et jamais dépassé. Il y aurait donc 3 périodes. De 0 (=1990 selon la base choisie pour les calculs de concentration) à T₁ la concentration augmente. Après T₁ la concentration reste à son maximum ; ce qui permet une baisse progressive de la valeur du carbone tandis que les stocks d'énergies fossiles s'épuisent progressivement. En T₂ (≈2100) la valeur du carbone est retombée à 0 et c'est la rente de rareté qui augmente ; ce qui rend rentable la substitution par les énergies décarbonnées (supposées disponibles sans coût d'innovation préalable) jusqu'à une date T₃ (≈2200) où ces énergies propres restent seules.

Calculons l'évolution de la valeur sociale du carbone dans la période [0,T₁] qui nous concerne directement. Appelons C_t la consommation d'énergie fossile et U(C_t) l'utilité qu'on en tire. Le programme de contrôle social optimal est :

$$\text{Max} \int_0^{\infty} e^{-\delta t} U(C_t) dt \text{ sous les contraintes :}$$

De l'épuisement du stock S d'énergie fossile : $\dot{S}_t = -C_t$

De la fonction de concentration du CO2 : $\dot{X}_t = \epsilon C_t - aX_t$

De l'objectif de concentration maximale : $X_t \leq Z$

Ce programme de contrôle optimal peut être décentralisé sous condition de marchés parfaits par des prix duaux que la puissance publique peut piloter par des taxes et subventions pour parvenir à inciter les acteurs privés à se comporter conformément à l'optimum social. Ces prix duaux sont les multiplicateurs du lagrangien qui max la fonction généralisée qui incorpore les contraintes. Soient λ_t la rente de rareté (prix implicite de la ressource fossile), μ_t la valeur du carbone (prix implicite du stock de carbone dans l'atmosphère) et ω_t le multiplicateur associé à la saturation de la contrainte de concentration.

Les valeurs des prix duaux évoluent selon les équations différentielles :

$$U'(C_t) = \lambda_t + \epsilon \mu_t$$

$$\frac{\dot{\mu}_t}{\mu_t} = \delta + a - \frac{\omega_t}{\mu_t}$$

$$\frac{\dot{\lambda}_t}{\lambda_t} = \delta$$

Tant que la contrainte de concentration carbone n'est pas saturée (t < T₁), la rente de rareté des énergies fossile croît au rythme du taux d'actualisation (règle de Hotelling) et la valeur du carbone comme la somme du taux d'actualisation et du taux d'absorption naturelle (ω=0)

Introduction du progrès technique exogène :

Soit Y(t) la consommation par tête de biens et services privés et Γ(A(t),t) le coût des abattements par personne. Le programme d'optimisation s'écrit :

$$\text{Max}_{A} \int_0^{T_1} e^{-\delta t} U(Y_t - \Gamma(A(t),t)) dt \text{ sous la contrainte de non dépassement de la}$$

concentration :

$$X_0 + \int_0^{T_1} (X_t - A_t) dt \leq Z$$

En appelant Γ_{mt} le coût marginal d'abattement et ω_t le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte, la condition du premier ordre est :

$$e^{-\delta t} U'(Y_t - \Gamma_t) \Gamma_{mt} = \omega_t$$

En différenciant cette condition/t on trouve :

$$\frac{1}{U'_t} \frac{\partial U'_t}{\partial t} + \frac{1}{\Gamma_m} \frac{\partial \Gamma_m}{\partial t} = \delta \text{ puisque } \mu=0 \text{ pour } t < T1$$

La dérivée de l'utilité marginale par rapport à elle-même est égale à l'opposé du produit de l'aversion pour le risque (η) et du taux de croissance de la consommation nette par tête (consommation privée- coût d'abattement) g . Le coût marginal d'abattement, qui est la valeur sociale du carbone, croît donc à un taux qui est le taux d'actualisation économique ou taux de rendement net du capital :

$$\frac{\dot{\Gamma}_m}{\Gamma_m} = \delta + \eta g = r \text{ où } \Gamma_m = \Gamma_m(A(t), t)$$

La condition d'efficacité s'écrit :

$$\frac{\partial \Gamma_m}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_m}{\partial t} = r \Gamma_m$$

Le progrès technique exogène signifie que le coût marginal d'abattement décroît dans le temps : $\partial \Gamma_m / \partial t < 0$. En outre, le coût marginal d'abattement est une fonction décroissante du montant des abattements : $\partial \Gamma_m / \partial A < 0$. Il s'ensuit que $\partial A / \partial t < 0$. Les émissions se réduisent dans le temps et la vitesse de réduction des émissions est accrue par le progrès technique.

Vis-à-vis du progrès technique exogène en univers certain, la règle de décision optimale séquentielle conduit à réduire l'effort d'abattement aujourd'hui en attendant que des techniques plus performantes dans l'avenir rendent l'abattement plus efficace. En conséquence, la valeur initiale du carbone est plus basse et augmente plus rapidement ensuite, parce que le progrès technique exogène rend la chronique des abattements plus rapide.

Mais la prise en compte de l'incertitude sur la dynamique du changement climatique, le coût des innovations et les risques sur leur performance, modifie sensiblement ces conclusions lénifiantes [Golier *et al.*, 2008].

L'incertitude sur l'ampleur du réchauffement climatique porte sur le rythme de concentration des GES, sur la sensibilité de la hausse de la température à la concentration, sur les seuils de déclenchement de rétroactions divergentes, sur l'étendue, la variété et les emballements catastrophiques des dommages provoqués par la hausse des températures et encore plus sur leur répartition géographique.

L'incertitude sur le progrès technique est de deux ordres : une incertitude radicale portant sur des techniques propres à émissions zéro carbone (« *backstop* ») qui ne sont pas encore découvertes par la recherche fondamentale (énergie thermonucléaire, pile à combustible) ou qui sont encore loin du marché (incarcération du carbone) ; une incertitude sur la diffusion de techniques opérationnelles mais coûteuses, dont la mise en service dépend d'incitations appropriées, donc d'une régulation socio-politique pour orienter et financer les investissements d'innovation. Car le progrès technique est endo-

gène. Sa vitesse et sa direction dépendent d'investissements préalables pour mettre en route ses mécanismes qui sont l'apprentissage, la R&D et la concurrence qui entraîne la diffusion. Il faut donc que les autorités publiques conçoivent des instruments adaptés : réglementations, signaux prix, montages financiers. Ceux-ci dépendent du choix de la valeur sociale du carbone.

Le choix est séquentiel, mais le profil est fortement altéré par rapport aux enseignements des modèles en univers certain et progrès technique exogène. La croissance endogène en univers incertain conduit à préconiser un effort massif d'investissements tourné vers les innovations bas carbone à engager le plus tôt possible et à soutenir par la fixation d'une valeur du carbone initialement élevée [Aghion *et al.*, 2009]. Il faut investir dans un très large portefeuille de technologies, celles qui sont porteuses à court terme de progrès technique incrémental et celles qui sont à long terme porteuses de progrès technique radical.

Les auteurs construisent un modèle où un bien de consommation peut être produit par une technologie polluante ou par une technologie propre. Les deux types de technologie peuvent être innovantes, c'est-à-dire augmenter la productivité grâce à l'innovation que l'investissement incorpore. Les techniques polluantes qui existent et sont bien rodées bénéficient de l'effet d'apprentissage qui nourrit l'innovation incrémentale. Celle-ci fait boule de neige. Ces innovations sont donc profitables, les profits croissant avec les gains de productivité. Il s'ensuit que les technologies polluantes déjà installées ont un avantage de départ et sont renforcées par l'irréversibilité qui nourrit leur profitabilité. Il s'ensuit que les technologies propres ne peuvent pas décoller sans une valeur carbone suffisamment élevée.

Le profil de la valeur carbone doit donc être différent de celui qui résulte du modèle coût-efficacité de l'encadré 4. Il ne faut pas attendre T_1 pour que l'augmentation de la rente de rareté finisse par rendre ces techniques utilisatrices d'énergie fossile non rentables. Le risque de dommages catastrophiques dans les équilibres écologiques serait trop élevé, d'autant plus que les deux types de technologies sont moins substituables. Une valeur sociale du carbone suffisamment élevée est indispensable initialement pour orienter les investissements vers les technologies propres. Elle doit être complétée par un mécanisme financier qui fasse appel aux investisseurs institutionnels, moyennant une forte garantie publique, pour disposer d'une mise de fond financière élevée à la disposition des porteurs de projets d'innovation environnementale (banques de développement, *venture capital* spécialisés, *private equity*).

Comment déterminer pratiquement une valeur sociale du carbone qui fasse un assez large consensus pour être adoptée dans un pays ou un groupe

de pays en vue du financement de l'innovation susceptible de procurer un avantage technologique à ceux qui s'y engagent ?

Il faut construire une modélisation qui calcule les trajectoires de croissance de la consommation, tout en stoppant puis inversant la dégradation des services de l'environnement. Ces trajectoires dépendent d'un processus de décisions séquentielles d'investissements de réduction des émissions de CO₂, incorporant les coûts de réduction d'émissions et les coûts de dégradation de l'environnement dus au retard dans la réalisation de ces investissements. Ce processus est séquentiel parce qu'il incorpore les informations nouvelles qui vont enrichir la connaissance du changement climatique dans l'avenir sur deux paramètres cruciaux, radicalement incertains aujourd'hui : la sensibilité de la variation de température au stock de gaz à effets de serre et le seuil de hausse de température qui provoque des effets non linéaires dégradant irréversiblement les équilibres écologiques.

En introduisant des probabilités subjectives sur une plage de valeurs de ces paramètres et en couplant ces hypothèses à une gamme de valeurs possibles de la croissance mondiale, il est possible de calculer les trajectoires de la fonction d'utilité sociale pour plusieurs milliers de scénarios avec un modèle de contrôle optimal approprié. La valeur sociale du carbone est déterminée en tout point de chaque trajectoire. *La valeur sociale moyenne du carbone sur la totalité d'une trajectoire est égale à la valeur moyenne du coût marginal actualisé de réduction des émissions rapporté au niveau des émissions de la période.*

Pour chaque ensemble d'hypothèses sur la sensibilité carbone, sur les seuils de température déclenchant des effets non linéaire dans l'augmentation des dommages et sur la croissance, on peut trouver une trajectoire d'évolution dans le temps de la valeur sociale du carbone jusqu'à la date où une action collective fondée sur une connaissance commune deviendra possible (2030 ? 2050 ?). En affectant des probabilités aux différents scénarios (par exemple équiprobabilité), on peut calculer une plage d'évolution et une évolution moyenne d'ici 2020 pour la valeur sociale du carbone. Une simulation de ce type effectuée par le CIRED avec le modèle de contrôle optimal RESPONSE aboutit à une plage de \$9 à \$80 la tonne de CO₂ avec une valeur centrale de \$22 en 2020 [Hourcade *et al.*, 2011]. Mais les valeurs qui permettent de diminuer d'ici 2020 le taux de concentration par rapport au niveau de 1990 sont au-delà de \$70 à instaurer dès maintenant.

L'incorporation de la valeur sociale du carbone dans les calculs des investissements dès aujourd'hui a pour raison d'être d'entreprendre des investissements qui, s'ils sont retardés, seraient trop tardifs pour enrayer le risque écologique systémique.

Comment incorporer la valeur sociale du carbone dans les décisions économiques ? Les méthodes les plus classiques sont de faire apparaître un prix dual en tant que prix de marché par la fiscalité. Plus précisément, il serait possible d'introduire des prix plancher et plafond dans les marchés de permis à polluer pour en limiter les fluctuations perturbatrices ou d'instaurer spécifiquement une taxe carbone qui guide le prix. Toutefois, une taxe carbone mondiale, voire même européenne, n'est pas immédiatement à l'ordre du jour. Il reste une troisième possibilité : un prix fictif utilisé dans la valorisation d'investissements porteurs de rentabilité à long terme grâce à ce prix. Ainsi valorisé, ce bien public d'un nouveau type (un montant de CO₂ évité ou réduit) peut être le collatéral d'une émission d'actifs financiers qui sont des promesses sur une réduction future des émissions découlant des investissements financés par ces actifs. Il faudrait alors utiliser le levier de la distribution des permis à polluer pour que le prix de marché de ces permis converge vers le prix notionnel. Tel est le socle théorique sur lequel on peut construire une architecture de finance durable.

6 ACTUALISATION DU FUTUR EN SITUATION D'INCERTITUDE RADICALE

Dans l'analyse coûts-avantages traditionnelle, le facteur d'actualisation est le prix fictif retenu pour actualiser les coûts et avantages futurs. Dans le modèle usuel de croissance optimale de Ramsey, c'est la quantité de consommation à laquelle un agent économique est prêt à renoncer au présent pour obtenir une unité supplémentaire de consommation à l'avenir. Dans un monde de prévision parfaite, le taux d'actualisation économique associé est le taux d'intérêt sans risque, égal au taux de préférence pure pour le présent plus le taux de croissance fois l'élasticité de substitution des utilités marginales. Ce dernier paramètre est équivalent à l'aversion relative au risque en cas d'incertitude. C'est pourquoi le taux d'intérêt sans risque soustrait à la formule dans un contexte d'incertitude un terme, qui est lui-même fonction de la variance de la fonction de densité de la probabilité dans le log de la consommation.

Cet élément de théorie classique a nourri la controverse sur le rapport Stern (2007). Les économistes orthodoxes (Nordhaus, 2007) ont affirmé que le taux d'actualisation retenu par Stern était bien trop faible (il utilisait le taux de préférence pure pour le présent estimé à 0,1 % pour des raisons éthiques) et qu'il fallait déduire le taux sans risque des indications données par les marchés financiers. L'enjeu de la controverse réside dans l'importance critique du

taux d'actualisation pour les conclusions de Stern sur la nécessité d'agir vite et d'investir massivement pour atténuer le changement climatique.

Lors de sa conférence Richard T. Ely, Nicholas Stern (« *The Economics of Climate Change* », AER, Papers and Proceedings, 2008) est revenu à son tour sur la controverse et a expliqué pourquoi faire référence aux taux de marché actuels est totalement erroné. Le problème auquel la société est confrontée n'est pas une analyse coûts-avantages le long d'un sentier donné de l'économie. C'est un choix entre différents sentiers en situation d'incertitude radicale. Il faut donc revenir aux premiers principes de l'économie de bien-être.

Un taux d'actualisation est le taux proportionnel de chute de la valeur du numéraire utilisé dans l'évaluation de la politique. Si la consommation totale est le numéraire, comme elle l'est dans les fonctions de bien-être standard, le taux d'actualisation social est le taux de variation du facteur d'actualisation social. Si la valeur sociale de la consommation au moment t est : $u(c)e^{-\delta t}$, alors le facteur d'actualisation social est l'utilité marginale : $u'(c)e^{-\delta t}$ et le taux de chute proportionnel est : $\eta\left(\frac{\dot{c}}{c}\right) + \delta$. Dans cette formule, η est l'élasticité de l'utilité marginale sociale de la consommation par rapport à la consommation. δ est le taux de préférence pure pour le présent. Il n'a aucun lien avec les préférences intertemporelles des individus. C'est un taux qui a une valeur éthique et qui renvoie à l'attitude de la société face à son avenir. Il doit être égal à 0. La seule raison pour laquelle il pourrait être légèrement positif est la possibilité d'un effondrement écologique qui met fin à la vie sur terre telle que nous la connaissons.

La problématique de la croissance soutenable au XXI^e siècle est étroitement mêlée au changement climatique. Étant donné la formidable incertitude qui entoure celui-ci, élaborer une politique ne consiste pas à effectuer des arbitrages entre la consommation présente et future sur un sentier donné, mais à choisir entre des sentiers de croissance de la consommation extrêmement différents. Par conséquent, le taux d'actualisation social est lui-même dépendant du sentier, il varie dans le temps, il est différent pour chaque séquence incertaine de résultats et, avec les marchés financiers très imparfaits que la crise a révélés, il diffère en fonction de l'agrégat considéré.

Si δ doit être proche de 0, la valeur de η est elle-même fortement éthique, puisqu'elle dépend de la distribution sociale du revenu jugée viable ou souhaitable sur un sentier de croissance soutenable. En effet, η concerne la distribution inter temporelle des revenus. $\eta > 1$ implique une redistribution de revenu amélioratrice du bien-être des plus riches vers les plus pauvres. Dans des

sociétés très inégalitaires comme les États-Unis, où les transferts de revenus induisent de fortes désincitations, il est probable que η est < 1 . Dans le contexte de l'incertitude, η est interprété comme le paramètre de l'aversion au risque relative dans un modèle d'utilité attendue des comportements individuels. Cependant, l'interprétation n'est pas pertinente pour l'incertitude radicale à laquelle l'ensemble des sociétés font face. La question éthique est urgente.

6.1 Croissance soutenable et changement climatique

Revenons à la modélisation de la fonction de bien-être social liée à la condition de sentiers de croissance soutenable présentée dans l'encadré 1. Cette fonction suppose que les services environnementaux ne sont pas parfaitement substituables à la consommation. Pour que le sentier de l'économie soit soutenable, la protection à long terme de l'environnement doit être recherchée pour elle-même. La diversité des taux d'actualisation, soulignée par Stern, est illustrée simplement. Il y a un taux d'actualisation standard tel que défini plus haut, mais il y a aussi un taux d'actualisation écologique, qui reflète le prix relatif de l'environnement par rapport à la consommation. Il s'ensuit qu'un autre paramètre crucial et très incertain entre en jeu, σ , qui mesure, dans un modèle hautement agrégé, la substituabilité relative de la consommation et des biens environnementaux dans la production de bien-être social. En outre, comme l'a affirmé Stern avec force, σ est endogène. Il évoluera en fonction des investissements de réduction du changement climatique et d'adaptation opérés sur un sentier donné. Mais surtout, il sera très différent d'un sentier à l'autre.

Dans une étude récente, solidement argumenté et éclairante (« *Ecological intuition versus economic reason* »), Olivier Guéant, Roger Guesnerie et Jean Michel Lasry illustrent la grande diversité des taux d'actualisation sociaux sur des sentiers de croissance qui diffèrent considérablement en termes d'évolution du prix relatif de l'environnement.

Ils montrent que le futur sera très différent selon que $\sigma > 1$ ou $\sigma < 1$ et qualifient la première hypothèse d'environnementalisme modéré (*moderate environmentalism*) et la seconde d'environnementalisme radical (*radical environmentalism*). Ils montrent que le taux d'actualisation écologique est plus faible que le taux d'actualisation économique standard, et ce d'autant plus que le taux de croissance est élevé et que l'élasticité de substitution σ est faible.

Si $\sigma > 1$, la consommation peut être substituée aux services de l'environnement produits par le capital naturel, qui s'épuise au fil du temps. La contribu-

tion des services de l'environnement au PIB diminuant dans le temps, la contribution de l'environnement au bien-être diminue et disparaît asymptotiquement. Même si le taux d'actualisation écologique est toujours inférieur au taux d'actualisation économique, les sentiers de croissance soutenable convergent sur longue période vers le taux de croissance optimal des modèles de croissance de Ramsey : $\frac{r - \delta}{\eta}$, le taux d'intérêt (r) mesurant la substitution intertemporelle de la consommation.

Si $\sigma < 1$, la substituabilité entre la consommation et les services environnementaux est faible. La situation est tout autre, parce que la contribution des services de l'environnement au PIB s'accroît au fil du temps avec un prix relatif de plus en plus élevé. *Les questions environnementales deviennent primordiales sur longue période sur des sentiers de croissance soutenable.* Le taux d'actualisation écologique est celui qui importe le plus et il converge asymptotiquement vers le taux de préférence pure pour le présent sur longue période si le capital naturel est préservé. S'il y a un épuisement régulier du capital naturel au taux s , le taux d'actualisation peut même devenir asymptotiquement négatif à la valeur : $\delta - \eta s$ avec $\delta \sim 0$.

Les enseignements de ce modèle théorique justifient pleinement l'avertissement de Stern selon lequel la comparaison des dynamiques économiques induites par le changement climatique demande une évaluation politique très différente de l'analyse du bien-être standard. Les sentiers de croissance soutenable dépendent étroitement de la substituabilité entre le capital économique, le capital humain et les autres types de capital immatériel d'une part, et le capital naturel d'autre part. Plus la substituabilité entre les biens économiques et les biens environnementaux est faible, plus étroit est l'éventail de sentiers de croissance soutenable. L'élasticité de substitution entre le capital naturel et les autres types de capital est donc critique.

Puisque l'élasticité est inconnue, un dilemme se pose. Les pouvoirs publics engageront-ils une politique d'investissement massif en innovations radicales aux dépens de la consommation présente et à court terme, dans l'espoir que les nouveaux investissements en énergies renouvelables améliorent la substituabilité des biens environnementaux et économiques à plus long terme ? Ou attendront-ils dans l'espoir d'obtenir davantage d'informations sur les développements du changement climatique et l'épuisement du capital naturel au risque de laisser survenir des dommages irréversibles ? On a montré plus haut que les considérations sur la détermination de la valeur sociale du carbone en univers incertain conduisent à préconiser des investissements innovants, massifs, diversifiés et immédiats. Cette conclusion est renforcée par une analyse

du risque systémique de nature écologique qui donne un éclairage théorique rigoureux au principe de précaution.

6.2 Rationalisation du principe de précaution

Pour comprendre l'incertitude radicale derrière le modèle théorique illustratif ci-dessus, il faut dépeindre les incertitudes complexes inhérentes à la chaîne d'interactions entre les objectifs choisis (limiter l'élévation de la température globale) et les politiques élaborées pour atteindre ces objectifs. Un article convaincant de Martin Weitzman (« *On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change* », RES, février 2009) permet de comprendre les enjeux.

Lorsqu'une politique est engagée en vue d'atteindre un objectif, une chaîne complexe d'interactions est présumée. La politique affecte le flux des émissions de gaz à effet de serre (GES). Puis on anticipe que le changement des flux aura un effet sur les stocks de GES via le cycle du carbone. Dans quelle mesure et à quel rythme, c'est l'inconnue. Le lien entre le stock de GES et l'élévation de la température dépend de la sensibilité du climat. Les experts du climat ont construit plusieurs modèles qui produisent des ordres de grandeur très différents. Ces modèles du climat mondial doivent être utilisés pour effectuer des simulations de Monte Carlo afin d'estimer la distribution de probabilité des résultats. Les liens entre la variation de la température globale moyenne et l'évolution des climats régionaux sont encore plus incertains. Ils sont néanmoins indispensables pour estimer la distribution des dommages qui doivent être ensuite convertis en dommages économiques, lesquels à leur tour ont un impact sur la valeur actuelle attendue du bien-être social. Si on applique la condition de la croissance soutenable qui lie la valeur de l'épargne authentique aux variations du bien-être social, on peut enfin déterminer l'impact d'une politique donnée. En répétant l'exercice, il est possible de comparer des politiques et les sentiers de croissance qui leur sont associés.

Cela ne va pas de soi car la complexe chaîne d'interactions intègre des rétroactions non linéaires, susceptibles de produire des résultats catastrophiques. Cela signifie que l'analyse coûts-avantages standard est handicapée par des fonctions de densité de probabilité dans le modèle de forme réduite de l'utilité attendue agrégée qui présentent des « queues épaisses » (*fat tails*) fortement affectées par des incertitudes structurelles.

La sensibilité climatique est une de ces interactions. Par exemple, l'objectif limitant la concentration de GES à 550 ppm \sim CO₂ donne une probabilité de 24 % d'une élévation de la température de plus de 4°C et une probabilité de

7 % d'une élévation supérieure à 5°C avec un modèle du climat mondial moyen. Certains modèles produisent des probabilités de queue bien plus élevées. En fait, la sensibilité climatique peut présenter des points de bascule au-delà desquels les rétroactions positives produisent des résultats incontrôlables. Si rien n'est fait, le statu quo pourrait impliquer une probabilité de 5 % d'une élévation de 5 à 10°C de la température. Un tel résultat détruirait une grande part de la vie sur terre. On assisterait à des extinctions d'espèces en masse et à une désintégration massive des écosystèmes. Tous les champs de glace fondraient et le niveau de la mer augmenterait de 10m ou plus, inondant les régions du monde les plus peuplées. La pluviosité serait totalement perturbée et les changements drastiques des précipitations provoqueraient une désertification régionale à grande échelle. Il s'ensuivrait des migrations en masse et des guerres dont les conséquences probables seraient un déclin radical de la population mondiale.

Si, comme la plupart des individus raisonnables en sont aujourd'hui conscients, le statu quo n'est pas une option de croissance soutenable, il s'agit d'élaborer des politiques et de fixer le calendrier de mise en œuvre. Stern a calculé dans ses simulations qu'en partant du chiffre actuel de 430 ppm, un objectif de stabilisation de la concentration de GES ≤ 550 ppm coûtera 1 % du PIB mondial par an avec de bonnes politiques et des décisions prises à temps. Retarder les mesures jusqu'à de plus amples informations sur la fonction liant l'élévation de la température à la concentration de GES pourrait coûter trois à quatre fois plus pour atteindre le même objectif.

On comprend maintenant le raisonnement de Weitzman. En l'état des connaissances, la fonction de bien-être actualisé agrégée présente une distribution de probabilité de changement climatique catastrophique à queue épaisse (*fat tail*). La perte de bien-être ne peut être limitée que par un chiffre très élevé, qui n'est rien moins que la valeur statistique de la civilisation humaine. Comme on l'a dit plus haut, c'est entièrement et exclusivement une question éthique.

Weitzman modélise le coefficient de sensibilité climatique comme un facteur d'échelle inconnu (s), dont dépend la fonction de densité de probabilité de la consommation future. Il montre que lorsque les experts du climat estiment cette inconnue par inférence à partir des résultats climatiques passés, la distribution de probabilité de la consommation future postérieure aux connaissances bayésiennes sur s est une fonction « t de student ». Elle converge asymptotiquement vers une loi de puissance à queue épaisse. Dans cet univers stochastique, le facteur d'actualisation des coûts et avantages futurs attendus tend vers l'infini et le taux d'actualisation social tend vers zéro.

Weitzman parvient ainsi à un lugubre théorème (« *dismal theorem* »). La probabilité de catastrophe décroît de façon polynomiale à un taux de l'ordre de s , tandis que l'impact d'un désastre écologique sur l'utilité marginale croît de façon exponentielle à un taux de l'ordre de s . Le théorème est valide pour toute fonction d'utilité avec une aversion au risque positive.

Le risque systémique inhérent au changement climatique est particulier. Dans une crise financière systémique, les classes d'actifs ne subissent pas toutes des pertes. La monnaie à haute puissance se démarque de tous les autres actifs par sa liquidité et polarise le comportement des individus à la recherche d'un refuge. Dans une crise climatique systémique en revanche, il est possible que des dommages globaux frappent toutes les classes d'actifs. Toutes les composantes de la richesse réelle pourraient subir des pertes partout dans le monde.

Le lugubre théorème valide ainsi un principe de précaution généralisé pour les situations d'expositions à un risque potentiellement illimité. Parce qu'on ne peut pas déduire des connaissances scientifiques sur la queue de la distribution des dommages à partir des observations passées, les individus sont projetés dans le domaine de l'incertitude subjective, où aucun mécanisme de marché ne peut induire de comportement rationnel. Seule l'action collective, guidée par une éthique forte qui se soucie du bien-être des générations futures, peut produire les politiques appropriées. L'incertitude structurelle en jeu étant masquée par une forte inertie, le changement climatique peut avoir des conséquences catastrophiques sur une échelle temporelle de plusieurs siècles, alors que les politiques nécessaires pour leur faire obstacle doivent être mises en œuvre immédiatement. Les décisions collectives présentent donc une sensibilité critique au taux d'actualisation postulé. Le choix sous-jacent du taux social d'actualisation et les politiques structurelles d'accompagnement visant à accroître la substituabilité entre classes d'actifs, afin de maintenir un sentier de croissance viable, reviennent à une stratégie d'allocation d'actifs dynamique généralisée, légitimée par la société tout entière sur toute la planète. La démocratie électorale représentative n'est pas suffisante pour organiser le débat social nécessaire à la légitimation de la vision à long terme qui modèlera les politiques adaptées. L'éthique doit prendre le relais dans le choix et la reproduction des élites. Les critères de mérite et de reconnaissance sociale doivent changer du tout au tout. La conception de la richesse doit être profondément transformée pour mesurer la totalité du capital et la prendre en considération dans les choix collectifs. Une démocratie participative plus profonde, plus socialement responsable doit émerger.

REFERENCES

- ACEMOGLU D., AGHION P., BURSZTYN L. and HEMOUS D. (2009), The environment and directed technical change, *NBER Working paper*, n°15451, October
- AGHION P., HEMOUS D. and VEUGELERS R. (2009), “No green growth without innovation”, *Bruegel Policy Brief*, n°7, November
- ARROW K. (1995), “Intergenerational Equity and the Rate of Discount in Long-term Social Investment”, Stanford University Department of Economics, Working paper n°97-005
- ARROW K., DASGUPTA P., GOULDER L., DAILY G., EHRlich P., HEAL G., LEVIN S., K-G MÄLER, SCHNEIDER S., STARRET D. and WALKER B. (2004), “Are we consuming too much?”, *Journal of Economic Perspectives*, vol. 18, n°4, Summer, p.147-172
- ARROW K., DASGUPTA P., GOULDER L., MUMFORD K. and OLESON K. (2007), “China, the US and sustainability : perspectives based on comprehensive wealth”, Stanford Center for International Development, January
- AUKRUST O. (1966), “An axiomatic approach to national accounting. An outline”, *Review of Income and Wealth*, September, p.179-190
- BARNETT G.E. (1936), *Two tracts by Gregory King*, John Hopkins
- BECKER G. (1964), *Human Capital. A Theoretical and Empirical Analysis with Special Reference to Education*, Columbia University Press
- BECKERMAN W. and H. CAMERON (2007), Ethics of the discount rate in the Stern Review on the economics of climate change”, *World Economics*, vol.8, n°1, p.187-210
- BÉNARD J. (1972), *Comptabilité nationale et modèles de politique économique*, Thémis
- BOSETTI V., CARRARO C., DUVAL R., SGOBBI A. and TAVONI M. (2009), “The role of R&D and technological diffusion in climate change mitigation : new perspectives using the Witch model”, *OECD Working Paper*, n°664, February
- BOWMAN M.J. (1968), « Principles in the valuation of human capital », *Review of Income and Wealth*, September, p.217-246
- CARSON C. (1975), « The history of the US national income and product accounts : the development of an analytical tool », *Review of Income and Wealth*, June, p.153-181
- CLARK C. (1940), *The Conditions of Economic Progress*, Mac Millan
- CORRADO A., HULTEN C. and SICHEL D. (2005), “Measuring capital and technology : an expanded framework”, in Measuring capital in “The New Economy”, C.Corrado, J. Haltiwanger and D. Sichel eds., *Studies in Income and Wealth*, vol.65, University Chicago Press
- CORRADO A., HULTEN C. and SICHEL D. (2006), “Intangible capital and Economic growth”, *NBER Working Paper*, n°11948, January
- DE PERTHUIS C. (2010), *Et pour quelques degrés de plus*, Pearson, 2^e édition
- DESAIGUES B. et POINT P. (1993), *Economie du patrimoine naturel. La valorisation des bénéfiques de protection de l'environnement*, Economica

- DIAMOND J. (2005), *Collapse*, Penguin Books
- EL SERAFY S. (1989) "The Proper Calculation of Income from Depletable Natural Resources", in Y. Ahmad, S. El Serafy and E. Lutz eds., *Environmental Accounting for Sustainable Development*, World Bank
- GILBERT M. et KRAVIS I. (1954), *Étude comparative des produits nationaux et du pouvoir d'achat des monnaies*, OEEC
- GILBERT M. and Associates, *Comparative National Products and Price Levels*, OEEC
- GOLDSMITH R. (1962), *The National Wealth of the US in the Postwar Period*, Princeton University Press
- GOLLIER C. (2007), "La finance durable du rapport Stern", *Revue d'Économie Politique*, vol.117, n°4, Juillet-Août
- GUEANT O., GUESNERIE R. and LASRY J.-M. (2010), "Ecological Intuition versus Economic Reason", communication au colloque international d'Aix en Provence sur le financement du long terme, 27-28 mai
- GUESNERIE R. (2004), « Calcul Économique et Développement Durable », *Revue Economique*, vol.55, n°3, p.363-82
- HAMILTON K. and CLEMENS M. (1999), "Genuine Savings Rates in Developing Countries", *World Bank Economic Review*, vol.13, n°2, p.333-356
- HARRISON A. (1989), « Introducing natural Capital into the SNA », in Y. Ahmad, S. El Serafy and E. Lutz eds., *Environmental Accounting for Sustainable Development*, World Bank
- HICKS J. (1940), « The Valuation of Social Income », *Economica*, May
- HICKS J. (1942), *The Social Framework*, Oxford University Press
- HICKS J. (1961), "The measurement of capital in relations with the measurement of other aggregates", in F.A.Lutz and D.C.Hague eds, *The Theory of Capital*, Mac Millan
- HOURCADE J.C., DUMAS P. and PERRISSIN FABERT B. (2011), What "social cost of carbon"? A mapping of the climate debate, CIRED Working Paper
- KENDRICK (1976), *The Formation and Stocks of Total Capital*, Columbia University Press
- KEYNES J.M. (1940), *How to Pay for the War*, Mac Millan
- KRAVIS I., HESTON A. and SUMMERS R. (1982), *World Product and Income : International Comparisons of Real Gross Products*, John Hopkins
- KUZNETS S. (1973), *Population, Capital and Growth : Selected Essays*, Norton
- LANDES D. (1998), *The Wealth and Poverty of Nations*, Little, Brown and Company.
- LEONTIEF W. (1941), *The Structure of the American Economy 1919-1929 : an empirical application of equilibrium analysis*, Harvard University Press
- LEV B. (2001), *Intangibles : Management, Measurement and Reporting*, Brookings Institution
- LUTZ E. (1993), *Towards Imported Accounting for the Environment*, World Bank
- MADDISON A. (2003), *The World Economy : Historical Statistics*, Development Center Studies, OECD

- MADDISON A. (2007), *Contours of the World Economy 1-2030 AD*, Oxford University Press, chap.6, macro measurement
- MAIRESSE J. (1972), *L'évaluation du Capital Fixe productif. Méthodes et Résultats*, Collections de l'INSEE, série C, n° 18, novembre
- MAIRESSE J. and KOSOGLU Y. (2005), "Issues in measuring knowledge : the contribution of R&D and ICT to growth", Communication to the Advancing Knowledge and Knowledge Economies, Conference at the national Academies, Washington DC, 10-11 January
- MEADE J. and STONE R. (1941), "The construction of tables of national income, expenditure, savings and investment", *Economic Journal*, May-September
- NORDHAUS W. and TOBIN J. (1973), "Is growth obsolete?", in M. Moss ed.; *The measurement of economic and social performance*, Columbia University Press
- NORDHAUS W. (2007), "A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change", *Journal of Economic Literature*, vol.45, n°3, p.686-702
- PARSON E. (2007), "The big one : a review of Richard Posner's catastrophe : risk and response", *Journal of Economic Literature*, vol XLV, March, p.147-164
- PEARCE D.W. and ATKINSON G. (1993), "Capital theory and the measurement of Sustainable Development : an Indicator of Weak Sustainability", *Ecological Economics*, n°8, P.103-108
- PIGOU A.C. (1932), *The Economics of Welfare*, Mac Millan, 4th edition
- POSNER R. (2004), *Catastrophe : Risk and Response*, Oxford University Press
- QUINET A. (2008), La valeur tutélaire du carbone, CAS
- RAMSEY F.P. (1928), "A mathematical theory of saving", *Economic Journal*, vol.38, n°152, p.543-559
- SAMETZ A.W. (1968), "Production of Goods and Services. The Measurement of Economic Growth", in E.B. Sheldon and W. Moore eds., *Indicators of social change. Concepts and Measurement*, Russel Sage Foundation, p.77-96
- SAMUELSON P. (1950), "Evaluation of real national Income", *Oxford Economic Papers*, n°2, p.1-29
- SCHULTZ T.W. (1961), "Investment in human capital", *American Economic Review*, March, p.1-17
- SEN A. (1976), "Real National Income", *Review of Economic Studies*, February
- SEN A. (1979), "The welfare basis of Income Comparisons : a survey", *Journal of Economic Literature*, March, p.1-45
- SIGLITZ J., SEN A. et FITOUSSI J.P. (2009), *Rapport de la Commission sur la Mesure de la Performance Economique et du Progrès Social*
- STERN N. (2007), *The Economics of Climate Change. The Stern Review*, Cambridge University Press
- STERN N. (2008), "The Economics of Climate Change", Richard T. Ely Lecture, *American Economic Review Papers and Proceedings*, vol.98, n°2, P.1-37
- STONE R. (1947), "Definition and measurement of the national income and related totals" in *Measurement of National Income and the Construction of Social Accounts*, UN.

- STONE R. (1956), *Quantity and price Indexes in National Accounts*, OEEC
- STUDENSKY P. (1958), *The Income of Nations*, New York University Press
- UNO K and BARTELEMUS P. eds (1998), *Environmental Accounting in Theory and Practice*, Kluwer
- VANOLI A. (1995), "Reflections on Environmental Accounting Issues", *Review of Income and Wealth*, March, p.57-71
- VANOLI A. (2002), *Une Histoire de la Comptabilité Nationale*, Repères, la Découverte
- WEITZMAN M. (2009), « On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change », *Review of Economics and Statistics*, vol XCI, n°1, February
- WORLD BANK (1995), *Monitoring Environmental Progress*
- WORLD BANK (2006), *Where is the Wealth of Nations? Measuring Capital for the 21st Century*