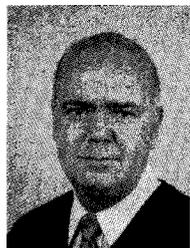


Calcul Optique Bidimensionnel

enquête sur le développement aux

États-Unis de technologies nouvelles



Guy Lebreton

Laboratoire GESSY, Université du Var, 639, boulevard des Armaris, 83100 TOULON.

Né en 1938, Guy Lebreton a d'abord professé dans l'Enseignement Secondaire après une Maîtrise de Physique à l'Université de Rennes. Il travaille comme chercheur depuis 1974 au GESSY (Groupe d'Études « Signaux et Systèmes »), à l'Université de Toulon où il est actuellement ingénieur de recherche. Après un D.E.A. d'Optique (Université de Marseille, 1975) et un Doctorat 3^e Cycle Traitement du Signal (Université d'Orsay, 1978), il a été en 1979 professeur-visiteur à l'Université Carnegie-Mellon de Pittsburgh (Laboratoire du Professeur D. Casasent). Il est depuis responsable au GESSY d'une Division « Processeurs Optiques ». Ses travaux ont surtout porté sur le traitement optique de signaux bidimensionnels comme les réseaux d'antennes, sur le développement d'imageurs cohérents, et plus récemment sur le calcul parallèle et les interconnexions optiques dans l'ordinateur.

PRÉSENTATION

Le manuscrit de ce rapport a été remis au SGDN (Secrétariat Général de la Défense Nationale, Bureau des Affaires scientifiques et techniques) début août 1986, avec une annexe de 130 pages comportant un résumé des références citées ici et divers documents non publiés. Les références concernant des processeurs optiques ont été sélectionnées comme illustrant des réalisations effectives vues par l'auteur au cours d'une mission aux États-Unis effectuée pour le SGDN en fin 1985. L'objet de cette mission était une étude prospective sur le développement aux États-Unis des techniques de calcul optique bidimensionnel, qui a fait l'objet d'une présentation orale du SGDN le 22 janvier 1986. Le rapport est enregistré sous la référence n° 16/SGDN/AST/ST.1. Nous remercions l'ICA Darzens, initiateur de cette Étude, de nous avoir autorisé à la publier.

Liste des abréviations

AFOSR : Air Force Office of Scientific Research.
 CALTECH : California Institute of Technology.
 DARPA : Defense Advanced Research Projects Agency.
 DOD : Department of Defense.
 ERIM : Environment Research Institut of Michigan.
 IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineering.
 IOCC : International Optical Computing Conference.
 JPL : Jet Propulsion Laboratory.
 MICOM : Missil Command Laboratory.
 MIT : Massachusset Institute of Technology.
 NOSC : Naval Ocean Systems Center.
 NRL : Naval Research Laboratory.
 NSF : National Sound Fondation.
 ONR : Office of Naval Research.
 OSA : Optical Society Research.
 SDI : Strategic Defense Initiative.
 SDIO : Strategic Defense Initiative Office.
 SEED : Self Electrooptic Device.
 SGDN : Secretariat Général de la Défense Nationale.
 SPI : International Society for Optical Engineering.
 UAH : University of Alabama in Huntsville.
 USC : University of Southern California.
 Définition des principaux systèmes de transduction et

de traitement cités dans le rapport :

Transducteurs acousto-optiques : modulateurs et déflecteurs; modulateurs à OAS; cuve acousto-optique; cellule de Braag acousto-optique. Dans ces éléments on soumet un matériau (solide ou liquide) à une action mécanique (contrainte) ou acoustique (onde). Le matériau est traversé ou réfléchit une onde lumineuse dont l'intensité ou la polarisation est modulée par le signal porté par la contrainte mécanique ou l'onde acoustique.

Imageur magnéto-optique. Dans un système, un matériau transforme l'information portée par un champ magnétique (local) en une information (intensité/polarisation) portée par un champ lumineux.

Diode Laser. Système émettant une onde lumineuse cohérente (laser) quand il est traversé par un courant électrique polarisé dans le sens de conduction de la diode.

Barettes et matrices photo CCD. Système combinant une transduction optique-électrique locale et un transport de l'information vers un point de lecture.

Pour une barette on « lit » en un point sous forme électrique les informations optiques collectées sur une ligne.

Pour une matrice on lit sur les contours d'une surface les informations optiques reçues sur la surface.

Note de la rédaction

Introduction

Du laser au calcul optique

Après les travaux de P. M. Duffieux publiés en 1943-1945 sur « l'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique », le développement du laser d'une part, le succès de la transformée de Fourier rapide en calcul numérique d'autre part, conduisirent de nombreux chercheurs à l'étude de processeurs optiques cohérents pour le calcul rapide et en particulier, pour répondre au besoin des utilisateurs militaires, à la recherche de processeurs destinés au traitement optique du signal en temps réel.

Séduisante au plan conceptuel, la transformation de Fourier optique bidimensionnelle n'a pourtant connu jusqu'ici que peu d'applications opérationnelles, faute d'interfaces capables d'assurer en temps réel l'acquisition des données et la sortie des résultats sous une forme exploitable par l'informatique. Faute d'une technologie industrielle, les performances demeuraient systématiquement en retard sur celles d'un traitement numérique à l'efficacité croissante, sur tous les plans : vitesse, résolution, dynamique, fiabilité. L'holographie off-axis (ERIM, 1960) et son corollaire le filtrage adapté (Vander Lugt, 1964) ne donnèrent lieu qu'à des démonstrations statiques sur plaques photographiques, avec dans quelques cas des dispositifs de développement rapide des films *in situ* (e.g. SAR construits au ERIM et au JPL dans les années 70).

Plus modeste, une autre famille de corrélateurs incohérents unidimensionnels est née de la technologie des lignes à retard acousto-optiques, qui connaissait un développement industriel de petite série pour la déflexion de faisceaux laser. Mais leur dynamique insuffisante faisait de ces modulateurs un pis-aller auquel on s'est parfois résolu pour une durée brève dans des applications militaires, le temps nécessaire pour que les progrès de l'informatique rendent caducs ces processeurs analogiques. Le seul exemple encore opérationnel est celui de l'analyse spectrale dans la bande 2-3 GHz.

Face à cet échec, considéré comme irrémédiable par la quasi-totalité des utilisateurs potentiels, le traitement optique du signal n'intéressait plus qu'une soixantaine de petits laboratoires universitaires, presque tous américains et vivant de modestes contrats gouvernementaux (*DARPA* ou *AFOSR* surtout) au sein de départements d'Ingénierie Électronique bénéficiant d'un potentiel propre de fonctionnement. Ils se rencontraient cependant tous les 2 ans dans une association de bénévoles, l'International Optical Computing Conference (IOCC), pour compenser leur faible reconnaissance dans les grandes sociétés d'optique (*OSA*) et de signal (*IEEE*). Seule la *SPIE*, société d'ingénieurs opticiens au départ, a toujours largement ouvert ses congrès aux sessions intitulées « Real-time Signal Optical Processing ».

Telle était la situation du Calcul Optique aux États-Unis dans les années 70. C'est seulement durant les premières années 80 que de nombreux éléments d'origines diverses sont venus bouleverser totalement cette situation. Amorcée lors des meetings tenus par la *SPIE* en 84, et d'un colloque OTAN en sep-

tembre 84 [1], matérialisée par un numéro spécial des *Proceedings de IEEE* en juillet 84 [2], la prise de conscience de ce bouleversement n'a été totale qu'avec le premier meeting spécial organisé par l'Optical Society (*OSA*) sur le Calcul Optique, en mars 1985 à Lake Tahoe, Nevada [3]. Parce qu'il s'agit bien de l'aube d'une révolution en cours, aucun des spécialistes impliqués ne se sent le droit d'en garantir le succès total. Du moins, tous ont la certitude que les éléments nouveaux en présence constituent un mélange suffisamment exothermique pour encourager les investissements. Ces éléments peuvent se regrouper en quatre grands axes :

- l'entrée de l'électro-optique dans l'ère industrielle, accompagnée de la création de nouveaux centres d'enseignement et de recherche;

- l'apparition des premiers processeurs optiques opérationnels (analogiques) et les premiers pas de l'optique numérique (au plan conceptuel mais aussi déjà expérimental) qui constitue à elle seule une véritable révolution;

- la prise de conscience de besoins nouveaux conduisant nécessairement à des architectures parallèles en informatique, qui amène les agences gouvernementales et les laboratoires des grandes firmes informatiques à financer un vaste effort de recherche : à court terme vers la connectique optique dans l'ordinateur; à moyen terme vers des processeurs itératifs optiques numériques associés à l'ordinateur; à long terme, vers la réalisation de machines optiques de calcul parallèle;

- l'émergence de nouvelles technologies, sous l'impulsion des trois phénomènes précédents, conduisant d'une part, à moyen terme, vers la réalisation de processeurs matriciels adaptés aux besoins du calcul optique, et d'autre part, à plus long terme, vers l'amorce d'une technologie de l'optique intégrée apparentée à la microélectronique moderne tout en gardant son caractère de tri-dimensionnalité spatiale.

Ces quatre axes de développement du calcul optique sont développés dans les quatre chapitres qui suivent. Cette évaluation s'appuiera autant que possible sur les avis des principaux spécialistes. Il ne sera pas fait mention ici des programmes japonais, dont la partie publiée (évoquée par le rapport Jerphagnon, documents MITI) semble déjà un peu ancienne, mais qui d'après les spécialistes américains recouvre en totalité et devance souvent l'ensemble des projets élaborés aux USA en ce domaine, tant au plan des concepts que des investissements.

Chapitre I

L'électro-optique : une discipline nouvelle

L'électro-optique a apporté au calcul optique les premiers composants industriels dont il avait besoin pour ses premiers pas, comme on le verra au chapitre suivant. Son essor a également fait naître le besoin d'un enseignement spécifique, qui n'était satisfait ni par les instituts d'optique, ni par les formations d'ingénierie électronique.

I. 1. L'ÉLECTRO-OPTIQUE ENTRE DANS L'ÈRE INDUSTRIELLE

Durant l'année 1985, tous les congrès d'Optique tenus aux États-Unis ont tenu à célébrer comme une véritable fête le 25^e anniversaire de l'apparition des lasers. Selon l'éditorial d'Howard Rausch dans la revue *Laser Focus/Electro-Optics* (oct. 84), « Si les années 60 furent l'âge de l'innocence pour le laser, les années 70 furent l'époque de l'adolescence ». Les années 80, elles, ont consacré la maturité industrielle du laser comme outil fiable et performant désormais intégré à pratiquement tous les domaines de la technologie moderne [4].

L'ensemble du marché des lasers a connu en 1984 un taux de croissance supérieur à 25% [5]. La maîtrise du laser a permis toutes les audaces dans le développement spectaculaire des fibres optiques pour les télécommunications [6], permettant par contre-coup l'arrivée à maturité industrielle des diodes lasers [7], des photodétecteurs et des composants optiques holographiques [8]. La diversité des applications nouvelles a provoqué à partir de 1980 une croissance exponentielle du marché des composants optiques [9], rendant urgent un investissement lourd pour l'élaboration de méthodes plus industrielles dans la fabrication de ces composants [10]. L'utilisation de systèmes à laser pour le guidage des missiles, la vision nocturne, la poursuite de cibles et la conduite de tir, la navigation inertielle (gyroscopes à laser annulaire ou à fibre optique), est passée du stade de la recherche à celui de l'équipement des armées, entraînant un progrès considérable dans la fiabilité de tous les composants électro-optiques ou acousto-optiques impliqués dans ces systèmes, en particulier des composants intégrés.

La rapidité croissante des modulateurs (surtout diodes laser) et des photodétecteurs, qui atteignent actuellement 20 GHz, a presque comblé le fossé entre les technologies optique et micro-ondes.

De nombreux programmes spatiaux incluent également la réalisation de composants à très hautes performances, surtout dans le domaine des mosaïques de photodétecteurs. Enfin, le succès récent du disque optique comme mémoire non effaçable en informatique a créé une énorme motivation pour la recherche de mémoires optiques effaçables [11].

I. 2. DE NOUVEAUX CENTRES DE FORMATION ET DE RECHERCHE

Sur les 20 laboratoires universitaires contactés pour l'importance de leurs activités dans le domaine du calcul optique aux USA, 15 avaient une expérience antérieure à 5 ans dans cette spécialité et tous appartenaient à des départements d'Electrical Engineering, souvent rebaptisés récemment Elect. Eng. and Computer Sciences. Cette appartenance souligne la carence jusqu'à présent d'une filière spécifique de formation, carence en voie d'être comblée de diverses manières :

- ouverture récente d'options spécialisées dans les instituts d'Optique traditionnels de Tucson et Rochester;
- création par la NSF d'un nouvel institut de recherche spécialisé dans les circuits optiques à Tucson;

- création d'un centre d'Optique Appliquée (UAH) à Huntsville, Alabama;

- création à l'étude, d'un Centre pour la Technologie Photonique à l'USC, Los Angeles, dont l'objectif prioritaire serait le développement des techniques du « tout AsGa », ambitionnant de faire de l'arséniure de gallium en optique le matériau universel qu'à été le silicium dans la standardisation de l'électronique moderne;

- centres régionaux de Technologie Laser, dont trois ont déjà été mis en place par la NSF pour prêter des lasers aux chercheurs de diverses disciplines et les guider dans le choix et la mise en œuvre [12].

- coopérative mise en place au Battelle Institute pour étudier et faciliter le passage rapide des composants opto-électroniques du stade de la recherche à celui du développement industriel [13].

Il faut en outre signaler qu'au moins la moitié des 50 laboratoires de recherche contactés ont depuis 4 ans plus que doublé leur équipement et leurs effectifs consacrés à la recherche en calcul optique. D'autre part, on peut estimer que le nombre de laboratoires intéressés par cette recherche a également plus que doublé depuis 4 ans, sans compter l'effort accru dans la recherche de matériaux nouveaux qui est le fait de départements de physique non pris en compte dans cette enquête. Enfin, il est évident que la perspective d'un marché nouvellement porteur de l'électro-optique a suscité l'intérêt d'un nombre croissant d'entreprises qu'il serait bien impossible de chiffrer.

Une tentative de la revue *Laser-Focus* (sept. 84) n'a pu recenser d'après les réponses obtenues que 2300 chercheurs engagés dans l'ensemble des applications du laser, appartenant à 123 laboratoires avec un budget total de 263 millions de dollars. D'après les recoupements, cette enquête conclut à une projection estimée de 11500 chercheurs et à un budget total de 2 à 2,5 milliards de dollars investis en 1984 par l'ensemble des USA pour la recherche et le développement des applications du laser. La marge d'extrapolation rend cette statistique bien approximative. A fortiori, le mélange des disciplines rend impossible l'appréciation spécifique de la part du calcul dans cet ensemble, mais cela n'a pas une importance majeure car cette part est en tous cas minime au stade actuel. L'important est surtout de souligner que l'énorme fossé qui séparait les niveaux de développement technologique de l'électronique et de l'optique est en voie de se réduire, ce qui constitue une condition préalable à tout espoir sérieux dans l'avenir du calcul optique.

Chapitre II

Du composant au processeur : premières réalisations opérationnelles

L'industrialisation d'un certain nombre de composants électro-optiques de base et les progrès technologiques qui en sont résultats rendent désormais possibles la réalisation de petits processeurs spécialisés. Depuis longtemps, la Défense avait déjà fait réaliser des prototypes expérimentaux, dont certains

embarquables, basés sur l'optique de Fourier ou la convolution incohérente. Il s'agissait toujours d'opérations classifiées, visant à résoudre provisoirement et à n'importe quel prix un problème sensible de traitement du signal en temps réel, en construisant spécialement les composants indispensables poussés à leur limite technologique. Des firmes comme Lockheed, Harris Corporation, General Electric, Ampex, ont ainsi réalisé des prototypes dont on apprend occasionnellement l'existence 3 à 5 ans après leur abandon. Une telle politique était peu porteuse pour la recherche et la technologie, car elle ne permettait pas de repenser les problèmes posés d'une manière adaptée aux capacités propres de l'optique, et le secret des réalisations réduisait la possibilité d'un transfert technologique vers l'industrie de production. Toutefois, c'est grâce au montant élevé de tels marchés qu'un certain nombre d'industriels ont pu améliorer leur savoir-faire et se préparer au marché actuel.

Les principaux composants à grande diffusion développés aujourd'hui sont : les modulateurs et défecteurs acousto-optiques à ondes volumiques, les diodes laser, les éléments optiques holographiques et les hologrammes synthétiques générés par ordinateur; le convertisseur d'images à cristaux liquides de Hughes, auquel s'est ajouté récemment l'imageur magnéto-optique à adressage matriciel de Litton; enfin, toute la gamme des barrettes ou matrices de photodétecteurs à CCD. Harris Corporation met également sur le marché, à un coût réservé aux applications militaires, une cuve acousto-optique à 64 canaux, de bande 200 MHz et fenêtre temporelle 1 μ s. Cette même firme lance également, pour le marché des grosses imprimantes laser (page composer), une cuve acoustique modulant en parallèle 10 canaux d'écriture (temps de montée/descente maximum 8 ns).

Les exemples de processeurs que nous allons examiner maintenant sont réalisés soit à partir de ces composants soit en utilisant des composants d'optique guidée d'onde acoustique de surface. Ces derniers, nécessitant une réalisation spéciale pour chaque application, n'ont pas l'avantage de pouvoir être assemblés à partir de composants commercialisés. D'autre part, ils atteignent leur limite technologique en satisfaisant à peine les spécifications demandées par leurs utilisateurs militaires. L'avenir appartient plutôt, selon l'avis des chercheurs du Harry Diamond Laboratory (jusqu'alors leaders en ce domaine de l'acousto-optique intégrée) à des processeurs optiques tridimensionnels mais compacts, du moins pour les applications spécifiques exigeant la miniaturisation la plus poussée comme celles actuellement développées pour le NRL chez Westinghouse.

Par contre, l'optique guidée trouve aujourd'hui un essor considérable dans les besoins en connectique des télécommunications par fibres optiques, où l'on voit apparaître de nombreuses petites entreprises de pointe. Les exemples de réalisations qui suivent ont été regroupés en deux catégories :

- optique analogique, où l'expérience antérieure de recherche en laboratoire n'attendait que les composants pour aboutir à des réalisations;
- optique numérique, qui représente une révolution conceptuelle et commence seulement à exister, mais

dont les énormes capacités potentielles constituent la clef du nouveau calcul optique parallèle.

II.1. EXEMPLES DE PROCESSEURS ANALOGIQUES EN PHASE DE DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL

Le ERIM (Environmental Research Institut of Michigan) a développé pour le *MICOM* (Missile Command Lab) un corrélateur temps réel contenant quatre filtres adaptés [13], destinés à la conduite de tir sur le terrain. Portable, ce dispositif qui fonctionne comme une caméra à CCD en a les dimensions et le poids. Son intérêt est surtout d'illustrer comment en n'utilisant que des composants commercialisés, on peut désormais faire sortir du laboratoire l'holographie traditionnelle.

Les laboratoires de Westinghouse à Baltimore continuent de développer l'acousto-optique intégrée pour des applications spécialisées de la Navy, en les poussant à leur limite technologique comme on l'a noté précédemment. Nous n'avons pu visiter ces réalisations, faute d'un accord de DEA demandé par le responsable au NRL (Dr Martin Kamhi). Seul l'analyseur de spectre [14], avec une bande de 600 MHz, a fait l'objet de publications régulières. La principale limitation tient aux performances des lentilles géodésiques, problème que le professeur Chen Tsai (Univ. of CA at Irvine) nous a récemment affirmé avoir pratiquement résolu : ceci doit correspondre assez exactement aux progrès de dynamique annoncés par Westinghouse pour obtenir une résolution de 150 points, proche de la limite théorique. Les exemples de corrélateurs intégrés [15], développés dans le même esprit par Westinghouse, sont destinés aux applications de guerre électronique, domaine actuellement le plus porteur pour l'utilisation militaire de processeurs optiques. Notons toutefois que la miniaturisation de tels dispositifs n'est pas sensiblement plus poussée qu'en utilisant des cuves d'onde acoustique de volume qui offrent des performances très supérieures.

Les applications les plus significatives du potentiel actuel, en matière de processeur optique analogique utilisant des composants standards, ont été développées au CALTECH dans les laboratoires du Pr D. Psaltis. Les quatre applications citées sont passées presque immédiatement de l'expérimentation en laboratoire, telle qu'elle est publiée ici, à une production de petite série pour les commanditaires :

- corrélateur en temps réel d'images vidéo [16], développé conjointement pour l'AFOSR et l'Army Research Office de Durham;

- plusieurs versions de processeurs destinés au traitement adaptatif d'antennes réseaux actives ou passives [17, 18] dont le développement ultérieur par l'USAF est désormais classifié;

- processeur temps-réel embarquable pour l'Imagerie Radar (SAR), qui constitue l'aboutissement de toute la recherche des 15 dernières années sur les corrélateurs acousto-optique [19]. En effet, après des générations de corrélateurs à intégration spatiale, puis temporelle, l'association simultanée des deux types d'intégration dans une architecture systolique permet, avec des modulateurs unidimensionnels, la réalisation

d'une véritable intégrale double à noyau non séparable. Ce principe peut être étendu à tout type de multicorrélateur (radar doppler, ambiguimètre...);

— analyseur de spectre à très grand produit durée-bande, basé sur le même principe d'intégration spatio-temporelle [20].

La firme ESL, que nous n'avons pu contacter directement, semble s'être fait une spécialité des réalisations de radiomètres, en optique intégrée ou volumique [21].

Le laboratoire du DOD (Dept of Defense), à Fort Meade, a publié de nombreuses réalisations expérimentales de technologie avancée. Des contacts par courrier ne nous ont évidemment donné accès qu'aux documents publiés. L'exemple le plus performant semble être un processeur « triple produit » (convolution bidimensionnelle pondérée) avec une bande de 500 MHz [22].

Le corrélateur compact d'impulsions [23], qui sera le dernier exemple cité de processeur analogique, est significatif de la possibilité actuelle de réalisation d'appareillage industriel. Il témoigne en même temps combien il est pour cela nécessaire, à l'heure actuelle, d'associer toutes les technologies de pointe disponibles, les quatre firmes impliquées étant parmi les plus avancées dans le domaine de l'électro-optique.

II. 2. EXEMPLES DE PROCESSEURS OPTIQUES NUMÉRIQUES EN COURS D'EXPÉRIMENTATION

Un corrélateur 32 bits à 32 Mbit/s [24], actuellement en fonction au Battelle Institute, utilise à la fois les techniciens de l'électro-optique et de l'acousto-optique intégrées (contrairement au rapport Jerphagnon, nous utilisons toujours ici le mot « intégré » dans l'acception « optique guidée » qui correspond toujours à l'expression « integrated optics »). Cet exemple illustre le principe tout à fait simple de l'optique numérique (auquel on n'avait cependant jamais pensé jusqu'à ces dernières années), qui consiste à utiliser un composant élémentaire par digit pour codage séparé, exactement comme en électronique. Soulignons toutefois que la connectique entre ces composants est fondamentalement différente, et que des arithmétiques adaptées sont nécessaires pour permettre un calcul vraiment parallèle (cf. chap. III). Notons au passage l'importance du département d'optique intégrée au Battelle Institute, Centre de recherche appliquée autonome qui vit entièrement de contrats gouvernementaux et industriels. Ce département étudie actuellement la réalisation en optique intégrée de toute la gamme des processeurs systoliques utilisant jusqu'à présent des ondes acoustiques volumiques.

Bien que la réalisation d'un ordinateur tout optique utilisant des VLSIO soit encore un rêve incertain, on peut envisager actuellement l'emploi de fibres optiques comme ligne à retard et connecteurs. Un exemple très significatif de ces possibilités est la pré-étude d'un filtre adaptatif réalisée chez BOEING à Seattle [25], qui permettrait 2,5 Gops en utilisant uniquement des composants existants. L'auteur de cette étude, rencontré à la Compagnie SIGMA (dirigée par le Dr P. Hildebrand, autre ancien de BOEING faisant autorité en calcul optique), ne s'est pas jugé autorisé à

parler des travaux actuels chez BOEING, sur lesquels nous n'avons aucune information par ailleurs.

Plus classique est le dispositif de laboratoire développé avec l'aide de la NASA chez le Pr Stuart Collins, pionnier de l'arithmétique des résidus [26]. Sous sa forme actuelle, ce dispositif n'est absolument pas intégrable, mais il s'agit des premières étapes préfigurant la prochaine génération de processeurs parallèles. A noter en particulier l'emploi d'une table de vérité mémorisée sur un hologramme, dispositif nécessaire au décodage des résidus pour une sortie binaire en temps réel.

L'université de Philadelphie et le CALTECH se sont associés dans la réalisation d'une mémoire associative (type CAM à boucle opto-électronique) [27] pour faciliter des recherches expérimentales sur l'Intelligence Artificielle du type réseau de neurones. Ce type de processeurs pourrait rapidement conduire à des dispositifs de Vision Intelligente ou Robotique.

Les deux processeurs numériques expérimentaux actuellement en fonction chez le Pr David Casasent [28, 29] sont représentatifs de l'état de l'art actuellement pour les processeurs matriciels et leurs applications d'algèbre linéaire. Le premier dérive des dispositifs précédemment expérimentés pour le produit Vecteur-Matrice analogique (ou produit systolique Matrice-Matrice). L'innovation est l'emploi de la cuve acousto-optique à 64 canaux commercialisée par Harris Corporation, qui permet de passer de l'analogique au numérique bipolaire 32 bits en utilisant les représentations arithmétiques parallèles dites « binaires modifiées ». Les entrées-sorties y sont en codage binaire normal, mais dans le processeur optique chaque digit peut prendre une valeur supérieure à la base (inférieure au poids du bit le plus fort). L'opération de base est la multiplication par convolution, innovation due aux chercheurs du NRL.

Le second dispositif [29], qui comporte également une boucle électronique non apparente, est un exemple représentatif de processeur optique systolique spécialisé dans la solution de systèmes d'équations. Notons par ailleurs l'important travail réalisé dans ce laboratoire [30] pour la réalisation optique de Filtres de Kalman, ainsi que l'étude de dispositifs d'Intelligence artificielle pour l'analyse d'images (projection synthetic discriminant functions).

D'une réalisation beaucoup plus facile est le processeur matriciel itératif [31] récemment fabriqué au nouvel Institut d'Optique Appliquée de Huntsville (UAH). Ce processeur est basé sur une modification de l'algorithme de Richardson pour l'inversion de matrice, modification qui conduit à ne faire calculer au processeur optique, à chaque itération, que l'écart de celle-ci avec le second membre. Cet écart est chaque fois incorporé à la valeur numérique précédente, incrémentée par l'ordinateur. Ce type d'association hybride entre un processeur analogique et l'ordinateur pourrait dès à présent conduire à de nombreuses applications, car il se satisfait d'un système optique de mauvaise qualité et donc peu coûteux, les erreurs dues au processeur étant autocorrigées. Un exemple d'architecture cellulaire [32] utilisant des composants existants est actuellement en cours de réalisation à l'UAH, utilisant l'électronique des photodétecteurs pour la

réalisation des seuils logiques (en attendant les futurs imageurs bistables).

Ces quelques exemples illustrent un point capital dans l'évolution des recherches sur le calcul optique : en visant résolument la perspective incertaine de l'ordinateur tout-optique, on est conduit à franchir de nombreuses petites étapes dont chacune est génératrice de processeurs spécialisés immédiatement utilisables.

Chapitre III

L'Optique et les architectures parallèles de calcul : aspects divers de la recherche industrielle et grands programmes gouvernementaux

Si l'industrie des télécommunications par fibre optique est aujourd'hui suffisamment motivée par le marché, il n'en va pas encore ainsi du calcul optique, qui ne saurait se passer du soutien de grands programmes d'aide à la recherche technologique. Ces programmes sont actuellement gérés par trois organismes : l'AFOSR (Air Force Office of Scientific Research, qui a joué ce rôle depuis les débuts de l'électro-optique), la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) et enfin, sous la gestion de l'ONR (Office of Naval Research), une division nouvelle spécialisée dans le calcul optique au sein de la branche IS et T (Innovative Science and Technology) chargée des recherches de base au sein du SDIO (Strategic Defense Initiative Office). La coordination entre les programmes de ces trois agences gouvernementales, ainsi qu'avec les actions les plus restreintes soutenues par la NASA et l'Army Research Office, s'effectue principalement au niveau des personnes responsables de ces actions (Program managers), par une concertation très souple laissant une grande place à leur initiative (à charge pour eux d'obtenir l'aval de leurs commissions respectives). De leur efficacité dépend en partie l'importance du budget attribué à ces programmes.

Avant de pouvoir commenter ces trois programmes, il est nécessaire de préciser deux lignes de force qui les animent et dont la prise de conscience a joué un rôle majeur dans la définition de ce qu'on appelle aujourd'hui aux États-Unis, le Calcul Optique. Ces lignes de force sont d'une part la globalité du soutien nécessaire, qui englobe sans exclusive tous les moyens potentiels de l'optique; d'autre part, la remise en cause radicale de toutes les méthodes de traitement ou calcul, pour passer de l'ère linéaires (type Von Neumann) à celle du traitement ou calcul massivement parallèle.

III. 1. LES DEUX GRANDS PRINCIPES : UN SOUTIEN GLOBAL A TOUTS LES MOYENS OPTIQUES; UNE REDÉFINITION TOTALE DES NOTIONS DE TRAITEMENT ET CALCUL. GLOBALITÉ DE LA TECHNOLOGIE ÉLECTRO-OPTIQUE

Les exemples de processeurs optiques cités au chapitre précédent montrent qu'il est de plus en plus difficile de faire une séparation entre optique intégrée et optique

volumique au niveau des composants, entre traitement du signal et calcul optique au niveau des applications, tant les emprunts mutuels sont nécessaires à la progression de tout l'ensemble. Bien qu'on l'ait peut-être insuffisamment mis en évidence, l'emploi des fibres optiques (et parfois de convertisseurs analogiques numériques réalisés en optique guidée) est essentiel à la réalisation de processeurs tridimensionnels compacts, il est manifeste également que les boucles et dispositifs à seuil pourront prochainement bénéficier de composants d'optique intégrés pour remplacer les dispositifs électroniques trop lents. Inversement, l'optique intégrée fait de plus en plus appel, en particulier pour les multiplexages nécessaires en télécommunications par fibre, à des éléments holographiques de connectique tridimensionnelle. Il faut également souligner, par exemple, une importante innovation présentée par le Lincoln Laboratory à la rencontre du SDIO sur le calcul optique (à Washington en oct. 85) : il s'agit de l'emploi d'un réseau optique dans un guide d'onde plan, pour diffracter l'information perpendiculairement à ce plan et permettre ainsi une sortie bidimensionnelle ou l'empilement de processeurs plans auto-couplés.

Il apparaît ainsi de plus en plus qu'on ne peut négliger aucune des techniques optiques, soit parce que chacune est mieux adaptée à la solution de certains problèmes particuliers, soit parce que leur complémentarité apparaît dans la mise en œuvre de systèmes compacts. D'autre part, en raison de la jeunesse de l'industrie électro-optique, il n'a pas été possible jusqu'à présent d'investir suffisamment dans la recherche de nouveaux matériaux et le développement de composants faisant appel aux technologies les plus récentes. Les actions gouvernementales s'efforcent actuellement de soutenir les efforts industriels pour le passage difficile d'une technologie artisanale à une industrie de pointe comparable à la micro-électronique (cf. développements du chapitre IV).

Il faut souligner enfin une caractéristique importante commune à tous les exemples cités au chapitre II et qui distingue cette nouvelle génération de processeurs de tous les prototypes réalisés avant les années 80. Non seulement ils bénéficient de l'emploi des composants de pointe nouvellement industrialisés, mais surtout ils en sont les dérivés naturels. Dans les tentatives précédentes, un utilisateur militaire cherchait à n'importe quel prix la solution immédiate, même imparfaite, d'un problème urgent de traitement de signal. Le résultat, obtenu en forçant les limites technologiques avec des composants uniques réalisés spécialement en laboratoire, n'était qu'un « monstre » voué à l'abandon dès que possible.

Les nouvelles réalisations sont au contraire l'aboutissement harmonieux de possibilités nouvelles, perçues en premier lieu par les spécialistes de l'électro-optique eux-mêmes. Les applications visées n'ont pas été le fait d'une décision des seuls utilisateurs mais se sont dégagées de leur collaboration très étroite avec le développement propre de la recherche optique. Par exemple, au CALTECH, c'est un cheminement continu qui a conduit, en partant du modulateur spatial acousto-optique à ondes volumiques, aux méthodes d'intégration spatiales puis temporelles et

enfin à l'association des deux pour un traitement bidimensionnel qui donne à ces nouveaux processeurs le potentiel propre de l'optique.

Il a fallu ensuite être capable de cerner les utilisations optimales de ces nouvelles capacités, à travers une concertation qui a conduit à des processeurs basés sur une algorithmique différente de leurs homologues numériques classiques.

Redéfinition des notions de traitement et de calcul

La recherche universitaire en calcul optique étant essentiellement le fait de départements d'ingénierie électro-informatique, comme on l'a déjà souligné, il était naturel qu'une interaction étroite se développe avec la recherche informatique. Cette interaction est pourtant toute récente. En effet, elle n'est devenue possible que lorsque les informaticiens ont commencé de s'intéresser au calcul parallèle, poussés par le succès grandissant du traitement des images ou de l'information multidimensionnelle, mais aussi par la croissance exponentielle des besoins en calcul créés par ces traitements.

Les laboratoires propres de la Défense, en particulier le NOSC et le NRL, ont joué un grand rôle dans l'étude de nouvelles architectures de traitement du signal adaptées au calcul optique.

De grands laboratoires industriels travaillant pour la Défense, comme Harris Corporation, y ont également apporté une contribution plus discrète mais efficace. Dans les trois grands programmes gouvernementaux, on peut distinguer quatre axes principaux de cette coopération désormais intensive entre les spécialistes du calcul optique et ceux de l'informatique et du traitement du signal :

- la recherche de nouvelles méthodes de traitement des images ou des informations pluri-dimensionnelles, où l'analyse de texture et la recherche de classification sont passées de la simple corrélation, ou des méthodes statistiques classiques en traitement de l'information, à l'élaboration de machines d'auto-apprentissage, de méthodes de substitution symbolique, de changements d'espace plus ou moins apparentés aux méthodes de Karhunen-Loeve pour le traitement d'images multi-senseurs;
- la recherche de nouveaux algorithmes itératifs semi-parallèles pour le calcul matriciel, aboutissant à de nouveaux processus pour le filtrage adaptatif destiné aux réseaux d'antennes, ou du filtrage de Kalman généralisé développé par D. Casasent pour les problèmes non linéaires du guidage de missiles air-air (soutenu par l'AFOSR et le SDIO);
- le développement d'arithmétiques nouvelles pour le calcul parallèle (cf. n° spécial *Optical Engineering*, 25/1, janvier 1986);
- le développement d'architectures de hardware et d'algorithmes spécifiques pour le calcul parallèle destiné moins à l'arithmétique qu'à l'analyse d'implications logiques; cette préoccupation rejoint évidemment celles des grandes compagnies d'informatique, comme on l'a constaté en visitant les centres de recherche de Texas Instruments et de Bell AT et T, en particulier. Ces deux dernières compagnies, qui ne font pas mystère de leur option prioritaire pour la

mise au point d'ordinateurs utilisant le « parallélisme massif », ont fait d'énormes investissements pour être les premiers en mesure de réaliser de telles machines optiquement. Le contact est chez eux particulièrement étroit, bien sûr, entre les recherches optiques et informatiques.

III. 2. PROGRAMMES DES AGENCES GOUVERNEMENTALES : DARPA, AFOSR, ET SDIO

[Étude basée sur des documents non publiés communiqués à l'auteur par ces trois organismes.]

La DARPA a pris la responsabilité d'un vaste programme de recherche sur la connectique optique à tous les niveaux de l'informatique : entre VLSI, entre processeurs et mémoires, entre gros ordinateurs. Sur le plan des composants, elle a fait le pari de l'imageur cohérent, avec pour objectif visé une matrice de 1024×1024 points avec une cadence image de 1 kHz. Enfin, la DARPA a fait l'option du développement des méthodes de substitution symbolique pour le développement de machines d'Intelligence Artificielle. Elle soutient un programme cohérent pour le futur ordinateur tout optique espéré (algorithmes, composants, matériaux), tout en continuant à financer de nombreux processeurs destinés à plus court terme à des applications particulières de traitement optique du signal.

L'AFOSR a été depuis 15 ans le principal soutien de la recherche en calcul optique (sous l'impulsion de John Neff, qui l'a quitté il y a 2 ans pour prendre la responsabilité du programme de la DARPA [33]). Le document transmis est un travail de groupe destiné à identifier les besoins réels en calcul optique et les moyens d'y parvenir. Cette étude identifie : les processeurs à réaliser à court terme (SAR, Convoieurs, Analyseurs de spectre, Communication par fibres optiques. . .) ainsi que les composants à développer et la recherche algorithmique. On y trouve également un résumé autorisé des principales réalisations récentes, une étude globale de l'architecture d'un ordinateur tout optique et enfin une tentative d'échancier des objectifs à réaliser à court et moyen terme. En conclusion, une évaluation des besoins essentiels pour le développement du calcul optique (matériaux, composants, architectures), avec la répartition des tâches entre AFOSR, DARPA, SDI, et Industrie.

Les objectifs du SDIO présentés par un article de William Micelli [34] sont plus spécialement orientés vers le calculateur tout-optique, qui fait partie des « recherches à haut risque » sans lesquelles le projet final du SDI n'a aucune chance d'aboutir. Il faut distinguer à ce sujet ce qu'on pourrait appeler la partie émergente de l'iceberg, c'est-à-dire le travail non classifié du groupe Optical Computing au sein du SDI/IST, avec un modeste budget de 3 millions de dollars pour 1986, et l'énorme budget de la SATKA, division chargée de tous les problèmes de calcul du SDI avec un budget 85 de 546 millions de dollars. La participation des grandes universités à cette recherche a été très controversée par les opposants au SDI, au nom du respect du traité de non-militarisation de l'espace. On constate cependant dans le premier rapport annuel de recherche que les laboratoires concer-

nés de ces universités ont, avec discrétion, maintenu leur participation. Réunissant en 85 un nombre à peu près égal de laboratoires universitaires et industriels, ce groupe a ainsi un rôle incitatif sur la recherche dans l'industrie qui met en jeu des moyens bien supérieurs à l'investissement gouvernemental. L'impact psychologique du SDI a aussi contribué, pour une grande part, au lancement d'un grand courant national favorable à l'idée du calcul optique.

L'ensemble des opinions exprimées par les spécialistes universitaires concernés [3] reflète cependant un optimisme modéré. Ils témoignent d'une commune certitude quant à la réalité des possibilités offertes par l'optique, sinon jusqu'à l'ordinateur tout-optique, du moins pour la réalisation de nombreuses fonctions optiques dans l'ordinateur. C'est ainsi que John Caulfield (longtemps éditeur de la revue *Optical Engineering*), qui a joué un rôle majeur dans le développement du calcul optique, propose de remplacer l'expression « optical computing » par celle plus adéquate d'« optically assisted computing ». Par contre, ces spécialistes partagent l'avis très généralement exprimé que les nouveaux investissements en cours, s'ils représentent un accroissement considérable des moyens antérieurement consacrés au calcul optique, demeurent bien modestes face à l'investissement actuel dans le seul traitement numérique des images. Andrew Tescher, ancien président de la SPIE et directeur de Aerospace Corporation résume ainsi les réticences générales en considérant que les moyens actuellement mis en œuvre ne sont pas à la hauteur des ambitions affichées.

Il faut toutefois souligner l'approche très pragmatique de Demetri Psaltis, qui considère que l'important est de faire les premiers pas : c'est seulement quand l'optique sera dans l'ordinateur, de quelque manière que ce soit, que pourra s'engager une évolution industrielle de grande ampleur. On peut ainsi résumer l'effort national américain pour le calcul optique. Une révolution en cours au plan des idées, mais une révolution à peine amorcée au plan de la réalité industrielle.

Chapitre IV.

Émergences de nouvelles technologies pour le calcul optique

En dressant un bilan rapide des progrès récents [35], David Casasent fait la liste des principaux composants qui ont permis au traitement optique d'effectuer une avancée significative. « Les modulateurs à onde acoustique de surface ou volumique, outre les diodes laser, les fibres optiques et les systèmes détecteurs, ont été et continueront d'être incorporés dans de nombreux systèmes compacts. » Il y adjoint, spécialement pour la classification par convolution, l'important développement des hologrammes générés par ordinateur. Par contre, il souligne comme frein majeur au développement actuel l'absence d'un modulateur bidimensionnel fiable et peu coûteux.

Pour incomplète qu'elle soit, cette énumération rapide à le mérite de souligner les deux axes du progrès technologique dont commence à bénéficier le calcul

optique : d'une part, il tire un profit maximal des composants électro-optiques de technologie avancée développés pour les applications les plus diverses et auxquels un marché d'utilisations civiles a permis un développement industriel (montée des performances et baisse des coûts); d'autre part, grâce à l'intérêt nouveau porté au calcul optique, on commence à voir apparaître des composants spécialement développés à cette intention et dont la réalisation conditionne un véritable développement du calcul parallèle optique : le point crucial est manifestement la production des modulateurs bidimensionnels.

IV.1. UTILISATION DE COMPOSANTS DÉVELOPPÉS POUR D'AUTRES APPLICATIONS. PROBLÈME DE COMPATIBILITÉ DES TECHNOLOGIES

Pour manifester qu'elle soit, l'utilisation des composants existant n'est pas sans poser de nombreuses difficultés. La raison principale est celle qui constitue l'argument majeur pour la création d'un Centre de Recherches sur le « tout AsGa » à l'USCLA. Dans l'introduction de ce projet, on observe que la microélectronique moderne doit l'essentiel de son succès à l'emploi presque exclusif d'un seul matériau, le silicium, qui a permis de concentrer tous les efforts vers une seule technologie, suffisamment flexible pour couvrir l'ensemble des besoins et dont l'homogénéité a permis d'atteindre le stade d'intégration actuel. Le projet considère que l'AsGa pourrait être ce matériau miracle d'une optronique moderne. Le fait que la NSF (National Science Foundation) ait provisoirement renoncé à inscrire ce projet dans ses grands programmes pour 1986, montre que l'unanimité n'est pas encore faite à ce sujet.

La recherche sur les nouveaux matériaux électro-optiques reste très ouverte. Cependant, l'argument majeur à retenir est la nécessité d'une technologie « compatible ». La signification de ce terme peut être précisée en considérant les principaux types de composants spécifiques de la nouvelle électro-optique industrielle : diodes laser, modulateurs acousto-optiques, hologrammes, VHSIC à fibres optiques.

Le développement des diodes laser a bénéficié de l'énorme marché des télécommunications par fibre optique. En conséquence, les plus performantes ont été développées dans l'infrarouge proche (en particulier 1,3 μm). Par contre, on ne dispose pas dans ces longueurs d'onde d'une technologie de photodétecteurs aussi avancée que celle des barrettes et matrices photo-CCD pour le visible motivée, elle, par les applications de télédétection et surtout l'important marché de la vidéo. Il existe cependant une bande commune de longueurs d'onde, de 0,85 à 1,1 μm . C'est dans cette bande que le calcul optique est actuellement contraint d'opérer pour bénéficier non seulement de la miniaturisation des diodes laser mais aussi de leur haute fréquence de modulation (qui atteint aujourd'hui 10 à 20 GHz). En l'absence de barrettes d'émetteurs et détecteurs à sortie parallèle dans cette gamme (les sorties série des barrettes CCD ne dépassent pas 20 MHz), la réalisation de systèmes compacts fait appel à une connectique par fibres optiques pour l'utilisation en parallèle d'une batterie de photodétecteurs.

Les modulateurs acousto-optiques ont surtout été développés pour la déflexion de faisceau laser. Leur marché s'est récemment développé grâce à la diversification des lasers. Ils sont le composant clé des processeurs actuellement développés pour le traitement bidimensionnel de signaux et d'images. Acceptant une gamme étendue de longueur d'onde, ils offrent également des caractéristiques différentes selon le matériau utilisé, optimisant résolution ou vitesse de traitement.

Les produits durée-bande les plus élevés actuellement commercialisés (1 000 points couramment, 2 000 points à 3 dB pour les plus performants) sont obtenus avec le TeO₂ dans la bande 60-120 MHz. On commence à voir apparaître des sorties-images d'ordinateurs atteignant cette bande passante et cette résolution, ce qui facilite les interfaces. L'apparition de mémoires c-mos rapides est également très utile à l'envoi parallèle des données dans les barrettes de modulateurs optiques.

Les premiers pas de l'holographie industrielle ont été les applications d'imagerie artistique ou publicitaire. La réalisation des éléments optiques holographiques connaît aujourd'hui un essor considérable pour deux raisons capitales : légèreté et souplesse d'adaptation. Grâce à l'emploi des gélatines dichromatées, leur rendement lumineux est désormais comparable à celle des composants en verre. Leur réalisation programmable par l'ordinateur (grâce aux progrès de la microgravure) permet la réalisation aisée, soit de systèmes asphériques, soit de réseaux de composants miniatures impensables sur les techniques du verre. Cette dernière possibilité trouve des applications de plus en plus nombreuses dans la connectique des réseaux de fibres en télécommunications.

Plus délicate est la réalisation de hologrammes effaçables programmés en temps réel. Les mono-cristaux de BSO ou BGO actuellement utilisés nécessitent une puissance laser excessive, qui accroît le coût et surtout l'encombrement des systèmes; de plus leur domaine de sensibilité dans les courtes longueurs d'onde visibles (400 à 500 nm) est incompatible avec l'emploi des diodes laser. Un effort considérable est actuellement en cours pour la recherche de nouveaux matériaux dans ce domaine. Notons ici la convergence importante de trois domaines d'utilisation : la connectique dans l'ordinateur (cf. programme DARPA), la commutation de voies en télécommunication, et enfin le processeur parallèle optique pour qui cette connectique à la signification d'une algorithmique câblée reprogrammable.

Les moyens importants actuellement engagés dans la connection par fibres optiques entre VLSI ouvre également la porte à un vaste domaine de réalisations hybrides opto-informatiques du type VHSIC. En effet, à partir du moment où la lumière est le véhicule de l'information entre processeurs, il devient éminemment plus facile d'envisager des opérations intermédiaires optiques bi- ou tri-dimensionnelles, dont la place s'apparenterait à celle des actuels « array-processors » électroniques.

A cette énumération incomplète, il faudrait ajouter l'emploi de composants optiques non linéaires (bistables ou portes logiques à seuil) en télécommunications par fibres ou en pré-traitement d'images pour la robo-

tique ou le contrôle industriel, ainsi que les nombreuses réalisations dans le domaine de l'instrumentation ou de l'automatique faisant appel aux nouvelles technologies de senseurs intelligents (Smart sensors), en particulier à fibres optiques. On n'a pas non plus abordé la conversion numérique-analogique rapide : des convertisseurs en optique intégrée sont actuellement étudiés au Battelle Institute par exemple, basés sur la propagation dans une fibre (réalisée avec un matériau non linéaire du type à effet Kerr) qui joue le rôle de ligne à retard absorbante avec des sorties optiques à seuil dont l'espacement est logarithmique.

IV. 2. COMPOSANTS SPÉCIALEMENT DÉVELOPPÉS POUR LE CALCUL OPTIQUE

On peut classer ces composants en deux grandes familles : les modulateurs bidimensionnels et la « circuiterie optique ».

4.2.1. Modulateurs bidimensionnels (imageurs à adressage électrique ou optique)

(Un développement de cette section a été publié postérieurement au présent rapport : cf. réf. [41].)

Le développement essentiel des technologies de connectique tridimensionnelle fixe ou programmable étant déjà assuré par d'autres applications, le seul problème majeur qui demeure est celui des modulateurs bidimensionnels. C'est aussi le domaine où l'évolution récente, bien qu'insuffisante, est la plus considérable.

Les besoins sont de deux types : introduction de l'information (données d'entrée ou de mémoire), par les imageurs proprement dits à adressage électronique, et traitement spatial parallèle de l'information (imageurs à adressage optique). Ces derniers jouent essentiellement le rôle d'une matrice de portes optiques de logique à seuil (binaire ou non), pas nécessairement bistable, pour le calcul parallèle, avec simultanément un rôle d'amplificateurs pour rendre possible des boucles tout-optique (processor array). Ces boucles comportent également une mémoire optique, probablement un hologramme multiple dont la mise au point rentre dans le cadre du disque optique programmable et des techniques holographiques évoquées précédemment.

Des imageurs ont été développés antérieurement pour la projection grand écran d'images de télévision. Ceux à adressage électronique, comme celui à film d'huile et adressage thermique produit par General Electric, se sont avérés impropres au calcul optique non seulement pour des raisons de coût, d'encombrement, ou à cause de leur médiocre résolution, mais surtout parce que le positionnement spatial entre images successives souffrait d'un « Jitter » prohibitif. Le convertisseur d'images incohérent-cohérent PROM (photodétecteur BSO) industrialisé par ITEK est maintenant abandonné, échec probablement dû aux nombreux défauts de fabrication mais qui risque de condamner l'avenir aux USA de cette technologie prometteuse dont le développement se poursuit en URSS. Dans ce contexte d'échec industriel, il ne restait au début des années 80 que le convertisseur d'images photconducteur-cristal liquide remarquablement développé par Hughes et qui a surtout bénéficié de l'absence de concurrence.

Ce contexte a commencé de changer avec le succès fulgurant d'un imageur matriciel magnéto-optique produit par la firme Litton et commercialisé par sa filiale SEMETEX depuis 1 an : la version actuelle comporte 128×128 pixels adressés séparément avec des temps de montée-descente inférieurs à $1 \mu\text{s}$. Bien que le faible rendement lumineux de cet imageur, 6%, soit un inconvénient coûteux dans la réalisation de systèmes, et qu'il s'agisse d'une modulation exclusivement binaire, ce dispositif a été immédiatement adopté pour la réalisation de corrélateurs militaires. Sa vitesse est essentiellement limitée actuellement par les possibilités électroniques d'adressage parallèle.

Le dispositif le plus performant est actuellement celui dont Texas Instruments vient de fabriquer une première version 128×128 pixels (dont les quelques exemplaires ont été réservés aux laboratoires militaires qui participaient à l'investissement) et prépare une version 1024×1024 points avec une ligne d'entrée multiplexée en AsGa à 1,5 GHz. Il s'agit d'un dispositif à membrane déformable. La mise en fabrication de cette ultime version est en instance de décision, suspendue semble-t-il au succès des essais militaires actuels dont dépend sans doute la contribution escomptée du DOD (Dept of Defense), mais l'étude est maintenant achevée et Texas Instruments a déjà fortement orienté vers cet appareil ses ambitions pour le calcul parallèle, avec des projets de « nearest neighbour optical computer » ou de « optical crossbar switch ».

Deux projets encore plus ambitieux sont actuellement à l'étude : un imageur 1024×1024 points à modulateurs céramique PLZT (USC SD avec le soutien de la DARPA), capable d'une cadence image de 1 kHz, mais dont la fabrication industrielle pose des problèmes qui ne sont pas encore surmontés; et un imageur bistable à puits quantiques dont la réalisation est encore plus délicate mais sur lequel Bell AT et T fonde ses plus grands espoirs d'ordinateur optique.

De nombreuses autres solutions font actuellement l'objet d'essais de laboratoire déjà très avancés : CCD-cristal liquide chez Hughes, CCD-puits quantiques au Lincoln Laboratory du MIT (soutien SDI), imageur CCD-microcanaux au MIT (soutenu par la DARPA), micro-modulateurs à silicium (TRW Space and Technology group; cf. *Optical Eng.*, 24-1, Jan. 1985, p. 101-106). Ce résumé souffrirait d'une lacune grave si l'on n'y mentionnait en outre les cuves acousto-optiques multicanaux commercialisées par Harris Corporation, déjà évoquées au début du chapitre II et dans un exemple de processeur (§ II-2). Plus spécialement adaptées au traitement de réseaux d'antennes dans la version 64 canaux, ces cuves peuvent être également utilisées pour l'affichage simultané de 200 mots de 64 bits avec une cadence image de 1 MHz, ou en défilement continu dans un processeur systolique. Dans le but probable de rentabiliser l'investissement, leur vente est autorisée dans les pays occidentaux.

4.2.2. Circuiterie optique

L'expression de circuiterie optique regroupe aujourd'hui toutes les réalisations électro-optiques ou opto-optiques de fonctions de bases analogues à celles de

l'électronique : transistors, seuils, portes logiques [1]. L'analogie avec les circuits électroniques porte sur la fonction, non sur la technologie. L'emploi des fibres optiques en télécommunication avait déjà suscité des réalisations de ce type, qui ont constitué l'essentiel des technologies regroupées sous le terme d'optique intégrée. S'il n'est pas exclu que les techniques de couplage de fibre soient utilisées pour la réalisation d'une bascule J-K (on trouvera des exemples dans *Optical Eng.*, 25/1, Jan. 1986, p. 44-55), ce sera pour la réalisation d'un composant élémentaire miniaturisé. On obtient aujourd'hui une bascule J-K optique beaucoup plus performante avec des interconnexions holographiques et une matrice d'éléments de seuil et gain au sein d'un mini-interféromètre [36]. Plutôt qu'une multitude de transistors et portes logiques reliés par des fibres, ce qui serait l'analogie directe de l'électronique, la « circuiterie » du calcul optique s'est résolument tournée vers le plein-emploi des interconnexions tridimensionnelles. Les processeurs optiques matriciels itératifs actuellement expérimentés utilisent encore une boucle électronique pour effectuer les opérations logiques qui constituent l'élément de décision du calcul. On peut considérer quod ces processeurs sont seulement des transformateurs de données. Comme l'explique très bien Hyatt Gibbs, directeur de la nouvelle « coopérative de circuiterie optique » créée à Tucson, on pourra parler d'ordinateur tout-optique lorsque la boucle optique de calcul parallèle comportera « un plan de décision » [37], c'est-à-dire une matrice de transistors optiques et de portes logiques.

Tout imageur non linéaire à adressage optique peut jouer ce rôle, en se basant sur une logique à seuil au lieu des classiques portes booléennes : de nombreuses recherches sont actuellement en cours pour la réalisation tant électronique qu'optique de ces portes logiques à seuil, mieux adaptées aux structures parallèles car un seul type de porte réalise toutes les fonctions et le nombre de composants requis est fortement réduit, surtout si l'on choisit une logique à plusieurs niveaux au lieu de la classique logique binaire (cf. exemples dans le numéro spécial déjà cité d'*Opt. Eng.*, 25/1, p. 3-21 et 44-55).

Un autre type de porte logique universelle, actuellement très étudié à l'UAH (nouvel Institut d'Optique de Huntsville, déjà cité) est la porte de Fred Kin, qui comporte toujours 3 entrées et 3 sorties et dont l'intérêt est d'être réversible. On peut ainsi considérer deux grandes tendances dans la recherche américaine actuelle sur la circuiterie optique. La première, que nous venons d'évoquer, est le développement des logiques à seuil, en coopération avec les électroniciens. L'intérêt pour l'optique est de pouvoir faire appel à n'importe quel dispositif non linéaire : le seuil peut-être par exemple une rotation de polarisation, ou un dispositif photo-CCD pondéré commandant l'écriture d'un imageur à adressage optique (à l'étude chez Hughes Aircraft). De nombreux dispositifs d'optique intégrée se prêtent également à ce type d'utilisation et pourraient prochainement se substituer à l'électronique pour réaliser un vecteur de décision dans une boucle optique de produit vecteur-matrice. L'autre grande tendance, que nous ne ferons qu'évoquer rapidement, est l'étude des dispositifs optiques bistables.

L'Université Heriot-Watt bénéficie, outre l'aide de la CEE, d'une convention avec le SDIO pour développer un imageur bistable utilisant les matériaux ZnSe ou InSb [38]. Le nouveau centre dirigé par Hyatt Gibbs à Tucson s'intéresse à toutes les techniques basées sur l'introduction de semi-conducteurs ou de matériaux organiques non linéaires dans une structure de résonateur optique, du type étalon Fabry-Pérot ou simplement filtre interférentiel. Parmi ces matériaux, H. Gibbs cite l'AsGa comme ayant donné les meilleures performances [37]. Il mentionne également les travaux de Bell AT et T déjà cité (§ V 2.1) sur la réalisation d'un imageur matriciel à puits quantiques. L'originalité de ce dernier est basée sur un nouvel effet physique où l'interaction électrons-photons est réversible, d'où son nom de « self electro-optic device » (SEED). A l'état de cellule élémentaire ce dispositif a déjà fonctionné comme transistor optique avec des performances de consommation et vitesse très supérieures aux plus récentes technologies électroniques.

Son intégration en imageur matriciel présente des difficultés considérables, dont seule la puissance technologique d'une firme comme AT et T peut permettre d'espérer qu'elles pourront être surmontées. En dehors du SEED, tous les composants logiques optiques actuels souffrent d'une même difficulté : des cadences rapides à faible énergie ne peuvent être actuellement obtenues qu'en réduisant au maximum la surface du modulateur élémentaire. Cette miniaturisation requiert la mise en œuvre des techniques les plus sophistiquées de la micro-électronique, nécessitant l'association étroite de centres de recherche universitaires et industriels. Tous les grands programmes gouvernementaux évoqués au chapitre III consacrent une part prioritaire de leur effort à la réalisation de tels « imageurs bistables » avec les matériaux actuels, mais aussi soutiennent largement des recherches à plus long terme pour la découverte de nouveaux matériaux.

Conclusion

L'enquête menée a mis en évidence le développement très important aux États-Unis d'une voie technologique nouvelle de l'informatique « assistée » optiquement (selon l'expression de John Caulfield, A 105). C'est à l'un des plus brillants spécialistes de la nouvelle génération, Ravindra Athale (réemment passé du Naval Res. Lab. à BDM Corp), que nous laisseront la parole dans cette conclusion (traduction partielle de l'article [39]).

« Au cours des 5 dernières années, un très fort courant est apparu en faveur du Traitement Optique de l'Information, visant à élargir son domaine d'applications. Cette tendance apparaît particulièrement manifeste dans le contenu de deux numéros spéciaux des *Proceedings de IEEE*, le premier en janvier 77, et le second en juillet 1984 [2]. La plupart des articles du numéro de janvier 1977 ont trait à des processeurs optiques basés sur la transformation de Fourier et orientés vers des applications très spécifiques. Les articles du numéro de juillet 1984 eux, sont tournés vers les divers aspects de la recherche sur le calcul

optique : logique tout-optique, architectures optiques de calcul numérique, processeurs optiques de calcul matriciel, et interconnexions optiques pour les systèmes électroniques.

Le regain d'activité et l'élargissement du champ du Calcul Optique est dû pour une large part à deux facteurs. Le premier facteur a trait aux récents progrès technologiques dans les matériaux et composants optiques. D'éminents exemples en sont la commercialisation de cellules de Bragg acousto-optiques à bande passante élevée, le développement de composés III-V dans des structures à puits quantiques pour réaliser des lasers à injection à haut rendement et des dispositifs Fabry-Pérot non-linéaires pour la commutation tout-optique. Ces deux dernières applications sont motivées par la spectaculaire croissance du marché des communications par fibre optique au cours de la dernière décennie.

Le second facteur a trait à l'évolution des perspectives concernant la structure et le rôle des ordinateurs. Il y a une prise de conscience croissante, au sein de la communauté Informatique, de ce que la prochaine génération des avancées en débit et capacité des systèmes ne peut aboutir qu'en exploitant parallélisme et simultanéité, ainsi que par des innovations architecturales et algorithmiques ».

R. Athale poursuit en soulignant l'importance d'une vaste recherche mathématique, pour des processeurs optiques où l'informatique se rapproche de l'Automatique. Les divers aspects de l'évolution observée corroborent tout point les remarques générales du « Rapport Jerphagnon » [40]. Au chapitre des lacunes françaises et européennes, dans le domaine du Traitement Optique, ce rapport évoquait des insuffisances en formation de chercheurs et ingénieurs, un manque de liaison université-industrie, le besoin de groupes de travail pluridisciplinaires, et certains « trous » technologiques dans le domaine des diodes laser et plus généralement (p. 40) « l'optoélectronique intégrée » ... les matériaux ... l'intégration de fonctions pour la réalisation de dispositifs applicables aux télécommunications, à l'informatique et répondant aux divers besoins du traitement du signal », en considérant ce domaine comme posant un problème important pour l'avenir de la technologie française mais impossible à résoudre sans une vaste coopérative européenne (p. 39).

En décrivant les divers aspects de la révolution amorcée depuis 1980 aux États-Unis, dans le domaine du Traitement Optique du Signal devenu désormais Calcul Optique, le présent rapport permet de situer avec plus de précision ces lacunes technologiques, dont le danger était globalement évoqué dans le rapport de prospective plus général présenté par M. Jean Jerphagnon. Il s'est avéré que l'objectif fixé à cette enquête par le SGDN, de prendre en compte simultanément les applications civiles et celles intéressant la Défense, rencontrait la réalité du développement actuel aux États-Unis, où les programmes de Défense sur le Calcul Optique sont apparus liés d'une manière indissociable aux progrès de l'ensemble de l'industrie électro-optique ainsi qu'au devenir de l'informatique, qu'il s'agisse des grands ordinateurs ou des machines spécialisées de traitement d'image ou d'automatisme.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. L. DOVE édit., Digital optical circuit technology, *AGARD Conf. Proceed.*, 362, Sept. 1984.
- [2] Special issue « Optical Computing », *Proceed. of the IEEE*, 72, n° 7, Jul. 1984, p. 755-979.
- [3] Special issue « The coming of age in optical computing », *Optics News*, 12, n° 4, Apr. 1986, p. 5-28.
- [4] Special issue « Commercial laser applications », *Laser Focus/Electro-Optics*, Oct. 1984, p. 75-128.
- [5] C. B. HRTZ, The laser marketplace, *Laser and Applications*, Jan. 1985, p. 47-62.
- [6] Special issue « Fiber Optics », *Laser Focus/Electr. Opt.*, Oct. 1984, p. 171-188.
- [7] J. HECHT, Diode Laser Report, *Laser and Appl.*, Nov. 1984, p. 89-92.
- [8] R. RALLISON, Applications of Holographic Optical Elements, *Laser and Appl.*, Dec. 1984, p. 61-68.
- [9] J. HOLT, The U.S. Optical Components Market, *Laser Focus/Electr. Opt.*, Nov. 1985, p. 108-116.
- [10] R. BOULAY, Advances in optical production processes, *Laser Focus/Electr. Opt.*, Jan. 1985, p. 118-123.
- [11] R. CUNNINGHAM, Erasable optical storage moves forward, *Laser and Appl.* May 1984, p. 109-112.
- [12] L. HOLMES, Regional Centers support laser-based research, *Laser Focus/Electr. Opt.*, Nov. 1985, p. 78-85.
- [13] J. UPATNIEKS, Portable real-time coherent optical correlator, *Appl. Opt.*, 22, n° 18, Sept. 1983, p. 2798-2803.
- [14] D. MERGERIAN *et al.*, High dynamic range integrated optical spectrum analyser, *SPIE Proceed.*, 477, 1984, p. 28/1-6.
- [15] I. J. ABRAMOVITZ, Passive surveillance applications of acousto-optic processors, *SPIE Proceed.*, 545, 1985, p. 25/1-6.
- [16] D. PSALTIS, Incoherent electro-optic image correlator, *Opt. Eng.*, 23, n° 1, Jan. 1984, p. 12-15.
- [17] D. PSALTIS, Adaptive acousto-optic processor, *SPIE Proceed.*, 519, 1984, p. 9/1-7.
- [18] D. PSALTIS, Acoustooptic adaptive signal processing, *SPIE Proceed.*, 551, 1984, p. 20/1-8.
- [19] D. PSALTIS, Acousto-optic techniques for real time SAR imaging, *SPIE Proceed.*, 545, 1985, p. 26/1-10.
- [20] K. WAGNER, D. PSALTIS, Time and space integrating acousto-optic folded spectrum processing for SETI, *SPIE Proceed.*, 564, 1985, p. 31/1-10.
- [21] P. KELLMAN et T. R. BADER, Acousto-optic channelized receivers, *Opt. Eng.*, 23, n° 1, Jan. 1984, p. 2-6.
- [22] M. A. KRINAK et D. E. BROWN, Interferometric triple product processor (almost common path), *Appl. Opt.*, 24, n° 9, May 1985, p. 1385-1388.
- [23] R. L. COHOON *et al.*, Acousto-optic convolver for digital pulses, *Opt. Eng.*, 25, n° 3, March 1986, p. 480-489.
- [24] C. M. VERBER, R. P. KENAN et J. R. BUSCH, Design and performance of an integrated optical digital correlator, *J. of Lightwave Techn.*, LT-1, n° 1, March 1983, p. 256-261.
- [25] J. N. POLKY et D. D. MILLER, Optical waveguide circuit design of an adaptive filter in the residue number system, *Appl. Opt.*, 21, n° 19, Oct. 1982, p. 3539-3551.
- [26] S. F. HABIBY et S. A. COLLINS, Design of an optical residue arithmetic matrix-vector multiplier using holographic table lookup, *Tech. Digest of the OSA Topic Meet. on Optical Computing*, Washington, 1985, p. TuD4/1-4.
- [27] N. FARHAT *et al.*, Optical implementation of the Hopfield model, *Appl. Opt.*, 24, n° 10, May 1985, p. 1469-1475.
- [28] D. CASASENT et B. K. TAYLOR, Banded-matrix high-performance algorithm and architecture, *Appl. Opt.*, 24, n° 10, May 1985, p. 1476-1480.
- [29] A. K. GHOSH, D. CASASENT et C. P. NEUMAN, Performance of direct and iterative algorithms on an optical systolic processor, *Appl. Opt.*, 24, n° 22, Nov. 1985, p. 3883-3892.
- [30] D. CASASENT, *Optical Computing at Carnegie-Mellon University*, in Ref. 3, p. 11-13.
- [31] H. J. CAULFIELD *et al.*, Bimodal optical computers, *Appl. Opt.*, 25, n° 18, Sept. 1986, p. 3128-3131 (à paraître).
- [32] H. J. CAULFIELD, Systolic optical cellular array processors, *Opt. Eng.*, 25, n° 7, July 1986, p. 825-827.
- [33] H. J. CAULFIELD, An interview with John Neff on optics research and development, *Opt. Eng. Reports*, n° 16, April 1985, p. 1-3.
- [34] W. MICELI, *Optical Computing for the Strategic Defense initiative*, in Ref. 3, p. 8-9.
- [35] D. CASASENT, Optical Processing Research making significant advancements, *Laser Focus/Electr.-Opt.*, Oct. 1984, p. 149-150.
- [36] S. C. GUSTAFSON et D. L. FLANNERY, *Optical Computing Research at the University of Dayton*, in Ref. 3, p. 13-15.
- [37] H. M. GIBBS, *Approaching the all-optical computer*, in Ref. 3, p. 21-23.
- [38] W. TAYLOR et A. C. WALKER, *Optical Computing Research at Heriot-Watt University*, in Ref. 3, p. 16-18.
- [39] R. A. ATHALE, *The role of optics in computation*, in Ref. 3, p. 18-20.
- [40] J. JERPHAGNON, *Rapport sur l'Optique*, Mission Scientifique et Technique du Ministère de la Recherche et de la Technologie, 12 Sept. 1985.
- [41] G. LEBRETON, Le point sur les modulateurs spatiaux de lumière, *Rev. Phys. Appl.*, 22, n° 10, Oct. 1987, p. 1309-1320.