

**Rupture d'une situation de lock-in et
introduction de la variété dans le secteur de
l'éclairage**

**P. MENANTEAU
H. LEFEBVRE**

**Cahier de Recherche N°5
texte proposé à la Revue d'Economie Industrielle**

INTRODUCTION.

Les économistes, de plus en plus nombreux, admettent aujourd'hui que les mécanismes de diffusion des technologies ne peuvent s'expliquer uniquement par un comportement d'optimisation des acteurs choisissant librement entre différentes options technologiques indépendamment de toute autre considération. Au contraire, les choix technologiques à un instant donné seraient fortement conditionnés par les décisions antérieures, traduisant des phénomènes d'irréversibilité et de dépendance au chemin suivi. Apprentissage industriel, effets d'échelle, ou externalités de réseau, constituent ainsi des sources de rétroactions positives par lesquelles les performances technico-économiques et donc les perspectives d'adoption d'une nouvelle technologie s'accroissent à mesure que le nombre des précédents adopteurs augmente. Ces processus d'adoption des technologies peuvent conduire à une situation de verrouillage technologique (lock in) où tout nouvel adopteur est conduit à opter pour la technologie dominante indépendamment de ses préférences initiales ou des qualités intrinsèques des technologies en présence. B. Arthur a le premier proposé une modélisation de ce mécanisme de concurrence entre technologies présentant de fortes rétroaction positives et conduisant à la création d'un monopole technologique (Arthur, 1988 ; 1989).

Plusieurs critiques ont été adressées à ce modèle notamment en ce qui concerne la non prise en compte de l'hétérogénéité comportementale des agents qui permet de conserver une certaine liberté de choix aux acteurs reflétant des fonctions de préférence particulières, la nécessaire contemporanéité des technologies dans le modèle de base qui exclue théoriquement la représentation des situations de lock in établi, et enfin, le caractère irrémédiable de la fermeture technologique en faveur de la technologie sur laquelle se sont focalisées les rétroactions positives (J.M. Dalle, 1995 ; D. Foray, 1989 ; D. Foray and A. Grübler, 1991).

Dans le cas présent, nous nous intéresserons en particulier au caractère irrémédiable du monopole technologique et aux conditions dans lesquelles une nouvelle technologie peut émerger puis bénéficier d'effets d'apprentissage et d'externalités, permettant d'améliorer progressivement les conditions de concurrence par rapport à la technologie dominante.

Nous étudierons pour cela le secteur de l'éclairage résidentiel qui présente une situation très proche du "lock-in" décrit par B. Arthur, la technologie de l'incandescence assurant la quasi-totalité des besoins d'éclairage dans ce secteur. Les effets d'apprentissage industriel et de série sur longue période lui ont permis d'enregistrer d'importantes réductions de coûts et améliorations successives des performances sur les lampes à incandescence (efficacité énergétique mais aussi qualité de lumière, durabilité, fiabilité, etc.). Plus encore, cette technologie bénéficie de nombreuses externalités de réseau, du fait de l'importance de la grande distribution qui conforte son monopole technologique, des fabricants de luminaires qui conçoivent des produits uniquement adaptés à l'incandescence, et des consommateurs pour qui la qualité de lumière de référence est fournie par les lampes traditionnelles. De ce fait, les conditions de concurrence sont fortement

défavorables à toute nouvelle technologie, chère, peu connue, voire encore insuffisante en termes de qualité.

Toutefois, alors que le modèle de concurrence technologique de B. Arthur confère à la situation de lock-in un caractère irrémédiable, l'exemple étudié ici montre qu'il peut être contourné, mais au prix d'une forte intervention publique. Par ailleurs, ce contournement ne conduit pas forcément à la domination de la nouvelle technologie par le biais de rendements croissants d'adoption, et à la disparition de l'ancienne technologie, mais peut aboutir à une situation nouvelle dans laquelle subsiste une certaine diversité technologique.

Notre hypothèse est que cet accroissement de la diversité ne correspond pas à une situation transitoire conduisant forcément à la domination d'une nouvelle technologie, mais à un état stable dans lequel plusieurs technologies d'éclairage peuvent durablement coexister.

Pour expliquer l'apparition de nouvelles technologies dans une situation de verrouillage technologique, nous serons conduits à mettre l'accent sur le comportement des agents, et tout particulièrement les stratégies des firmes de l'éclairage qui sont ici à l'origine de l'innovation. Les formes de concurrence et les structures de production des industries notamment ne sont pas prises en considération dans les modèles de compétition technologique mais elles nous semblent constituer dans le cas présent des éléments centraux pour la compréhension de la dynamique du changement technologique. Ainsi, la transformation du contexte de concurrence oligopolistique, au même titre que l'existence de nouvelles opportunités technologiques et une possible évolution des fonctions de préférences des consommateurs ont fortement contribué à inciter les firmes à innover avec une volonté de différenciation stratégique.

L'analyse de ce processus de contournement du lock-in de l'incandescence dans le secteur de l'éclairage résidentiel débutera par un examen de l'évolution technologique de l'éclairage sur longue période, avec la mise en évidence de l'existence de trois trajectoires distinctes qui matérialisent la succession des innovations techniques dans l'éclairage et font apparaître l'historicité de ces processus. Nous présenterons ensuite l'influence de l'environnement de sélection des industries de l'éclairage sur la nature et le rythme du changement technique. Enfin, nous examinerons les contraintes rencontrées dans la phase initiale de diffusion de l'innovation, l'importance des marchés niches qui permettent d'amorcer un processus d'apprentissage et le rôle indispensable des mécanismes d'incitation publics à cet égard.

I. STRUCTURATION DES TRAJECTOIRES TECHNOLOGIQUES DANS LE SECTEUR DE L'ECLAIRAGE.

Bien que la proportion de la consommation d'électricité consacrée à l'éclairage ait fortement régressé depuis l'apparition de l'éclairage électrique à la fin du 19^{ème} siècle, cet usage absorbe toujours une part importante de la consommation totale d'électricité (10 à 20 % en moyenne dans les pays de l'AIE en 1990)¹. Les besoins continuent à croître sous l'effet de l'augmentation de la taille des logements, du développement du secteur tertiaire, grand consommateur d'éclairage artificiel, et de la généralisation de l'éclairage public. La croissance de la demande a été toutefois en partie compensée par la progression constante des performances énergétiques des sources lumineuses depuis un siècle. Ainsi, les lampes halogènes des années 90 ont un rendement lumineux 10 fois supérieur à celui de la lampe à filament de carbone mise au point par Edison. D'autres technologies utilisées en éclairage extérieur présentent des performances énergétiques encore très supérieures. L'éclairage public, ou extérieur d'une manière générale, ainsi que l'éclairage des locaux à usage industriel ou tertiaire, ont largement profité de cette évolution technologique. En revanche, les performances ont peu évolué dans le secteur résidentiel où les besoins d'éclairage sont majoritairement satisfaits par des sources lumineuses peu efficaces.

Trois innovations majeures sont à l'origine de la totalité des sources lumineuses disponibles aujourd'hui. Elles correspondent à trois principes scientifiques différents de production de lumière : l'incandescence, la fluorescence et la décharge. En dépit de quelques tentatives d'hybridation, ces innovations majeures ont donné naissance à des familles de lampes bien spécifiques.

1. Les lampes à incandescence.

L'origine de l'éclairage à incandescence remonte au siècle précédent avec la mise au point par Thomas Edison d'une lampe à filament de carbone en 1879. De nombreuses améliorations y ont été apportées depuis, principalement au niveau du filament : remplacement du carbone d'origine par le tungstène, double spirale du filament, introduction de gaz inertes chargés de réduire la vitesse d'évaporation du filament, etc., qui ont fait passer l'efficacité lumineuse de 1-2 lm/W à 15-20 lm/W, pour une durée de vie moyenne de l'ordre de 1000 heures (Lemaigre-Voreaux P., 1979).

Au delà des améliorations continues apportées au filament, à la composition des gaz, à l'optimisation de la forme des ampoules, etc., les progrès les plus significatifs enregistrés récemment sont liés au développement des cycles halogènes qui ont permis d'accroître simultanément les performances lumineuses et la durée de vie des lampes. Le principe du cycle halogène était connu depuis la fin du 19^{ème} siècle. Mais son développement industriel a été rendu possible à la fin des années 60 notamment grâce aux progrès réalisés sur les verres à haute résistance qu'imposait le fonctionnement sous haute pression et à température élevée du filament (Rouaux E., 1989).

A l'origine ces lampes n'étaient disponibles que sous la forme de "crayons" (basse tension/forte puissance) qui associés à des luminaires de forte puissance (300 et 500 W) et modulables, ont popularisé l'éclairage halogène dans le secteur résidentiel. Par la suite, des lampes halogènes très basse-tension (TBT) de petite taille ont été développées pour l'éclairage d'accentuation sous forme de petits spots. L'une et l'autre de ces lampes nécessitaient des luminaires particuliers du fait de leur puissance et des culots spécifiques qui en limitaient le développement. Depuis peu, les lampes halogènes sont disponibles avec des culots standards (lampes halogènes à double enveloppe) et peuvent se substituer aux ampoules à incandescence classiques.

Il s'agit d'une innovation importante qui a contribué à conforter la trajectoire de l'éclairage à incandescence laquelle n'avait pas bénéficié d'innovation réellement significative depuis longtemps. Son importance tient moins à l'amélioration des performances lumineuses, finalement assez limitée, même si elle permet de dépasser 20 lm/W, ou à l'accroissement de la durée de vie (2000 heures), qu'aux nouvelles perspectives de miniaturisation des sources qu'offrent les ampoules TBT et au développement de sources à lumière blanche et brillante pour les usages résidentiels.

2. Les lampes à décharge

L'autre grande famille de technologies d'éclairage est constituée par les lampes à décharge dont l'origine est encore antérieure à celle de la lampe à incandescence. Différents systèmes de décharge dans des gaz ont été expérimentés dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, mais la production et la commercialisation des lampes à décharge ne commencent réellement qu'au début des années 30, bientôt suivies par les lampes fluorescentes (Lemaigre-Voreaux P., 1979).

Le principe de la lampe à décharge est celui d'un arc électrique produit entre deux électrodes dans une vapeur métallique (mercure ou sodium). Les lampes à décharge se répartissent théoriquement en deux grandes familles, la décharge basse-pression qui nécessite une transformation du rayonnement par le biais de poudres fluorescentes, et la décharge haute pression dont le rayonnement est directement visible.

Les lampes à décharge à haute pression présentent une efficacité lumineuse supérieure à 100 lm/W mais sont pour l'instant encore limitées à des usages spécifiques : éclairage routier ou urbain, installations sportives, halls industriels, centres commerciaux, etc. Des progrès récents rendent toutefois possible ou envisageable une extension progressive vers des applications de plus faibles puissances avec les lampes aux halogénures métalliques : 80 à 100 lm/W, pour des puissances situées entre 250 et 1000 W (Koedam M., 1980; Sikkens M., 1990). Ces lampes encore réservées aux usages professionnels pourraient se diffuser en direction du tertiaire et du résidentiel en remplacement des sources incandescentes ou halogènes. La principale alternative à l'éclairage à incandescence dans ces secteurs reste toutefois aujourd'hui encore la fluorescence,

notamment du fait du développement de lampes de petite taille utilisant ce principe.

3. Les lampes fluorescentes

La première lampe fluorescente a été présentée au public des Journées Internationales de la Lumière en 1936 par A. Claude. La possibilité d'utiliser des matériaux luminescents pour produire de la lumière était connue de longue date, mais, avant 1935, les matériaux disponibles n'émettaient que de la lumière verte ou bleue ne permettant pas de réaliser une synthèse en "lumière blanche".

Les premiers tubes fluorescents avaient une efficacité lumineuse relativement élevée, de l'ordre de 35 lm/W, mais un médiocre rendu de couleur. Pendant 40 ans, le changement technique dans le domaine de la fluorescence sera orienté sur la résolution de ce problème : améliorer simultanément efficacité énergétique et rendu de couleur (Lux, 1986; Koedam, 1980; Vrenken L.E., 1979; Jack A.G. et Vrehan Q.H.F., 1986). Aujourd'hui, les tubes fluorescents ont une efficacité lumineuse moyenne située entre 50 et 90 lm/W, pour une durée de vie de l'ordre de 10 000 heures. Les meilleures qualités de lumières (IRC² supérieur à 85) sont obtenues pour des tubes ayant des rendements de l'ordre de 60 lm/W, alors que les plus performants ont un rendement qui dépasse 80 lm/W mais pour un IRC situé entre 50 et 85 (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques des différents types de lampes

Lampes	IRC	Efficacité lumineuse (lm/W)	Durée de vie économique (heures)
Incandescence			
Standard	100	10 - 15	1000
Tungstène halogène			
BT	100	15 - 20	2000
TBT	100	15 à 25	2000 - 4000
Fluorescence			
Tube rectiligne			
Standard	60 - 75	50 - 85	8000
IRC amélioré	>90	50 - 65	
Haut rendement	85	70 - 90	8000
LFC			
Ballast magnétique	85	50	8000
Ballast électronique	85	45 - 65	8000
A décharge			
Halogénures métal.	70 - 95	65 - 100	6000
Vapeur de mercure HP	30 - 60	40 - 60	20000
Sodium HP			
Standard	20	80 - 130	20000
IRC élevé	65	60 - 95	15-20000
Sodium BP	monoch.	100 - 200	12000

Source : catalogues fabricants

L'éclairage fluorescent a fortement pâti des premières tentatives de diffusion dans le résidentiel avec des tubes dont les caractéristiques de couleur étaient plus adaptées à des utilisations dans des locaux industriels. Ces contraintes ont conduit les industriels à développer deux nouvelles lampes utilisant le principe de la fluorescence : les lampes fluorescentes compactes (LFC), ou lampes à économie d'énergie, et les lampes à induction. Ces lampes conçues pour se substituer aux lampes à incandescence traditionnelles présentent les avantages liés à la fluorescence (longévité, efficacité) sans les contraintes d'encombrement et d'installation. La lampe à induction est encore confidentielle et n'occupe que des niches de marché extrêmement étroites, en revanche, la diffusion de la LFC qui est encore limitée apparaît bien engagée après une première phase initiale difficile.

4. Le progrès technique dans le domaine de l'éclairage : amélioration des performances et diversification des technologies

Les performances des sources lumineuses ont beaucoup progressé depuis la conception initiale sous l'effet d'améliorations techniques permanentes résultant de l'amélioration du niveau général des connaissances et de l'apprentissage industriel. Les progrès enregistrés dans certains domaines scientifiques ou techniques tels que la physique des solides, la chimie, la technique du verre ou la métallurgie, ont ainsi permis d'apporter des améliorations importantes aux principes de base : double spiralage du filament, pression de gaz plus élevée, nouveaux matériaux, etc. L'accroissement des performances résulte aussi d'un progrès technologique de nature plus routinière, lié à l'apprentissage et à l'expérience accumulée par les ingénieurs et les techniciens sur les différents procédés et techniques utilisés.

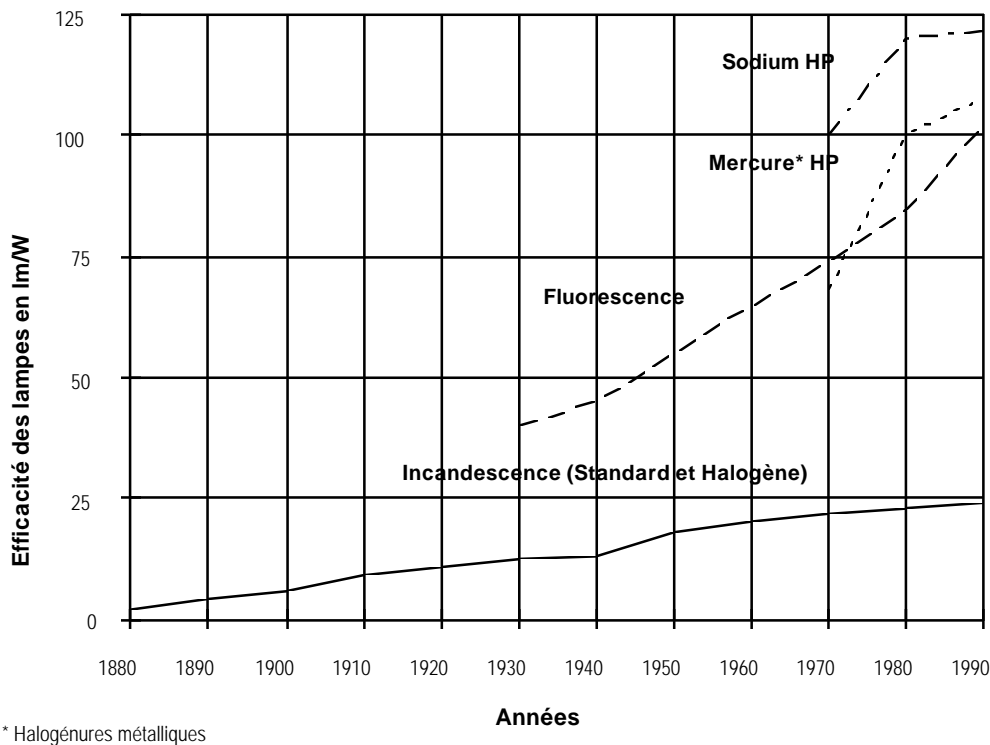
Bien entendu, certaines innovations revêtent une importance plus grande que d'autres, le filament de carbone, les poudres tri-phosphores, les composés halogènes par exemple, mais toutes se situent dans la continuité des principes de base. Elles ont permis une meilleure exploitation progressive des potentialités initiales. De ce fait, il nous semble fondé de parler dans le cas des technologies d'éclairage de trajectoires technologiques, au sens que donne G. Dosi à ce concept, c'est-à-dire une séquence d'innovations inspirées par un même principe scientifique ou technique (G. Dosi, 1982).

Les différentes familles de lampes utilisées aujourd'hui reposent sur trois trajectoires technologiques distinctes dont l'origine remonte à plus de 50 ans, et près d'un siècle pour les lampes incandescentes. Pendant cette période la technologie a évolué considérablement dans quatre directions :

- l'augmentation de l'efficacité lumineuse;
- l'amélioration de la qualité de la lumière;
- l'augmentation des durées de vie;
- et la réduction de l'encombrement, voire la miniaturisation.

La caractéristique la plus visible de cette évolution est l'amélioration de l'efficacité lumineuse qui est passée de 1-2 lm/W pour les premières lampes à incandescence à 100 - 120 lm/W avec les lampes à décharge (près de 200 lm/W pour le sodium basse-pression)(Fig.1).

Fig. 1 : Amélioration des performances énergétiques des sources lumineuses



Source : Lamp Guide 1990, Lighting Industry Federation Limited, London 1990.

Le progrès technique a aussi contribué à introduire une plus grande diversité technologique parmi les sources lumineuses. Chaque grand secteur utilisateur (résidentiel, tertiaire, industrie, éclairage public) a, dans un premier temps, favorisé le développement d'une trajectoire plutôt qu'une autre en fonction de ses besoins spécifiques : meilleur rendu des couleurs, plus forte puissance, rendement lumineux plus élevé, accroissement de la longévité, etc. Ainsi, l'incandescence assure-t-elle encore la quasi-totalité des besoins d'éclairage dans le secteur résidentiel. Cette situation initiale de domination technologique a évolué, dans un deuxième temps, avec l'élargissement des possibilités d'utilisation des différentes sources permis par la miniaturisation, l'extension des gammes de puissance, l'amélioration de la qualité de la lumière, et de manière générale, la réduction des contraintes à l'utilisation. Il en résulte, aujourd'hui, une extension du champ d'application des sources lumineuses de base et une diversification pour la satisfaction d'un usage donné. La concurrence est de ce fait beaucoup plus ouverte entre plusieurs technologies d'éclairage. On peut observer cette ouverture dans le secteur tertiaire, par exemple, où différentes sources halogènes, la fluorescence rectiligne ou compacte et certaines sources à décharge peuvent coexister. Elle est beaucoup moins marquée dans le secteur résidentiel où

l'incandescence standard est encore en situation de monopole technologique même si celui-ci n'est plus aussi affirmé qu'il y a quelques années.

II. PERTURBATION DE L'ENVIRONNEMENT DE SELECTION ET CHANGEMENT TECHNOLOGIQUE

L'évolution des performances des différentes sources lumineuses sur longue période atteste d'une importante activité innovatrice dans le secteur de l'éclairage. Toutefois, l'adoption d'un point de vue historique, s'il permet de mettre en évidence les progrès accomplis, peut suggérer l'idée d'un progrès technique qui bénéficie de l'amélioration des connaissances scientifiques, d'une part, et de l'apprentissage industriel, de l'autre, mais évolue de façon autonome relativement aux décisions des acteurs, notamment des acteurs industriels. Or les industriels ont, à l'évidence, une influence déterminante sur le rythme et l'orientation du changement technique par les choix qu'ils opèrent sur la nature et l'ampleur des programmes de R&D qu'ils décident de mettre en oeuvre.

La décision d'innover est prise notamment en fonction des opportunités technologiques que peuvent identifier les firmes (connaissances scientifiques, perspectives techniques, disponibilité des matériaux et équipements, compétences et savoir-faire techniques de la firme,...) ainsi que de la perception de l'environnement de sélection (Nelson R. et Winter S., 1977) dans lequel l'innovation va évoluer. Cet environnement de sélection ne se limite pas simplement à la notion de "marché potentiel", mais se situe dans une perspective plus dynamique qui intègre une possible évolution, des comportements de consommation sous l'effet de nouvelles normes sociales, des conditions institutionnelles ou réglementaires qui favorisent ou non le recours à certaines technologies, des comportements stratégiques des firmes concurrentes, etc.

Jusqu'au début des années 70, l'industrie de l'éclairage évolue dans un environnement de sélection stable et relativement peu concurrentiel. Le changement technologique résulte essentiellement, sur cette période, de rendements croissants d'adoption propres à chaque trajectoire technologique. Les différentes formes d'apprentissage qui accompagnent la diffusion des innovations, les externalités de réseau résultant de la standardisation des produits et les économies d'échelle liées à la taille des séries produites, renforcent la position de certaines technologies sur leurs marchés spécifiques : lampes à incandescence dans le résidentiel et tubes fluorescents dans l'industrie, en particulier.

Pendant cette période, le changement technologique dans l'industrie de l'éclairage ne conduit pas à des innovations de produit susceptibles de favoriser des comportements concurrentiels agressifs basés sur des technologies à fort risque de marché. La concurrence porte principalement sur les prix, par le biais de rendements croissants d'adoption et la recherche d'effets de série ou d'échelle. Elle conduit à une forte baisse des prix des sources lumineuses sur la période mais ne remet pas en cause les positions au sein de l'oligopole³. En revanche, les

perturbations introduites par les chocs pétroliers et la transformation de l'environnement concurrentiel induiront des innovations technologiques de produits.

1. Les sources de l'innovation LFC

La relative stabilité antérieure est perturbée au cours des années 70 par les chocs pétroliers qui modifient l'environnement de sélection des technologies énergétiques en suggérant une vision du futur dans laquelle les prix de l'énergie sont orientés à la hausse. La transformation intervient dans un contexte où les stratégies concurrentielles des firmes de l'éclairage sont plus marquées qu'auparavant et où certaines technologies atteignent une phase de maturité. Elle contribue à accélérer le progrès technique sur le critère d'efficacité énergétique avec la perspective de renforcer des positions concurrentielles par la recherche d'une possible différenciation technologique.

1.1 Chocs pétroliers et rôle des anticipations des industriels de l'éclairage.

Les chocs pétroliers des années 70 ont modifié considérablement le contexte énergétique qui prévalait depuis plusieurs dizaines d'années. Pour l'ensemble des observateurs, il devient alors évident que les prix de l'énergie seront à l'avenir durablement orientés à la hausse pour des raisons d'épuisement progressif des ressources.

Cette anticipation d'une hausse durable des prix de l'électricité, liée à l'évolution des prix du pétrole, conduit les firmes de l'éclairage à orienter leur activité de R&D vers l'amélioration de l'efficacité énergétique des sources lumineuses. Ainsi, Osram, annonce consacrer à la fin des années 70, 4% de son chiffre d'affaire à la recherche et au développement de nouveaux produits, l'ensemble des axes de ces recherches étant dirigé vers les économies d'énergie (Lux N°105; dec 1979). De même GTE Sylvania, à l'occasion d'une présentation à la presse en 1980, s'engageait à mettre au point et à produire un nombre croissant de sources lumineuses permettant de réaliser des économies d'énergie. La firme insistait aussi sur sa volonté de développer des lampes de remplacement réduisant la consommation de courant électrique (Lux N°107, Avril 1980).

Cette orientation marquée peut probablement s'expliquer de différentes manières. Tout d'abord, les firmes anticipent une évolution des comportements des consommateurs qui les rendra de plus en plus soucieux de maîtriser l'évolution de leur consommation énergétique et donc l'efficacité énergétique de leurs appareils électriques.

D'autre part, les industriels de l'éclairage ont aussi le souci de montrer qu'ils contribuent à l'intérêt général en participant à la réduction de la facture énergétique nationale, par l'amélioration de l'efficacité énergétique de leurs produits. Cette implication apparaît d'autant plus nécessaire que l'éclairage est un usage particulièrement symbolique de l'électricité, au même titre mais peut-être plus encore que l'électroménager.

Enfin, les comportements de consommation évoluent et prennent en compte de nouvelles préférences telles que la protection de l'environnement par exemple. La fonction d'utilité du consommateur ne tient plus seulement compte de la minimisation du coût mais aussi de nouveaux attributs tels que l'impact environnemental ou la durée de vie des produits. Ainsi, les questions environnementales prendront progressivement le relais des préoccupations géopolitiques et économiques pour légitimer la poursuite d'un effort particulier dans le sens d'une plus grande efficacité énergétique. Les programmes de maîtrise de la demande d'énergie que les compagnies d'électricité seront contraintes d'engager, vers le milieu des années 80, attestent de l'importance de cette évolution dans la perception collective des problèmes énergétiques.

Au total, l'impulsion initiale apportée par les chocs pétroliers n'apparaît pas contestable. Elle conduit à la conception d'une nouvelle source lumineuse plus efficace au sein de la famille fluorescente qui offre alors des perspectives technologiques intéressantes alors que l'incandescence paraît entrer dans la fin de son cycle de vie.

1.2 Anticipation de l'épuisement de la trajectoire de l'incandescence

La lampe à incandescence est un produit banalisé dont les performances ont bénéficié de nombreuses innovations incrémentales depuis son apparition sur le marché à la fin du 19^{ème} siècle. La première lampe d'Edison produisait à peine 2 lm/W alors que l'efficacité lumineuse de l'incandescence se situe aujourd'hui autour de 20 lm/W. Cependant, les gains que peuvent apporter ces innovations incrémentales ne sont pas illimités. L'introduction du cycle halogène, qui constitue une innovation importante pour prolonger le cycle de vie de l'incandescence, n'a pas permis d'accroître l'efficacité lumineuse dans des proportions considérables.

Compte tenu de l'évolution de l'environnement de sélection, et des limites prévisibles de l'incandescence, la question peut se poser d'effectuer un saut technologique vers une autre technologie a priori mieux adaptée. Or, alors que les performances lumineuses de l'incandescence sont encore inférieures à 20 lm/W et évoluent très lentement, celles de la fluorescence ont en revanche largement dépassé 50 ou 60 lm/W et continuent à progresser. Le principal obstacle pour la mise au point d'une lampe de substitution réside dans les conditions d'utilisation : la trajectoire de la fluorescence s'est en effet développée dans un environnement spécifique qui a déterminé des caractéristiques de confort et d'encombrement totalement inadaptées au secteur résidentiel. Mais, à la fin des années 70 des progrès technologiques sur l'éclairage fluorescent permettent d'envisager le dépassement de ces contraintes par la miniaturisation.

1.3. Faisabilité technique d'une lampe de substitution à l'incandescence

L'efficacité lumineuse des sources fluorescentes a évolué, depuis les années quarante, de 30 à 100 lm/W, avec une amélioration simultanée de la qualité de la lumière et de nouvelles perspectives technologiques qui autorisent des niveaux de performance encore plus élevés.

La fluorescence pourrait donc constituer une solution adaptée à un nouveau contexte de forte augmentation des prix de l'énergie. Les problèmes majeurs pour diffuser la fluorescence dans le tertiaire et le résidentiel proviennent de l'encombrement des tubes, de la nécessité de disposer de luminaires avec des raccords électriques spécifiques et de la mauvaise qualité de la lumière produite. Ces problèmes deviennent techniquement solubles au cours des années 70 avec la mise au point de nouvelles poudres fluorescentes.

Ainsi, la miniaturisation des tubes fluorescent se heurtait jusque là une impasse : la réduction de la longueur du tube de décharge impliquait une augmentation consécutive de la densité du courant et une détérioration rapide du flux lumineux avec les poudres traditionnelles. Problème que l'élévation générale du niveau des connaissances dans différents domaines scientifiques et techniques vont permettre de résoudre. Grâce à la mise au point de nouvelles poudres "tri-phosphores" présentant une bonne résistance à des densités de courant élevées, la diminution du diamètre et de la longueur des tubes est devenue possible. Par ailleurs les caractéristiques des poudres "tri-phosphores" ont permis d'accéder à la miniaturisation sans perte importante de l'efficacité lumineuse tout en maintenant une très bonne qualité de lumière (Bouwknegt A., 1982; Lux, 1986; Jack A.G. and Vrehan Q.H.F., 1986).

Toutefois, ainsi que le font remarquer Nelson R. et Winter S. (1977, p.54) "les premières versions des nouvelles technologies tendent seulement à être marginalement supérieures à la plus récente des anciennes technologies... Les avantages d'une nouveauté résident principalement dans les capacités que peuvent apporter les vagues d'améliorations qui suivent la nouveauté, comparé à la difficulté de trouver des améliorations dans une technologie saturée". L'innovation n'échappe pas ici à cette règle. Certes l'efficacité lumineuse de ces nouvelles lampes est très supérieure à celle de l'incandescence, mais les autres caractéristiques ne sont pas encore réellement comparables, notamment en ce qui concerne le poids, l'encombrement ou la qualité de la lumière émise.

Les premières LFC sont disponibles sur le marché européen au début de l'année 80, et de manière à peu près simultanée chez les différents constructeurs. Philips est le premier avec la lampe SL commercialisée en avril 80, bientôt suivi par Osram Circolux, puis Mazda et Thorn quelques mois après. L'apparition simultanée de ces nouvelles lampes "à économie d'énergie" n'est bien entendu pas fortuite, aucune firme leader ne pouvant prendre le risque de laisser un concurrent direct.

2. Stratégie technologique et modification de l'équilibre concurrentiel

Résultat de la mondialisation de l'économie, de l'apparition de nouveaux acteurs, pays de l'Est ou Asie notamment, et de nouvelles opportunités technologiques, la décennie 80 est une période troublée pour l'industrie de l'éclairage. La relative stabilité antérieure fait place à des stratégies offensives pour la conquête de nouvelles parts du marché mondial.

On assiste ainsi à de nombreux rachats et fusions qui modifient totalement les positions antérieures, au moins sur le plan régional (Rea T., 1995). Philips et Osram rachètent respectivement les parts du marché américain des constructeurs Westinghouse et GTE, devenant de fait des concurrents directs de General Electric (GE) alors que celui-ci était déjà concurrencé sur son marché par des firmes de la frange comme Panasonic (groupe Matsushita). Le géant américain G.E. contre-attaque en effectuant une série de rachats d'entreprises européennes de la frange comme Thorn (Royaume Uni), Tungstam (Hongrie) ou encore Sivi Illuminazione (Italie), avec l'objectif avoué d'acquérir 30% du marché européen.

Dans ce jeu complexe de fusion-acquisitions, il est évident que la technologie peut jouer un rôle important en conférant un avantage concurrentiel significatif pour la conquête d'un nouveau marché. Il n'existe pas dans l'oligopole de l'éclairage de différenciation stratégique comme on peut en observer, par exemple, dans l'industrie automobile. A quelques rares exceptions près, les firmes du coeur de l'oligopole sont présentes sur l'ensemble des secteurs de marché avec la totalité des produits d'éclairage disponibles. De ce fait, l'équilibre concurrentiel pourrait être modifié par l'introduction d'une innovation technologique décisive. Ceci conduit les firmes leaders à se positionner sur toute nouvelle technologie considérée comme potentiellement porteuse⁴ de façon à se préserver face au risque de différenciation stratégique.

Ainsi, l'annonce et la commercialisation par Philips, au début de l'année 80, d'une nouvelle lampe susceptible de remplacer la lampe à incandescence, avec une efficacité lumineuse très supérieure, contraint ses concurrents à réagir rapidement en présentant des produits équivalents. Cela n'empêchera pas les premiers innovateurs d'essayer de tirer parti de cette innovation pour conquérir de nouveaux marchés⁵, mais la réaction immédiate des autres firmes permet d'en limiter les risques. Simples effets d'annonce ou industrialisation effective, le fait est que les principaux industriels de l'éclairage présents sur le marché européen annoncent en 1980 la commercialisation d'une lampe économe en énergie à quelques mois d'écart, alors que les recherches étaient engagées depuis 1973/74.

Paradoxalement, cette stratégie d'innovation imitative conduit ultérieurement à un comportement de coopération entre les firmes. Après la phase de course à l'innovation, si aucune firme n'a réussi à se positionner seule sur un nouveau produit, la coopération devient possible voire nécessaire pour en assurer la diffusion de manière coordonnée⁶.

A ce stade, les investissements dans la R&D et pour l'industrialisation des nouveaux produits, entraînent une certaine rigidité, non seulement pour chaque firme mais pour l'ensemble de l'industrie de l'éclairage, ce qui rend en partie irréversibles les décisions antérieures.

Aussi, l'évolution défavorable des prix de l'énergie et donc de l'environnement de sélection, au milieu des années 80, ne remet-elle pas en cause l'objectif de diffusion des nouvelles lampes économes, mais elle en modifie considérablement les perspectives à court et moyen terme. Le retournement des prix de l'énergie a deux effets importants sur la diffusion des LFC, le moindre intérêt des consommateurs pour l'efficacité énergétique et surtout, la relance de l'innovation sur la trajectoire technologique de l'incandescence peut être trop prématurément enterrée. Dès lors, la perspective initiale d'un abandon des sources à incandescence devenues obsolètes au seul profit des LFC n'est plus pertinente. Au contraire, le maintien d'une certaine diversité entre les sources d'éclairage dans les secteurs résidentiel et tertiaire apparaît de plus en plus probable, avec une régression progressive mais moins rapide et moins complète que prévue de l'incandescence classique.

Pour les industriels de l'éclairage, il en résulte une réorientation de la stratégie initiale centrée sur la substitution de la nouvelle technologie au profit d'une stratégie plus diversifiée tenant compte d'une possible persistance de la diversité technologique mais s'appuyant progressivement sur les produits à plus forte valeur ajoutée (LFC et halogènes). Stratégie qui a pu être interprétée comme un relatif manque d'agressivité commerciale en direction du résidentiel notamment. En fait, la perception d'un risque de marché élevé lié à un environnement peu favorable a conduit les acteurs industriels à une position plutôt attentiste dans un premier temps. Cette position durera jusqu'à ce que les programmes d'incitation publics, à la fin des années 80, créent une dynamique de demande et suscitent un comportement plus agressif des industriels.

III. DE L'APPARITION A LA DIFFUSION DE L'INNOVATION : LES CONTRAINTES DU MARCHE

L'innovation d'un produit ou d'un procédé de production nécessite de la part des concepteurs une succession de phases de l'idée initiale à l'industrialisation et la commercialisation, phases distinctes dans le temps mais pouvant donner lieu à des boucles de rétroaction au cours du processus d'innovation. Ces différentes phases constituent autant de difficultés que doivent dépasser les industriels mais elles ne garantissent en rien la réussite de l'innovation qui doit, in fine, être confrontée au marché. Pour un acteur industriel, le rythme et l'ampleur de la diffusion d'une innovation sont les critères qui permettront de juger de son succès.

Dans le cas des LFC, la première étape allant jusqu'à la commercialisation était franchie au début des années 80, mais la diffusion, dans le secteur résidentiel principalement, s'est heurtée à diverses contraintes. Elle a alors, pour des raisons

d'intérêt général, bénéficié de nombreuses actions publiques de promotion, qui ont créé une dynamique de diffusion plus favorable en suscitant des rétroactions positives.

Ces rétroactions positives à partir des premiers adopteurs et des actions publiques d'incitation vont "véhiculer la propriété d'additivité des choix individuels" et conduire à une irréversibilité cumulative (Willinger M. et Zuscovitch E., 1993). L'irréversibilité cumulative est utilisée dans le sens d'une impossibilité pour la technologie, du fait d'un effet de mémoire (Boyer R., Chavance B., Godard O., 1991), d'un retour au point initial. Les conséquences des chocs pétroliers et du contre choc comme une perturbation symétrique ne nous a pas ramené à la situation initiale. La succession des décisions prises par les industriels et les acteurs publics affecte le processus de diffusion des LFC en orientant le choix des utilisateurs.

L'ensemble des rétroactions positives et l'accumulation des innovations incrémentales sur les LFC vont introduire de l'irréversibilité dans les choix technologiques opérés et permettre une certaine diffusion de l'innovation. Mais au milieu des années 90, cette diffusion est encore insuffisante pour qu'il soit possible de se prononcer sur l'avenir de cette technologie.

1. Des comportements d'adoption très contrastés

Les LFC de première génération étaient sensiblement différentes les unes des autres, notamment du point de vue de l'encombrement. Cette diversité sera progressivement réduite par la concertation entre les fabricants qui permettra d'aboutir rapidement à un quasi standard consacrant une forme commune plus facilement comparable aux lampes à incandescence classiques. En ce qui concerne les performances et caractéristiques techniques, les fabricants se sont approchés au mieux de la lampe à incandescence, mais les LFC en diffèrent encore notablement sur le plan de l'encombrement et du poids, de la qualité de la lumière (température et un indice de rendu de couleur), de la rapidité de l'allumage, etc., et bien sur de la durée de vie et de l'efficacité lumineuse (cf. Tableau 2).

Tableau 2 : Comparaison des caractéristiques des lampes à incandescence standard et LFC au début des années 80.

	Incandescence standard	LFC (1980) Philips SL
Puissance (W)	75	18
Flux lumineux (lm)	960	900
Eff. lumineuse (lm/W)	13	50
Temp. de couleur (°K)	2600	3000
Indice de rendu des couleurs (IRC)	100	85
Longueur (mm)	105	165

Source : Lux N° 107, Avril 1980.

Ces attributs seront perçus différemment en fonction des critères de choix et préférences des utilisateurs potentiels; favorablement dans le secteur tertiaire, et les usages professionnels de manière générale, où une pratique de bonne gestion peut conduire à minimiser les coûts de l'éclairage (de remplacement et d'usage), avec plus de difficultés dans le secteur résidentiel beaucoup moins sensible à une démarche d'optimisation.

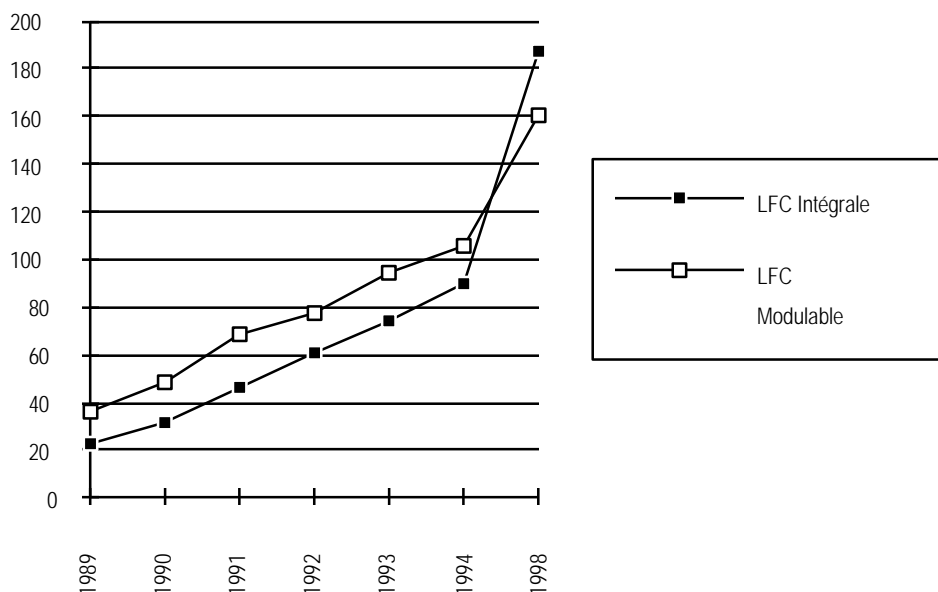
1.1 Des caractéristiques adaptées aux usages professionnels de l'éclairage

Pour des raisons de confort, de sécurité ou d'esthétique, nombre de points lumineux fonctionnent, dans des secteurs économiques tels que commerces et services, de même que dans les secteurs de la santé ou de l'enseignement, de manière quasi continue⁷. Dans ces secteurs, la volonté de maîtriser les coûts de fonctionnement conduit souvent les gestionnaires à s'intéresser à la réduction des coûts énergétiques et de maintenance de l'éclairage.

Pour cette raison, l'éclairage fluorescent qui minimise le coût global de l'usage d'éclairage est déjà largement répandu dans certains de ces secteurs, mais sa diffusion reste contrainte, notamment dans les commerces, les hôtels, les restaurants, pour des raisons esthétiques et d'encombrement. Avec la LFC, il devient envisageable de développer la diffusion de l'éclairage fluorescent dans les usages professionnels qui ne lui étaient jusque là pas favorables. Elle bénéficie en effet de deux avantages essentiels sur l'incandescence, la diminution des coûts de fonctionnement (efficacité lumineuse) et surtout, facteur important dans ces secteurs la réduction des coûts de maintenance. A l'inverse, son prix relativement élevé par rapport à une lampe à incandescence, n'est pas ici une contrainte insurmontable dans la mesure où il permet des temps de retour qui restent attractifs.

Le marché des usages professionnels apparaît ainsi comme le plus immédiatement porteur pour assurer la diffusion de la LFC et faire bénéficier l'innovation des retours d'expérience pour améliorer le produit. Très vite, la première lampe de substitution comprenant l'ensemble des composants nécessaires à une installation directe sur un luminaire classique, plutôt destinée à des usages résidentiels, va être complétée par une lampe, dite d'intégration⁸, destinée aux utilisations professionnelles.

Pendant les années 80, et jusqu'au milieu des années 90, l'essentiel des LFC commercialisées étaient des lampes d'intégration (cf. Fig. 2) en direction des usages professionnels. On peut par ailleurs affirmer sans trop de risque d'erreur que la majorité des lampes de substitution diffusées pendant les années 80 étaient aussi des lampes destinées au secteur tertiaire, le début de la pénétration des LFC dans le résidentiel remontant aux premiers programmes de promotion mis en oeuvre par les compagnies d'électricité américaines (cf. infra) à partir de la fin des années 80.

Fig. 2 : Ventes annuelles globales des LFC et prévisions dans le monde.

Sources : IAEEEL newsletter 4/94.

1.2... mais moins aux comportements d'achat des consommateurs domestiques

La diffusion de la LFC aurait pu suivre le cheminement, assez classique pour les nouveaux produits, d'une pénétration d'abord centrée sur des segments de marchés spécifiques puis d'une extension au delà des premières niches lorsque apprentissage et économies d'échelle ont permis de faire baisser les prix. Mais, le marché résidentiel n'a que peu profité de la diffusion de la LFC dans les usages professionnels du fait de comportements d'achat très différenciés entre les deux catégories d'acteurs.

La première difficulté à laquelle s'est heurtée la LFC dans le résidentiel est le problème du prix de vente. Pour le consommateur domestique, il existe une sorte de prix de référence en matière d'éclairage, déterminé par le très faible coût des lampes à incandescence depuis de très nombreuses années. Or la LFC est proposée à un prix qui peut être 20 fois supérieur à celui de la lampe incandescente créant une sorte de "barrière psychologique" (L. Lamare, 1993).

D'autre part, le calcul d'optimisation qui consiste à minimiser le coût du service éclairage en intégrant le prix d'achat et le coût d'usage n'est pas une démarche habituelle du consommateur domestique, moins encore lorsqu'il s'agit de consommations électriques qui restent, en règle générale, très faibles. En conséquence, le prix de vente actuel des LFC, même s'il autorise en théorie un temps de retour de 2 ou 3 ans sur les points lumineux les plus utilisés, constitue une contrainte forte pour motiver une adoption sur de simples critères économiques.

Les consommateurs domestiques ne se déterminent toutefois pas uniquement (dans certains cas pas du tout) sur des critères économiques. Des caractéristiques

telles que la fonctionnalité, la commodité d'utilisation, l'esthétique ou la marque du produit, influent largement sur les comportements d'achat des consommateurs. En l'occurrence, ces attributs ne favorisent pas la nouvelle technologie face à l'incandescence dont la notoriété est maximale et la fonctionnalité optimisée par plusieurs dizaines d'années d'utilisation dans le secteur résidentiel.

1.3... malgré un effort important de la part des industriels pour adapter leur produit à la demande.

Les premières LFC ne sont effectivement pas réellement comparables aux lampes à incandescence notamment en ce qui concerne les critères de confort : qualité de lumière encore jugée blafarde par les utilisateurs, allumage non- instantané, bourdonnement ou papillotement sur certaines lampes, et problèmes d'encombrement, qui interdisent la substitution de certaines lampes à incandescence sans modifier le luminaire.

Ce dernier point a été, dans un premier temps, négligé par les industriels qui pensaient probablement qu'il serait possible de mobiliser rapidement les fabricants de luminaires pour concevoir et commercialiser des luminaires adaptés aux nouvelles lampes. Or, du fait d'un comportement attentiste de la part des fabricants de luminaires, conforté par une diffusion très incertaine des premières LFC, aucune solution à ce problème n'a été apportée, sauf en ce qui concerne les luminaires destinés au tertiaire.

Pour les industriels de l'éclairage, il importait donc de proposer rapidement de nouveaux modèles de lampes compatibles avec les luminaires existants dès lors que ce problème apparaissait comme une des principales contraintes à la diffusion des LFC dans le résidentiel.

L'interaction producteurs/consommateurs a ici joué un rôle important et permis de faire évoluer considérablement les LFC depuis les premières lampes volumineuses et lourdes des années 80. Une simple comparaison des modèles de 1980 et 1995 permet de se faire une idée de cette évolution (Tableau 3) : l'encombrement a été réduit de 30 %, le poids de 75 %, l'efficacité lumineuse a été accrue de 20 %, et la durée de vie allongée (de 8 000 à 10 000 heures). En complément, l'introduction des ballasts électroniques a supprimé les problèmes de papillotement de la lumière, et permis un allumage instantané.

Tableau 3 : Evolution des LFC de 1980 à 1995

	SL 18 W électromagnétique	PL 15 W électronique
Flux lumineux (lm)	900	900
Efficacité lumineuse (lm/W)	50	60
Longueur (mm)	175	126
Diamètre	64	55
Poids (g)	420	100

Source : catalogue Philips

Malgré cette évolution sensible des LFC, la comparaison avec les lampes à incandescence reste encore imparfaite, et l'avantage comparatif se réduit au coût d'usage, mais pour un prix souvent jugé excessif. Dans ces conditions, la diffusion des LFC n'est intervenue de manière réellement significative que dans les pays où les préférences des consommateurs les conduisaient à valoriser d'autres attributs.

Le principal exemple est celui du Japon, où l'éclairage fluorescent joue traditionnellement un rôle prépondérant dans le secteur résidentiel et où de ce fait la diffusion des LFC n'a pas rencontré d'obstacle particulier lié à la qualité de la lumière émise, au contraire. Par ailleurs, les LFC ont largement bénéficié d'une image de marque positive liée à l'innovation technologique qui suscite un intérêt marqué pour les consommateurs japonais. Enfin, l'intégration verticale de l'industrie de l'éclairage au Japon qui a permis d'assurer une meilleure coordination entre les producteurs de lampes et les fabricants de luminaires, a conduit à une large diffusion de la LFC qui assurerait aujourd'hui près de 80% de la demande d'éclairage dans le résidentiel (L. Lamarre, 1993).

Aucun pays européen n'a atteint un tel niveau de diffusion, mais il est clair que certains pays en Europe ont été plus réceptifs que d'autres aux attributs des LFC, ce qui se traduit par des rythmes d'adoption très différenciés (Tableau 4).

Tableau 4 : Diffusion des LFC en Europe (lampes de substitution).

	CH	NL	D	I	DK	B	A	GB	F	E	UE
Ventes de LFC pour 100 foyers	22	18	15	14	10	10	9	8	6	2	10
	CH	NL	D	I	DK	B	GB	A	F	E	UE
Parc installé par foyer	3,2	2,4	1,8	1,4	1,1	0,7	0,6	0,5	0,4	0,1	0,9

Source : Syndicat de l'éclairage, 1995.

Plusieurs facteurs expliquent probablement les différences importantes observées (le volume des ventes varie de un à dix !). Ainsi, la présence d'un producteur national peut expliquer la bonne place des Pays-Bas et de l'Allemagne, et le prix élevé de l'électricité celles de la Suisse ou également de l'Allemagne, bien qu'aucune corrélation évidente n'apparaisse entre diffusion des LFC et prix de l'électricité sur l'ensemble de l'échantillon. Mais, paraissent incontestables :

- la plus grande sensibilité des pays du nord de l'Europe aux questions environnementales qui se traduit, depuis plusieurs années, par une évolution des comportements d'achat des consommateurs, et en particulier une plus grande attention au critère d'efficacité énergétique sur certains produits;
- l'influence des programmes publics de promotion de l'efficacité énergétique de manière générale, et en faveur de la diffusion des LFC, en particulier.

En l'absence de mécanismes d'incitation spécifiques, la diffusion des LFC reste, en effet, quasi confidentielle dans le secteur résidentiel, jusqu'à ce que l'intervention de compagnies d'électricité et d'agences publiques à la fin des années 80 contribuent à la reconnaissance du produit et assurent une première diffusion.

2. Les programmes publics de promotion de la diffusion des LFC

A la suite des Etats-Unis, de nombreuses compagnies d'électricité européennes ont engagé, à la fin des années 80, des programmes de Maîtrise de la Demande d'Electricité (Demand-Side Management en anglais) orientés notamment vers le secteur de l'éclairage sous la forme de promotion de la diffusion de LFC.

Différents mécanismes d'incitation ont ainsi été mobilisés pour faciliter la diffusion des LFC, mais l'action la plus largement utilisée a consisté à instaurer un rabais sur le prix de vente des lampes, généralement de l'ordre de 20 à 50% du prix public⁹ et pour un nombre limité de lampes. Le nombre total de lampes diffusées par le biais de ces programmes¹⁰ est supérieur à 2 millions d'unités (sur une période de 5 ans) à comparer aux ventes estimées pour le seul secteur résidentiel, de l'ordre de 15 millions d'unités pour l'ensemble des pays européens (chiffre 1993).

Ces programmes ont eu un impact très significatif sur la dynamique des marchés puisque dans certains pays, les ventes de LFC impulsées par les programmes ont été du même ordre de grandeur que les ventes moyennes observées habituellement. Aux Pays-Bas, au Danemark ou en Irlande, par exemple, les actions d'incitation ont multiplié les ventes par un facteur 3 (E. Mills, 1993).

La position des fabricants par rapport à ces actions a été assez contrastée à l'origine mais semble aujourd'hui nettement favorable. L'inquiétude initiale venait du risque de susciter chez le consommateur un comportement opportuniste qui l'aurait conduit à différer tout projet d'achat de LFC en l'absence d'incitations spécifiques. Les actions entreprises par les compagnies d'électricité auraient alors bénéficié à ces dernières en améliorant l'efficacité énergétique dans leurs zones de distribution, mais fortement ralenti la diffusion "naturelle" à l'extérieur de celles-ci.

Les résultats enregistrés sur les ventes, semblent avoir convaincu les industriels de l'intérêt qu'ils pouvaient avoir à participer activement à ces programmes. D'autant que, de ponctuelles et limitées dans le temps, pour des objectifs de diffusion immédiate, les programmes d'incitation des compagnies d'électricité ont progressivement évolué vers des actions de "transformation du marché" qui visent à créer des conditions favorables pour l'instauration d'une réelle dynamique de diffusion des LFC.

Plusieurs éléments peuvent suggérer que cette dynamique favorable est d'ores et déjà engagée :

- une croissance soutenue des ventes mondiales de LFC qui depuis le début des années 90, dépassent 200 millions d'unités en 1995 ¹¹, avec des taux de

croissance en voie de stabilisation (15-20%) après la période d'explosion des années 1989 - 90 (30%) correspondant à une phase de croissance dans le cycle de vie du produit ;

- les lampes d'intégration sont aujourd'hui rattrapées par les lampes de substitution, ou sont en passe de l'être, ce qui suggère que la diffusion de ces dernières dans le secteur résidentiel est bien engagée.

L'évolution à la baisse du prix des lampes, ainsi que l'amélioration continue des caractéristiques et performances des premières lampes, ont largement contribué à l'instauration de cette dynamique. Les prix de vente ont en effet sensiblement baissé ces dernières années, sous l'impulsion des programmes publics instaurant des rabais sur certains produits et du fait de la stratégie des industriels soucieux de résister à l'apparition sur le marché de produits d'importation de moindre qualité¹². Ces baisses vont renforcer la dynamique initiale suscitée par les programmes publics et contribuer à l'accroissement du volume des ventes. Les baisses de coûts de production devraient alors, par la mobilisation des effets d'échelle et d'apprentissage, permettre de prendre le relais d'une baisse des prix qui résulte, pour l'instant, essentiellement de stratégies commerciales.

3. Perspectives de diffusion et amélioration de l'efficacité énergétique de l'éclairage

Les trajectoires technologiques suivies dans l'industrie de l'éclairage depuis près d'un siècle ont conduit à une amélioration continue des performances énergétiques des sources de lumière. La période de crise énergétique des années 70 a accéléré la conception et la commercialisation de nouvelles sources plus efficaces, en particulier les LFC, destinées à remplacer les lampes à incandescence au rendement médiocre.

Si la diffusion de ces nouvelles lampes a commencé sans difficultés particulières, dans le secteur tertiaire, elle est en revanche restée confidentielle dans le secteur résidentiel où se situent pourtant une part importante des enjeux énergétiques¹³. Nulle part, à l'exception de la Suisse ou des Pays Bas, le nombre de LFC par ménage ne dépasse 2 lampes, alors que le nombre moyen de points lumineux par foyer se situe entre 20 et 30. La substitution totale de l'éclairage incandescent par les LFC est donc un objectif encore très éloigné même dans les situations les plus favorables.

Cet objectif est-il seulement réaliste? Probablement pas, les LFC ne paraissent pas aujourd'hui en mesure de remplacer totalement les lampes à incandescence et ce pour plusieurs raisons :

- la première est liée au problème de poids, d'encombrement, et globalement d'intégration aux luminaires existants. Certes le progrès technique devrait permettre d'atteindre un encombrement comparable à celui de l'incandescence pour des puissances standards, mais au delà, les contraintes propres à la fluorescence imposeront des tailles plus importantes, et de plus la fluorescence est mal adaptée à la miniaturisation des sources (cf. halogène TBT);

- en second lieu, des contraintes économiques subsisteront, même si nous pouvons envisager une forte baisse des prix des LFC, il est en effet probable que ceux-ci n'atteindront pas les niveaux qui rendraient le choix entre incandescence et fluorescence totalement indifférent, indépendamment des durées d'utilisation. Or, certaines lampes à incandescence -la plupart- sont utilisées moins d'une heure par jour en moyenne sur l'année¹⁴;
- enfin, il restera des catégories d'usage ne convenant pas à la fluorescence ou pour lesquelles les autres sources sont mieux adaptées : fortes puissances, éclairage ponctuel, miniaturisation des sources, etc.

Par ailleurs, les comportements des utilisateurs par rapport à l'éclairage évoluent considérablement. Le nombre de points lumineux dans le résidentiel a ainsi fortement augmenté depuis plusieurs années, correspondant à une plus grande spécification des usages, conduisant à une réduction des durées d'utilisation et à une plus grande diversité des sources utilisées. Cette tendance à la diversité des sources lumineuses va très probablement se poursuivre avec la coexistence de l'incandescence sous diverses formes, halogène basse-tension et très basse-tension, de la fluorescence, sous la forme LFC et peut-être lampes à induction, enfin lampes à décharge avec le développement des halogénures métalliques dans le domaine des faibles luminances.

Quelle conclusion faut-il en tirer sur les perspectives d'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur de l'éclairage ?

La totalité des sources à incandescence ne seront pas remplacées par des lampes à très haute efficacité, mais le mouvement global de substitution va se poursuivre avec la pénétration de sources dont les performances énergétiques sont un peu (l'halogène TBT notamment) ou très (LFC, lampes à décharge, à induction) supérieures à celles de l'incandescence. L'efficacité énergétique globale de l'éclairage va donc continuer à s'accroître, peut être même à un rythme accéléré, puisque la diffusion s'effectue dans le résidentiel, secteur encore peu concerné par l'évolution des performances des sources lumineuses.

IV. CONCLUSION

L'analyse du progrès technologique dans le secteur de l'éclairage et de son évolution sous l'effet des transformations de l'environnement de sélection permet de faire apparaître différents résultats sur les conditions de concurrence entre les technologies.

Les rendements croissants d'adoption (effets d'échelle, apprentissage industriel, externalités de réseau) intervenus sur longue période ont créé dans le secteur de l'éclairage résidentiel une situation de monopole technologique en confortant la trajectoire de l'incandescence. Cette situation de lock-in rend particulièrement difficile l'émergence de nouvelles innovations technologiques qui n'ont pas, par définition, pu bénéficier des mêmes effets d'apprentissage ou d'échelle. Ainsi, le secteur de l'éclairage résidentiel semble en première analyse refléter la situation

modélisée par B. Arthur des comportements d'adoption avec de fortes rétroactions positives conduisant à la création d'un monopole technologique. En fait, l'analyse de la concurrence technologique dans le secteur de l'éclairage montre que celle-ci diffère sur plusieurs points de celle décrite par B. Arthur.

Tout d'abord en ce qui concerne les hypothèses : la "contemporanéité des technologies" utilisée dans le modèle de compétition technologique de W.B. Arthur, qui traduit l'apparition simultanée de technologies concurrentes ne peut ici être retenue (cette hypothèse est d'ailleurs contestée par certains auteurs, D. Foray, 1989). La trajectoire technologique de la fluorescence n'entre réellement en concurrence avec celle de l'incandescence, dans le secteur résidentiel, qu'au début des années 80. La situation analysée ici ne correspond donc pas à une opposition entre deux technologies concurrentes bénéficiant à l'origine de chances comparables, avant que des événements plus ou moins aléatoires ne fassent pencher la balance en faveur de l'une ou l'autre, mais de la contestation d'un monopole déjà établi, par une technologie émergente.

Contrairement au résultat auquel conduit la modélisation de B. Arthur, cette situation n'est pas irrémédiable. Certaines travaux ont déjà permis de montrer que le monopole technologique auquel conduisait le modèle n'était, dans certaines conditions, pas définitif (D. Foray et A. Grübler, 1991 ou J. Islas Sampiero, 1995). Dans le cas de l'éclairage résidentiel, la situation initiale de monopole technologique, a finalement permis l'émergence et la diffusion de technologies concurrentes. Le contournement du lock-in a ici été rendu possible notamment par une forte intervention publique qui a permis de modifier les conditions initiales de concurrence entre les technologies, de créer un espace de concurrence plus ouvert, et d'engager un processus d'apprentissage et de rétroactions positives à l'origine d'une dynamique de diffusion. En créant les conditions d'une transition plus rapide vers un nouveau système, l'action publique devient ainsi un des facteurs essentiels du contournement du lock-in (P.A. David et D. Foray, 1995).

Un autre facteur est ici essentiel pour permettre la contestation du monopole technologique établi : la nouvelle technologie a largement bénéficié des progrès antérieurs réalisés sur la trajectoire de la fluorescence et d'un premier processus d'apprentissage sur le secteur du tertiaire, avant de concurrencer l'incandescence sur le résidentiel. Le tertiaire a ainsi constitué une niche technologique facilitant la maturation de la trajectoire de la fluorescence dont les caractéristiques technico-économiques se sont progressivement améliorées en modifiant les conditions de concurrence avec l'incandescence. Sans l'existence de cette "niche technologique", les performances de la nouvelle technologie n'auraient pas pu évoluer jusqu'à concurrencer celles de la technologie dominante (JM. Dalle, 1995).

Enfin, cette contestation du lock-in ne conduit pas à la reconstitution d'un autre lock-in en faveur de la nouvelle technologie, par le biais de rendements croissants d'adoption, et à l'élimination de la technologie ancienne. Au contraire, on observe, un accroissement de la diversité des technologies dans le secteur résidentiel provenant de conditions particulières d'usage qui nécessitent le recours à diverses sources lumineuses. En conséquence, la concurrence technologique n'est pas totale

sur le secteur, mais se limite à certains segments spécifiques. Ce résultat ne correspond pas nécessairement à une phase transitoire devant conduire à une nouvelle domination technologique mais, nous semble-t-il, à un état stable reflétant un accroissement de la variété technologique (Saviotti, 1988).

Sans remettre en cause la pertinence du modèle d'Arthur, ces résultats montrent que celui-ci ne permet pas de décrire la totalité des situations de concurrence technologique. Dans le cas présent en particulier, on observe qu'une situation de monopole technologique sur une technologie ayant bénéficié de rendements croissants d'adoption peut évoluer en faveur d'une nouvelle technologie qui profite de processus d'apprentissage sur des marchés niches ainsi que d'une amélioration des conditions de concurrence obtenues par de vigoureuses politiques publiques d'incitation.

Bibliographie :

Arthur W. B. : "Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events", in The economic journal, n° 99, 1989.

Arthur W. B. : "Competing technologies : an overview", in G. Dosi, C. Freeman, R. Nelson, G. Silverberg and L. Soete (Eds), Technical change and economic theory, Pinter Publishers, London and New York, 1988.

Boyer R, Chavance B., Godard O. (sous la dir.), Les figures de l'irréversibilité en économie, Paris, Ed de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 1991.

Bouwknegt A. : "Compact fluorescent lamps". Journal of Illumination Engineering Society, Vol 14, N°4. July 1982.

Dalle J. M. : "Dynamiques d'adoption, coordination et diversité : la diffusion des standards technologiques." Revue économique, Vol. 46, juillet 1995, pp. 1081-1098.

Davis F. : "Engines of energy innovation : smaller manufacturers of efficient lighting products", in Energy, 1993, vol. 18, n°2, pp.185-190.

EPRI Journal : "Impact evaluation of DSM Programs, Volume 2 : Case studies and applications", in EPRI CU-7179. Palo Alto, 1991.

David P.A. et Foray D. : "Dépendance du sentier et économie de l'innovation : un rapide tour d'horizon." Revue d'économie industrielle. N° spécial Economie industrielle : développements récents. 1er trim. 1995.

Dosi G. : "Technological paradigms and technological trajectories : a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change", Research Policy, Vol. 11 N° 3.

Foray D. and Grübler A. : "Morphological Analysis, Diffusion and Lock-out of Technologies : Ferrous Casting in France and the FRG", in Research Policy, 19 (6). 1991.

Foray D. : "Les modèles de compétition technologique. Une revue de la littérature". Revue d'Economie Industrielle. N° 48, 2eme trimestre 1989. pp 16-34.

Glenny T. and Procter J. : "Energy Efficient-Lighting Technologies". In Emerging Energy Technologies : Impacts and Policy Implications. The Royal Institute for International Affairs. Dartmouth, 1992.

Inestène : Perspectives et moyens de la MDE dans l'éclairage, Rapport réalisé pour l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), 1995.

International Association for Energy Efficient Lighting, IAEEL newsletter 3/94, n°8, vol. 3.

Islas Sampeiro J. : "Le contournement du "lock-in" établi dans les systèmes de production électrique : le cas de la turbine à gaz", I.E.P.E., Coll. Cahier de Recherche, n°3, Grenoble, juin 1995.

Jack A.G. and Vrehan Q.H.F. : "Progress in fluorescent lamps". Philips Technical Review 42 N° 10/11/12 - Sept. 1986

Koedam M. : "L'avenir de la famille lampe". Lux N° 107 - Avril 1980.

Lamarre L. : "Shedding light on the compact fluorescent", in EPRI Journal, Mars 1993, pp. 23-27.

Lemaigre-Voreaux P. : "La surprenante ascension des performances des lampes électriques". Lux N°101 - Fev. 1979.

Lévy-Leboyer M. et Morsel H (sous la direction de) : Histoire de l'électricité en France - Tome II 1919-1946,. Ed. Fayard. Paris 1994.

Lux : "Evolution des lampes fluorescentes". Lux N° 137 - MARS Avril 1986.

Mc-Gowan T. : "Energy-Efficient Lighting". In Electricity : Efficient End-Use and New Generation Technologies and Their Planning Implications. Lund University Press, 1989.

Mills E. : "Efficient lighting programs in Europe : cost effectiveness, consumer response, and market dynamics". Energy The International Journal. Vol 18 N°12 ; special issue : Energy efficient lighting. Feb. 1993.

Mills E. and Piette M.A. : "Advanced energy-efficient lighting systems : progress and potential". Energy The International Journal. Vol 18 N°12 ; special issue : Energy efficient lighting. Feb. 1993.

Nelson R. and Winter S. : "In search of a useful theory of innovation", Research Policy, 1977, N° 6, pp 36-76.

Rea T. : "Who owns who in lighting". Electrical Review Vol 228 N°2 - Feb. 1995.

Rouaux E. : "Rappel du fonctionnement de lampes tungstène-halogène". Lux N° 154 - Aout Septembre 1989.

Saviotti P.P. : "Information, entropy and variety in technoeconomic development", Research Policy, Vol 17., 1988.

Sikkens M. : "Lampes des années 90". Lux N° 159 - Août Septembre 1990. Art. paru dans la Revue Internationale de l'Eclairage (1989).

Vrenken L.E. : "Lampes fluorescentes à très haute efficacité lumineuse". Lux N° 101 - Février 1979.

Willinger M., Zuscovitch E., (1993), "Efficience, irréversibilité et constitution des technologies" in Revue d'économie industrielle, n°65, 3^e trimestre 1993, pp. 7-22.

¹ A titre d'exemple, la consommation d'électricité pour l'éclairage en France représentait 38 TWh en 1990 et se répartissait de la façon suivante selon les secteurs : tertiaire, 20 TWh - résidentiel, 10 TWh - industrie, 4 TWh - éclairage public, 5 TWh ; EDF, 1992.

² L'Indice de Rendu de Couleur (IRC) mesure la capacité d'une source lumineuse à retranscrire fidèlement la perception des couleurs. La valeur maximale est de 100 ; au delà de 85 on considère que le rendu des couleurs est bon.

³ A l'échelle mondiale, le marché des lampes et des matériels d'éclairage (hors automobile) est supérieur à 200 Mds de francs. Il est dominé par trois grands groupes industriels dont la branche éclairage ne constitue qu'une petite partie de l'activité : General Electric est le leader mondial, suivi par deux groupes européens Philips (Pays Bas) et Osram (Allemagne), une filiale du groupe Siemens. Enfin, une multitude d'entreprises de plus petite taille, limitées à certaines zones géographiques et/ou spécialisées sur des technologies spécifiques, participent au marché mondial de l'éclairage mais se situent plutôt à la frange de l'oligopole.

⁴ Peut être faut-il voir là l'explication de l'absence (provisoire ?) d'Osram sur la technologie de l'induction : impasse technologique, risques de marché, concurrence avec la LFC ?

⁵ Osram en particulier essaiera de tirer parti de sa position d'innovateur sur les LFC pour pénétrer le marché américain à l'occasion des programmes de DSM des compagnies d'électricité américaines.

⁶ Cf. accord entre Philips et Osram, pour aboutir à un quasi-standard sur la forme des LFC d'abord, sur leur industrialisation ensuite.

⁷ Nombre d'heures d'utilisation annuel moyen : commerces (3100 h), santé (3000 h); enseignement (1500 h), cafés - hôtels - restaurants (2700 h) - Source : Inestène, 1995.

⁸ Cette lampe sépare le tube du système d'amorçage de la décharge (ballast) lequel est intégré dans le luminaire. Elle ne peut donc remplacer directement une lampe à incandescence, mais présente l'avantage de coûter, au moment du renouvellement, beaucoup moins cher qu'une lampe de substitution (30 à 50% du prix de la LFC classique).

⁹ Dans certains cas, la subvention pouvait même atteindre 100% puisque des compagnies d'électricité danoises ont instauré des programmes de distribution gratuite de LFC à leurs abonnés portant sur plus de 200 000 lampes (E. Mills, 1993).

¹⁰ En Europe, E. Mills a dénombré près de 50 programmes de promotion de la diffusion des LFC entre 1987 et 1992 dans 11 pays (E. Mills, 1993).

¹¹ On est encore loin des ventes mondiales de lampes à incandescence (10 milliards d'unités) mais la comparaison est peu pertinente compte tenu des différences de durées de vie entre les deux technologies.

¹² Si les prix des lampes électroniques restent proches des 150 FF, il est très facile aujourd'hui de trouver des promotions proposant les mêmes lampes aux alentours de 90 FF.

¹³ Un quart de la consommation d'électricité pour l'éclairage, mais une forte contribution à la pointe journalière.

¹⁴ Pour rendre indifférent le choix entre LFC et lampe à incandescence sur des durées d'utilisation de 1h/j, il faudrait que les LFC soient vendues moins de 25 F.