



**HAL**  
open science

# L'économie stationnaire du point de vue de la production jointe : le cas des bioénergies

Yoann Verger

► **To cite this version:**

Yoann Verger. L'économie stationnaire du point de vue de la production jointe : le cas des bioénergies. Écologie politique vs écologie industrielle, quelles stratégies pour le développement durable?, Mar 2013, Clermont-Ferrand, France. hal-00804223

**HAL Id: hal-00804223**

**<https://hal.science/hal-00804223>**

Submitted on 25 Mar 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# L'économie stationnaire du point de vue de la production jointe : le cas des bioénergies

**Auteur : Yoann Verger (REEDS, UVSQ-OVSQ)**

## **Abstract :**

L'écologie industrielle et l'économie stationnaire peuvent se rejoindre dans la notion de cycles : ainsi les industries pourraient fonctionner en boucle quasiment fermées si la théorie de l'écologie industrielle était suivie jusqu'au bout, et l'économie dans sa forme plus générale ne perturberait pas les grands cycles naturels et écologiques qui lui permettent de subsister du point de vue de l'économie stationnaire, au contraire elle s'y insérerait parfaitement. C'est sur ce deuxième point que je veux travailler, en cernant dans quelles mesures une économie stationnaire pourrait s'organiser en préservant ces cycles naturels, voir en essayant de les renforcer. Sans aller jusqu'aux dérives de la bio-ingénierie, qui cherche à faire, littéralement, la pluie et le beau temps, mon postulat de base est que l'économie se sert de produits ou de services issus de processus environnementaux, et qu'elle en dégrade d'autres : les injonctions couplées du principe de précaution et du développement durable (en pensant notamment aux générations futures) nous obligent donc à nous préoccuper du bon fonctionnement de ces processus, qu'il s'agissent des grands cycles géochimiques ou des services liés plus spécifiquement aux écosystèmes (pollinisation par exemple). Les bienfaits économiques ou les effets économiques des dégradations ne sont pas forcément bien pris en compte, notamment à cause de ce que les économistes appellent les failles du marché (l'économie est myope concernant les biens publics). Des modèles ont tenté de définir les bénéfices économiques apportés par les services éco-systémiques, d'autres ont cherché à internaliser les dégâts causés sur ces mêmes services. Mon approche va se focaliser sur un type de modèle néo-ricardien de production jointe : je vais, à l'aide de celui-ci, décrire simplement la structure d'une économie qui s'appuie en partie sur la production de services éco-systémiques, pour montrer ensuite les implications en termes de changements structurels permettant de rendre viable le système sur le long terme. Je chercherai ainsi à démontrer que le seul système économique viable est alors une économie stationnaire qui va se servir du profit généré pour revitaliser le capital écologique, et non seulement pour servir la croissance du sous-système économique. Les principes de l'économie stationnaire tels que la non-consommation des ressources renouvelables à un taux plus élevé que leur renouvellement seront soulignés. Je me pencherai plus spécifiquement sur le cas d'un ensemble de processus décrivant le fonctionnement d'un système de production/consommation de bioénergie. Cet exemple se basera sur le développement récent en France de coproduction de chaleur et d'énergie à base de biomasse, ou permettant l'injection de biogaz dans le réseau de gaz de ville : dans le cadre de la « transition énergétique » récemment évoquée au plus haut niveau de l'Etat, ce type d'unité énergétique peut être vu comme un moyen à la fois d'assurer une autonomie locale vis-à-vis des ressources fossiles, et à la fois de réduire les émissions polluantes. L'exploration au niveau théorique des échanges de matière et d'énergie entre les différents processus impliqués permettra de souligner les enjeux évoqués plus haut. Puis, au niveau des applications pratiques, dans le cadre de l'exemple évoqué des bioénergies, je montrerai que les politiques permettant la viabilité du système peuvent s'inspirer des principes de l'écologie industrielle et de l'économie de fonctionnalité. L'objectif est donc double : d'une part théoriser les liens entre environnement et économie via la caractérisation d'un capital naturel produisant des biens et des profits accaparés par l'économie humaine, d'autre part construire une vision pratique de scénarios permettant de tirer profit des implications d'une économie stationnaire. Le rapprochement entre économie stationnaire et écologie industrielle me paraît dans ce sens inévitable.

## Introduction

Le but de cet article est d'essayer de rattacher l'économie écologique, vu comme une vision originale du lien entre économie et environnement, avec l'écologie industrielle. L'écologie industrielle en effet tire son origine d'observations sur le dysfonctionnement du système industriel, générant notamment des externalités négatives environnementales (Erkman 1998). Une refonte du système industriel est alors proposée, avec prise en compte de son aspect systémique, justement, et donc prise en compte des différents impacts créés par l'industrie et tentatives de les résoudre via un fonctionnement en cycle. La vision est soutenue par des ingénieurs, des industriels (Frosch and Gallopoulos 1989), et plus récemment par des politiques, présageant ainsi un développement certain du domaine dans l'avenir. Mais il manque à cette vision un véritable lien vers un modèle économique prenant en compte l'environnement : l'économie et la consommation doivent aussi changer si on veut que le système industriel devienne réellement durable (Vivien 2003). Il n'est pas juste de dire qu'il n'y a pas de modèle économique nouveau : l'économie de fonctionnalité (Mont 2004) est un modèle qui bouleverse profondément à la fois les modes de production et de consommations et à la fois les modèles contractuels et les régimes de propriétés. L'économie de fonctionnalité permet ainsi de révolutionner le système industriel au niveau de l'interaction consommateurs/producteurs, ce qui a pour effet (du moins on l'espère !) de réduire l'impact environnemental. Toutefois au niveau de l'interaction directe entre industrie et environnement, le corpus théorique est beaucoup plus faible et se rattache en général à l'économie de l'environnement – que l'on pourrait définir par *business as usual* encadré par un ensemble de normes, taxes et quotas permettant de *maîtriser* cette interaction. Me plaçant du point de vue de l'écologie économique, où l'on parle d'une impossibilité de tout maîtriser, d'incertitudes et de principes de précaution, je vais essayer de mettre à jour comment cette vision économique des choses peut se joindre à la vision positive de l'écologie industrielle – je dis positive parce qu'un des postulats est qu'il existe une réserve d'innovations technologiques permettant de réaliser des cycles fermés et d'éliminer quasiment tous les déchets. Des approches ont été tentées pour relier économie écologique et écologie industrielle mais elles se sont surtout centrées sur les analyses Input-Output, communes aux 2 champs (Duchin and Hertwich 2003). Ici je voudrais mettre en évidence un modèle différent, inspiré de la modélisation néo-ricardienne de la production jointe. Ce modèle est intéressant parce qu'il met en valeur l'importance de la distribution du profit dans l'établissement des prix, et donc l'importance des rapports de forces entre les différents acteurs – notion de conflit environnemental. La vision de l'environnement, la façon dont on le valorise, est primordiale si on souhaite le préserver et construire un système industriel durable, ce qui est le but premier de l'écologie industrielle.

Dans une première partie je m'attacherai à définir le concept d'économie stationnaire, un des concepts fondateur de l'économie écologique qui met en valeur l'importance de la relation entre économie et environnement, et je définirai également le concept de production jointe en expliquant comment ce modèle est relié à la problématique de l'écologie économique. Dans une deuxième partie je m'attacherai à faire ressortir la notion de valeur dans un modèle de production jointe, et une application numérique permettra dans la troisième partie d'illustrer mes propos. Dans une quatrième partie enfin je tenterai de définir les voies de valorisation de l'environnement que pourrait adopter une stratégie d'écologie industrielle réellement globale. Enfin je conclurai sur les différentes perspectives de recherche que nous offre la modélisation de production jointe et les différentes interactions entre économie écologique et écologie industrielle.

### I. Présentation des concepts de production jointe et d'économie stationnaire

L'écologie économique s'est construite dans les années 1960 - 1970 en opposition à un système où la croissance sans fin des flux économiques, physiques, sans compter la croissance de la population

mondiale, menaçait de détruire l'environnement : un courant de recherche est alors né pour analyser les conflits environnementaux naissant, et surtout pour tenter de proposer des modèles économiques durables (Rokpe 2004). L'économie stationnaire fait partie de ceux-là.

#### *Histoire de l'économie stationnaire*

Adam Smith, Thomas Malthus et David Ricardo ont été les premiers à évoquer un état stationnaire pour l'économie, mais il était pour eux synonyme d'une société morne. A l'inverse John Stuart Mill (1848) fut le premier à le décrire comme un état désirable, dans lequel :

*'while no one is poor, no one desires to be richer, nor has any reason to fear being thrust back by the efforts of others to push themselves forward'.*

Plus tard, le géologue Hubbert (1974) va remettre cette idée au goût du jour en faisant le lien entre exploitation des ressources naturelles et économie. Ce lien est théorisé par Boulding (1966) : il va créer un modèle macroéconomique mondial décrivant une économie inscrite dans son environnement et va creuser les implications d'une économie stationnaire (Boulding 1973). Son travail sera repris notamment par Daly (Daly 1991; Daly, Cobb et al. 1994; Daly and Farley 2004; Daly 2008), qui va également puiser ses sources dans les relations entre entropie et économie telles qu'elles ont été définies par Soddy et Georgescu-Roegen (Soddy 1926; Georgescu-Roegen 1971).

#### *L'économie selon Daly*

L'économie humaine peut être considérée comme un ensemble de processus de production/consommation inscrit dans un ensemble qui le dépasse, l'écosystème (Boulding 1966; Daly 1968). Ces processus servent à assurer le renouvellement, voire l'augmentation dans une économie de croissance, de 2 stocks physiques : le stock humain – population humaine – et le stock de biens – traduction du terme *artifact* (Daly 1991). Le concept principal, déjà évoqué par Malthus (1817) en son temps, est qu'il y a des limites : l'économie à une taille, définie par rapport à son environnement. Daly (1991) définit alors l'économie stationnaire ainsi :

*'A steady state economy (SSE) is an economy with constant stocks of artifacts and people, maintained at some desired, sufficient levels by low rates of maintenance "throughput".'*

Daly (*ib.*) poursuit son raisonnement en donnant les définitions suivantes :

- *'Stock is the total inventory of producers' goods, consumers' goods, and human bodies'.* Reliant cette définition à la définition d'un capital proposée par Fisher (1906), Daly explique qu'un stock est l'ensemble des choses physiques capable de satisfaire un désir humain et pouvant faire l'objet d'un droit de propriété.
- *'Service is the satisfaction experienced when wants are satisfied, or « psychic income » in Fisher's sense. Service is yielded by the stock'.* Les services sont délivrés dans le temps, ils peuvent être considérés comme des flux psychiques mais sans possibilité d'accumulation (Georgescu-Roegen 1971).
- *'Throughput is the entropic physical flow of matter-energy from nature's sources, through the human economy, and back to nature's sinks, and it is necessary for the maintenance and renewal of the stocks' (Boulding 1966; Daly 1968; Georgescu-Roegen 1971).*

Ces trois définitions données, on peut les relier entre elles par l'équation 1.

$$\frac{\text{service}}{\text{throughput}} \equiv \frac{\text{service}}{\text{stock}} \times \frac{\text{stock}}{\text{throughput}} \quad (1)$$

1                      2                      3

Suivant l'équation (1), l'objectif d'une économie stationnaire est de maximiser le ratio 1 – en augmentant les services, en diminuant le *throughput* et en atteignant un niveau de stock satisfaisant,

c'est-à-dire en réalisant un *développement* économique, par opposition à la *croissance* économique. L'augmentation du ratio numéro 3 est limitée par les lois de la thermodynamique : un recyclage ne peut pas être complet – il y a toujours au moins de l'énergie qui ne sera pas réutilisable. Il est plus difficile de déterminer s'il y a une limite à l'augmentation du ratio numéro 2, mais il n'est pas farfelu de le penser. On peut donc en théorie arriver à une économie stationnaire, avec un stock suffisant et un *throughput* le plus petit possible. La signification d'un renouvellement constant avec un *throughput* le plus faible possible signifie que la durée de vie des hommes et des biens est la plus importante possible, afin d'assurer une bonne qualité de vie et des niveaux d'extraction de ressources et de production de déchet faible. Ces niveaux peuvent être définis ainsi :

1. consommation des ressources renouvelables à un niveau inférieur ou égal à leur renouvellement ;
2. consommation des ressources non renouvelables à un niveau inférieur ou égal à leur remplacement par d'autres ressources ;
3. production de déchet à un niveau inférieur ou égal à la capacité d'assimilation de ces déchets par l'environnement.

On rejoint alors simultanément le concept d'*économie de fonctionnalité* où la production et la consommation sont considérées comme des coûts (Boulding 1966; Mont 2004) et le concept de *bioéconomie* (Passet 2012), où la circularité et la dépendance entre les processus priment, et où un développement qualitatif humain est recherché avant toute quantification.

#### *Naissance de l'écologie politique et d'une autre économie*

Les travaux de Boulding et de Daly vont servir de tremplin pour une écologie politique remettant en cause le dogme de la croissance sans limite. Le rapport Meadows (1972), en cherchant à modéliser l'économie mondiale, va aboutir à un système où la croissance infinie est impossible, soulignant les liens forts existants entre économie et environnement (Meadows, Meadows et al. 1972; Turner 2008). Ces travaux seront suivis par des efforts de modélisation d'une économie avec peu ou pas de croissance (Victor 2008): le rapport de Jackson (2009) met en valeur ces travaux et réhabilite l'idée qu'une autre voie que le '*tout croissance*' est possible. Mais comme Victor (2010) le dit lui-même, il reste beaucoup de travail à faire pour définir précisément les mécanismes d'une économie sans croissance : la question de savoir si cette économie serait compatible avec le capitalisme reste notamment sans réponse (Blauwhof 2012). D'autres critiques de la pensée économique classique se sont également fait entendre durant le siècle dernier : on notera notamment le concept de bioéconomie fondée par Passet (1979). Suivant les indications données par Sraffa (1960) et Pasinetti (1975) sur la production jointe, Perrings (1987), puis O'Connor (1993; 1994; 1998) vont modéliser eux aussi une économie alternative basée sur la prise en compte des processus environnementaux dans une vision néo-ricardienne.

#### *La notion de production jointe*

Toute production de *biens* produit également des *maux* (Baumgärtner, Dyckhoff et al. 2001) : la notion économique qui exprime cette relation est la *production jointe*. Le phénomène de production jointe est particulièrement mis en évidence si l'on regarde la production du point de vue thermodynamique : dans le cas général, on a formation de biens possédant une entropie faible à partir de matière première possédant une entropie élevée et d'une énergie de basse entropie ; mais il y a également production jointe de déchets d'entropie élevée. En effet la seconde loi de la thermodynamique stipule que toute transformation crée une quantité positive d'entropie : ceci implique notamment que tout processus de transformation est irréversible. Ceci implique également qu'il y a une limite à la substitution des intrants dans les processus de production : il faut toujours de la matière première à basse entropie, habituellement de l'énergie, si l'on veut créer des biens de

faible entropie. Enfin cela entraîne la conclusion qu'il y aura toujours des déchets à gérer, et que promouvoir une *société zéro déchet* est une utopie. Si l'on relie les 3 implications, on revient au débat sur les limites de la croissance, et sur l'intérêt d'utiliser ce concept de production jointe dans une économie écologique qui s'écarterait de la vision néoclassique. Dans l'histoire de la pensée économique, deux cas de figure ont été considérés : le cas où tous les produits joints étaient désirables (Sraffa 1960; Pasinetti 1975), et le cas où au moins l'un d'entre eux était indésirable et au moins l'un d'entre eux était désirable (Perrings 1987; O'Connor 1993). Le second cas apparaît comme celui directement relié aux questions relevant de l'écologie économique. Une des conclusions auxquelles sont notamment arrivés Perrings et O'Connor est qu'il n'existe pas de chemin de croissance équilibrée si l'environnement n'a qu'une capacité limitée à produire des ressources naturelles de basse entropie et à assimiler des déchets d'entropie élevée. La production jointe fait aussi naître des questions d'ordre philosophique : que faire de l'éthique des producteurs de déchets potentiellement non pris en compte par la société ? Est-ce à l'entreprise d'être en avance sur la gestion des déchets, ou à la société de prendre en compte l'état de fait imposé par le principe de production jointe ? Cela pose les questions de la prévention des risques et du *principe de précaution*, questions d'ordre épistémologique. Le concept de production jointe est un concept simple, compréhensible par tous : il est donc un bon candidat pour faire de la médiation de connaissance, et surtout de la sensibilisation aux questions environnementales. C'est un concept universel, qui peut être utilisé à différentes échelles spatiales – entreprise, territoire, etc... – ou temporelles – l'échelle de temps des biens et des déchets n'est souvent pas la même. C'est une approche systémique, qui enjoint à considérer les ressources et les déchets en même temps : *'the resource is the mother of the waste'* (Baumgärtner, Dyckhoff et al. 2001). Le concept de production jointe permet aussi de voir plus large que le lien classique entre externalité négative et dédommagement ou restauration en mettant en évidence le lien entre production de biens et externalités négatives – et donc en remettant en question cette production avant de songer à réparer les erreurs. En résumé ce concept décrit les liens entre systèmes naturels et activité humaine, décrit l'économie humaine, souligne la responsabilité et les limites du savoir des hommes, et apparaît comme un concept clair et facile d'accès – au contraire de l'entropie par exemple, qui reste une notion difficile à manier.

## II. Présentation du système de production jointe

Un système de production jointe peut être modélisé en suivant le formalisme de Von Neumann (1945-1946) : soit un couple de matrice  $[\mathbf{A}(T) ; \mathbf{B}(T)]$  représentant la technologie du système, les deux matrices étant de dimension  $M \times N$  :

$$\mathbf{A}(T) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{B}(T) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix}$$

Les coefficients des 2 matrices représentent respectivement la proportion d'input et d'output de la ressource considérée nécessaire pour que le processus considéré puisse produire une unité d'activité. Chaque couple de vecteurs en ligne représente un processus ; et chaque couple de vecteur en colonne représente une ressource. Il y a donc dans le système  $M$  processus de production et  $N$  ressources. Chez Von Neumann, les processus étaient en nombre plus important que les ressources, et la grande question était alors de savoir quels seraient les processus qui seraient effectivement utilisés par l'économie. Ici on suit plutôt la philosophie de Sraffa (1960) où l'on cherche à décrire un système existant réellement et à comprendre comment se forme la valeur dans ce système. Le temps est représenté par la période  $T$  : au cours d'une période de production, les coefficients de production

ne changent pas. On supposera pour notre part la technologie comme stable sur la durée de notre étude, ce qui permet de supprimer les indices temporels pour **A** et **B**. On prendra par convention  $M=N$  mais si cette convention aide les calculs, elle ne doit pas être comprise comme une condition sine qua non de la réalisation du modèle : d'autres auteurs se sont intéressés aux modèles avec  $M$  différent de  $N$  (Patterson, Wake et al. 2006).

Prenons un système matriciel (1) de production simple :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ici le processus 1 – disons l'économie -- se sert de la ressource 1 – disons un bien économique – en quantité  $a_{11}$  et de la ressource 2 – disons une ressource naturelle – en quantité  $a_{12}$  pour produire une quantité  $b_{11}$  de la ressource 1. Il y a deux composantes à ce système de production : une composante physique, et une composante monétaire. L'étude de la composante physique permet d'aborder le problème de la soutenabilité du point de vue des quantités : est-il possible à l'économie de continuer ce processus, et si oui, à quel niveau d'activité ? La composante monétaire, elle permet la mise en place d'un système de valeur : si cette ressource naturelle est importante pour le fonctionnement de l'économie, comment la valoriser, c'est-à-dire quel est le prix que l'on doit lui attribuer ?

#### *Composante physique du système*

Les quantités peuvent être exprimées dans une unité commune, la masse, en kg. Ainsi l'analyse pourra être en accord avec la première loi de la thermodynamique, qui stipule l'équilibre des masses lors de chaque transformation. Ceci nous amène, en posant le vecteur **e** comme le vecteur unité en colonne de dimension  $M$  à la relation (2) :

$$\mathbf{Ae} = \mathbf{Be} \Leftrightarrow \mathbf{B}^{-1}\mathbf{Ae} = \mathbf{e} \quad (2)$$

Ainsi dans le système (1) cela oblige les relations suivantes :

$$a_{11} + a_{12} = b_{11} \quad (3)$$

$$a_{22} = b_{22} \quad (4)$$

Le vecteur en ligne d'activité **y(T)** permet de définir le niveau d'activité de chaque processus. Ainsi on pourra établir les quantités disponibles au début de chaque période dans le système de production en définissant le vecteur en ligne des quantités **q(T)** par la relation (5) :

$$\mathbf{q}(T) = \mathbf{y}(T)\mathbf{A} \quad (5)$$

Les quantités disponibles à la fin de la période d'activité des processus sont quand à elles établies via la relation (6) :

$$\mathbf{q}(T+1) = \mathbf{y}(T)\mathbf{B} \quad (6)$$

Ici il revient de parler de la manière dont l'économie se sert des processus environnementaux : soit elle extrait de la matière, ce que Perrings appelle une exaction. Soit elle rejette ses déchets dans l'environnement, ce que Perrings appelle insertion. Dans les 2 cas il n'y a pas *échange*, mais plutôt relation de force entre les *possesseurs* des différents processus<sup>1</sup> – en l'occurrence les *possesseurs* du processus naturel sont supposés ne disposer d'aucun pouvoir, en grande partie parce qu'ils n'existent pas, où parce qu'ils ne sont pas représentés chez les décideurs (association de protection de la nature par exemple). Dans le premier cas les possesseurs du processus économique traitent les ressources naturelles comme des biens gratuits ; dans le second cas ils considèrent possible d'opérer

<sup>1</sup> Ou des possesseurs des différentes ressources : il y a un débat sur ce point entre Perrings et O'Connor, mais ils s'accordent sur le fait qu'il s'agit d'une relation de pouvoir qui s'exprime dans tous les cas.

des rejets gratuits. Or l'environnement existe, et d'un côté s'épuise, de l'autre réagit : les déchets, en s'insérant dans d'autres processus changent la technologie du système et par effet domino peuvent amener à impacter l'économie de manière imprévisible. Ce sont ces notions de don gratuit et de rejet gratuit qui peuvent être rejetées en posant la relation (7) :

$$\mathbf{y}(T)\mathbf{B} = \mathbf{q}(T+1) = \mathbf{y}(T+1)\mathbf{A} \quad (7)$$

Ainsi le système fonctionne en cycle fermé, et l'accumulation dans l'un des processus provoquera forcément la perte de l'ensemble du système. Une première question est donc de savoir si l'économie actuelle, représentée par le processus 1 dans le système (1), peut atteindre un état stationnaire, dans lequel les ressources naturelles, représentée par la ressource 2 dans le système (1) ne serait pas détruite petit-à-petit par l'économie. Cet état stationnaire à la Daly serait caractérisé par un taux de croissance  $g$  égal à 0 : ce taux de croissance physique de l'économie peut être représenté dans la relation (8) :

$$\mathbf{y}(T)\mathbf{B} = (1+g)\mathbf{y}(T)\mathbf{A} \quad (8)$$

La relation (5) implique que  $\mathbf{y}(T)$  soit un vecteur propre de  $\mathbf{A}\mathbf{B}^{-1}$ , comme on peut le voir sur la relation (9) :

$$\mathbf{y}(T)\mathbf{A}\mathbf{B}^{-1} = \frac{1}{1+g}\mathbf{y}(T) \quad (9)$$

Les valeurs propres associées à  $\mathbf{y}(T)$  sont donc les scalaires  $1/(1+g)$  qui satisfont la relation suivante :

$$\left| \mathbf{A}\mathbf{B}^{-1} - \frac{1}{1+g}\mathbf{I} \right| = 0 \quad (10)$$

Or  $\mathbf{A}\mathbf{B}^{-1}$  étant une matrice semblable à  $\mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}$ , elle possède les mêmes valeurs propres que cette dernière. Comme la relation (2) impose une valeur propre égale à 1 associée au vecteur propre unité,  $\mathbf{A}\mathbf{B}^{-1}$  a également une valeur propre égale à 1, la relation (8) avec  $g$  égal à 0 est donc possible. Il est ainsi possible de définir un niveau de l'économie tel qu'un état stationnaire soit réalisable. Ce niveau peut être défini par son *throughput* comme veut le faire Daly : on peut alors définir la matrice  $\mathbf{S}(T)$  représentant les quantités consommées (si le signe de l'élément est négatif) ou produites (si le signe de l'élément est positif) par chaque processus à l'issue de la période de production :

$$\mathbf{S}(T) = \mathbf{Y}(T) \left[ \mathbf{B} - (1+g)\mathbf{A} \right] \quad (11)$$

Avec  $\mathbf{Y}(T)$  la matrice contenant les éléments de  $\mathbf{y}(T)$  sur la diagonale principale et tous les autres éléments nuls. Le *throughput* est alors défini comme la somme des éléments positifs de chaque colonne de la matrice  $\mathbf{S}(T)$  : on obtient ainsi les quantités de ressources circulant à travers le système.

Dans le système(1) le seul vecteur d'activité soutenable est  $[0 ; 1]$  (multiplié par un scalaire) : en effet si le processus 1 fonctionnait, il entrainerait la perte du système en consommant la ressource 2 sans permettre sa production en retour : or celle-ci est produite à un taux de croissance nul suivant la relation (4). Si un système stationnaire peut toujours être mis à jour en suivant la 1<sup>ère</sup> règle de la thermodynamique et l'absence de biens gratuits et de rejets gratuits, cela ne signifie pas que tous les processus peuvent fonctionner : certains sont *écartés* de la solution, et c'est le principal risque qui menace l'économie humaine.

#### *Composante monétaire*

Dans cette composante on s'intéresse aux échanges entre les périodes de production : ces échanges permettent la reproduction des processus à la période suivante et amènent la formation des prix. Un des postulats de Sraffa (1960) est que le profit est déterminé de manière exogène au système : ce sont des facteurs sociopolitiques qui déterminent le niveau du taux de profit par rapport au niveau du



taux de salaire. Ici il n'est pas question de salaire parce que le travail humain ne sera pas représenté dans ce modèle mais il est question du taux de profit adéquat pour que l'économie puisse fonctionner. Le système de prix est modélisé suivant la relation (9), avec un vecteur en colonne  $\mathbf{p}(T)$  pour les prix et en posant le taux de profit  $\pi$  ainsi :

$$\mathbf{Bp}(T) = (1 + \pi)\mathbf{Ap}(T) \quad (12)$$

Le théorème de Perron-Frobenius pose que pour les matrices non-négatives, comme  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{B}$ , la valeur propre maximale  $1/(1+\pi)$ , donc celle correspondant au taux de profit minimum, aura un vecteur propre aux coefficients tous positifs. Dans le système de Sraffa et de Von Neumann, les prix de productions se devaient d'être positifs. Mais Kurz et Salvadori (1992) soutiennent que si l'assomption de rejets gratuits concernant les déchets est retirés, il est possible d'avoir un vecteur de prix dont les composantes négatives signifient la présence de déchets devant être traités par l'économie. Ainsi en ne choisissant pas la valeur propre maximale mais en choisissant la valeur propre correspondant au taux de profit des processus économiques, des prix négatifs apparaîtront. Le théorème vaut aussi bien pour la matrice  $\mathbf{AB}^{-1}$  que pour la matrice  $\mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}$  : les vecteurs d'activités sont donc également concernés. En l'occurrence si l'on admet la possibilité d'avoir des prix négatifs, la possibilité d'avoir un coefficient d'activité négatif doit être rejeté : cela signifierait qu'un processus fonctionnerait à l'envers, ce qui est proscrit par la seconde loi de la thermodynamique (irréversibilité des transformations). Les solutions adéquates pour le système de prix adopté sont donc celles générant des niveaux d'activité tous positifs quel que soit la période. Mais trêves de théorie, passons maintenant à un exemple numérique permettant d'illustrer les propos.

### III. Caractérisation d'une économie stationnaire : l'exemple des bioénergies

Nous allons aborder le cas des bioénergies : produites à partir de déchets agricoles ou urbains, ou bien à partir de cultures énergétiques, elles sont considérées comme une piste intéressante pour rendre l'Union Européenne moins dépendante du pétrole étranger, relancer l'économie et lutter contre le changement climatique (EC 2012). Les bioraffineries semblent des bonnes candidates pour les expériences d'écologie industrielles, de part les nombreux coproduits générés par leurs activités. Je vais m'intéresser à la relation entre le développement des bioénergies et le cycle du carbone dans une modélisation de production jointe. Le point de départ sera le projet mené à Lille qui a abouti à la création d'un centre de valorisation des déchets organiques ménagers en 2007, et dont une partie de la production sert à créer du biométhane, inséré dans le réseau de Gaz de France et notamment utilisable par les bus urbains. Le gaz naturel est une ressource fossile : les estimations sur les quantités de gaz dans la croûte terrestre varient beaucoup, mais les experts s'accordent à dire que la formation souterraine du gaz est très lente, ce qui peut nous faire dire, vu nos niveaux de consommation actuels, que c'est une ressource non renouvelable.

Ainsi nous pouvons construire un premier modèle de production jointe qui décrit un système imaginaire d'approvisionnement en gaz naturel :

- Le processus 1 décrit l'extraction et la purification du gaz naturel (ressource 3) grâce à l'utilisation d'un capital physique économique (ressource 1). Les outputs du processus sont du gaz naturel purifié (ressource 2) et du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ , ressource 4).
- Le processus 2 décrit l'utilisation du gaz naturel purifié afin de régénérer le capital physique économique : un deuxième output est également du  $\text{CO}_2$ .
- Le processus 3 décrit le stockage du gaz naturel dans la croûte terrestre : le gaz naturel étant non renouvelable, l'égalité entre les coefficients d'input et d'output est posée.
- Le processus 4 décrit le stockage du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère.

Ainsi les matrices  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{B}$  seront les suivantes :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} ; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,9 \end{bmatrix} \quad (13)$$

On remarque immédiatement dans ce modèle que la relation (2) ne tient pas : les coefficients ne sont pas tous mesurés en kg, le premier principe de la thermodynamique n'est pas scrupuleusement vérifié. Il serait cependant possible de le faire, mais hors de portée pour l'étude présente. Les relations (7), (8) et (12) sont conservées :

$$\mathbf{y}(T)\mathbf{B} = \mathbf{q}(T+1) = \mathbf{y}(T+1)\mathbf{A} \quad (7)$$

$$\mathbf{y}(T)\mathbf{B} = (1+g)\mathbf{y}(T)\mathbf{A} \quad (8)$$

$$\mathbf{Bp}(T) = (1+\pi)\mathbf{Ap}(T) \quad (12)$$

La détermination du taux de profit uniforme est celui qui permettra la répartition du surplus et la formation des prix : il dépend des valeurs propres de la matrice  $\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$ . Celles-ci sont au nombre de 4 :

$$1 + \pi_1 = 1,4142$$

$$1 + \pi_2 = -1,4142$$

$$1 + \pi_3 = 1$$

$$1 + \pi_4 = 0,95$$

L'une est négative et une autre inférieure à 1, ce qui suppose un taux de profit négatif dans les 2 cas. Une 3<sup>ème</sup> est égale à 1,4142. Cette valeur propre, associée au taux de profit  $\pi_1$  de 41%, amène au vecteur de prix  $\mathbf{p}_1$  (en transposée) suivant :

$$\mathbf{p}_1^T(T) = [2,121 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$

Ici la ressource naturelle est effectivement vue par l'économie comme un don gratuit, car sa valeur vaut 0 – mais le gaz naturel purifié est lui payant. De même, il y a également rejet gratuit puisque le prix du CO<sub>2</sub> vaut également 0. Le choix de ce taux de profit n'est donc pas anodin sur la manière dont vont se comporter les acteurs économiques vis-à-vis de l'environnement : l'exploitation et la pollution sans limite est permise, jusqu'à ce que les gisements s'épuisent. Une autre valeur propre est égale à 1, elle implique donc un taux de profit  $\pi_3$  égal à 0. Cela correspondrait au taux de renouvellement de la ressource naturelle. Le vecteur de prix  $\mathbf{p}_3$  associé est le suivant :

$$\mathbf{p}_3^T(T) = [6 \quad 4 \quad 3 \quad 0]$$

On a ici une situation étrange : si le prix du gaz naturel devient payant, cela ne permet toutefois pas de le sauvegarder. En effet une analyse du vecteur d'activité montre une impossibilité d'opérer le processus 3 en même temps que les autres processus, car ils sont de signes opposés. Soit on obtient une économie qui fonctionne sans processus 3, ce qui signifie la fin à plus ou moins long terme des stocks de gaz naturel, et donc l'arrêt des autres processus, soit le processus 3 fonctionne tout seul (il n'a en effet besoin d'aucun autre input à part ce qu'il produit lui-même). Les graphiques ci-dessous illustrent l'évolution du système avec l'application du taux de profit  $\pi_3$  et le vecteur d'activité de départ suivant :

$$\mathbf{y}(0) = [1 \quad 1 \quad 20 \quad 0]$$

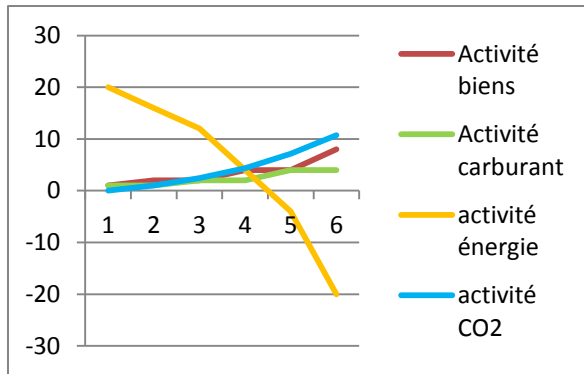


Figure 1 : Evolution des niveaux d'activités

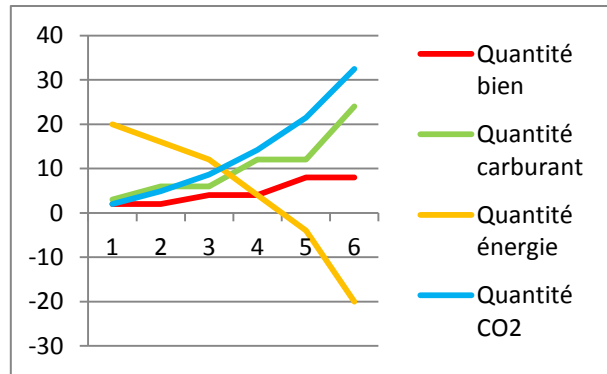


Figure 2 : Evolution des niveaux de quantités

Une solution pour essayer de se rendre moins dépendant de la ressource naturelle en voie d'extinction, et pour limiter les impacts sur le changement climatique est de promouvoir les innovations technologiques. Selon Perrings (1987) il y a innovation ou changement de technique quand les coefficients techniques strictement positifs sont modifiés. Ainsi analysons les matrices de technologies suivantes, légèrement modifiées par rapport au système (13) pour rendre compte des progrès en termes d'éco-efficacité :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 4 & 0 & 0,5 \\ 2 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,9 \end{bmatrix} \quad (13)$$

On rejette moins de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère par unité produite de capital physique et de gaz naturel purifié et on produit plus de capital physique économique par unité de gaz naturel purifié consommé, ainsi que plus de gaz naturel purifié par unité consommée de gaz naturel. Voici les valeurs propres obtenues :

$$\begin{aligned} 1 + \pi_1 &= 2 \\ 1 + \pi_2 &= -2 \\ 1 + \pi_3 &= 1 \\ 1 + \pi_4 &= 0,95 \end{aligned}$$

Encore une fois deux taux de profit sont possibles : le premier mène à un vecteur de prix assumant le don gratuit de la nature ainsi que le rejet gratuit du CO<sub>2</sub>, avec taux de profit de 100%, soit plus élevé que dans le système (13). Le deuxième est nul et comme dans le système précédent il propose aussi une compensation pour la perte du capital naturel avec le vecteur de prix suivant :

$$\mathbf{p}_3^T(T) = [1 \quad 1 \quad 1,5 \quad 0]$$

On s'aperçoit que le prix relatif de la ressource naturelle est beaucoup plus élevé qu'auparavant : l'éco-efficacité ne mène donc pas à une plus grande indépendance vis-à-vis de la ressource, au contraire. Les niveaux d'activités possibles sont les mêmes qu'avec le système précédent : seul le processus 3 peut s'auto-alimenter et survivre sur le long terme. Les graphiques ci-dessous illustrent l'évolution du système avec l'application du taux de profit  $\pi_3$  et le vecteur d'activité de départ suivant :

$$y(0) = [1 \quad 1 \quad 20 \quad 0]$$

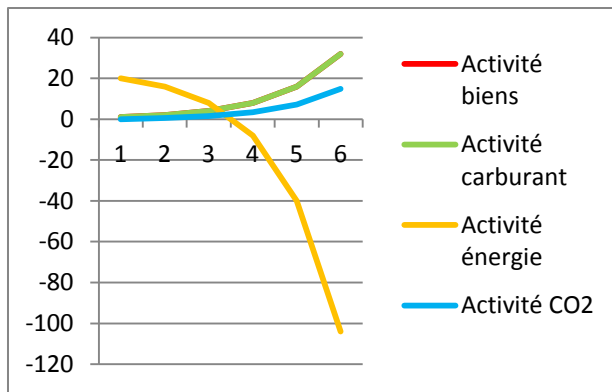


Figure 3 : Evolution des niveaux d'activités

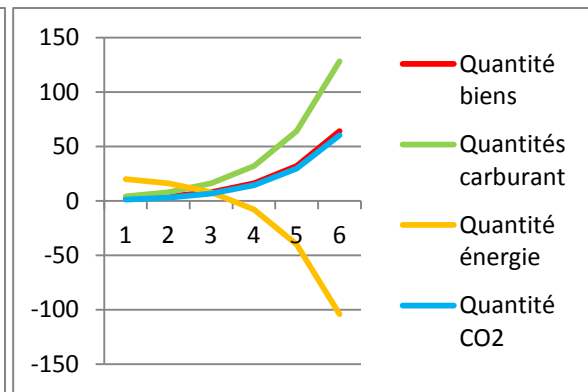


Figure 4: Evolution des quantités

On comprend bien ici que le problème est structurel : on s'appuie sur une ressource non renouvelable, l'économie ne peut fonctionner indéfiniment. Changer les coefficients à la marge n'amène que des changements de prix à la marge, sans changer l'issue. On dispose ainsi d'une méthode d'évaluation des prix qui est inopérante pour prévoir la future disparition du système. O'Connor (1993) analyse ceci en termes d'appropriation du capital écologique, via une pseudo compensation : ce type de compensation peut par exemple servir à développer des projets d'énergie renouvelable<sup>2</sup>. Se servir de ce type de compensation implique donc un optimisme envers l'avenir, envers la possibilité de trouver une technologie novatrice qui permettra de sortir du cercle vicieux exploitation-extinction. La bioéconomie est peut-être cette solution, car on s'appuie alors sur une énergie renouvelable, sans risque d'extinction, le soleil. C'est le parti pris à Lille : les déchets fermentescibles des ménages sont pris en charge dans un Centre de Valorisation Organique (CVO) à Sequedin. Les déchets sont alors transformés par méthanisation en biogaz, les résidus servant à la fabrication de compost. Le biogaz obtenu est purifié, puis inséré dans le réseau du gaz de ville, géré par EDF. Une partie de ce gaz sert ensuite à faire rouler les quelques 300 bus de la ville qui fonctionnent au GNV (environ les trois quarts de la flotte de bus lilloise). En 2011 le CVO a reçu 48 736 tonnes de déchets qui ont permis la production de 1 125 508 Nm<sup>3</sup> de biogaz brut et de 240 960 Nm<sup>3</sup> de biométhane (Lille-Métropole 2012). C'est actuellement le projet d'injection de biogaz dans le réseau le plus important et le plus abouti en France (Ernst&Young 2010). Se servir des déchets pour produire de l'énergie est effectivement un manière révolutionnaire d'opérer : c'est ce que Perrings (1987) appelle une invention, ou changement technologique, qui modifie la structure de la matrice de technologie. Une telle bioéconomie peut être modélisée via le système de production jointe suivant :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Ici le changement réside dans le processus 4 : grâce à l'énergie solaire non représentée, et à l'apport de capital physique économique, il est possible de transformer du CO<sub>2</sub> en source d'énergie, en biogaz, qui pourra donc remplacer le gaz naturel comme moyen de production pour le capital physique économique. Dans ce système les valeurs propres sont au nombre de 3 :

<sup>2</sup> Ou peut servir à acheter des *possesseurs* ou protecteurs encombrants de processus naturels... afin de les réduire au silence.

$$1 + \pi_1 = -1,443$$

$$1 + \pi_2 = 1 + \pi_4 = 1$$

$$1 + \pi_3 = 0,693$$

La valeur propre qui nous intéresse est alors celle égale à 1, qui signifie un taux de profit égal à zéro. Il est alors possible d'avoir un vecteur d'activité où les 4 processus sont positifs durablement et où les quantités produites par le système restent stables :

$$\mathbf{y}(T) = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

On s'aperçoit que les processus 1, 3 et 4 sont reliés entre eux : à ces niveaux d'activité, ils n'ont pas besoin de l'activité du processus 2 pour fonctionner. Les prix par contre dépendent du prix de la ressource 2 : si le prix du CO<sub>2</sub> est supérieur au prix du gaz naturel, celui-ci sera utilisé, ce qui engendrera une instabilité des prix. Une solution pour le vecteur prix est par exemple celle-ci :

$$\mathbf{p}^T(T) = [4 \quad 3 \quad 3 \quad 1]$$

Il est donc alors possible d'avoir un prix positif pour le CO<sub>2</sub> qui était jusqu'à maintenant considéré comme un déchet dont le rejet était gratuit. Une économie stationnaire est donc possible, dès lors que le surplus économique est réinvesti pour *purifier* l'atmosphère du CO<sub>2</sub> en surplus. Cette économie stationnaire répond aux critères posés par Daly concernant l'utilisation des ressources : utilisation des ressources renouvelables à un taux permettant leur renouvellement, utilisation des ressources non-renouvelables à un taux permettant leur remplacement par d'autres ressources avant extinction, et rejet des déchets à un taux permettant leur absorption par l'environnement. Cette économie stationnaire peut être caractérisée par son *throughput*, en construisant la matrice S définie dans la relation (11) :

$$\mathbf{S}(T) = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -2 & 1 \\ 2 & -3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & -2 \end{bmatrix}$$

On remarque que le processus 2 ne fait rien *circuler* : il est mis en dehors du système d'échange économique. Le *throughput* étant alors défini comme la somme des éléments positifs de chaque colonne de la matrice S(T), on obtient :

$$\mathbf{t}(T) = [2 \quad 3 \quad 2 \quad 2]$$

On voit ainsi les flux physiques de matières circulant dans l'économie et devant être régulés pour préserver le système, selon la vision de Daly. A partir de ce *throughput* physiquement stable, l'économie est libre d'en tirer le maximum de services possibles.

#### IV. Discussion et ouverture sur l'écologie industrielle

Le système présenté est simple et ne tient pas compte des chiffres réels. Des hypothèses fortes sont également prises : pas de prise en compte de la demande finale qui est susceptible de changer si les prix changent, et taux de profit et de croissance uniformes. Ces limites ne demandent qu'à être investiguées : Baumgärtner (2004) a étudié l'impact sur la production de biens dont les prix oscillent entre une valeur positive et négative en fonction de la demande et O'Connor (1993) a investigué les conséquences du relâchement de l'hypothèse des prix uniformes. Le taux de profit, vu comme une relation de pouvoir, est supposée uniforme dans les exemples précédents : si cette hypothèse est relâchée, on peut faire varier les taux de profits en fonction du processus concerné. La situation d'équilibre où différents taux de profits se côtoient dans l'économie révèle ce qu'O'Connor appelle

'l'équilibre des pouvoirs'. Une autre critique qui peut être avancée est toutefois la non prise en compte du facteur travail, notion pourtant centrale du travail de Sraffa (1960) et Pasinetti (1975) sur la production jointe, et des recherches futures devront tenter de prendre en compte cet aspect de la redistribution du surplus.

Car c'est bien dans la redistribution du surplus que réside le principal attrait de ce type de modèle et la principale leçon de l'étude des interactions entre environnement et économie est que le capital physique accumulé dans l'économie nuit au final à la durabilité de l'ensemble. Il faut construire des éléments nouveaux permettant de *fermer le cycle* et d'éviter une accumulation délétère. On rejoint alors l'idée que ce que l'on reçoit de la nature, on doit le rendre, sous forme de don (Maus 1925; Buclet 2011). Ainsi on peut inscrire cette leçon dans le cadre d'analyse du débat sur la croissance : van den Bergh et Mooij (1999) ont classé 5 types de discours par rapport à ce débat et nous allons reprendre leur classification et interpréter où les différents discours étudiés dans cet article peuvent se ranger :

- Le discours moral : la croissance n'est pas souhaitable. C'est le discours qui souligne que le lien entre bien-être et croissance n'est plus vrai au-delà d'un certain point (Jackson 2009) et qu'il vaut donc mieux savoir se satisfaire d'un état stationnaire (Daly 2008).
- Le discours pessimiste : la croissance est impossible sur le long terme. C'est le parti pris de l'application rigoureuse des lois de la thermodynamique (Georgescu-Roegen 1971) : ce discours rejoint en partie le premier discours et il n'est pas en désaccord avec le parti pris des modèles de production jointe de Perrings (1987) et O'Connor (1993).
- Le discours technocrate : la croissance est compatible avec la protection de l'environnement. C'est le discours qui est adopté par les partisans de l'écologie industrielle : il est possible de produire plus à l'aide de capital renouvelable, et à l'aide d'une réutilisation systématique des déchets produits.
- Le discours opportuniste : la croissance est la seule solution. Ce discours est celui abordé actuellement par ceux, notamment dans les pays en voie de développement, qui font valoir que leur droit au développement passe avant leur responsabilité environnementale. C'est un discours fataliste également, prônant par exemple l'adaptation au changement climatique plutôt que des programmes inutiles de lutte.
- Le discours optimiste : la croissance est la meilleure solution. C'est aussi un parti pris des tenants de l'écologie industrielle, qui ont confiance dans le fait qu'un système industriel durable en croissance est possible.

Si le discours pessimiste est donc celui qui se rapproche le plus de celui issu de la production jointe à la Perrings et O'Connor, il manque toutefois la notion de réinvestissement dans un cycle de reproduction. En effet selon O'Connor, il ne faut pas seulement acter que l'histoire humaine est remplie d'exemple où, à force d'exploitation, la civilisation considérée s'est effondrée une fois les ressources disparues (on peut citer l'île de Pâques, mais aussi la civilisation romaine par exemple). Si donc les chutes et les catastrophes font partie de l'histoire humaine, si la nature ne peut être contrôlée, il faut non pas être pessimiste ou opportuniste, mais plutôt investir dans l'avenir en redistribuant le capital économique vers la nature (O'Connor 1994). Cela rejoint le discours sur le *capitalisme naturel* tenu par Hawken et Lovins, qui fait la connexion entre l'obligation de rendre à la nature ce qu'on lui a pris et l'écologie industrielle (Hawken and Lovins 1999). En effet les 4 piliers du capitalisme naturel selon eux sont les suivants :

- Productivité maximale dans l'utilisation des ressources
- Biomimétisme : fonctionnement en cycle fermé, sans déchets, sans toxicité

- Economie de fonctionnalité : amélioration des services et non augmentation de la production physique de biens
- Réinvestissement dans le capital naturel.

Ces piliers font échos aux 4 grands défis de l'écologie industrielle énoncée par Erkman (2001) :

- Valoriser systématiquement les déchets
- Minimiser les pertes par dissipation
- Décarboniser l'énergie – en utilisant moins d'énergies fossiles
- Dématérialiser l'économie en promouvant l'économie de fonctionnalité.

Si la vision du capitalisme naturel reprend bien tous les attributs de l'écologie industrielle, elle lui ajoute donc l'injonction de réinvestir dans le capital naturel. Elle reprend donc à son compte cette nécessité issue de l'analyse des systèmes de production jointe, mais en lui ajoutant cette dose d'optimisme technologique qui lui pousse à ne pas prôner la décroissance ou un état stationnaire.

### Conclusion

L'état stationnaire n'est pas recherché par les tenants de l'écologie industrielle et territoriale, pas plus que par les tenants du capitalisme naturel. Au contraire, les tenants de la modélisation en production jointe tentent de savoir s'il est possible. Au travers de cet article j'ai tenté de jeter les bases d'une communication possible entre ces 2 mondes. Se pose maintenant la question de savoir comment mener à bien les politiques de réinvestissements dans le capital naturel. Et concernant la production jointe, une analyse poussée dans le sens de la comptabilité minutieuse des échanges physiques et énergétiques entre processus pourraient être une voie de développement, en croisant les résultats déjà nombreux établis dans le domaine de l'analyse Input-Output. L'analyse de système avec plusieurs ressources naturelles, différents taux de profit et différents taux de croissance, permettra également à l'avenir de mieux discerner les possibilités et les développements de ce type d'analyse.

- Baumgärtner, S., (2004) Price ambivalence of secondary resources: joint production, limits to substitution, and costly disposal, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 43, pp. 95-117.
- Baumgärtner, S., H. Dyckhoff, M. Faber, J. Proops and J. Schiller, (2001) The concept of joint production and ecological economics, *Ecological Economics*, Vol. 36, pp. 365-372.
- Bergh, J. C. J. M. v. d. and R. A. de Mooij, (1999) An Assessment of the Growth Debate, in J.C.J.M. van den Bergh ed., *Handbook of Environmental and Resource Economics*, 1999), pp. 643-655.
- Blauwhof, F. B., (2012) Overcoming accumulation: Is a capitalist steady-state economy possible?, *Ecological Economics* Vol. 84, pp. 254–261.
- Boulding, K. E., (1966) The Economics of the Coming Spaceship Earth, in H. Jarrett ed., *Environmental Quality in a Growing Economy*, (Baltimore, 1966), pp. 3-14.
- Boulding, K. E., (1973) The Shadow of the Stationary State, *Daedalus*, Vol. 102, pp. 89-101.
- Buclet, N. (2011). Le territoire, entre liberté et durabilité, Puf.
- Daly, H. E., (1968) On Economics as a Life Science, *Journal of Political Economy*, Vol. 76, pp. 392-406.
- Daly, H. E. (1991). Steady-State Economics. Second Edition with New Essays. Washington, D.C.
- Daly, H. E. (2008). A Steady-State Economy. UK, Sustainable Development Commission.
- Daly, H. E., J. B. Cobb and C. W. Cobb (1994). For the Common Good : Redirecting the Economy Toward Community, the Environment, and a Sustainable Future. Boston, Beacon Press.
- Daly, H. E. and J. C. Farley (2004). Ecological Economics: Principles and Applications. Washington DC, Island Press.
- Duchin, F. and E. Hertwich (2003). Industrial Ecology. Online Encyclopaedia of Ecological Economics, International Society for Ecological Economics, p. 12.
- EC (2012). Innovating for Sustainable Growth - A bioeconomy for Europe, European Commission, p. 59.

- Erkman, S. (1998). Vers une Ecologie Industrielle. Paris, Editions Charles Léopold Mayer.
- Erkman, S., (2001) L'écologie industrielle, une stratégie de développement  
*Le Débat*, Vol. 113, pp. 106-121.
- Ernst&Young (2010). Etude de marché de la méthanisation et des valorisations du biogaz, ADEME-GrDF, p. 142.
- Fisher, I. (1906). The Nature of Capital and Income. London, MacMillan.
- Frosch, R. A. and N. E. Gallopoulos, (1989) Strategies for manufacturing, *Scientific American*, Vol. 261, pp. 144-152.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). The Entropy Law and the Economic Process. Cambridge, Mass., Harvard University Press.
- Hawken, P. A. and L. H. Lovins (1999). Natural capitalism — creating the next industrial revolution, Rocky Mountain Institute.
- Hubbert, M. K. (1974). M. K. Hubbert on the Nature of Growth. Hearings before the Subcommittee on the Environment of the committee on Interior and Insular Affairs House of Representatives.
- Jackson, P. (2009). Prosperity Without Growth ? UK, Sustainable Development Commission, p. 136.
- Kurz, H. D. and N. Salvadori (1992). Von Neumann Growth Model and the "Classical" Tradition. Tenth World Congress of the International Economic Association. Moscow, p. 36.
- Lille-Métropole (2012). Résidus Urbains - Rapport Annuel sur le prix et la qualité du service public d'élimination des déchets - 2011, Lille Métropole Communauté Urbaine, p. 57.
- Malthus, T. R. (1817). An Essay on the Principle of Population. London, Murray.
- Mauss, M. (1925). Essai sur le don. Forme et raison de l'échange dans les sociétés archaïques, Presses Universitaires de France (2007).
- Meadows, D. H., D. L. Meadows, J. Randers and W. W. Behrens III (1972). Limits to Growth. New York, New American Library.
- Mill, J. S. (1848). Principles of Political Economy with Some of their Applications to Social Philosophy. London, John W. Parker.
- Mont, O. (2004). Product-Service Systems : Panacea or Myth ? Lund, Sweden, Lund University.
- O'Connor, M., (1993) Value System Contests and the Appropriation of Ecological Capital, *The Manchester School*, Vol. 61, pp. 398-424.
- O'Connor, M., (1994) Entropy Liberty and Catastrophe: on the physics and metaphysics of waste disposal, in Peter Burley and John Foster eds., *Economics and Thermodynamics: new perspectives on economic analysis*, (Dordrecht/Boston/London, 1994), pp. 119-182.
- O'Connor, M., (1998) Ecological-economic sustainability, in Sylvie Faucheux and Martin O'Connor eds., *Valuation for sustainable development. Methods and Policy Indicators*, (Cheltenham, 1998), pp. 19-42.
- Pasinetti, L. L. (1975). Lectures on the Theory of Production. Bologna, Società editrice il Mulino
- Passet, R. (1979). L'économique et le vivant. Paris, Payot.
- Passet, R., (2012) La bioéconomie, un monde à réinventer, *Presses de Sciences Po*, Vol. 45, pp. 83-91.
- Patterson, M. G., G. C. Wake, R. McKibbin and A. O. Cole, (2006) Ecological pricing and transformity: A solution method for systems rarely at general equilibrium, *Ecological Economics*, Vol. 56, pp. 412-423.
- Perrings, C. (1987). Economy and Environment. Cambridge, Cambridge University Press.
- Rokpe, I., (2004) The early history of modern ecological economics, *Ecological Economics*, Vol. 50, pp. 293-314.
- Soddy, F. (1926). Wealth, Virtual Wealth and Debt : The Solution of the Economic Paradox. London, Allen & Unwin
- Sraffa, P. (1960). Production of Commodities by Means of Commodities. Bombay, K. K. Vora, Vora & Co.
- Turner, G. M., (2008) A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality, *Global Environmental Change*, Vol. 18, pp. 397-411.



- Victor, P. A. (2008). Managing without Growth. Slower by Design, Not Disaster. Cheltenham, U.K. and Northampton, MA, USA., Edward Elgar.
- Victor, P. A., (2010) Ecological economics and economic growth, *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 1185, pp. 237-245.
- Vivien, F.-D., (2003) Rencontre du troisième type... d'écosystème ou quand l'écologie devient industrielle, *Innovations*, Vol. 2, pp. 43-57.
- Von Neumann, J. V., (1945-1946) A Model of General Economic Equilibrium, *The Review of Economic Studies*, Vol. 13, pp. 1-9.