

Résumé de la Table Ronde : Enjeux de l'Opto-Electronique

L'école d'été s'est achevée le vendredi 7 juillet 1989 par une table ronde sur les enjeux et perspectives de l'optoélectronique : après deux semaines de cours de physique sur l'optoélectronique, il s'agissait d'évoquer les aspects technologiques et économiques. Avaient été invités spécialement pour cette occasion MM. Alain Carencó, responsable du département "Optique Intégrée" au C.N.E.T. (Bagneux) et Jean-Pierre Pestie, responsable du développement et de la fabrication des composants stratégiques au département transmission de Alcatel C.I.T. (Villarsaux). MM. Noblanc, directeur des laboratoires de Bagneux du C.N.E.T. et Brunol, directeur des opérations de la division Systèmes Electroniques de Thomson C.S.F. avaient participé à la préparation de la table ronde mais n'ont malheureusement pas pu y prendre part.. Les deux invités étaient accueillis au nom des organisateurs par Pierre Chavel. Ces pages, rédigées par ce dernier sous sa seule responsabilité, résument les interventions.

Intervention introductive d'A. Carencó :

Comment l'optoélectronique évoluera-t-elle vers la microoptoélectronique ? L'optoélectronique date des années 60. A l'origine, la vocation de l'optoélectronique était les afficheurs et photocoupleurs. Aujourd'hui les composants sont dans les foyers, dans les télécommunications. Les systèmes de télécommunications, les mémoires optiques, les capteurs les utilisent. Le numéro de juin 1989 du magazine Laser Focus présente la production japonaise d'optoélectronique en 1988. Les diodes électroluminescentes représentent encore un chiffre d'affaires très important. Depuis 1970 environ, on assiste toutefois à l'arrivée des télécommunications optiques grâce au développement des fibres à faibles pertes et à celui des composants semi-conducteurs GaAs puis InP qui assurent une conversion électrooptique avec un rendement quantique remarquable, voisin de 100 %. Un événement plus récent encore est le développement du marché des mémoires optiques avec le disque compact et la chute des coûts des lasers à 0,8 μm . Emergent maintenant les capteurs : circuits capteurs à fibre comportant une diode laser et même capteurs intégrés au silicium. L'optique va-t-elle prendre le dessus sur l'électronique ? Pour les "pessimistes", non, car c'est encore plus difficile de faire des circuits en optique qu'en électronique - pour les optimistes au contraire, on va vers le tout optique. Même si l'on peut penser que la vérité est entre les deux, il est hasardeux de faire des pronostics précis. Formulons plutôt quelques remarques générales.

Il convient d'abord de remarquer que de toute façon il faut de l'électronique pour commander l'optique. Un répéteur dans les télécommunications à grande distance, par exemple, utilise actuellement une quantité considérable d'électronique. Mais même si on peut passer au répéteur "tout optique", c'est à dire où le signal est amplifié directement sous forme optique, l'alimentation, la commande et le contrôle des composants optiques nécessaires continuera de nécessiter beaucoup d'électronique : l'optique ne peut pas se passer de l'électronique.

Il est par ailleurs clair qu'une inconnue essentielle qui conditionne le développement de l'optoélectronique est la possibilité de faire baisser les coûts.

La comparaison des caractéristiques des photons et des électrons permet aussi de dégager quelques idées simples : les électrons se prêtent bien au stockage, alors que pour éviter les interactions et donc propager les signaux, les photons ont l'avantage. Pourra-t-on utiliser le meilleur des deux ? En tout cas, il est naturel de transmettre en optique et de commuter en électronique.

Les composants optoélectronique actuels se limitent pour l'essentiel à la conversion dans les deux sens ; ils sont petits, rapides, utilisent une technologie semblable à celle de la microélectronique. Mais une question essentielle est la possibilité d'intégrer des structures

mixtes incluant des fonctions optiques et des fonctions électroniques aussi bien que des fonctions de conversion. Elles sont difficiles à fabriquer, les contraintes ne sont pas les mêmes, le confinement de la lumière et le confinement des électrons ne se font pas exactement dans les mêmes matériaux, les épitaxies nécessaires et les traitements technologiques ne sont pas facilement compatibles. Globalement, les circuits hybrides donnent aujourd'hui de meilleurs résultats que les circuits monolithiques.

Il est encourageant d'observer le développement de la filière GaAs avec le laser pour disque compact, qui constitue une belle ébauche de circuit hybride microoptoélectronique à très bas coût. Une information récente d'IBM montre des barrettes d'émetteurs et de récepteurs en GaAs associés de manière hybride à des circuits électroniques monolithiques en GaAs, comportant près de 10000 transistors et assurant des liaisons optiques rapides à haut débit (1 Gbit/s) dans l'ordinateur. Il s'agit d'une percée intéressante de GaAs montrant la grande maturité de ce matériau.

Intervention introductive de J.P. Pestie :

Rappelons ce qu'on trouve dans une liaison à fibre optique pour transmissions : si un industriel veut être à la tête du secteur, il doit maîtriser

l'émetteur
le récepteur
la fibre.

Les performances à atteindre dépendent toutefois de la longueur de la liaison. On distingue donc deux types de systèmes :

dans les liaisons à longue distance, on utilise des fibres en silice à 1300 nm et à 1500 nm, dans le premier cas en raison de la dispersion chromatique nulle et d'un facteur d'atténuation réduit à 0,35 dB/km environ, dans le second parce qu'on y atteint les facteurs d'atténuation record de l'ordre de 0,2 dB/km. Le coût d'une telle liaison vient pour l'essentiel de l'électronique et des composants optoélectroniques à cause de la nécessité de répéteurs. Mais pour les voies téléphoniques, le coût par voie est très bon marché grâce à la bande passante élevée qui permet de véhiculer de nombreuses communications simultanément. L'avantage est si net qu'il n'y a plus de systèmes coaxiaux de transmission à longue distance.

A faible distance au contraire, la longueur d'onde 0,84 μm est utilisable malgré l'atténuation. Les types de liaisons visés sont les réseaux locaux, la diffusion de signaux vidéo chez l'abonné. La bande nécessaire y est large, il est impératif d'arriver à réduire les coûts.

Le choix de la source se porte maintenant sur la diode laser et non plus sur la diode électroluminescente. Pour les longues distances, l'option est évidente à cause de la puissance couplée aussi bien que du débit. Optimiser distance et débit implique le recours à des lasers de plus en plus monochromatiques, avec en vue le développement des liaisons cohérentes avec hétérodynage. Côté récepteur, on est passé des photodiodes PIN aux photodiodes à avalanche qui présentent un gain supérieur de 6 dB.

Examinons l'historique du prototype des liaisons à longue distance, les liaisons sous marines : il y faut un nombre de répéteurs minimal. En 1958, la première liaison transatlantique véhiculait 60 voies téléphoniques ; en 1975, on arrive à 3400 voies par coaxial à amplification analogique par transistors bipolaires ; en 1988, le premier système transatlantique à fibres optiques transporte 3840 voies téléphoniques avec régénération numérique à 280 Mbits/s et pas de répétition 45 km. En 1991, la liaison TAT 9 atteindra 560 Mbits/s et 110 km de pas grâce à un laser monomode. L'accélération des progrès est continue on ne peut pas dire ce qui se passera dans 10 ans. Alcatel CIT a également des liaisons à bas débit sans répéteur, très important pour une distance de l'ordre de 150 à 200 km, par exemple France-Angleterre. Les liaisons terrestres, elles aussi, sont passées depuis 1975-80 des systèmes analogiques aux systèmes numériques et des coaxiaux aux fibres

optiques. Aujourd'hui, le standard est de 560 Mbits/s et il existe plusieurs liaisons fonctionnant à 2,5 Gbits/s à titre expérimental.

Revenons aux composants optoélectroniques. Alcatel définit un composant stratégique par cinq caractéristiques :

- 1 - la spécificité : le composant ne sert qu'à cette application ; tant que les lasers télécom ne servent qu'à cela ils sont chers et stratégiques ;
- 2 - l'adhérence au système : le composant détermine les performances ; livrer les caractéristiques à un tiers, c'est livrer son savoir faire ;
- 3 - l'apport en performances ; si on attend un composant sur le marché avant de pouvoir faire un système performant, on n'est pas le premier et on perd sa place ;
- 4 - la disponibilité aléatoire sur le marché ouvert ;
- 5 - le coût ; le laser détermine par exemple 15 % du coût d'un répéteur, ce qui n'est pas négligeable.

Ces caractères stratégiques font que pour les liaisons grande distance tous les systémiers fabriquent leurs composants stratégiques eux-mêmes.

Qu'en est il des composants optoélectroniques bas coût ? Le coût du composant est déterminant pour l'apparition d'un marché : le marché de la vidéocommunication, si elle voit le jour, disons vers 1995, pourrait représenter 10 millions de pièces pour couvrir le monde. D'où deux tactiques : soit les composantiers - en pratique, les japonais - nous amènent les composants, soit les systémiers s'y mettent comme ils l'ont fait pour les grandes distances, bien que l'aspect stratégique des composants ne soit pas aussi net que pour les grandes distances. L'exemple du disque compact est significatif : en 1988, 25 millions de lasers ont été fabriqués dans le monde, en grande majorité à semi-conducteurs (dont 200000 environ pour les télécommunications). Parmi eux, la grande majorité sont en fait de petits modules lasers pour le disque compact audio (le boîtier contient aussi une photodiode de contrôle). Le marché mondial en 1988 est de plus de 10 millions de pièces, le coût unitaire de 20 F. Les fabricants sont cinq japonais (Sharp, Nec, Mitsubishi, Hitachi, Sony) et un européen (Philips). En 1988, les fabricants de systèmes de disques compacts sont exactement les mêmes. Philips va d'ailleurs arrêter pour les systèmes. Sur ce créneau spécifique de l'audiodisque, la méconnaissance du marché système du composantier fait que seul le systémier peut décider l'investissement et la fabrication compte tenu du coût de développement du système. Maintenant qu'il est question du démarrage des vidéocommunications, on ne connaît pas du tout les spécifications nécessaires, le composantier ne sait pas quoi faire. Il affronte de plus un grand risque de rentabilité : s'il se trompe de 10 % sur le prix des lasers audio à 20 F pièce pour un million de pièces, le résultat est dramatique, s'il ne se trompe pas, le gain est faible. C'est pourquoi la capacité des japonais à se présenter à la fois comme composantier et comme systémier est un atout. Cet exemple illustre l'idée que même pour les composants à bas coût, le composant devient stratégique.

Dans un module longue distance, il faut pouvoir mettre le maximum de fibres, ajuster les courants laser quand cristal laser se fatigue, assurer l'indépendance à la température, effectuer l'alignement au dixième de micron (on perd 50 % de l'énergie avec un désalignement de 0,5 μ m). On imagine que ces précautions nécessitées par la tenue à l'environnement rendent le bas coût impensable. Les prévisions pour des modules de réseaux locaux font état de deux hypothèses : dans l'hypothèse la plus chère, on arriverait à produire un million de pièces pour 1000 F pièce, ce qui reste trop cher ; dans l'hypothèse basse, celle des lasers dits connectés, à un million de pièces pour 200 F pièce. Ce serait le laser pour l'abonné et les réseaux locaux, qui atteindrait une grande diffusion. Il est placé dans un connecteur optique. La partie mâle du connecteur se branche sur la fibre. Le couplage ne pourra pas être précis au dixième de μ m, mais on pourra se contenter de coupler 200 μ W avec une fibre monomode.

Intervention introductive de P. Chavel :

A l'occasion d'une Ecole d'été d'Optoélectronique, il n'est pas mauvais de poser la question : qu'est-ce que l'optoélectronique ? Proposition de définition : "l'optoélectronique est l'étude des composants qui émettent, modulent ou détectent le signal lumineux". Un participant intervient pour faire remarquer qu'il vaudrait mieux remplacer dans cette définition "étude" par "mise en oeuvre". D'autres définitions sont parfois mentionnées, comme "la manipulation signal dans le temps et dans l'espace" (G. Picoli), ou simplement "les diodes laser et tout ce qu'on fait avec". L'optoélectronique est en fait plus large que le contenu de l'école, un certain nombre de sujets qui y sont habituellement rattachés comme les matrices de détecteurs n'ont pas été abordés. Malgré ces nuances, le mot "optoélectronique" est maintenant bien entré dans l'usage et son emploi ne crée pas souvent de difficulté.

De même, le mot "électrooptique" est, assez clairement, réservé aux effets d'un champ électrique statique sur l'indice optique complexe. Mais il n'en va pas de même de tous les néologismes qui ont cours dans notre milieu. Que dire de "photonique", de "nanotechnologies", de "calcul optique" (calcul des combinaisons optiques ou optique dans l'ordinateur ?), de "traitement optique" (couche mince ou traitement du signal ?) ? Le mot "optronique" mérite une mention particulière, puisqu'on le trouve parfois employé dans un sens très voisin de "optoélectronique", alors que les systémiers en réservent l'emploi au mariage de l'optique, de la mécanique et de l'électronique dans des systèmes, notamment militaires ou aéronautiques. La Commission des Communautés Européenne réfléchit actuellement à l'impact de "l'optomatronique" sur la structuration de l'industrie européenne des années 90 : d'après la commission "FAST", chargée à Bruxelles de l'évaluation des technologies, l'impact de l'optique et des matériaux nouveaux sur l'électronique pourrait jouer un rôle économique déterminant et exiger des actions de concertation de la Communauté pour la recherche appliquée, le transfert de technologie et l'enseignement.

Sur quoi peuvent s'appuyer les experts pour faire des prévisions ? Les prévisions de Bruxelles, malgré des erreurs dans le détail, sont-elles assez justes dans les grandes lignes pour donner un fondement sain à notre politique communautaire de la science et de la technologie face aux autres continents ?

Débat : (le nom de certains intervenants n'ayant pas été noté en temps utile, ce résumé qui suit ne reprend que les idées et non la chronologie de la discussion).

- Les "OEIC", optoelectronic integrated circuits, vont se développer. Ce concept ne doit pas être confondu avec celui de l'optique intégrée, où seules les fonctions optiques sont réunies par technologie planaire sur un même substrat. Il s'agit ici de l'intégration de fonctions optiques et de fonctions électroniques. Les composants optoélectroniques comportent actuellement peu de dispositifs, mais l'intégration monolithique de plusieurs fonctions sur un même substrat progresse et jouera un rôle important.

- Le circuit comprenant un laser et sa commande de modulation est déjà un exemple important. Les lasers connectés seront un élément décisif en matière de coût, car l'intégration est utile quand deux ou trois composants sont remplacés par un seul objet : l'assemblage compte pour 80 % des coûts. Plus tard, un véritable circuit intégré pourra inclure également aussi la modulation.

- Le laboratoire de Bagnex du C.N.E.T. a réalisé l'intégration monolithique d'un laser à rétroaction distribuée à 1,3 μm et d'une photodiode de contrôle, sans reprise d'épitaxie, mais avec un problème de gravure particulièrement ardu à maîtriser en raison de la coexistence de niveaux très différents à graver en même temps. La difficulté de fond vient de ce que la partie active du laser et la partie active de l'électronique utilisent des matériaux certes compatibles, mais néanmoins différents. De là vient la supériorité fréquente des dispositifs hybrides sur les monolithes.

- Mais compte tenu de l'assemblage, l'intégration monolithique fait baisser les coûts alors que l'hybridation, au contraire, les fait croître.

- Le silicium permet de faire un million de transistors par puce, a-t-on besoin d'un circuit optoélectronique aussi intégré que cela, l'hybride suffira peut être en optoélectronique ? Réponse (AC) : aujourd'hui oui, plus tard non, avec la détection cohérente par exemple.

- On peut distinguer deux types de besoin : si la performance compte avant tout, il faut hybrider, et si le coût compte avant tout, il faut envisager l'intégration monolithique. Cela dépend du coût système. Le composant de haute performance est valorisé dans le système, on n'y gagne pas d'argent, il peut être utile de le réaliser par hybridation pour atteindre les caractéristiques visées. Mais il y a des systèmes qui se développeront si les coûts baissent, comme les vidéocommunications, les réseaux locaux. Là, l'intégration servira.

- Sont-ce les composants qui freinent les systèmes optoélectroniques ou bien l'économie ? Pourquoi ne pas installer chez l'abonné des réseaux locaux à diodes électroluminescentes- DEL ? Réponse (JPP) : on penche au contraire actuellement pour la distribution chez l'abonné par fibre monomode. On a essayé à 0,85 μ m en multimode mais il est maintenant clair que si les réseaux locaux se développent à l'échelle mondiale ce sera en monomode et à 1,3 ou 1,5 μ m. Les longues distances ont rejeté définitivement le 0,85 μ m, l'expérience actuelle dans les longues distances profitera aux réseaux locaux. Le génie civil apprend à poser de la fibre monomode, il pourra amener le RNIS (réseau numérique à intégration de service) chez l'abonné en monomode. Ceci condamne les LEDs chez l'abonné : une DEL ordinaire peut à peine mettre un 1 μ W dans la fibre ; quant aux DEL superluminescentes, elles coûtent à peu près autant que le laser.

- (AC) l'importance de l'intégration monolithique est double :

1 - la rapidité : un driver GaAs avec puce InP à 1,3 μ m et une photodiode de rétroaction, c'est difficile à intégrer, mais on atteint 10 Gbits/s, parce qu'on diminue les capas.

2 - la possibilité de mettre au point des "tuners optiques" : les recherches sur les télécom cohérentes laissent entrevoir la possibilité d'accorder à volonté la réception sur la fréquence d'émission. Cela exige un oscillateur local laser accordable à raie très fine, polarisé, asservi en longueur d'onde sur une fréquence qui ne diffère de celle de l'émetteur que de 1 GHz environ. Actuellement, c'est fait en laboratoire avec une batterie de composants optiques montés sur banc, mais le faire chez l'abonné à bas coût, cela implique l'intégration

- Quelle est l'incidence de la longueur d'onde sur le coût ? Elle n'est pas directe. La longueur d'onde a d'autant moins d'importance sur le coût que le composant ne représente que 20 % (avec 80 % pour le montage, comme on l'a dit) : même s'il existe des différences de coût de fabrication d'un domaine spectral à l'autre, la longueur d'onde ne saurait jouer que sur quelques pour cent. Le choix du matériau par contre est important pour l'intégration et le matériau détermine la longueur d'onde : par conséquent, pour les composants discrets, on peut penser que coût et longueur d'onde sont peu corrélés, mais ils le sont dans le cas des circuits intégrés monolithiques.

- Coût n'est pas prix. L'industriel détermine ses prix en fonction des technologies qu'il veut favoriser ou pas. La diode laser à 20 F du lecteur de disque compact ne peut pas être achetée par un laboratoire universitaire à un prix inférieur au lecteur tout entier. Ne pourrait-on vendre le composant avec profit faible pour le promouvoir, notamment au profit de l'enseignement ? Réponse (JPP) : pour un systémier, il n'y a pas d'intérêt évident à promouvoir un composant stratégique, d'autant plus que le prix du traitement de commande et de facture est rédhibitoire. A moins d'une certaine quantité, on gagne à ne pas vendre, mais à donner. Mais de nombreux systémiers fabricants de composants stratégiques sont suffisamment soucieux de l'enseignement de leur technologie pour donner quelques composants aux universitaires.

- Quelles sont les perspectives de l'embauche et de l'emploi dans l'optoélectronique, et l'industrie aura-t-elle besoin dans les prochaines années surtout de techniciens supérieurs ou d'ingénieurs ? Réponses (AC) : des enquêtes de consultants montrent des perspectives de croissance importante dans l'optoélectronique. On prévoit l'arrivée des OEIC, leur application à l'électronique grand public, aux mémoires informatiques et à l'instrumentation aussi bien qu'aux télécommunications - ces dernières prenant une part majoritaire dans le chiffre d'affaire.

- (JPP) La croissance prévue des fibres sur 5 ou 10 ans est de 10 % par an. En ce qui concerne l'enseignement et l'emploi, le nombre de techniciens comme d'ingénieurs embauchés chez Alcatel en fibres optique continue de croître. Actuellement, on manque d'ingénieurs, ce n'est pas si facile de les recruter. En matière de technologie, les laboratoires nationaux comme les grands industriels ont l'impression d'être les formateurs. Les jeunes ingénieurs au bout de 3 ou 4 ans s'en vont pour gagner plus, ils sont formés, ils vont ailleurs. On sème dans l'esprit des jeunes que la carrière se fait dans les dix premières années en changeant d'entreprise tous les deux ans. On ne fidélise pas, et pour les métiers de la technologie, c'est catastrophique. Peut être que l'informatique ou la gestion tolèrent mieux la rotation rapide. La formation y est moindre et les formations des écoles et universités sont directement valorisables.

- Il est plus facile de former un étudiant en système qu'en composants dans une école, l'épitaxie ne se fait pas au tableau noir. Peu d'écoles se munissent des moyens de formation à la technologie de la microélectronique, a fortiori de l'optoélectronique. Il faut citer les installations d'une école d'ingénieurs, l'E.S.I.E.E. (NMOS 1,5 μ m) et celles du CETAAM à Orsay, ouvert aux étudiants de D.E.A. ; mais on ne trouve nulle part de technologie optoélectronique complète. Au niveau de la formation par la recherche, le rôle du L.A.A.S. est bien connu.