

› Entretiens Louis le Grand 2005 ›
Enseignants de Sciences Economiques et Sociales – Entreprises

Lundi et mardi 29 et 30 août 2005

« Les entreprises, acteurs de la recherche et de l'innovation »

De la mise au point des cellules photovoltaïques à leur industrialisation

SVEZ



Valérie Gaillard

Jean-Claude Steffens



Introduction

Des spécialistes de l'énergie nous annoncent pour les années à venir le risque d'une crise énergétique, lorsque les capacités de production de pétrole et de gaz déclinantes deviendront insuffisantes pour faire face à la demande. En outre, le maintien sur le marché électrique européen libéralisé d'un nombre suffisant de centrales pour couvrir les besoins des industries et de la population aux heures de pointe peut devenir problématique à l'avenir et provoquer des interruptions (black out).



D'autre part, dans le cadre des accords de Kyoto de 1997, les Etats se doivent de développer des énergies propres, c'est à dire économes en énergies fossiles et respectueuses de l'environnement.



5^{ème} groupe industriel français, Suez occupe une position de leader dans le domaine de l'énergie et de l'environnement (l'eau et la propreté). Ainsi, de part la nature même de ses métiers, Suez a choisi d'intégrer le respect de l'environnement parmi ses valeurs communes essentielles. C'est dans cette logique que Suez s'est impliqué dans la production d'électricité à partir de toutes sortes d'énergies renouvelables (13% de sa production en 2004) et a investi en amont de la filière jusqu'à la production industrielle de cellules photovoltaïques dans une *Joint Venture (50/50)* avec le pétrolier TOTAL.

L'objet de l'étude porte sur l'industrialisation d'un nouveau mode de fabrication de cellules photovoltaïques à partir de silicium polycristallin.

Après avoir présenté succinctement le groupe Suez puis la fabrication et l'utilisation des cellules photovoltaïques, l'étude de cas développera l'implication de Suez dans le photovoltaïque. Puis, le business plan sera présenté. Enfin, les atouts et les contraintes du marché seront traités, sans oublier la gestion de l'avenir.

I. Présentation de Suez

L'historique de la formation de SUEZ



SUEZ résulte de la fusion de la Compagnie de SUEZ et de la Lyonnaise des Eaux intervenue en juin 1997.

A l'époque, la Compagnie de SUEZ, qui avait construit et exploité le canal de Suez jusqu'à sa nationalisation par le gouvernement égyptien en 1956, était encore une société holding possédant des participations diversifiées en Belgique et en France, en particulier dans les secteurs des services financiers et de l'Energie.

Quant à la Lyonnaise des Eaux, c'était une société diversifiée dans la gestion et le traitement de l'eau et des déchets, la construction, la communication et la gestion d'installations techniques. Une large part de son activité était localisée en France, avec toutefois une activité internationale significative.

Les activités du groupe

« SUEZ , vous apporter l'essentiel de la vie »

L'objectif de SUEZ est de répondre aux besoins fondamentaux d'une clientèle variée.

Progressivement, SUEZ a cessé d'être un conglomérat pour devenir un groupe industriel de services, acteur du développement durable, offrant une large gamme de solutions pour les entreprises, les particuliers et les collectivités dans le domaine de l'Energie et de l'Environnement (Eau et Propreté).

La spécificité de SUEZ est d'imaginer, de concevoir, de mettre en œuvre et de gérer des systèmes et des réseaux dans chacun de ses métiers, afin de satisfaire les besoins de ses clients, entreprises, collectivités ou clientèle individuelle. SUEZ souhaite leur apporter les solutions spécifiques et innovantes qu'ils attendent.

Le développement du Groupe s'appuie donc sur :

- une offre diversifiée de services qui repose sur une capacité d'expertise étendue,
- sa longue expérience et ses nombreuses références
- La flexibilité financière et géographique que lui offrent des cash-flows récurrents et son réseau international.

SUEZ détient, dans chacun de ses grands domaines, Energie et Environnement, des positions de premier plan.

Dans le domaine de l'Énergie, SUEZ est un acteur majeur dans :

- la production d'électricité,
- le négoce d'énergie en tant qu'activité de support,
- le transport ou la commercialisation de l'électricité et du gaz naturel,
- la gestion de réseaux de transport et de distribution,
- l'offre de services comme la construction et l'exploitation sur site d'unités de cogénération,
- la gestion technique des installations chez les clients ou l'optimisation de systèmes,
- Des activités d'ingénierie.

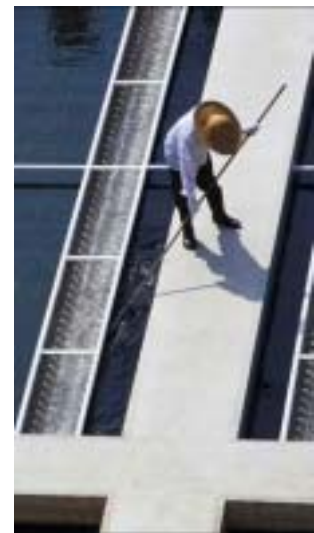


Dans le domaine de l'Environnement, SUEZ est un acteur majeur des services liés à l'eau.



Il assure la conception et la gestion de systèmes de production et de distribution d'eau potable et de traitement des eaux usées, il offre des activités d'ingénierie et fournit aux industriels une large gamme de services.

SUEZ est également l'un des acteurs mondiaux de la gestion des déchets pour le compte des clients municipaux et des entreprises. Ses compétences couvrent la totalité de la chaîne de valeur: collecte, tri et recyclage, incinération, enfouissement et la plupart des catégories de déchets, banals ou spéciaux.



La clientèle

SUEZ dessert deux grands segments de clientèle :

a) la clientèle des entreprises

SUEZ propose aux clients :

- la fourniture de produits et services de base (électricité, gaz, eau et gestion des déchets),
- un vaste ensemble de prestations spécialisées, qui couvrent désormais, entre autres, le traitement des déchets industriels spéciaux,
- la conception et la fourniture d'installations de traitement des eaux ou d'installations électriques et mécaniques ou le génie climatique;
- des services de gestion sur site industriel, commercial ou tertiaire allant de la maintenance à des opérations complexes d'externalisation.



b) la clientèle municipale et les particuliers

L'évolution des politiques publiques, des réglementations nationales et le développement de l'urbanisme déterminent le marché potentiel du Groupe à long terme.

En effet, l'appel au secteur privé se développe :

- soit au rythme de la libéralisation des marchés de l'énergie,
- soit du fait de la prise de conscience par les collectivités publiques concernées du caractère limité de leurs ressources et de leurs compétences spécialisées,
- soit encore en raison du renforcement des réglementations environnementales dans le cas de la propreté.

Cet appel au secteur privé peut prendre la forme de privatisations, de concessions ou de contrats d'opération et de maintenance.

Les chiffres clés

160700 collaborateurs

200 millions de particuliers desservis dans le monde

3 000 municipalités desservies au quotidien

500 000 clients industriels et commerciaux

40,7 milliards d'euros de chiffre d'affaires en 2004

+6,2% de croissance organique en 2004

72% du chiffre d'affaire réalisé par l'activité Energie, 28% par l'activité Environnement

54,9% du chiffre d'affaires est réalisé en France et en Belgique, 79,6% en Europe

L'éthique et les valeurs du groupe

Dès le début de son existence, SUEZ a affirmé ses valeurs :

- le professionnalisme
- le partenariat
- l'esprit d'équipe
- la création de valeur
- le respect de l'environnement
- l'éthique

SUEZ en Bourse

SUEZ est une société anonyme cotée en Bourse, avec un capital social au 9 août 2005, de **EUR 2.053.624.334**. Au 10 août 2005, sa valeur boursière était de 25,56 milliards d'euros, soit $(24,9 \times 2\,053\,624\,334) / 2$ (la valeur nominale de l'action étant de 2 euros)

II. Le photovoltaïque

La production directe d'électricité à partir de la lumière

Certains appareils sont capables de convertir directement la lumière en énergie électrique. Ils utilisent des matériaux exploitant les propriétés des semi-conducteurs et fournissent un courant continu lorsqu'ils sont éclairés. L'énergie est produite sans aucune pièce en mouvement ni apport extérieur et donc les seuls coûts sont ceux de la fabrication du système et de ses auxiliaires, dont nous détaillons ci-dessous les étapes.

Les technologies permettant la conversion directe de lumière en électricité

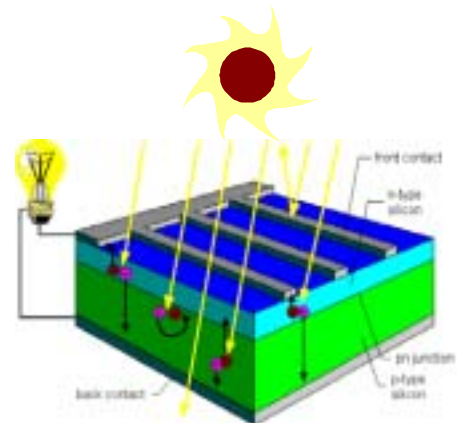
a) le silicium monocristallin

Les substrats de silicium cristallin très pur sont traités pour acquérir les propriétés photovoltaïques puis équipés de conducteurs sur les deux faces pour récolter le courant qui traverse le substrat sous l'effet de la lumière.

Une fine plaquette de base formée d'un seul cristal de silicium et traitée pour acquérir les propriétés semi-conductrices est capable de transformer la lumière en électricité, collectée par les conducteurs déposés sur les surfaces avant et arrière. La qualité du monocristal garantit une utilisation maximale de la lumière entrante. Les rendements se situent dans le meilleur des cas aux alentours de 16%.

b) le silicium polycristallin

Si le substrat est formé non pas d'un seul cristal, mais d'un petit nombre de grands cristaux juxtaposés, on obtient pratiquement le même rendement tout en abaissant les coûts de production du substrat. Le fonctionnement est en principe identique à celui du monocristal avec un rendement de 14 à 15%.



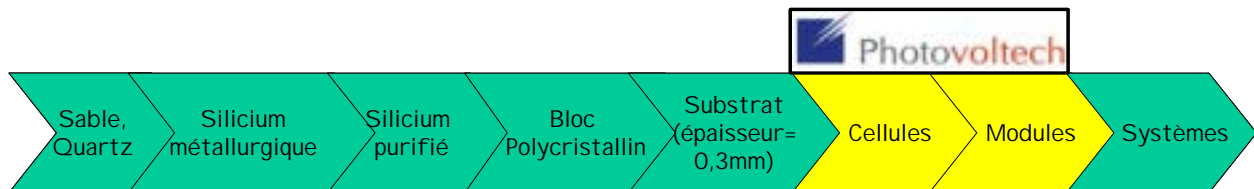
c) le silicium amorphe

Par opposition au silicium cristallin, le silicium amorphe est formé d'atomes de silicium attachés dans des grains de façon chaotique. Il a donc perdu les propriétés liées à la structure ordonnée. Cependant, en déposant une couche mince (de 1 à 3 microns) de silicium amorphe sur un support adéquat, on peut quand même recueillir un courant photovoltaïque, mais avec un rendement de l'ordre de 5 à 10 % (avec un coût de fabrication lui aussi beaucoup moindre).

d) L'apport des nanotechnologies

Récemment, des chercheurs ont mis en évidence la possibilité de réaliser à l'aide des nanotechnologies des polymères présentant aussi des propriétés capables de transformer directement la lumière en énergie électrique. D'autres développent des peintures photovoltaïques à base de nanofils d'oxydes métalliques. Des tests en laboratoire ont déjà mis en évidence des composants affichant un rendement de 5%, pour de très petites surfaces. Des études complémentaires sont en cours pour stabiliser les rendements sur de plus grandes surfaces dans des conditions industrielles de production. Les coûts de fabrication seraient moins élevés et surtout on s'affranchirait des contraintes de surface plane liées aux cristaux de silicium. Ces technologies pourraient voir leurs premières applications commerciales dans 5 ou 10 ans.

La chaîne de valeur « cellules cristallines »



e) le silicium métallurgique

A partir de l'oxyde de silicium (SiO_2) présent en abondance à la surface de la terre (généralement sous forme de sable ou de quartz), on peut le transformer en silicium atomique (Si). On obtient alors ce qu'on appelle du silicium métallurgique. Ce dernier a une pureté de 98% au moins.

f) le silicium purifié

Le degré d'impuretés qui restent dans le silicium métallurgique est trop important pour en faire des cristaux de grande dimension nécessaires pour les applications informatiques ou photovoltaïques. On purifie donc le silicium jusqu'à obtenir un taux d'impureté inférieur ou égal à un par million.

g) le cristal de silicium (monocristal, polycristal)

Un cristal de silicium est un solide dans lequel les atomes sont rangés de façon ordonnée, identique et répétitive dans les trois dimensions.

Pour former ce cristal, le silicium purifié est moulu, fondu et resolidifié très lentement pour former, selon la technologie employée, un monocristal (sous forme de barreau cylindrique ayant une longueur supérieure à 1 m et un diamètre qui peut atteindre 40 cm), ou un polycristal (sous forme d'un parallélépipédique d'un mètre de largeur).

h) les substrats ("wafers")

Le cylindre monocristallin est équiné (avec des coins arrondis pour limiter les pertes) ; quant au bloc de polycristal, il est scié en barre carrée (dimensions jusqu'à 15x15 cm). En suite, ces lingots sont débités en fines plaques (300 microns) qui serviront de substrats pour les cellules photovoltaïques.

i) les cellules solaires photovoltaïques

Les substrats sont soigneusement nettoyés chimiquement, puis enrichis du produit « dopant » qui leur donne leurs propriétés de semi-conducteurs. Ils sont alors équipés d'une couche anti-reflets qui en améliore l'esthétique et le rendement. La trame métallique chargée de recueillir le courant est alors ajoutée par sérigraphie (à travers un pochoir) puis cuite sur la surface. A ce niveau, la cellule est capable de fournir le courant.



j) les modules (ou panneaux)



La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Elles sont également très fragiles mécaniquement et sensibles à l'humidité qui corrode leurs contacts (seule source de vieillissement). Pour produire plus de puissance, leur donner plus de rigidité et les isoler de l'humidité de l'air, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en

conservant la tension. La puissance de crête, obtenue sous un éclairage maximal, sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité.

k) les systèmes photovoltaïques



L'interconnexion de modules entre eux - en série ou en parallèle - pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale ou le réseau auquel il est raccordé, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules,

le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque.

Les secteurs d'application et quelques exemples concrets

Les différents secteurs d'application sont:

a) Le domaine spatial:

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes, ...) remontent aux années soixante. Depuis lors, des recherches et développements nombreux ont été réalisés dans le domaine militaire et public pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules.

b) L'habitation isolée



L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en développement. L'extension du réseau pour des demandes relativement faibles et isolées n'est pas rentable pour les sociétés d'électricité. Bien que la solution des groupes électrogènes (Diesel) présente beaucoup d'inconvénients (approvisionnement en carburant souvent peu fiable, systèmes peu autonomes, coûts cachés pour le combustible, les réparations et l'entretien), ils ont souvent été choisis pour leur coût d'investissement modéré. En effet, le coût initial élevé d'un générateur photovoltaïque est l'obstacle majeur à son expansion sur ce type de marché.

Les dizaines de milliers d'unités photovoltaïques autonomes (au silicium cristallin ou amorphe) installées de par le monde ont pourtant démontré leur compétitivité en ce qui concerne de multiples applications de petite et moyenne puissance (inférieur à 100 kW). De nombreuses organisations internationales d'aide aux pays en développement ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de développement social et économique pour fournir des services de base à la population, tels que:

- le pompage de l'eau pour la consommation du village ou pour l'irrigation,
- la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles,...
- l'éclairage

c) L'industrie isolée

La technologie photovoltaïque est de plus en plus couramment intégrée dans les programmes nationaux d'électrification rurale (habitations domestiques, écoles, centres de santé, télécommunication,...)

Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible. Le générateur photovoltaïque est alors une solution très séduisante.

d) La centrale de puissance

Des centrales de production photovoltaïque sont expérimentées depuis quelques années en Europe et aux États-Unis.



e) La résidence urbaine

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est aussi envisagé en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et façades de bâtiments.

Les premières réalisations datent de la fin des années 70 aux États-Unis, mais ce n'est que depuis quelques années que l'Europe s'est lancée dans un programme d'expérimentation de maisons photovoltaïques, en particulier en Allemagne où la politique de protection de l'environnement et de conservation des ressources est dynamique. La Suisse a aussi mis en place des plans de soutiens, et surtout l'Espagne opère une percée dans ce secteur.

L'intérêt de telles réalisations est de produire de la puissance à l'endroit même de la demande, en s'affranchissant des problèmes de réseau. Seul l'excès de production est injecté dans le réseau, et en période de non-production (la nuit), l'électricité est prélevée sur le réseau. Le compteur tourne alors dans les deux sens.

La façade photovoltaïque suscite beaucoup d'intérêt en Europe et aux États-Unis. En réalité, l'enthousiasme découle du fait que le revêtement à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques revient pratiquement au même prix qu'un recouvrement à l'aide de matériaux classiques dès que ceux-ci deviennent un peu luxueux (marbre, inox, ...). Ceci requiert une approche commerciale et une formation appropriée des architectes.

f) Les biens de consommation

Beaucoup de petits appareils peuvent être alimentés par une petite surface de cellules photovoltaïques. Les applications les plus connues sont les calculatrices et les montres.

En conséquence, on peut distinguer trois grands types d'application:



- les systèmes isolés dédiés



exemples: les bornes téléphoniques autonomes le long de l'autoroute, l'éclairage public le long du stade Baudouin au Heysel, le mobilier urbain (abribus).

- les systèmes raccordés au réseau

Leur but est d'alimenter une consommation locale tout en restituant l'excès de production (ou en appelant la puissance manquante) au réseau de distribution.

- les systèmes d'électrification rurale

Le système alimente un mini-réseau, souvent avec des moyens de stockage limités (batteries) ou un équipement de production classique en secours. Toute électricité produite à partir du soleil vient réduire la consommation des moyens classiques.

III. L'implication de Suez dans le photovoltaïque: Photovoltech

L'histoire de Photovoltech

Photovoltech est une entreprise située à Tienen (Tirlemont) en Belgique, entre Bruxelles et Liège. Elle a été fondée en décembre 2001. Elle produit des cellules et des modules photovoltaïques, en se basant sur la technologie développée par IMEC.



IMEC (Interuniversitair Micro-Elektronica Centrum) est un grand centre de recherche interuniversitaire (1500 personnes) situé près de l'université de Leuven en Belgique. Cet institut spécialisé dans l'électronique a développé et mis au point un processus pour fabriquer de façon fiable des cellules photovoltaïques de haute qualité sur des substrats de silicium polycristallin, dont les rendements dépassent 16%.

Dans un premier temps, IMEC a développé le processus en laboratoire en se basant sur ses connaissances accumulées, dans le cadre de projets subsidiés. Une fois le procédé bien contrôlé et parfaitement au point, IMEC s'est mis en quête de partenaires industriels pour valoriser commercialement ses connaissances.

C'est alors qu'Electrabel, filiale de Suez, a engagé sa participation dans le cadre d'une joint venture avec Total, qui recherchait à l'époque un partenariat dans ce secteur.

Electrabel possédait déjà, à l'époque, une société Soltech qui construisait des modules et des systèmes à la demande à partir de cellules achetées sur le marché, et l'entrée dans le créneau de la fabrication des cellules complétait sa pénétration dans la chaîne de valeur.

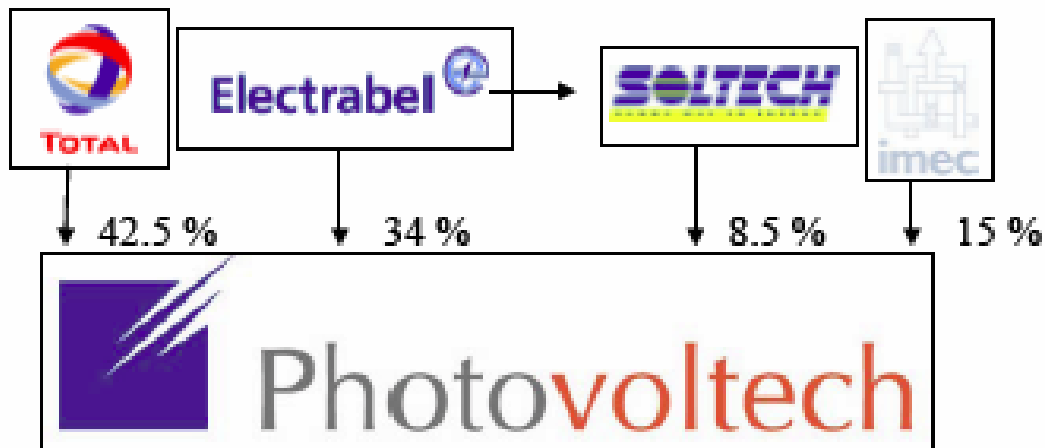
Les travaux de construction de l'usine de Tirlemont ont démarré en octobre 2002. La production a débuté en novembre 2003, et la capacité totale atteinte en avance par rapport au planning initial.

A la fin de l'année 2004, l'entreprise fonctionnait avec 5 équipes pour les cellules et 3 équipes pour les modules. Au total, 95 personnes étaient employées dont 30 employés et 35 ouvriers.



Photovoltech a bien sûr gardé des contacts privilégiés avec IMEC. Le Directeur Général de Photovoltech était le responsable du projet photovoltaïque au sein d'IMEC. IMEC continue par ailleurs à faire des recherches pour le compte de Photovoltech, débouchant sur les produits « *back-contact* » dont il sera question plus loin..

L'organigramme financier de départ (11 décembre 2001)



Lors de l'augmentation de la capacité de production, Total et Electrabel accroîtront leur participation directe tout en maintenant leur parité. Les participations relatives de Soltech et IMEC en seront mécaniquement diminuées.

Photovoltech dans la chaîne de production

la production de Photovoltech se concentre sur les cellules et les modules

Au départ, Photovoltech avait prévu une force de vente pour les cellules qu'il fabriquait. La question était: "Comment vendre ce que nous produirons?"

Très rapidement, le marché est devenu demandeur (pénurie due à la demande en forte hausse et aux rigidités sur les outils de fabrication). Aujourd'hui, la question est: "Comment pourrions-nous produire ce que nous avons vendu?" La force de vente réduite gère et entretient les relations commerciales avec d'importants fabricants de modules.

Dans les circonstances actuelles, le marché restera encore demandeur pendant plusieurs années et donc une promotion n'est pas indiquée.

L'innovation et son marché

a) définitions et type d'innovation

Au préalable, attardons-nous sur la définition que Suez donne d'une innovation. Pour Suez, innover, c'est intégrer une discontinuité dans l'organisation ou les services offerts en interne ou en externe, pour améliorer un processus ou un produit de l'entreprise alors qu'il était déjà satisfaisant.

L'objectif de Suez est la recherche constante à la fois des produits qui satisfassent de mieux en mieux les besoins des clients, mais aussi des procédés qui rendent ceux-ci plus compétitifs. Ainsi, l'innovation comprend à la fois la recherche, l'acceptation et l'intégration d'un saut qualitatif. Quant à l'invention proprement dite qui a été à la base de l'innovation,

elle est souvent plus difficile à cerner. C'est plutôt a posteriori, en observant l'innovation que l'on est à même de retrouver l'invention: Chez Suez, l'innovation est portée par la demande et l'accumulation de l'expertise. D'abord, il y a l'idée de l'innovation, puis on dirige les recherches pour parfaire l'invention qui y correspond.

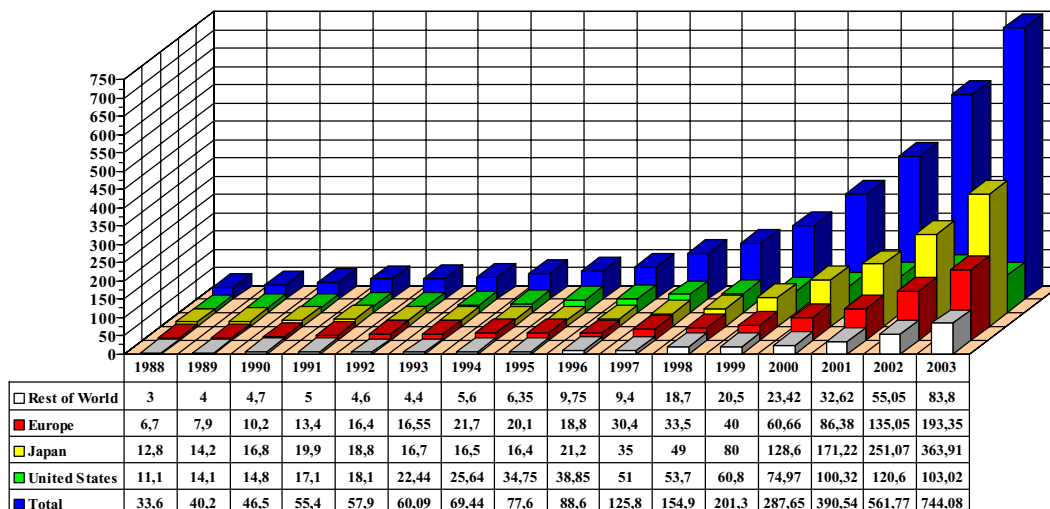
Les cellules de Photovoltech sont essentiellement une innovation de procédé. Les cellules produites diffèrent seulement des produits de la concurrence par leur rendement final et leur esthétique. La grande innovation consiste à pouvoir produire des cellules systématiquement meilleures de façon stable et avec peu de rebuts.

En référence à la théorie de J.A. Schumpeter, le procédé IMEC est une innovation mineure. Le terme d'innovation majeure correspondrait plutôt à la découverte des cellules à base des nanotechnologies. Les innovations majeures ont un temps de pénétration du marché plus long car il faut modifier la conception des systèmes sous-jacents (par exemple, comment collecter le courant produit à partir d'une peinture photovoltaïque ?). C'est sans doute la raison pour laquelle les cellules de Photovoltech se sont si facilement implantées sur le marché dans la mesure où, sans être fondamentalement différentes, elles sont meilleures en rendement et surtout par leur aspect visuel (couche anti-reflets).

Les cellules photovoltaïques de Photovoltech ne s'intègrent pas dans un ensemble cohérent d'innovations chez Suez, dans la mesure où cette activité ne fait pas partie du corps de métier de Suez ou de ses filiales. Cette activité vient plutôt en support, dans une perspective d'élargissement du portefeuille de l'offre en énergies renouvelables ainsi que du positionnement volontaire du groupe dans ce domaine.

L'exploitation de cette innovation est le résultat d'une attitude opportuniste face à une situation qui s'est offerte. La logique d'opportunité était accrochée, au moment du démarrage du projet, à la conjonction commerciale et technique favorable (technologie IMEC prête pour l'industrialisation, croissance forte du marché, saturation des outils de production chez les concurrents) à la volonté de comprendre un marché à la frontière des activités renouvelables déjà développées (hydraulique, éolien et biomasse) ainsi qu'à l'image (positive résultant de cette initiative industrielle).

b) la nature du marché



Le marché des cellules photovoltaïques est à la fois homogène et diversifié. Il est homogène en Europe où la demande est pilotée par des politiques nationales de soutien dont les structures se ressemblent (essentiellement : subside à l'investissement et/ou à l'électricité produite par l'installation une fois celle-ci réalisée, payé non à partir du budget de l'état, mais par les clients de l'électricité en fonction de leur consommation). De par l'ensoleillement limité et l'exiguïté des surfaces disponibles, les projets ont systématiquement recours à des technologies à haut rendement de conversion de la lumière à cause du principe de calcul des subsides. Ce type de demande correspond au segment visé par Photovoltech. L'expérience montre en effet que des cellules amorphes avec un coût moindre et un rendement plus limité n'ont pas percé sur le marché européen.

Néanmoins, ce marché est également diversifié au niveau mondial, car dans les pays en développement où l'ensoleillement est beaucoup plus abondant et le terrain plus disponible, une tendance se dessine pour installer des systèmes d'électrification rurale à base de cellules à moindre coût et moindre rendement. Cependant, ce développement est freiné par l'incapacité des pouvoirs publics locaux à soutenir ces réalisations. Les volumes ne sont pas encore suffisants pour imposer la technologie et les populations locales ne sont pas à même de supporter les coûts, surtout si l'électricité est utilisée à des fins de confort (réfrigération, éclairage) et non à des fins qui génèrent des revenus (Petites et Moyennes Entreprises).

Les missions de Photovoltech

a) la volonté d'être un acteur important sur le marché en forte croissance du photovoltaïque

L'énergie renouvelable jouera un rôle important et croissant dans l'approvisionnement énergétique. L'énergie solaire de type photovoltaïque peut y contribuer dans les applications qui s'y prêtent. Le potentiel théorique est en tout cas énorme, même en Europe du nord. Les conditions économiques, au niveau actuel du marché, empêchent encore son développement.

b) des produits d'une image de qualité, d'esthétique et de haut rendement

Le rendement est quasiment au sommet de ce qui est actuellement possible industriellement avec le silicium polycristallin. Une extension du procédé vers les monocristaux est également possible, offrant une flexibilité supplémentaire.

Le développement récent de cellules « back contact » sans réseau de conducteurs apparents et donc plus esthétiques (couleur bleue unie sur toute la surface du module) répond à cette volonté.



c) Le corps de métier: la fabrication de cellules

Toutefois, la fabrication de modules est utile pour comprendre les besoins des clients acheteurs de cellules et accéder à des segments de marchés plus localisés.

IV. Les chiffres clés: le business plan

Le financement



a) le budget

La taille de Photovoltech est négligeable par rapport à Suez. L'apport initial des actionnaires de Photovoltech était de 10 millions d'euros.

b) le mode de financement et la réalisation du projet

Dans le business plan initial, l'option retenue a été de recourir à l'apport des actionnaires pour tous les investissements liés à la production (machines, stocks), tandis que les investissements non directement liés à la production (terrain, bâtiments, etc.) et le fonds de roulement ont été financés par emprunts.

Plus de la moitié des investissements coûteux ont été engagés pendant l'année 1, alors que la production ne commençait qu'au 6^{ème} mois de l'année 2 (ce qui peut être considéré comme un décalage fort court).

La rentabilité du business

a) Comment la recherche a-t-elle été rentabilisée?

La société IMEC travaille avec des contrats de recherche financés par les fonds publics ou des projets privés. Elle ne rembourse par les subsides reçus. Une fois les résultats obtenus, la découverte est évaluée par rapport à sa valeur marché et une rémunération correspondante de l'innovation est obtenue de la part de la société industrielle qui la met en œuvre.

Dans ce cas d'espèce, IMEC est rémunérée pour son invention de deux façons différentes:

- IMEC a reçu 15% des actions de Photovoltech en rémunération de son apport immatériel (Il a donc droit à 15% des dividendes)
- IMEC est rémunéré proportionnellement au volume produit ainsi que des gains de rendement en contrepartie de la licence sur son procédé.

b) l'obtention du point mort

Dès 2005 le résultat opérationnel est positif. Le niveau de production est passé très vite à son niveau maximum (cinq équipes de production) limité seulement par la maintenance de matériels de fabrication. Le point mort (cumulatif sur l'ensemble des exercices) sera atteint dans deux ans.

L'avenir du marché

a) hausse actuelle du prix des matières premières due à la surchauffe du marché aval

Le caractère artificiel de la demande (lié aux subsides aux acheteurs finals) et le nombre limité d'acteurs sur le marché à forte capacité de production rend le pilotage du marché difficile. Actuellement, on note une surchauffe en Europe basée sur la consommation

allemande et espagnole, mais celle-ci peut à tout moment s'arrêter en cas de modification de la politique. La possibilité de voir d'autres pays (France, mais aussi pays du sud comme le Portugal, l'Italie et la Grèce) prendre la relève après l'effacement de l'Allemagne est réelle, mais pas encore certaine. Le marché est plus stable au Japon, mais dominé par les fournisseurs japonais (Kyocera, Sharp), également grands exportateurs

Par ailleurs, le goulot d'étranglement n'est pas sur la fabrication des cellules (Photovoltech, avec un doublement de son capital, peut multiplier par 6 sa production), mais sur le marché, beaucoup plus capitalistique, de la production de silicium purifié dont le débouché dépend de l'informatique et du photovoltaïque. Le marché du silicium métallurgique a d'autres débouchés importants, comme la fabrication d'aluminium. Il y a quelques années, le photovoltaïque absorbait les surplus ou les rebuts de l'informatique (10% du total). Maintenant, la consommation de silicium purifié pour le photovoltaïque représente 50% du total et donc une augmentation de capacité ne pourra se rentabiliser que sur la pérennité de ce marché, difficile à assurer en fonction de ce qui précède.



On observe donc une rigidité importante dans l'augmentation des moyens de production amont, conduisant à une augmentation des prix sur les substrats.

A cette rigidité, il faut ajouter le délai de réalisation, qui fait qu'une décision d'investissement aujourd'hui ne porterait ses fruits sur le marché que dans 2 ans au mieux.

b) les perspectives de diminution du prix de vente

Les diminutions de prix de vente sont prévisibles à partir de différentes actions:

- L'automatisation et le perfectionnement des chaînes de production

Toutefois, ceci a déjà été réalisé en grande partie à ce jour.

- La diminution de l'épaisseur des substrats (actuellement 300 microns, ou 0,3 mm)

Toutefois, les substrats sont sciés à partir d'un bloc avec des fils d'acier qui ont déjà un diamètre de 180 microns. Plus on diminue l'épaisseur des substrats, plus on augmente le pourcentage de pertes dans le bloc. En outre, plus les substrats sont minces, plus les chances de les casser sont grandes. En effet, les substrats sont vendus et transportés vers les usines de cellules.

- Les économies d'échelle dans les chaînes de production

Chez Photovoltech, les chaînes de production tournent déjà au maximum. Un doublement du capital en 2005 - 2006 permettra de multiplier la production par 6. Au niveau mondial (une forte augmentation des capacités ne doit pas être attendue), les grands producteurs ont anticipé la croissance du marché en saturant et en développant leurs capacités de production..

Ces perspectives sont malheureusement compensées par la hausse actuelle du prix des matières premières.

Des baisses de prix (artificielles) sont à attendre si la demande venait à diminuer fortement. Dans ce cas, tous les producteurs ne sont pas tous logés à la même enseigne : certains d'entre eux, en place depuis longtemps et dont les installations sont déjà fortement amorties ou pour qui la rentabilité de cette activité n'est qu'un souci marginal, pourront préférer vendre à perte plutôt que de fermer leurs capacités de production. Pour d'autres, financièrement plus fragiles, ceci peut tourner à la fermeture pure et simple.

Enfin, les baisses de prix attendues sur le marché du photovoltaïque viendront également via les produits "bas de gamme" soit au silicium amorphe en film mince, soit aux nanotechnologies, au prix de rendements électriques moindres. Ces baisses de prix, d'abord applicables aux endroits où de grandes surfaces sont disponibles et où l'ensoleillement est fort (Pays En Développement) pourraient avoir en retour des répercussions en France et en Europe où on observe actuellement que ce sont les cellules au rendement maximum qui se vendent le mieux.

c) un marché porté par la demande tant que le cadre institutionnel est favorable

Si le cadre institutionnel a effectivement joué parfaitement son rôle en permettant la pénétration des technologies photovoltaïques, sa fragilité liée aux revirements toujours possibles, est bien connue et constitue un frein important à la confiance des industriels qui ont besoin d'un cadre stable sur des durées suffisantes pour rentabiliser leurs outils de production.

V. Les atouts et les contraintes

Le photovoltaïque de manière générale



a) les atouts

- Le rôle important et croissant de l'énergie renouvelable: la réduction de l'effet de serre
- Un potentiel réel de production même en France du nord (1000 heures d'équivalent crête par an). Toutefois, le potentiel économique dépend des aides financières et autres subsides
- des opportunités futures dans les Pays En Développement
- Une amélioration progressive des qualités esthétiques et architecturales. Ainsi, l'aspect esthétique est fondamental car le coût de façade évitée peut avoir une importance capitale. A titre de comparaison, le photovoltaïque en façade s'élève à 1000€/m². Une façade commerciale en marbre coûte environ 1200€/m². Dans un cas particulier, une façade en inox d'une banque à Paris a coûté 2500€/m². Ainsi, on peut dire que le marché "esthétique" résistera mieux en cas de baisse des politiques de support

b) les contraintes

- des coûts de production élevés (économies d'échelle de part les effets de la courbe d'apprentissage et par une recherche-développement judicieuse)
- des cycles de demande courts (2 ans) et brutaux
- une demande européenne entièrement pilotée par les politiques nationales de soutien

Par exemple, en Allemagne, les sociétés de distribution de l'électricité rachètent l'électricité fournie par le photovoltaïque à un prix fixé par la loi (500 €/MWh, à comparer aux 35 €/MWh pour l'électricité produite à partir d'énergies fossiles ou nucléaire, et aux 125 €/MWh payés par certaines tranches de consommateurs domestiques). De plus, les institutions financières accordent des conditions de prêts favorables à l'investissement. Enfin, l'intervention est garantie pendant les 20 ans qui suivent la mise en service pour la fourniture au réseau.

D'autres pays soutiennent particulièrement l'énergie photovoltaïque: l'Espagne, l'Italie, la Belgique (et en particulier la région flamande).

A propos de Photovoltech

a) les atouts

- le silicium polycristallin

Il est moins cher à produire que le substrat monocristallin. De plus, il donne un meilleur rendement que le silicium amorphe.

Le procédé IMEC peut aussi si nécessaire être appliqué tel quel à des substrats monocristallins pour un rendement encore supérieur si le marché le demande.

- L'originalité du processus de fabrication:

Le procédé de fabrication ajusté et optimisé est propre à Photovoltech.

- l'amélioration des qualités esthétiques:

Photovoltech se différencie de ses concurrents en développant des cellules avec un aspect architectural plus esthétique, tout en maintenant son avance sur le rendement électrique.

Enfin, dans un domaine où la théorie est connue depuis très longtemps et les substrats sont les mêmes pour tout le monde, la différenciation ne peut se faire que sur des détails de fabrication.

- le rendement de la cellule produite

Un module de 1m² de module photovoltaïque produit entre 130 et 140 Wc (crête c'est à dire à plein soleil)

1kWc = 1000Wc

Un système d'environ 8 à 10 m² de surface peut fournir 1 kWc

- le rendement écologique de la cellule photovoltaïque

La production d'une cellule photovoltaïque demande beaucoup d'énergie (principalement électrique) et le grillage du quartz au départ pour obtenir du silicium métallurgique émet une tonne de CO₂ par tonne de silicium obtenue.

Dans nos contrées d'Europe de l'ouest, à des latitudes moyennes (Belgique, Nord de la France, Allemagne, etc.) on estime qu'il faut attendre près de 5 ans pour qu'une cellule ait émis toute l'électricité qui a été nécessaire pour la fabriquer.

Ce chiffre est à comparer avec une durée de vie de 25 ans de la cellule proprement dite. Après avoir "repayé" son énergie de naissance, la cellule a encore quatre fois autant de vie devant elle.

A présent que la demande de silicium purifié pour l'industrie photovoltaïque devient importante, de nouvelles méthodes sont développées pour purifier du silicium pour ce segment uniquement (silicium impropre pour



une utilisation en informatique) plutôt que d'acheter sur le marché de l'informatique existant. On peut ainsi réduire significativement la quantité d'énergie de la purification.

Si l'on veut traduire ces chiffres en émissions de CO₂, il faut convertir l'énergie électrique en fonction d'un parc de production précis. Sur la base des émissions CO₂ moyennes de Belgique (où les cellules Photovoltech sont fabriquées) et d'une utilisation de ces cellules en milieu tempéré, on calcule que l'électricité photovoltaïque émet sur son cycle de vie complet l'équivalent de 60g CO₂ pour chaque kWh qu'elle produit. Par comparaison, une centrale à charbon émet 900g CO₂/kWh, un cycle combiné à gaz, 450g; ou encore (en tenant compte du cycle de vie complet); une éolienne, 28g; un barrage, 14g; une centrale nucléaire, 4g.

Il faut noter cependant que le silicium peut être importé de pays où l'électricité n'émet que très peu de CO₂, comme la Norvège par exemple. Les chiffres deviennent alors plus positifs pour les cellules au silicium cristallin.

- le cycle de vie du produit

L'essentiel du coût énergétique de la cellule se trouve dans la fabrication du substrat (wafer) dont le coût commercial représente 60% du prix de la cellule. Par comparaison, l'étape qui transforme le substrat en cellule n'a qu'un coût limité en matière (essentiellement des produits de décapage, puis des dopants en quantité infinitésimale).

La cellule fonctionne sans pièce en mouvement ni réaction chimique pendant toute sa durée de vie.

Sa vie se termine par rupture accidentelle du substrat (très rare vu la protection sous verre) ou par oxydation des contacts qui perdent leurs caractéristiques de conducteurs.

Après nettoyage chimique, la cellule peut être recyclée au niveau du silicium métallurgique, économisant ainsi une grande part de l'énergie nécessaire à la fabrication d'une nouvelle cellule. Le nombre actuellement très limité de cellules hors service ne permet pas de tester ce recyclage à grande échelle.

b) les contraintes

- l'approvisionnement en silicium purifié

Dans le contexte de pénurie actuel, sécuriser l'approvisionnement est un vrai problème. Les méthodes utilisées vont dans le sens de discussions avec les producteurs amont, qui demandent des garanties d'enlèvement (contrats « *take or pay* ») pour garantir leurs investissements en nouveaux moyens de production.

- la sécurisation de l'aval sur le moyen terme



La question restera toujours épineuse, car la stabilité dans le temps de la volonté politique pilotée par l'opinion publique n'est jamais garantie. Les actions utilisées sont principalement l'information des décideurs sur les effets inattendus ou cachés que leurs décisions peuvent avoir (lobbying bien compris)

VI. La gestion de l'avenir

La poursuite des cellules back contact



La fabrication des cellules back contact (cellules d'une meilleure qualité esthétique dans la mesure où l'assemblage électrique se fait par l'arrière) est maintenant établie, mais ce modèle n'est pas encore commercialisé à grande échelle. Une promotion appropriée doit encore être développée.

Le passage au format substrat de 156 x 156

Actuellement, Photovoltech produit des cellules sur des substrats de 125x125 mm. De plus en plus, le format 156x156 mm devient le standard du marché et des substrats de cette dimension sont accessibles. Comme la chaîne de fabrication est « à la pièce », on augmente automatiquement la production (exprimée en Wc) si on l'applique à des substrats de plus grande dimension. Une seule machine, dont le remplacement est en cours, empêchait jusqu'à présent le passage à cette nouvelle dimension.

Des substrats plus minces

La disponibilité de substrats plus minces est liée au développement de techniques de sciage plus élaborées.

Actuellement le sciage se fait par un fil dont le diamètre ne peut être diminué. Plus les substrats sont minces, plus le pourcentage de chutes sur le bloc complet est important, montrant les limites de cette amélioration.

Le procédé IMEC peut s'appliquer à des substrats plus minces, mais il faut tenir compte de leur fragilité accrue lors des manipulations avant, pendant et après l'usinage.

L'économie ne sera sensible que sur le prix du substrat mince.

Une augmentation continue des rendements

Par l'application des résultats de R&D et un effort continu pour améliorer le rendement des cellules fabriquées, on permet de tirer un meilleur parti du silicium produit et des surfaces disponibles

Une substantielle expansion de l'usine et de la capacité de production

Différents aménagements sur la chaîne existante porteront sa capacité annuelle de production de 15 à 23 MWc à fin 2005.

L'addition d'une chaîne supplémentaire permettra de passer à 80 MWc dès que l'approvisionnement correspondant en substrats aura pu être sécurisé. Cet accroissement permettra des économies d'échelle importantes car toute l'infrastructure administrative restera pratiquement inchangée.

Le défi à court terme:

l'offre de substrats en quantité insuffisante sur le marché, résultat de la demande croissante et des problèmes liés à la disponibilité du silicium purifié

Le problème de la stabilité du marché

Dans un marché demandeur, chacun fait tourner ses outils de production à pleine capacité et rationne ses clients.

En même temps, on prépare un avenir potentiellement plus difficile (soit par augmentation des capacités disponibles sur le marché mondial, soit par chute de la demande au moment où la cadre institutionnel n'est plus aussi favorable), en essayant de se démarquer de ses concurrents.

La compétition complexe pour l'usage du silicium purifié entre l'informatique (fabrication des puces) et le photovoltaïque rend l'équation plus difficile à gérer encore. Au début, les rebuts de l'électronique allaient au photovoltaïque. A présent, le photovoltaïque représente une consommation égale avec l'électronique (mais loin derrière l'aluminium qui consomme du silicium métallurgique)

Les investissements aux trois étages de la fabrication des substrats (silicium métallurgique, silicium purifié, mono et polycristaux) sont d'un ordre de grandeur plus élevés que les investissements en cellules photovoltaïques. C'est donc à ce niveau que les vrais blocages arrivent.



Une fois ces problèmes de capacités résolus, la question sera de sécuriser la demande pendant une durée suffisante pour amortir les nouveaux outils de fabrication.

La demande est pilotée par le niveau des politiques nationales de support. Comme ceux-ci correspondent à un effort financier (le plus souvent des consommateurs plutôt que de l'état lui-même), il est possible de voir des pays ralentir leur effort (ex. Suisse).

A ce moment, soit un autre pays prend le relais (par exemple, l'Espagne), soit le marché global risque de connaître une récession après la surchauffe.

En cas de récession, ce sont les produits non-standards qui ont les meilleures chances de se maintenir, la demande des produits standards non différenciés étant fortement inférieure à l'offre. Ce paramètre joue en faveur de Photovoltech avec des cellules à très haut rendement et le système back contact.

La collaboration avec Total

Total et SUEZ ont peu d'activités en commun sur leur corps de métier principal. De plus, la production industrielle de cellules photovoltaïques ne constitue pas l'activité principale d'aucun des deux protagonistes. Photovoltech n'est donc pas une "semence" qui germera dans d'autres activités communes.

Conclusion

L'innovation de procédé liée aux cellules photovoltaïques de Photovoltech apporte de réels atouts en terme de débouchés et de progrès dans la pénétration de la filière photovoltaïque dans le portefeuille des énergies renouvelables.

Toutefois, ce marché fonctionne dans des conditions spécifiques car la demande ne répond pas aux règles concurrentielles normales (courbe d'élasticité de la demande, concurrence des fournisseurs sur les prix, émergence de produits de substitution). Ce marché doit en même temps soutenir une forte évolution des produits offerts, en sous-tendant et en intégrant progressivement les fruits de la R&D continue sur ce sujet.

De plus, se pose également le problème de l'approvisionnement en silicium. La gestion de l'avenir consiste donc à maintenir la compétitivité relative de Photovoltech dans un marché sous fortes contraintes.

Cette étude de cas montre que le choix des innovations ne relève pas seulement de considérations de coûts, mais aussi d'opportunités à saisir au "bon moment". L'avenir à moyen long terme ne peut bien entendu être maîtrisé. Toutefois, les prises de risque ne font-elles pas partie de la gestion de l'avenir?

