



**F**ondation **T**ravail - **U**niversité ASBL

Centre de recherche Travail & Technologies

---

Rue de l'Arsenal 5, B - 5000 Namur  
① +32-81-725122, fax +32-81-725128

Programme « Leviers du développement durable »

Contrat de recherche n° HL/DD/020

**L'innovation technologique  
au service du développement durable**

**Working Paper n° 1  
Aspects conceptuels**

*Gérard Valenduc  
Françoise Warrant*

Février 2001

*Ce document fait partie du rapport final de la recherche « L'innovation technologique au service du développement durable » (HL/DD/020), remis le 28 février 2001 aux Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles (SSTC), dans le cadre du programme « Leviers du développement durable ».*

**Fondation Travail-Université asbl**  
Centre de recherche Travail & Technologies  
Rue de l'Arsenal, 5  
B-5000 Namur  
Tél. (0)81-725122, fax (0)81-725128  
E-mail : [gvalenduc@compuserve.com](mailto:gvalenduc@compuserve.com)  
<http://www.ftu-namur.org>

# Aspects conceptuels : le rôle de l'innovation technologique dans le développement durable

L'objectif de ce document est de faire le point sur une approche théorique du rôle de l'innovation technologique dans le développement durable. Il comporte quatre sections, qui répondent aux objectifs suivants :

- préciser les notions de "technologie" et "innovation technologique", telles qu'elles sont utilisées dans cette recherche ;
- dresser un aperçu des statuts attribués à la technologie et à l'innovation dans les grands courants d'analyse théorique du développement durable ;
- introduire quelques notions spécifiques à l'innovation technologique favorable au développement durable et souligner l'ambivalence de la technologie, qui peut être vue à la fois comme une cause du développement non durable et un facteur de développement durable ;
- faire le point sur la terminologie utilisée dans ce rapport : technologie soutenable ou durable, technologie environnementale, technologie propre, etc.

## 1. Technologie et innovation

### 1.1. Les différentes catégories d'innovations

D'une manière très générale, l'innovation peut porter sur le produit, le procédé, l'organisation ou le marché d'une entreprise.

- L'innovation de produits concerne la conception d'un bien – matériel, équipement, instrumentation, fournitures, produits – ou d'un service. Il s'agit de la mise au point ou la commercialisation d'un produit nouveau ou amélioré sur le plan technologique (ou à tout le moins de certaines de ses caractéristiques).
- L'innovation de procédé a trait aux processus de production et de distribution du bien ou du service.
- L'innovation organisationnelle désigne les changements organisationnels liés aux innovations de produits ou de procédés, de même que les changements liés aux tâches de support et le comportement innovant en affaires.
- L'innovation de marché concerne la percée sur de nouveaux marchés ou niches mais aussi les modifications des relations que l'entreprises entretient avec son environnement (fournisseurs, concurrents, pouvoirs publics, investisseurs...).

Les activités d'innovation technologique couvrent toutes les démarches scientifiques, technologiques, organisationnelles, financières et commerciales qui mènent à la réalisation de produits et de procédés technologiquement nouveaux ou améliorés.

### **1.2. Les sources de l'innovation technologique**

Les sources de connaissances liées à l'innovation technologique se décomposent classiquement en quatre grands piliers :

- la recherche-développement (R&D) ;
- l'acquisition de technologies développées à l'extérieur ;
- la collaboration avec d'autres entreprises et organismes de recherche ;
- d'autres activités liées à l'augmentation des connaissances.

La recherche-développement comprend tous les travaux créatifs entrepris de façon systématique (structurés) en vue d'élargir les connaissances et l'utilisation de ces connaissances afin de développer de nouvelles applications.

Selon les termes figurant dans l'inventaire permanent du potentiel scientifique belge, établi dans le cadre de l'accord de coopération interrégional du 12/06/1994, « La recherche comprend les activités créatives entreprises en vue d'agrandir les connaissances scientifiques et la compréhension scientifique. Le développement comprend également des travaux créatifs entrepris systématiquement (structurés) en vue d'exploiter les résultats de la recherche pour produire des matériaux et/ou des produits nouveaux ou fortement améliorés, de même que pour développer des applications, des procédés ou des systèmes nouveaux ou fortement améliorés. Le critère de base permettant de distinguer la R&D des autres activités liées à l'accroissement du stock de connaissances est la présence d'un élément de nouveauté et la volonté de trouver une solution à une certaine incertitude scientifique et technologique. Est considéré comme nouveau ce qui l'est pour l'entreprise, à l'exclusion des connaissances accessibles du grand public (« the state-of-the-art »). Les activités qui ne relèvent pas de cette catégorie sont le design industriel, l'outillage, l'ingénierie industrielle, la pré-production, les tests de normalisation ».

L'acquisition de technologies développées à l'extérieur en appui à l'innovation comprend :

- l'acquisition de biens d'équipement technologiquement avancés, pour autant qu'ils ne relèvent pas de technologies standards ;
- l'acquisition de brevets, de licences, de marques et de services technologiques ;
- l'acquisition de logiciels avancés (pour autant qu'il ne s'agisse pas d'ensembles standards) ou de logiciels faits sur mesure.

La collaboration en tant que forme d'acquisition de connaissances consiste en des accords plus ou moins formels allant de la collaboration au stade de projet avec des clients ou des fournisseurs pour le développement de nouvelles technologies, jusqu'à des joint-ventures en passant par l'échange de technologies entre partenaires du même secteur.

Enfin, les autres activités liées à l'accroissement des connaissances visent des activités importantes constituant un indicateur des investissements dans la capacité d'innovation

des entreprises : la formation, la gestion de la qualité, les études de marché, les études de management constituent autant d'investissements dans la connaissance du potentiel humain, de l'organisation et du marché. Il existe encore d'autres activités qui peuvent être reprises sous cette catégorie comme le modelage industriel, l'outillage, l'ingénierie industrielle, les tests de normalisation.

### **1.3. La diffusion des innovations**

La diffusion d'une innovation technologique peut se définir comme l'adoption d'un dispositif technique à grande échelle ou par une large population d'acteurs, c'est le mécanisme par lequel l'innovation, phénomène microéconomique, acquiert une dimension méso- voire macroéconomique (1). Ce point est développé de manière plus approfondie dans la première partie de l'annexe 4 « Stimulation de l'innovation technologique favorable au développement durable ».

#### **1.3.1. Les limites de la régulation par le marché**

Dans l'approche économique néoclassique, les agents sont tenus pour rationnels, ils maximisent certaines fonctions, ils innoveront pour avoir un bénéfice, ils rencontrent les consommateurs sur des marchés, l'équilibre se trouve via un système de prix et de revenus.

Dans l'approche évolutionniste, les agents ne sont plus considérés comme parfaitement rationnels, les prix ne coordonnent pas totalement leurs actions.

On sait que si l'innovation engendre un rente pour la firme innovante (momentanée car il s'opère assez vite des phénomènes d'imitation, et même s'il y a protection par un brevet, la durée du monopole est limitée dans le temps), l'innovation engendre des dépenses, dont le coût est fixe, indépendant de la quantité de bien produite. On estime que le taux de rendement moyen de l'investissement en recherche se situe dans une fourchette oscillant entre 15 et 30% (Guellec, op.cit.).

La coordination par le marché en matière d'innovation est depuis longtemps reconnue comme inefficace par les économistes car il se produit des effets externes. Les effets externes désignent de manière générale les relations entre agents qui ne passent pas par le mécanisme des prix (2). Deux types d'effets externes nous intéressent tout particulièrement :

- les *externalités de R&D* liées à la diffusion des connaissances par divers canaux tels que copie, espionnage, mobilité du personnel, publications scientifiques ou techniques, rétro-ingénierie ;
- les *externalités de réseau*, souvent appliquées à des technologies faisant l'objet de standards et normes technologiques et donnant lieu à des rendements croissants

---

(1) Guellec D., *Economie de l'innovation*, La Découverte, Repères, Paris, 1999.

(2) Bach L. et Lhuillery S., *Recherche et externalités, Tradition économique et renouveau*, dans Foray D. et Mairesse J. (sous la dir.), *Innovations et performances, approches interdisciplinaires*, Editions EHESS, Paris, 1999, p. 340.

d'adoption (exemple classique : l'intérêt du fax ou du courrier électronique augmente au fur et à mesure que le nombre de détenteurs de fax ou d'adresses e-mail est élevé).

Arrow et Nelson (3) ont mis les premiers en évidence que les mécanismes de marché ne peuvent inciter les entreprises à investir de manière optimale dans la R&D car le rendement social de l'investissement en R&D dépasse son rendement, de sorte que chaque firme est encline à sous-investir (du point de vue de la société) dans ce domaine. Ce décalage entre rendement social et rendement privé s'explique, selon Arrow, par la disparité entre les coûts élevés de production de connaissances et les coûts quasi nuls de diffusion de ces mêmes connaissances (4). Il y a un risque de déficience de l'initiative privée en matière de R&D, lié à un pur problème d'appropriation. Cette théorie permet de justifier théoriquement les politiques publiques de soutien à la R&D, en mettant en lumière l'incapacité du marché à jouer pleinement son rôle d'incitation. Plus récemment, Bozeman, Link et Zardkoohi (5) ont utilisé ce type d'argumentation pour souligner l'intérêt d'une intervention des pouvoirs publics en matière de recherche coopérative.

Dasgupta et Stiglitz (6) ont par contre soutenu qu'il n'est pas vrai que dans tous les cas (concurrence ou monopole), on encourt le risque de sous-investissement en R&D. Le risque inverse existe également, car il faut consacrer l'analyse non pas à une firme unique mais à un ensemble de firmes en interaction. Selon ces auteurs, il y aurait un risque d'excès de R&D par rapport à l'optimum social, lorsque le degré d'inélasticité de la demande est élevé. Cette argumentation joue en défaveur du soutien public à la R&D mais ne remet pas en cause l'hypothèse de base de Arrow et Nelson, à savoir que le coût de diffusion des résultats de R&D, considérés comme des biens publics, est quasi nul.

Cette hypothèse de base est de plus en plus battue en brèche car il ne faudrait pas confondre ce qui a trait à la duplication des résultats de la R&D, qui s'opère à un coût très faible, avec ce qui a trait à leur exploitation, dont la mise en œuvre suppose des coûts d'apprentissage : « Faire l'hypothèse d'une quasi-nullité des coûts de diffusion revient à confondre les coûts de duplication et les coûts d'exploitation des résultats de la R&D : (...) ce qui équivaut à admettre que toute connaissance disponible est une connaissance immédiatement utilisable par la firme. Or de nombreux travaux permettent d'affirmer que cette vision est erronée et qu'elle révèle une représentation non pertinente des processus de création technologique ». (7)

### 1.3.2. La part des connaissances tacites

Une grande part de la connaissance mobilisée pour la mise en œuvre et l'amélioration des technologies de produit et de procédé est tacite (notion avancée par Hayek, déjà en 1945), c'est-à-dire qu'elle n'est pas aisément transmissible par l'intermédiaire d'une publication, d'un manuel d'opération ou même via les compétences d'un ingénieur isolé.

---

(3) Arrow K., *Economic welfare and the allocations of resources for invention*, in Nelson ed., *The rate and direction of inventive activity*, Princeton, Princeton University Press, 1962.

(4) Foray D. et Mowery D., *L'intégration de la R&D industrielle : nouvelles perspectives d'analyse*, dans *Revue économique*, n°3, mai 1990, pp.501-530.

(5) cités par Foray et Mowery, op.cit.

(6) Dasgupta P. and Stiglitz J., *Industrial structure and the nature of innovation activity*, in *The Economic Journal*, 1980, p. 90.

(7) Foray D. et Mowery D., op.cit.

Ce caractère essentiellement tacite des connaissances techniques provient de ce que celles-ci sont fortement spécifiées par le lieu et les conditions de mise en œuvre et qu'elles se développent en interaction avec la R&D ainsi qu'avec d'autres fonctions, dans le cadre d'une firme déterminée.

On voit donc que la diffusion de l'innovation dépasse le cadre du marché mais que cette diffusion représente un coût à ne pas négliger. Il faut une capacité d'apprentissage dans le chef des entreprises qui veulent bénéficier des retombées de ces effets externes.

### 1.3.3. L'avantage relatif d'une innovation

Dans le cadre d'un mémoire ESST, T. Kjørboe soutient l'idée que les technologies propres seraient plus lentes à se diffuser que d'autres technologies (8). A partir des travaux d'Everett Rogers, elle a tenté d'expliquer les raisons de ce rythme plus lent de diffusion.

Pour Rogers (1995, cité par Kjørboe), dans un processus de diffusion, deux aspects sont fondamentaux : l'intervention d'agents de changement et les caractéristiques que présentent l'innovation aux yeux de l'adopteur.

Le rôle de l'agent de changement est multiple auprès des adopteurs potentiels : prendre contact, convaincre, accompagner, percevoir leurs besoins, manifester de l'empathie. Quant aux caractéristiques que l'innovation doit présenter pour ces adopteurs, Rogers souligne l'importance de celles-ci :

- avantage relatif
- compatibilité
- niveau de complexité
- recours à des démonstrations
- essais possibles

La question de l'avantage relatif est manifestement centrale en ce qui concerne les technologies propres, qui sont des technologies préventives destinées à éviter des futurs problèmes et dont le coût est généralement plus élevé que celui des technologies de remédiation. Leur avantage est difficile à percevoir aujourd'hui et Rogers recommande d'augmenter l'avantage relatif des innovations préventives par le jeu d'incitants positifs (subsidés) ou négatifs (taxes).

On se trouve à nouveau confronté au problème de l'écart entre le rendement privé et le rendement social, non plus seulement à propos d'investissements en R&D mais de façon plus générale en matière d'investissements immatériels liés à l'innovation. Cet écart est aggravé lorsque l'horizon temporel s'éloigne.

« Les agents intéressés par leur bénéfice privé contribuent certes à la production d'externalités de longue portée, mais leur apport ne peut être qu'accessoire. Il revient pour l'essentiel à la puissance publique de poursuivre cet objectif et d'assurer ainsi une redistribution intergénérationnelle des ressources en matière de recherche. L'adoption d'une démarche de type « croissance soutenable » telle qu'elle peut être appliquée en matière d'environnement peut être utile pour traiter des problèmes d'allocation des

---

(8) Kjørboe T., *Preventing prevention : why are cleaner technologies difficult to diffuse*, ESST Master Thesis, Roskilde / Namur, 1997.

ressources auxquelles la puissance publique est ainsi confrontée. Elle peut contribuer à éviter la tentation d'opportunisme dans les décisions, puisque les générations anciennes ne peuvent plus revenir sur leur legs et les générations futures ne peuvent pas protester contre notre refus éventuel de contribuer à leur bien-être. (...). Le principe des analyses en termes de coûts et bénéfiques est de donner des valeurs présentes à des bénéfiques lointains. Or, celles-ci sont extrêmement dépendantes du taux d'actualisation et seront toujours faibles même pour un taux d'actualisation très peu élevé » (9).

#### 1.3.4. Adopter une innovation, c'est l'adapter

Si les arguments de Rogers présentent beaucoup d'intérêt, car ils soulignent le rôle-clé des porte-parole dans la diffusion des innovations, il nous semble qu'ils ne remettent pas en cause le fait qu'un produit lancé sur le marché finit, en vertu de ses qualités propres par se répandre à travers la société par effet de démonstration.

« Face à une innovation comme la coulée continue, le premier réflexe est de recenser ses avantages et ses inconvénients: économie de matière première, augmentation de la productivité, amélioration de la qualité des produits... Ce sont les qualités intrinsèques qui servent ensuite à expliquer la plus ou moins grande vitesse de diffusion de l'innovation. Celle-ci, comme dans un phénomène épidémiologique, convainc de plus en plus d'utilisateurs potentiels. D'où ces courbes logistiques bien connues qui illustrent la propagation des innovations. En dépit de leur popularité, de tels modèles n'ont qu'un lointain rapport avec la réalité » (10).

« Pour comprendre le succès ou l'échec, c'est-à-dire la diffusion et ses péripéties, il faut accepter de reconnaître qu'un objet n'est repris que s'il parvient à intéresser des acteurs de plus en plus nombreux. Des décisions qui creusent l'écart entre les propriétés de l'objet, doté d'une cohérence qui lui est propre, et les propriétés de l'environnement social (utilisateurs, distributeurs, réparateurs...) multiplient les obstacles sur le chemin que suit l'innovation. Faire comme si le contexte socio-économique était connu une fois pour toutes, le produit pouvant être défini une fois pour toutes en dehors de toute interaction avec lui, est contraire à tout ce que nous savons de l'innovation. Celle-ci est perpétuellement en quête d'alliés. Elle doit s'intégrer dans un *réseau d'acteurs qui la reprennent, la soutiennent, la déplacent* » (11).

Cette longue citation de Akrich, Callon et Latour met en lumière le phénomène de l'ajustement progressif de l'innovation, qui évolue tout au cours de son adoption. Reprenant une étude menée sur la diffusion de la coulée continue, ces auteurs signalent que la diffusion de la coulée continue s'est avérée particulièrement lente aux USA parce que ses avantages supposés (économies d'investissement, d'espace, de main d'œuvre, meilleur rendement de la matière, valorisation des laminoirs) ne valent pas uniformément et dans certains cas se retournent contre elle. Chaque site industriel constitue un cas particulier et l'intérêt de la coulée continue varie de l'un à l'autre. La coulée continue n'existe pas en général. Elle doit être modifiée en fonction du site où elle est mise en

(9) Cohendet P., Foray D., Guellec D., Mairesse J., *La gestion publique des externalités positives de recherche*, dans Foray D. et Mairesse J. (sous la dir.), *Innovations et performances, approches interdisciplinaires*, Ed. EHESS, Paris, 1999.

(10) Akrich M., Callon M., Latour B., *L'art de l'intéressement*, in Vinck D.(coord.), *Gestion de la recherche, nouveaux problèmes, nouveaux outils*, De Boeck, Bruxelles, 1991, p.47.

(11) *ibid.*, p. 49.

oeuvre. Sans cette adaptation, c'est son adoption qui est tout simplement compromise. Il a fallu le travail des chercheurs dans les labos, mais aussi d'ingénieurs, de contremaîtres et d'ouvriers qui, usine après usine, l'adaptent aux conditions particulières des sites concernés. C'est la dimension collective de l'innovation qui est ainsi reconnue.

### 1.3.5. Le profil des adopteurs

Plus d'un auteur s'est penché sur le profil des adopteurs. Ainsi, Rogers distingue les innovateurs, les adopteurs précoces, la majorité prudente, l'arrière-garde retardataire. Cette distinction a été reformulée par T. Kjørboe (12) dans le cas des technologies propres :

**Tableau 1**  
**Typologie des attitudes des entreprises**  
**à l'égard des technologies propres**

	<b>Interactive:</b> <i>les innovateurs</i>	<b>Pro-active:</b> <i>les premiers adoptants</i>	<b>Réactive:</b> <i>les suivistes et les prudents</i>	<b>Contre-active:</b> <i>les lambins</i>
<i>Attitude à l'égard de l'environnement</i>	"Nous fixons l'agenda"	"Nous sommes en tête"	"Nous nous adaptions"	"Nous n'avons pas de problème"
<i>Attitude à l'égard de la réglementation</i>	Implication dans la conception	Anticipation	Mise en conformité	Résistance
<i>Critère de compétitivité</i>	Crédibilité, originalité	Innovation	Productivité	Coûts
<i>Place de l'éco-management</i>	Rôle moteur	Fonction importante	En cas de besoin	Pas nécessaire
<i>Intégration de la fonction "technologies propres"</i>	Dans la conception des procédés et des produits	En coordination avec les autres départements	Fonction séparée	Aucune
<i>Engagement financier</i>	Ligne de crédit ouverte	Provisionné en suffisance	Budgété en cas de problème	Minimal
<i>Performances recherchées</i>	Gérer l'objectif environnemental	Minimiser les impacts écologiques	Résoudre les problèmes écologiques	Rien de particulier

Source: T. Kjørboe, 1997.

(12) Kjørboe T., Valenduc G., *La diffusion des technologies environnementales*, dans *La Lettre EMERIT*, n° 17, novembre 1997.

D'une manière générale, la taille des entreprises, le taux de croissance de l'industrie concernée, la qualité du management ainsi que les caractéristiques perçues (avantage relatif et coûts d'installation) sont autant d'éléments qui détermineront le profil innovant de l'entreprise, l'appartenance à l'une ou l'autre de ces catégories. Les barrières à franchir peuvent être d'ordre très divers : barrières conceptuelles, barrières organisationnelles, barrières de connaissances, barrières technologiques et bien sûr barrières financières. L'aptitude des entreprises à surmonter ces barrières est assurément inégale.

## 2. Le statut de l'innovation technologique dans les théories du développement durable

Le rôle dévolu à l'innovation technologique dans les différentes théories du développement durable est une question épistémologique, qui dépend essentiellement de la représentation que construit chaque théorie de la croissance, du développement, de l'environnement et des rapports entre l'homme, la nature et la société (13). Deux grands courants de pensée sont traités dans cette section : d'une part les théories économiques du développement durable, d'autre part l'approche écosystémique du développement durable.

### 2.1. Les théories économiques du développement durable

La notion de développement durable interpelle directement les théories de la croissance économique et du développement. Pour les théories économiques, le problème de base n'est pas posé en termes de limites écologiques objectives. La plupart des théories économiques tiennent à se détacher d'un "néo-malthusianisme écologique", qui consisterait à réhabiliter le slogan "halte à la croissance", avancé par le Club de Rome et son célèbre rapport Meadows en 1972. La théorie économique considère l'environnement non pas comme une *limite*, mais comme une *contrainte*. Ce qui change aujourd'hui, c'est que cette contrainte acquiert un caractère structurel plutôt que conjoncturel. A cause de cette contrainte, le mode et le rythme de la croissance actuelle ne sont plus viables à long terme. Le développement durable doit donc être synonyme de *croissance viable*.

#### 2.1.1. Le principe de "soutenabilité faible" (*weak sustainability*)

Selon ce principe, le capital naturel et le capital construit (c'est-à-dire le capital fabriqué et accumulé par les activités humaines) peuvent être substitués l'un à l'autre de manière quasi parfaite. David Pearce est un des défenseurs les plus connus de cette thèse.

La soutenabilité faible se définit par la règle selon laquelle la somme du capital naturel et du capital construit doit être maintenue constante. Elle permet que du capital naturel soit remplacé par du capital construit, pourvu que le stock total ne diminue pas. Cette notion repose sur la conviction que l'on peut donner une valeur monétaire aux ressources naturelles et aux services rendus à l'homme par l'environnement. De même, il faut pouvoir mesurer le gaspillage ou la détérioration du capital naturel en termes monétaires. Le capital naturel peut être dépensé, mais il peut aussi être épargné. De plus, l'évaluation

---

(13) Valenduc G., Vendramin P., *Science, technological innovation and sustainable development*, in the Proceedings of the Conference "Science for a Sustainable Society", Roskilde (DK), Oct. 1997.

monétaire doit pouvoir faire l'objet d'une actualisation, au sens économique du terme, c'est-à-dire qu'il doit être possible d'estimer la valeur actuelle d'une ressource ou d'une détérioration future, et inversement.

Des méthodes ont été élaborées pour sélectionner des indicateurs économiques susceptibles de mesurer le processus de soutenabilité faible et construire des comparaisons internationales du degré de soutenabilité de différentes économies (14).

Le principe de soutenabilité faible ne s'écarte guère des théories économiques classiques ou néoclassiques. Il y introduit simplement une nouvelle composante au capital : le capital naturel. Mais, à l'instar des autres facteurs de production (capital financier, capital matériel, travail, technologie), cette nouvelle composante du capital peut entrer dans une grande variété de combinaisons et de substitutions, à la seule condition que le stock total de capital (y compris le capital naturel) reste au moins constant.

Dans cette optique, le progrès technologique est censé générer en permanence des solutions techniques concrètes aux défis environnementaux posés par l'accroissement de la production de biens et de services. Les mécanismes du marché finissent par rendre rentables le développement et la diffusion de "technologies de la dernière chance" (back-stop technologies), même si celles-ci sont restées longtemps sous le seuil de rentabilité, comme c'est le cas de l'énergie solaire (15).

### **2.1.2. Le principe de "soutenabilité forte" (*strong sustainability*)**

Selon ce principe, le capital naturel et le capital construit ne peuvent pas être substitués l'un à l'autre de manière parfaite. Il existe un seuil de "capital naturel critique" au-delà duquel le capital naturel doit être préservé. Le capital naturel permet en effet de fournir à l'homme et à la société des biens et des services qui ne sont pas remplaçables par le capital construit. Hernan Daly et Nicholas Georgescu-Roegen sont parmi les fondateurs de ce courant d'analyse.

Le processus de substitution entre capital naturel et capital construit rencontre certaines limites, que l'on peut énoncer de la manière suivante (16) :

- les ressources naturelles ne peuvent pas être utilisées ou dégradées à un rythme tel que leur disponibilité vienne à se raréfier de manière significative pour les générations futures ;
- les déchets de l'activité humaine ne peuvent pas s'accumuler dans des quantités qui pourraient compromettre le bon usage futur de la biosphère ;
- la diversité biologique ne peut pas se réduire d'une manière qui puisse menacer la variété de la vie non humaine, ni restreindre les usages futurs de la biosphère par les êtres humains ;

---

(14) Pearce D., Atkinson, G., *Capital theory and measurement of sustainable development, an indicator of weak sustainability*, in *Ecological Economics*, n°8, 1993.

(15) Faucheux S., Nicolai I., *Les firmes face au développement soutenable : changement technologique et gouvernance au sein de la dynamique industrielle*, dans la *Revue d'économie industrielle*, n°83, 1998 (p.130).

(16) Van Hauwermeiren S., *Manual de Economía Ecológica*, Instituto de Ecología Política, Santiago de Chile, 1998 (p. 101).

- les modèles existants de croissance et de développement ne peuvent pas continuer à produire des biens et des services qui n'ont pas d'utilité sur le plan social et humain, ni à entretenir des situations inéquitables entre les pays développés et les autres, pas plus qu'à l'intérieur des nations.

Les critères de soutenabilité forte visent d'une part à déterminer la capacité de la biosphère à assurer le développement économique tout en préservant ses fonctions de support de la vie humaine et non humaine, d'autre part à maintenir le niveau de capital naturel critique.

Dans l'optique de la soutenabilité forte, les limites imposées à l'utilisation du capital naturel entraînent une forte demande pour des technologies de réduction des inputs matériels et énergétiques. Cette solution est souvent qualifiée de "dématérialisation" de l'économie (17) (18). Elle repose sur le principe suivant : afin de limiter la dégradation qualitative et quantitative du capital naturel, il faut faire porter l'effort d'innovation sur la maîtrise des inputs, c'est-à-dire limiter les quantités de matière et d'énergie extraites de la biosphère, puis utilisées et transformées au cours de la production et finalement déposées et émises dans la nature. On utilise aussi le terme "éco-efficience". La contribution du changement technologique est fondamentale dans cette perspective.

### 2.1.3. De l'économie de l'environnement à l'économie écologique

Richard Norgaard, président de la Société Internationale d'Economie Ecologique (ISEE), définit ainsi les objectifs de l'économie écologique : « Fournir un cadre conceptuel et des outils opérationnels pour une répartition équitable des ressources et des droits de propriété entre les hommes d'aujourd'hui, entre les générations actuelles et les générations futures, entre l'espèce humaine et les autres espèces » (19). Il y a dix ans que l'économie écologique a commencé à s'organiser comme un domaine de recherche à part entière, notamment sous l'égide de la revue scientifique *Ecological Economics*.

Dans l'éditorial du premier numéro de *Ecological Economics*, son fondateur, Robert Costanza, dressait le constat suivant: « Les relations entre les écosystèmes et les systèmes économiques ne sont pas bien couvertes par les disciplines scientifiques existantes. L'économie de l'environnement et des ressources naturelles, telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui, consiste surtout en une application de l'économie néoclassique aux problèmes environnementaux. L'écologie, telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui, traite parfois des impacts humains sur les écosystèmes, mais sa tendance naturelle est de se replier sur la nature. L'économie écologique vise à rapprocher ces deux démarches et à favoriser une nouvelle conception des liens entre systèmes économiques et écosystèmes » (20).

---

(17) Von Weizsäcker E.U., *Sustainable growth with a new generation of technologies*, contribution à la conférence *Développement durable : les chaînons manquants entre la politique et la mise en œuvre économique*, Fondation Roi Baudouin, Bruxelles, octobre 1996.

(18) Von Weizsäcker E.U., Lovins A.B., Lovins L.H., *Facteur 4 : deux fois plus de bien-être en consommant deux fois moins de ressources*, Rapport au Club de Rome, 1997.

(19) Masood E., *L'économie écologique, nouvelle discipline née d'un choc culturel*, dans *Le Monde – Economie*, 9/10/1998.

(20) *Ecological Economics*, Tenth Anniversary Issues, vol. 28/1-28/2, Elsevier, 1999.

L'économie écologique se distingue de l'économie de l'environnement. Celle-ci utilise les concepts et les instruments de l'économie néoclassique pour traiter des "externalités" environnementales. Pour rappel, on appelle externalités tous les effets positifs ou négatifs d'une activité économique, qui ne sont pas comptabilisés dans les prix de marché. Les travaux des économistes de l'environnement visent à "internaliser" les externalités environnementales, à travers des nouveaux mécanismes de fixation des prix et des taxes. Ils s'occupent également de l'allocation optimale des ressources non renouvelables d'une génération à l'autre. Ceci les conduit à donner une valeur marchande à la nature et à l'environnement. Les travaux fondateurs de ce courant d'analyse économique sont déjà anciens et comportent quelques noms connus depuis longtemps parmi les économistes : Pigou, Coase, Pareto.

L'économie écologique conteste le primat des théories néoclassiques et le postulat selon lequel le capital naturel peut être indéfiniment remplacé par du capital créé par l'homme. Elle propose de nouvelles règles pour l'utilisation du capital naturel :

- utiliser les ressources renouvelables (eau, sols, forêts, pêche, biomasse) à un rythme qui ne doit pas dépasser leur capacité de régénération ;
- utiliser les ressources non renouvelables (pétrole, charbon, matières premières) à un rythme qui ne dépasse pas celui de leur substitution par des ressources renouvelables ;
- limiter les quantités de déchets à la capacité d'absorption ou de recyclage des écosystèmes et de l'industrie ;
- conserver la diversité biologique.

Elle considère que la viabilité écologique de l'économie est plus importante que la croissance économique, car celle-ci repose sur une notion de valeur économique qui sous-estime la rareté et l'épuisement de l'environnement, à court et long terme.

Un des thèmes de recherche principaux consiste à réfuter les hypothèses de base de l'économie néoclassique. Certains travaux s'attachent à la notion de « valeur » des écosystèmes et au phénomène de dépréciation et de régénération du capital naturel. D'autres travaux s'intéressent aux paradoxes de la notion de croissance du produit intérieur brut (PIB). Celui-ci inclut de plus en plus de dépenses défensives en faveur du cadre de vie, si bien que la croissance doit être toujours plus forte pour dégager les moyens de protéger la population contre les dégâts causés par la croissance elle-même.

Mais l'économie écologique ne se borne pas à croiser le fer avec l'économie traditionnelle :

- elle propose des méthodes alternatives pour mesurer la croissance (PIB écologique) et pour intégrer l'environnement et les ressources naturelles dans la comptabilité nationale (comptes satellites de l'environnement, comptes du patrimoine naturel) ;
- elle propose également de nouveaux indices macro-économiques, comme l'indice de bien-être économique soutenable de Daly & Cobb (*ISEW, indice of sustainable economic welfare*) ;
- elle développe aussi des concepts nouveaux, qui mêlent des notions d'économie et d'écologie. L'empreinte écologique (*ecological footprint*) évalue le territoire nécessaire pour produire les ressources et assimiler les déchets nécessaires au maintien de l'activité et du niveau de vie d'une population donnée. A titre d'exemple, l'empreinte de la Belgique vaut 14 fois la superficie de son territoire, celle de la France et de

l'Autriche 2.5 fois. Le concept voisin de capacité de sustentation (*carrying capacity*) évalue, quant à lui, les limites à la croissance économique pour un écosystème particulier (21).

#### 2.1.4. La notion de croissance qualitative

La croissance qualitative est le processus par lequel la productivité par unité de ressource augmente continuellement avec le bien être économique. Cette définition fait référence d'une part, à une croissance future, ou du moins à une stabilité des performances de l'économie et du bien-être et d'autre part à une diminution de l'utilisation des ressources non renouvelables et une diminution des dommages sur l'environnement. Ce type de croissance est donc caractérisé par une augmentation des services, une diminution des dommages environnementaux et une utilisation des ressources renouvelables qui peuvent, soit être régénérées, soit être remplacées par des ressources artificielles. Naguère utopique, ce type de croissance est envisageable aujourd'hui, car le niveau des connaissances et les services immatériels peuvent se substituer aux ressources matérielles, à l'énergie, au travail manuel.

L'Académie de Technology Assessment de Stuttgart a développé cette notion de croissance qualitative en lien avec les programmes de développement technologique. Selon ses travaux, trois stades peuvent être distingués dans la mise en place d'un tel mode de croissance (22) :

- Dans un premier stade, la croissance qualitative signifie une diminution continue des ressources utilisées par unité de produit national domestique. Ainsi, chaque produit doit utiliser moins de ressources qu'auparavant.
- Dans un deuxième stade, la croissance qualitative signifie une diminution continue en ressources per capita. En d'autres termes, les effets résultant d'une meilleure utilisation de l'environnement doivent être plus importants que toute utilisation des ressources provenant d'une augmentation de la production ou de la consommation.
- Dans un troisième stade, la croissance qualitative signifie une décroissance des ressources utilisées par l'économie nationale. Cette étape est la même que la deuxième, l'utilisation absolue des ressources doit diminuer, mais, en plus, elle tient compte de l'augmentation de la population. Ainsi, les changements de la structure économique ne doivent pas uniquement compenser un accroissement de la consommation individuelle, mais elle doit également compenser l'augmentation de la demande collective résultant de la croissance de la population.

Cette définition de la croissance qualitative n'est pas utopique, car l'histoire des technologies est remplie d'exemples dans lesquels l'innovation a permis de trouver des substituts à des éléments peu abondants. L'innovation peut donc, via de nouveaux produits ou de nouveaux modes de gestion des activités économiques, remplacer des matériaux et de l'énergie.

---

(21) Van Hauwermeiren S., op.cit., chap. 3 et 4.

(22) Renn O., Goble R., Kastenholtz H., How to apply the concept of sustainability to a region, in *Technological forecasting and social change*, North Holland, n°58, 1998.

## 2.2. L'approche "écosystémique" du développement durable

Cette conception du développement durable peut être résumée comme suit. Il y a aujourd'hui une série de grands défis écologiques à l'échelle planétaire; leur caractère global est nouveau et implique un changement de perspective. C'est la survie des écosystèmes qui est en cause, car le mode de développement actuel nous rapproche des "limites objectives" de la capacité de sustentation de la Terre (ressources naturelles, population, niveau de vie). Le développement durable vise à rétablir et entretenir à long terme cette capacité de sustentation.

Il existe des variantes à l'intérieur de cette approche écosystémique ; on peut opposer grosso modo une variante *naturaliste*, une variante *progressiste* et une variante *techniciste*.

1. Dans la variante *naturaliste*, l'homme n'est qu'un élément de la biosphère. L'environnement est hérité des générations précédentes et emprunté aux générations futures. Il faut préserver la nature comme une valeur en soi. Une formulation typique de cette variante est l'hypothèse Gaia (la Terre en tant qu'être vivant), qui a déjà donné lieu à une abondante littérature (23).
2. Dans la variante *progressiste*, la biosphère est considérée comme le résultat des interactions entre l'homme et la nature. L'environnement n'est pas donné, il est construit. C'est une notion dynamique, qui évolue avec le progrès technique et le progrès social. Cependant, cette dynamique bute aujourd'hui sur des "limites objectives". Les notions de répartition, de justice et d'équité doivent être intégrées dans le modèle de relations entre l'homme et la biosphère.
3. La variante *techniciste* se réfère à la thermodynamique et au principe d'entropie (tendance universelle à la dégradation de l'énergie et de la matière). Elle identifie l'accroissement de l'entropie à un gaspillage des ressources, qu'il convient de limiter au mieux des contraintes physico-chimiques. Pour limiter le gaspillage et la pollution, il faut une nouvelle logique de l'innovation technologique (24).

La conception du développement durable relève ici d'une approche pragmatique, qui ne privilégie pas la dimension globale et mondiale mais s'attache à trouver des solutions nouvelles, de type "*problem-oriented*", dans lesquelles la technologie joue un rôle moteur. Les principes sont :

- "boucler" les cycles de vie pour minimiser l'usage des ressources et limiter les émissions;
- "enchaîner" les cycles de vie (output d'un système = input d'un autre);
- limiter l'accroissement de l'entropie (augmenter les rendements énergétiques et la productivité des ressources).

L'approche techniciste introduit dans la problématique du développement durable quelques concepts qui sont peu présents dans les autres approches :

- le concept de transfert de technologies;

---

(23) Deléage J-P., *Une histoire de l'écologie*, Points/Sciences, Editions du Seuil, Paris, 1994 (chapitres 9 et 10).

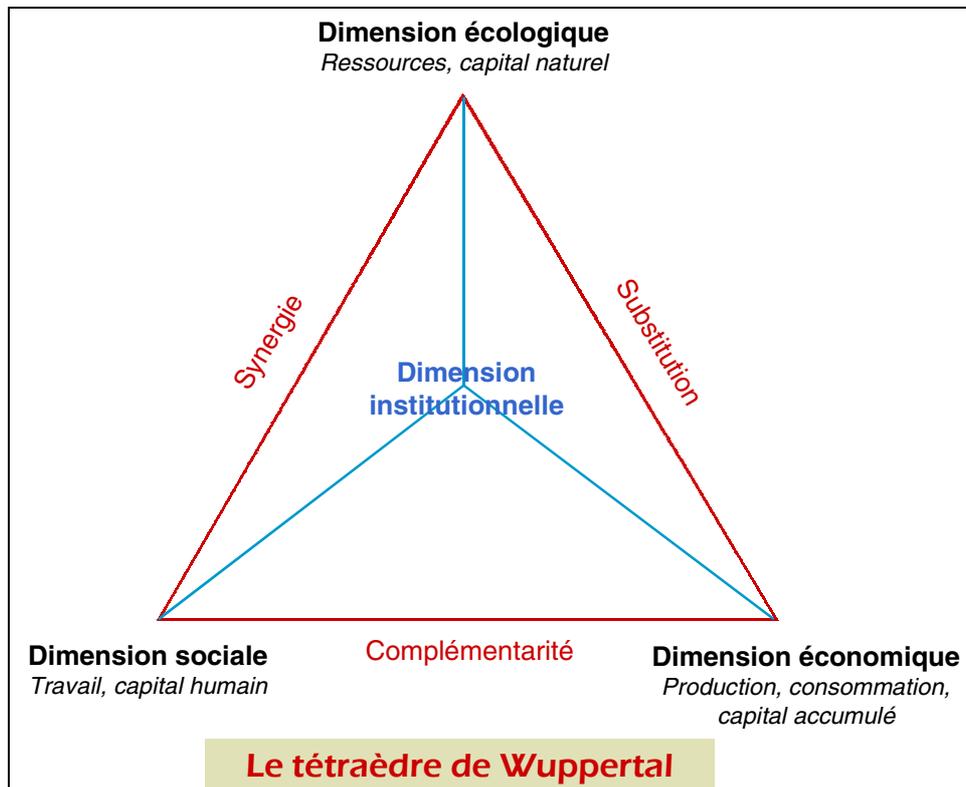
(24) Vivien F-D., *Economie et écologie*, Repères, Ed. La Découverte, Paris, 1994 (chapitre IV).

- le concept de cycle de vie;
- le concept de filière technologique ou de filière de produits.

L'approche écosystémique donne une grande importance à la R&D dans les sciences naturelles et la technologie, qui est amenée à jouer un rôle moteur dans l'identification des paramètres des changements globaux et dans la sélection des options possibles pour un développement durable. La plupart des autres sciences, notamment les sciences humaines, sont "instrumentalisées", dans la mesure où leur rôle consiste à fournir des moyens pour concrétiser les choix : instruments économiques, cadres juridiques, conditions de diffusion des innovations, conditions d'acceptabilité sociale des changements, etc.

### 2.3. Le rôle nécessaire, mais non suffisant, de l'innovation technologique

Le schéma ci-dessous, emprunté à l'Institut de Wuppertal (25) et fréquemment cité dans les travaux de la CSD (Commission du développement durable, chargée du suivi de l'Agenda 21), représente les quatre dimensions clés du développement durable.



Ce schéma permet de situer, selon ses auteurs, la contribution de l'innovation technologique :

- Dans les relations entre la dimension économique et la dimension écologique, l'innovation technologique permet d'une part la substitution du capital naturel par du

(25) Spannenberg J., Bonniot O., *Sustainability indicators, a compass on the road towards sustainability*, Wuppertal Paper n°81, February 1998.

capital construit et accumulé, d'autre part la réduction de la ponction sur le capital naturel à travers une augmentation de l'éco-efficience des procédés et des produits.

- Dans les relations entre la dimension sociale et la dimension économique, l'innovation technologique permet d'organiser une meilleure complémentarité entre le capital humain et le capital matériel et financier, de manière à corriger les sources d'exclusion sociale qui sont à la racine d'un développement non durable.
- Dans les relations entre la dimension sociale et la dimension écologique, il s'agit de transformer les modes de consommation et les modes de vie (notamment en matière de transport et d'habitat) de manière à ce que l'accroissement de la qualité de la vie entre en synergie avec la préservation du capital naturel.

Selon ce schéma, c'est la dimension institutionnelle qui permet au modèle d'être cohérent. Par rapport à l'innovation technologique, cela veut dire que ce n'est pas tellement la technologie en tant que telle qui est le centre d'intérêt, mais bien son institutionnalisation dans des systèmes de diffusion des innovations et d'organisation de la R&D. Réduite à son seul aspect de substitution entre le capital naturel et le capital construit, la technologie n'est pas en soi un facteur de développement durable.

Certains travaux théoriques tentent d'approfondir les implications pour l'innovation technologique des deux grandes thèses sur la soutenabilité "faible" ou "forte" (26) :

- dans l'optique de la soutenabilité forte, l'essentiel de l'effort d'innovation doit porter sur la "dématérialisation" de l'économie ;
- dans l'optique de la soutenabilité faible, l'essentiel de l'effort d'innovation doit viser à reculer les limites de la substitution du capital naturel par le capital construit.

Bien que ces deux thèses soient discutées et opposées dans la plupart des références théoriques sur les modèles de développement durable, leurs implications concrètes pour les politiques d'innovation sont moins distinctes qu'il n'y paraît.

### **3. La nature de l'innovation technologique favorable au développement durable**

---

L'innovation technologique présente un caractère ambivalent : alors que la technologie peut être considérée, sous certains aspects, comme une des causes du développement non durable, elle est en même temps investie d'un rôle important dans la recherche de solutions concrètes pour le développement durable. Dans cette section, on s'attachera uniquement à ce dernier aspect. Il ne s'agit cependant pas d'un effet de naïveté ou de myopie face aux "dégâts du progrès".

---

(26) Kyriakou D., *Sustainable development : towards a synthesis*, IPTS Technical Report Series, Joint Research Centre, European Commission, Sevilla, 1995.

### 3.1. Technologies additives ou technologies intégrées ?

Les technologies additives sont des dispositifs qui sont ajoutés aux procédés ou aux produits existants, de manière à réduire les dommages environnementaux liés à la production ou à la consommation. Cette acception est celle du Bureau d'évaluation des choix technologiques du Parlement fédéral allemand (27) ; le terme anglais correspondant est *add-on technology* (28). Le concept de technologie additive est plus large que celui de *end-of-pipe technology*, qu'on trouve fréquemment dans la littérature; en effet, il englobe également des technologies de mesure et de contrôle, de prévention des risques, de réduction des déperditions énergétiques. Les technologies additives ne requièrent pas toujours un effort significatif de recherche et développement. Elles peuvent aussi provenir de combinaisons astucieuses de techniques existantes.

Dans le cas des technologies intégrées, les caractéristiques environnementales sont incorporées dans la conception même du procédé ou du produit. Les technologies propres sont des technologies intégrées, mais elles ne sont pas les seules. Appartiennent également à cette catégorie les systèmes dont l'efficacité augmente en réduisant les inputs en énergie et en matières premières, les procédés qui comportent un "recyclage interne" de leurs effluents ou sous-produits, les procédures de substitution de substances nocives dans les produits ou dans les procédés, la conception de produits réutilisables, recyclables ou démontables, l'amélioration de la "qualité totale" conduisant à une durée de vie plus longue et une réparation plus facile des produits, etc. Les technologies intégrées nécessitent un effort de recherche et développement; elles recourent également à de nouvelles méthodes de conception, comme l'analyse du cycle de vie (LCA ou écobilan) ou l'analyse de filière de produit.

Dans un sens, les technologies intégrées rendent inutiles les technologies additives, alors que celles-ci constituent parfois des marchés rentables. Elles peuvent donc être rivales: ainsi, le pot catalytique, destiné à réduire les émissions d'oxyde d'azote des voitures, est une technologie additive qui handicape le développement de moteurs radicalement moins énergivores et moins polluants. Cependant, si on considère l'ensemble de l'industrie et de l'économie, les technologies additives et intégrées ne sont pas exclusives, mais complémentaires, surtout à court terme.

Le tableau 2 (page suivante) compare les principales caractéristiques des technologies additives et des technologies intégrées. Il appelle quelques commentaires.

Dans l'industrie, les technologies additives augmentent les coûts de production, sans accroître l'output de manière significative, sinon peut-être en qualité. La productivité décroît légèrement. La compétitivité est-elle menacée ? Des études menées en Allemagne montrent que les investissements en technologies additives ne modifient pas sensiblement la position compétitive sur les marchés internationaux, car ils pèsent peu dans l'ensemble des facteurs qui affectent la compétitivité, notamment les facteurs financiers (taux d'intérêt et taux de change) et le coût du travail.

---

(27) Coenen R., Klein-Vielhauer S., Meyer R., *Integrierte Umwelttechnik und wirtschaftliche entwicklung*, Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Arbeitsbericht n°35, Nov. 1995.

(28) Sorup P., *The role of technology in sustainable development*, in the Proceedings of the conference of the Spanish presidency of the European Union on Research, Technology and Employment, El Escorial, 1995.

**Tableau 2**  
**Comparaison des technologies additives et intégrées**

	Technologies additives	Technologies intégrées
Productivité globale	Réduction de la productivité	Potentiel d'accroissement de la productivité
Coûts de production	Plus élevés	Potentiel de diminution des coûts
Charge d'investissement	Faible	Elevée
Augmentation des coûts fixes	Généralement non	Possible
Coûts d'accès et coûts d'information	Faibles	Elevés
Coûts d'adaptation ou de reconversion	Faibles	Elevés
Compatibilité dans l'entreprise	Elevée	Faible
Risque économique	Faible	Elevé
Position sur le marché des technologies environnementales	Très bonne	Potentiellement très bonne
Compétitivité internationale	Tendance à l'affaiblissement	Avantages compétitifs potentiels dans le futur

Source: Coenen R. & al., op. cit, p. 37.

A l'inverse, les technologies intégrées peuvent contribuer à la réduction des coûts de production et à l'augmentation de la productivité. Plus économes en ressources, plus fiables et plus modernes, elles entraînent à la fois une meilleure productivité du capital et du travail. Elles améliorent globalement la position concurrentielle sur les marchés internationaux, indépendamment des autres facteurs de compétitivité. L'avantage compétitif sera d'autant plus grand que les réglementations environnementales prennent de l'importance.

Mais les différences essentielles entre technologies additives et technologies intégrées ne se situent pas au niveau de la productivité et de la compétitivité. Les technologies intégrées représentent une charge d'investissement beaucoup plus lourde, assortie d'un risque économique plus élevé. Les coûts d'information et d'accès sont élevés, surtout pour les petites et moyennes entreprises. Les coûts d'adaptation ou de reconversion des installations ou des méthodes existantes sont également importants.

En conséquence, le choix individuel de l'entrepreneur est plus difficile pour les technologies intégrées que pour les technologies additives. Par contre, les technologies intégrées se prêtent bien à des programmes concertés de modernisation technologique et industrielle, soutenus par les pouvoirs publics.

Comme le notent Faucheux et Nicolai (29), « Dans ces conditions, on serait tenté de conclure que les technologies intégrées sont pleinement en mesure de susciter un changement structurel écologique permettant un découplage entre la croissance économique et les facteurs nuisibles à l'environnement, favorisant ainsi une trajectoire de développement soutenable ».

### **3.2. Innovations incrémentales ou innovations radicales ?**

Dans un ouvrage publié avant le début de cette étude (30), nous proposons une autre distinction utile pour les technologies au service du développement durable : la distinction entre innovation incrémentale et innovation radicale.

Les innovations *incrémentales* sont des perfectionnements apportés aux produits ou aux techniques de production, de manière à améliorer la qualité, la productivité, la diversité. Les innovations incrémentales surviennent de manière continue au fil de l'histoire des techniques. Elles n'apportent pas de bouleversement important, mais sont essentielles pour expliquer les gains de productivité, les conquêtes de parts de marché, les effets de mode. Les innovations *radicales*, par contre, constituent des ruptures dans l'évolution des procédés ou des produits, impliquant une transformation des méthodes de production ou de commercialisation, ainsi qu'une évolution des qualifications professionnelles. Elles ne surviennent pas de manière continue dans le temps. La convergence de nombreuses innovations radicales, corrélées entre elles, peut donner naissance à un *nouveau système technique*.

Par rapport aux technologies de l'environnement, cette typologie laisse perplexe. En effet, la plupart des technologies additives et des technologies intégrées appartiennent à la catégorie des innovations incrémentales. Il suffit d'observer, dans leur description, la fréquence des termes tels que amélioration, réduction, substitution, etc. Est-ce à dire que, faute d'innovations radicales, les technologies de l'environnement n'ont pas la vocation de devenir un nouveau système technique ? Faut-il donc en déduire qu'elles ne peuvent pas être un facteur décisif de relance économique ?

Faucheux et Nicolai ont repris plus récemment notre argumentation et, en se référant aux exemples cités par la FTU, l'ont assortie des commentaires suivants : « Il existe pourtant des innovations radicales répondant à des objectifs de développement durable. La chimie sans chlore, les biocarburants, l'énergie photovoltaïque en constituent des exemples. En d'autres termes, les ruptures radicales dans les technologies de l'environnement proviendraient des progrès réalisés au sein d'autres systèmes techniques (la chimie de synthèse, les nouveaux matériaux, les biotechnologies, la microélectronique, etc.), en raison, notamment de l'insuffisance des efforts de R&D dans le champ des technologies environnementales. Or, ce sont les ruptures technologiques radicales qui autorisent une transformation du système productif, une modification des modes de consommation et des modes de vie en amorçant une nouvelle trajectoire technologique qui finit par coïncider avec une trajectoire de développement durable » (31).

---

(29) Faucheux et Nicolai, op. cit. (p. 132)

(30) Valenduc G., Vendramin P., *Le travail au vert – innovation, environnement et emploi*, Editions EVO, Bruxelles, 1996.

(31) Faucheux et Nicolai, op. cit. (p. 133)

### 3.3. Technologie, dématérialisation et développement durable

Une autre caractéristique de la technologie au service du développement durable est son degré de "dématérialisation". Cette caractéristique est particulièrement importante si on se place dans l'optique de la soutenabilité forte.

Ainsi, l'Institut de recherche sur le climat de Wuppertal a développé le concept d'intensité de matériel par unité de service (MIPS, «*material intensity per unit service*»). Il s'agit de mesurer le rapport entre la fonction assurée par un produit ou un service (par exemple: transporter telle quantité d'information entre tels points) et le degré d'utilisation des ressources naturelles non renouvelables (y compris l'énergie). Pour éviter l'épuisement des ressources, il faut développer des activités économiques à faible MIPS (32). Selon l'Institut de Wuppertal, l'informatique et la télématique constituent des exemples de produits et de services dont le MIPS est particulièrement faible, mais dont le potentiel de croissance économique est élevé. La "société de l'information" répondrait donc bien à des exigences structurelles du développement durable, dans la mesure où la production et la consommation de biens et de services immatériels prennent le pas sur la production et la consommation de biens matériels.

Même si la clé d'analyse de l'Institut de Wuppertal ne fait pas l'unanimité, le critère de dématérialisation est important à prendre en compte dans la définition de la technologie au service du développement durable, dans la mesure où il se réfère de manière explicite à la préservation et au renouvellement du "capital naturel".

## 4. Technologie et développement durable : terminologie et définitions opérationnelles

Dans la suite de ce rapport, on rencontrera très fréquemment une série d'expressions qui, pour être semblables, n'en désignent pas moins des choses différentes : technique, technologie ou innovation technologique ; technologie environnementale, technologie propre, technologie soutenable. Sur base des considérations développées dans ce premier chapitre, on peut proposer une série de définitions opérationnelles.

L'**innovation technologique** désigne un processus qui inclut non seulement la technologie elle-même, mais aussi tout son cycle de vie : conception, diffusion, marché, perfectionnement, déclin. L'innovation est un processus économique, qui fait intervenir des variables telles que la rentabilité, la compétitivité, l'investissement, etc. L'innovation est aussi un processus social, qui fait intervenir des acteurs, des intérêts convergents ou divergents, des représentations individuelles et collectives. L'innovation est encore un processus institutionnel, qui se déroule dans des programmes et au sein d'organisations, publiques ou privées, et qui fait l'objet de négociations et de procédures de décision.

Le terme technologie est utilisé dans deux acceptions. Au sens premier, la **technologie** désigne un ensemble cohérent de solutions techniques ou d'objets techniques (produits ou procédés), incluant non seulement les **techniques** proprement dites, mais aussi les services qui y sont associés (assistance, maintenance, réparation, etc.). Technologie a un sens générique : on parlera des technologies de l'information et de la communication, des

---

(32) Schmidt-Bleek F., *Work in a sustainable economy*, Proceedings of the Telework 94 conference, European Commission, Berlin, 1994.

biotechnologies, des technologies environnementales, etc. Mais dans le langage courant, les termes technologies et techniques (au pluriel) sont souvent employés de manière indifférente.

Le terme **technologie environnementale** désigne une technologie qui a pour but d'apporter une solution à un problème environnemental. Le terme **technologie verte** ne veut rien dire de plus, mais il n'est que d'un usage journalistique. Les technologies environnementales peuvent comprendre des techniques qui ne sont pas spécifiques du domaine de l'environnement. Ainsi, une technologie d'épuration des eaux, qui est une technologie environnementale, repose sur une série de techniques électromécaniques ou chimiques qui ne lui sont pas spécifiques. La technologie environnementale n'est donc pas définie par rapport aux objets ou procédés techniques, mais rapport au but qu'elle poursuit.

Le terme **technologie propre** (ou technologie plus propre, meilleure traduction de *cleaner technology*) désigne une catégorie particulière de technologies environnementales, qui apportent une solution à la source et non pas en bout de chaîne. Il s'agit de prévenir la pollution ou le gaspillage de ressources naturelles, plutôt que d'en traiter les conséquences. Le concept de prévention est essentiel dans la notion de technologie propre. L'opposé d'une technologie propre est une **technologie de bout de chaîne** (*end-of-pipe technology*). Et le contraire d'une technologie propre est évidemment une technologie sale... Parmi les technologies propres, il y a une proportion élevée de technologies intégrées (voir § 2.1. ci-dessus), mais les deux termes ne sont pas toujours synonymes. De même, les technologies additives, qui s'ajoutent à un procédé sans le modifier radicalement, ne sont pas nécessairement synonymes de technologies de bout de chaîne ; il peut s'agir de technologies propres, par exemple si elles diminuent la consommation de ressources naturelles.

Le terme **technologie soutenable** fait référence non seulement à l'objectif environnemental, mais également aux autres objectifs du développement durable : équité et solidarité, transformation des modes de production et de consommation. Cette expression est une métonymie, qui correspond à la traduction de *sustainable technology*. Mais on verra plus loin que l'expression est ambiguë. En effet, ce n'est pas la technologie qui peut être qualifiée de soutenable, mais l'ensemble du processus d'innovation et de diffusion dans la société. Mais "technologie soutenable" est un raccourci commode pour "technologie au service du développement durable".

---

## Bibliographie

---

- Akrich M., Callon M., Latour B., *L'art de l'intéressement*, in Vinck D.(coord.), *Gestion de la recherche, nouveaux problèmes, nouveaux outils*, De Boeck, Bruxelles, 1991.
- Arrow K., *Economic welfare and the allocations of resources for invention*, in Nelson ed. , *The rate and direction of inventive activity*, Princeton, Princeton University Press, 1962.
- Bach L. et Lhuillery S., *Recherche et externalités ,Tradition économique et renouveau*, dans Foray D. et Mairesse J. (sous la dir.), *Innovations et performances, approches interdisciplinaires*, Editions EHESS, Paris, 1999.
- Coenen R., Klein-Vielhauer S., Meyer R., *Integrierte Umwelttechnik und wirtschaftliche entwicklung*, Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Arbeitsbericht n°35, Nov. 1995.
- Cohendet P., Foray D., Guellec D., Mairesse J., *La gestion publique des externalités positives de redcherche*, dans Foray D. et Mairesse J. (sous la dir.), *Innovations et performances, approches interdisciplinaires*, Ed. EHESS, Paris, 1999.
- Dasgupta P. and Stiglitz J., *Industrial structure and the nature of innovation activity*, in *The Economic Journal*, 1980.
- Deléage J-P., *Une histoire de l'écologie*, Points/Sciences, Editions du Seuil, Paris, 1994 (chapitres 9 et 10).
- Ecological Economics*, Tenth Anniversary Issues, vol. 28/1-28/2, Elsevier, 1999.
- Faucheux S., Nicolai I., *Les firmes face au développement soutenable : changement technologique et gouvernance au sein de la dynamique industrielle*, dans la *Revue d'économie industrielle*, n°83, 1998.
- Foray D. et Mowery D., *L'intégration de la R&D industrielle : nouvelles perspectives d'analyse*, dans *Revue économique*, n°3, mai 1990, pp.501-530.
- Guellec D., *Economie de l'innovation*, La Découverte, Repères, Paris, 1999.
- Kjørboe T., *Preventing prevention : why are cleaner technologies difficult to diffuse ?*, ESST Master Thesis, Roskilde / Namur, 1997.
- Kjørboe T., Valenduc G., *La diffusion des technologies environnementales*, dans *La Lettre EMERIT*, n° 17, novembre 1997.
- Kyriakou D., *Sustainable development : towards a synthesis*, IPTS Technical Report Series, Joint Research Centre, European Commission, Sevilla, 1995.
- Masood E., *L'économie écologique, nouvelle discipline née d'un choc culturel*, dans *Le Monde – Economie*, 9/10/1998.
- Pearce D., Atkinson, G., *Capital theory and measurement of sustainable development, an indicator of weak sustainability*, in *Ecological Economics*, n°8, 1993.
- Renn O., Goble R., Kastenholz H., *How to apply the concept of sustainability to a region*, in *Technological forecasting and social change*, North Holland, n°58, 1998.

- Schmidt-Bleeck F., *Work in a sustainable economy*, Proceedings of the Telework 94 conference, European Commission, Berlin, 1994.
- Sorup P., *The role of technology in sustainable development*, in the Proceedings of the conference of the Spanish presidency of the European Union on Research, Technology and Employment, El Escorial, 1995.
- Spannenberg J., Bonniot O., *Sustainability indicators, a compass on the road towards sustainability*, Wuppertal Paper n°81, February 1998.
- Valenduc G. Vendramin P., *Le travail au vert – innovation, environnement et emploi*, Editions EVO, Bruxelles, 1996.
- Valenduc G., Vendramin P., *Science, technological innovation and sustainable development*, in the Proceedings of the Conference "Science for a Sustainable Society", Roskilde (DK), Oct. 1997.
- Van Hauwermeiren S., *Manual de Economía Ecológica*, Instituto de Ecología Política, Santiago de Chile, 1998.
- Vivien F-D., *Economie et écologie*, Repères, Ed. La Découverte, Paris, 1994 (chapitre IV).
- Von Weizsäcker E.U., Lovins A.B., Lovins L.H., *Facteur 4 : deux fois plus de bien-être en consommant deux fois moins de ressources*, Rapport au Club de Rome, 1997.
- Von Weizsäcker E.U., *Sustainable growth with a new generation of technologies*, contribution à la conférence *Développement durable : les chaînons manquants entre la politique et la mise en œuvre économique*, Fondation Roi Baudouin, Bruxelles, octobre 1996.

## Table des matières

<b>1. TECHNOLOGIE ET INNOVATION.....</b>	<b>3</b>
1.1. LES DIFFÉRENTES CATÉGORIES D’INNOVATIONS .....	3
1.2. LES SOURCES DE L’INNOVATION TECHNOLOGIQUE.....	4
1.3. LA DIFFUSION DES INNOVATIONS .....	5
1.3.1. <i>Les limites de la régulation par le marché.....</i>	5
1.3.2. <i>La part des connaissances tacites .....</i>	6
1.3.3. <i>L’avantage relatif d’une innovation.....</i>	7
1.3.4. <i>Adopter une innovation, c’est l’adapter.....</i>	8
1.3.5. <i>Le profil des adopteurs.....</i>	9
<b>2. LE STATUT DE L’INNOVATION TECHNOLOGIQUE DANS LES THÉORIES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE .....</b>	<b>10</b>
2.1. LES THÉORIES ÉCONOMIQUES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE .....	10
2.1.1. <i>Le principe de “soutenabilité faible” (weak sustainability) .....</i>	10
2.1.2. <i>Le principe de “soutenabilité forte” (strong sustainability).....</i>	11
2.1.3. <i>De l’économie de l’environnement à l’économie écologique .....</i>	12
2.1.4. <i>La notion de croissance qualitative.....</i>	14
2.2. L’APPROCHE “ÉCOSYSTÉMIQUE” DU DÉVELOPPEMENT DURABLE.....	15
2.3. LE RÔLE NÉCESSAIRE, MAIS NON SUFFISANT, DE L’INNOVATION TECHNOLOGIQUE... 16	
<b>3. LA NATURE DE L’INNOVATION TECHNOLOGIQUE FAVORABLE AU DÉVELOPPEMENT DURABLE .....</b>	<b>17</b>
3.1. TECHNOLOGIES ADDITIVES OU TECHNOLOGIES INTÉGRÉES ?.....	18
3.2. INNOVATIONS INCRÉMENTALES OU INNOVATIONS RADICALES ? .....	20
3.3. TECHNOLOGIE, DÉMATÉRIALISATION ET DÉVELOPPEMENT DURABLE .....	21
<b>4. TECHNOLOGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE : TERMINOLOGIE ET DÉFINITIONS OPÉRATIONNELLES .....</b>	<b>21</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>23</b>

