Communication par crossbar optique dans une architecture informatique massivement parallèle

D. Comte, P. Siron, X. Thibault, P. Churoux, M. Fraces, M. Laug

► To cite this version:

D. Comte, P. Siron, X. Thibault, P. Churoux, M. Fraces, et al.. Communication par crossbar optique dans une architecture informatique massivement parallèle. *Revue de Physique Appliquée*, 1987, 22 (10), pp.1301-1307. 10.1051/rphysap:0198700220100130100 . jpa-00245681

HAL Id: jpa-00245681

<https://hal.science/jpa-00245681>

Submitted on 1 Jan 1987

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
Physics Abstracts
52.80

Communication par crossbar optique dans une architecture informatique massivement parallèle

D. Comte, P. Siron, X. Thibault, P. Churoux (+), M. Fraces (+) et M. Laug (+)

Département Informatique, CERT/ONERA, B.P. 4025, 31055 Toulouse Cedex, France

(+) Département Optique, CERT/ONERA, B.P. 4025, 31055 Toulouse Cedex, France

(Reçu le 13 novembre 1986, révisé le 2 mars 1987, accepté le 10 août 1987)

Résumé. — Les machines informatiques à structure centralisée présentent de façon intrinsèque des problèmes « d'embouteillage » sur les lignes de transmission de données. La répartition des tâches sur plusieurs modules indépendants est un palliatif à cet état de fait. La possible mise en œuvre, par des moyens optiques, de réseaux parallèles possédant un grand nombre d'abonnés permet de concevoir des architectures nouvelles et réalistes. Le C.E.R.T. présente une expérience sur un tel moyen de communication ainsi que les architectures parallèles auxquelles il peut servir de base. Un réseau se compose de lignes de transport de données, de commutateurs et d'un gestionnaire. Nous utilisons les avantages de la communication en espace libre : grande bande passante, non-interactivité des faisceaux, absence de support matériel et facile réalisation de la fonction « fan-out » (communication de 1 vers N). Nous exposons et commentons les performances et les limitations qui dépendent des composants utilisés et des contraintes spécifiques liées au principe même de l'expérience.

Abstract. — Computer with centralized organization generate the « Von Neumann Bottleneck » effect. The task sharing can be a solution to avoid this problem. The ability for optics to achieve crossbar networks with an important number of lines allows to design new and realistic architectures. C.E.R.T. presents an experiment on such a system as well as parallel architectures based on it. An optical crossbar network needs lines, switches as well as a controller. We take advantage of free space : high data rate, non interference, no material support for lines, and « fan-out » function. We present and analyse the characteristics and limitations of such a system depending on the components and the operation mode.

1. Introduction.

La technologie des semiconducteurs franchit chaque année de nouveaux records tant en intégration qu'en vitesse. Ces progrès ont des retombées directes dans le domaine des architectures d'ordinateurs où l'on concentre de plus en plus de puissance de traitement dans un volume de plus en plus faible. Mais dans le domaine du traitement de l'information, l'appétit ne semble pas avoir de limite ; chaque jour naissent de nouvelles applications réclamant une vitesse de traitement souvent au-delà des possibilités technologiques. L'approche du problème par la technique du parallélisme permet de concevoir des architectures multiprocesseurs performantes. Se pose alors le problème des communications que l'électronique ne sait pas bien maîtriser. Par nature, l'optique offre des avantages dans ce domaine qui nous permettront de concevoir des systèmes de communications répon-

dant aux critères des architectures parallèles à grand nombre de processeurs.

Après avoir situé le point d'impact de l'optique dans le domaine des architectures parallèles d'ordinateurs, cet article décrit le système de communication optique que nous avons choisi de développer au CERT, à savoir un crossbar optique reposant sur un modulateur de type valve à cristaux liquides. Ce crossbar sera intégré dans une architecture multiprocesseur à construire, constituée d'environ 10 Transputer (microprocesseurs de INMOS).

2. L'optique appliquée aux architectures parallèles d'ordinateurs.

2.1 ARCHITECTURES PARALLÈLES ET MASSIVEMENT PARALLÈLES.

2.1.1 Définition. — Un calculateur séquentiel classi-

que réunit les 3 unités essentielles suivantes : mémoire, unité de traitement et unité de contrôle. L'unité de traitement est chargée d'exécuter les opérations du programme : opérations logiques, arithmétiques, décalages, transferts. Elle le fait de manière séquentielle : une opération à la fois. La plupart des applications numériques (en particulier la simulation de phénomènes physiques) mettent en œuvre des traitements vectoriels (ou matriciels) se traduisant par un nombre d'opérations élémentaires extrêmement élevé. Pour accélérer les traitements, on peut choisir la voie du parallélisme d'exécution : on remplace l'unité de traitement unique par n unités de traitement (identiques ou non) appelées « processeurs élémentaires ». La vitesse de traitement est par là même améliorée d'un facteur plus ou moins proche de n selon la nature du problème traité.

Une architecture parallèle d'ordinateur sera qualifiée de « massivement parallèle » au-delà d'un certain nombre de processeurs élémentaires que nous choisirons aux alentours de 100. A ce niveau, les processeurs élémentaires sont intégrés et ont de faibles performances (aux alentours de 1 million d'instructions/seconde). La limite supérieure du nombre de processeurs n'est en théorie pas déterminée, elle n'est que technologique. Actuellement, nous la fixerons à environ 1 000.

2.1.2 Perspectives à moyen et long terme en matière d'architectures parallèles.

Technologie : En matière d'architecture, la technologie électronique joue un rôle prédominant et décisif. Les progrès rapides et constants de l'intégration permettent d'envisager le développement d'ordinateurs de plus en plus massivement parallèles [0]. On sera capable, dans les quelques années à venir, de réaliser plusieurs dizaines de processeurs par circuit. Il est dès lors tentant, pour augmenter les performances d'un calculateur, d'envisager des assemblages de plusieurs milliers de processeurs.

Réseaux systoliques [1, 2] : Forme un peu simplifiée des architectures massivement parallèles citées plus haut, les réseaux systoliques offrent un bon exemple de ce qu'autorise aujourd'hui la technologie. Un circuit intégré renferme une multiplicité « d'opérateurs » ou « cellules » (forme simplifiée d'un processeur élémentaire) câblés dans un maillage autorisant la circulation des données de cellules en cellules qui interagissent à chacune de leurs rencontres.

Réseaux de processeurs [3] : Tout comme les réseaux systoliques, les réseaux de processeurs sont directement nés des progrès technologiques. Cette approche consiste à intégrer sur un circuit un ensemble de processeurs élémentaires reliés entre eux par un ensemble de nœuds de commutation programmables. On peut ainsi organiser les processeurs en différentes topologies : arbre, réseau carré, réseau

diagonal, anneau, pyramide, etc... Cette architecture permet de s'adapter au mieux au type de traitement envisagé en « configurant » le réseau des processeurs élémentaires.

Les deux approches d'architectures parallèles mentionnées ici illustrent bien la tendance actuelle qui consiste à regrouper un maximum de processeurs pour atteindre des performances que la technologie seule ne peut satisfaire.

2.1.3 Problèmes soulevés et limitations. — Les architectures massivement parallèles présentent tout de même des problèmes majeurs qui pourraient, au moins temporairement, limiter leur développement. Ne relevant pas directement de notre préoccupation immédiate, nous ne ferons que mentionner la première difficulté de mise en œuvre d'une architecture massivement parallèle, celle de sa programmation. Les langages traditionnels ont été conçus pour des calculateurs monoprocesseurs séquentiels et ne sont pas, par conséquent, adaptés à de telles architectures. De gros efforts restent nécessaires pour rendre ces machines facilement et efficacement programmables.

La deuxième difficulté que rencontrent les architectures massivement parallèles et à laquelle nous tenterons d'apporter une solution est celle des interconnexions : interconnexions entre processeurs ou entre processeurs et mémoire, ou les deux à la fois. Si l'électronique nous offre un transistor de plus en plus rapide, il n'en est pas de même au niveau du temps de communication entre les différents éléments d'un système électronique : transistors, circuits ou cartes. On a atteint ici une butée que l'électronique seule ne saura jamais surpasser.

La *multiplicité* des interconnexions (connectique) pose également un problème de plus en plus délicat au fur et à mesure que le nombre de processeurs ou de blocs mémoire augmente. Imaginons le nombre de liaisons nécessaires au dialogue de 1 000 processeurs entre eux sur des canaux bidirectionnels de 32 ou 64 bits ! Une bonne illustration de la complexité du problème nous est donnée par le supercalculateur CYBER 205 de control Data qui n'a pourtant que 4 processeurs : pas moins de 5 000 km de câbles coaxiaux sont nécessaires pour relier les différentes baies du calculateur !

2.2 APPORT SPÉCIFIQUE DE L'OPTIQUE EN MATIÈRE D'INTERCONNEXION.

2.2.1 Caractéristiques d'un faisceau optique. — Le faisceau optique offre un certain nombre d'avantages par rapport à la liaison électronique [4] :

- les lignes à grandes bandes passantes ne présentent pas d'effet capacitif,
- vitesse de propagation égale à celle de la lumière,

- propagation parallèle sur les lignes par absence d'interaction mutuelle (par exemple, deux faisceaux peuvent se croiser dans l'espace sans interaction),
- communication possible en 3 dimensions,
- liaisons insensibles aux parasites électromagnétiques,
- puissance consommée fortement réduite et croissant très peu avec le nombre de canaux sur une même connexion.

Cet ensemble de caractéristiques va nous permettre de reconsidérer le problème des interconnexions dans un ordinateur.

2.2.2 Réseau optique dans un ordinateur parallèle.

— Un ordinateur parallèle met en œuvre de nombreux échanges d'informations, soit entre processeurs élémentaires et mémoires, soit entre processeurs élémentaires, soit les deux. Ces communications peuvent être de différentes natures selon le type de l'architecture retenue :

- elles sont régulières et synchrones (tous les chemins s'ouvrent et se ferment en même temps) dans une architecture de type « SIMD » [5],
- elles sont quelconques et asynchrones dans une architecture de type « MIMD » [5].

Le second cas de figure étant le plus complexe à mettre en œuvre. Dans la réalité, ces problèmes de mise en communication sont confiés à une « boîte noire » appelée « réseau de communication » (ou réseau) qui est chargée d'établir les circuits entre demandeurs et demandés. On connaît à l'heure actuelle de nombreuses formes de réseaux offrant des souplesses de communication et des complexités de réalisations variables [6, 7]. Le seul réseau offrant toutes les possibilités de connexion sans conflit entre deux quelconques abonnés est celui de type « Crossbar » (Fig. 1). L'inconvénient majeur est sa complexité de réalisation [8, 9]. Ce type de réseau

Fig. 1. — Réseau crossbar $p \times n$. A gauche, sont détaillés les différents états possibles d'un nœud de commutation.

[$p \times n$ crossbar network on the left are detailed the different states of the switches.]

n'est actuellement pas envisageable dans des architectures à plus d'une centaine de processeurs.

Crossbar optique. — De par ses propriétés intrinsèques, l'optique est mieux adaptée au problème de communications que l'électronique. La connectique électronique insurmontable au-delà d'un certain nombre de fils peut être avantageusement remplacée par des faisceaux optiques en espace libre. On s'affranchit ainsi de la majeure partie des problèmes de l'électronique.

On connaît à l'heure actuelle plusieurs techniques possibles pour réaliser un Crossbar optique [10]. La plupart sont issues des méthodes de multiplication d'une matrice par un vecteur. C'est le principe que nous retiendrons pour développer notre crossbar optique. Le modulateur spatial utilisé est une valve à cristaux liquides décrite plus loin.

Caractéristiques du crossbar optique. — D'un point de vue strictement informatique, le crossbar optique offre un débit beaucoup plus important que l'électronique (quelques Gbits) mais par contre un temps de commutation bien inférieur (de l'ordre de la ms contre quelques dizaines de ns en électronique). Le nombre de voies parallèles important constitue un autre avantage important.

La lenteur de la commutation nous limite les utilisations possibles du crossbar optique dans une architecture parallèle. L'accès des processeurs élémentaires aux données du programme ne peut se faire par ce type de réseau sous peine de ralentir considérablement la vitesse d'exécution : en effet, les données étant réparties dans des blocs mémoire différents, leur accès peut entraîner une commutation de circuit à chaque élément (cas pire). Nous allons donc envisager des architectures dont le fonctionnement est adapté à cette caractéristique de réseau.

2.3 ARCHITECTURE MASSIVEMENT PARALLÈLE RECONFIGURABLE.

— Compte tenu de la remarque qui précède, nous nous orienterons vers une utilisation du crossbar optique pour relier les processeurs élémentaires d'une architecture parallèle (Fig. 2) en

Fig. 2. — Interconnexion entre processeurs par crossbar optique.

[Interconnections of processors by optical crossbar network.]

faisant l'hypothèse que l'utilisation d'une trame d'interconnexion entre ces processeurs dure un laps de temps bien supérieur au temps de commutation du réseau. On en arrive ainsi à la notion « d'architecture reconfigurable », où l'organisation entre les processeurs varie « peu souvent » durant l'exécution d'un programme pour s'adapter au mieux au traitement demandé. Ainsi, de par la souplesse du réseau, on pourra passer par toutes les organisations de processeurs connues qui généralement sont figées dans des architectures spécialisées : anneau, trame carrée, cube, pyramide, arbre, etc. Certains domaines d'applications sont particulièrement demandeurs de telles architectures comme l'intelligence artificielle [11].

3. Principe de réalisation d'un réseau optique crossbar.

L'important effort technologique actuellement mené dans le domaine des modulateurs spatiaux de lumière nous a conduits à entreprendre l'approche expérimentale d'un réseau optique d'interconnexions de type crossbar, utilisant une valve à cristaux liquides de fabrication Hughes disponible dans notre département. L'objet de cette présentation est la description du système. Son principe repose sur un produit matrice-vecteur, le vecteur étant constitué par les signaux d'entrée du réseau et la matrice par le modulateur spatial de lumière (SLM). Le SLM est utilisé en régime binaire de commutation. Le vecteur

Fig. 3. — Principe du crossbar optique par produit matrice-vecteur.

E_k = émetteurs, D_j = détecteurs, L_{kj} = points de commutation.

[Optical crossbar network using matrix-vector multiplication.

E_k = emitter, D_j = detector, L_{kj} = switching point.]

résultant du produit correspond aux signaux de sortie du réseau. Pour un réseau crossbar $N \times P$, N émetteurs E_k matérialisent N lignes horizontales sur l'une des faces du modulateur. Un ensemble de P détecteurs D_j est disposé à 90° du réseau d'émetteurs. La j -ième colonne du modulateur est imagée sur l'élément D_j . L'établissement de la liaison entre E_k et D_j s'effectue en activant le pixel L_{kj} de la matrice (voir Fig. 3). Ce système conçu au département d'optique du CERT a été étudié par d'autres laboratoires dont un repose sur le même modulateur (Réfs. [12] et [13]).

3.1 PRÉSENTATION DU MODULATEUR A CRISTAUX LIQUIDES. — La valve optique est constituée par une succession de couches minces. Un miroir diélectrique et une couche bloquante assurent l'isolation optique des faisceaux d'écriture et de lecture. La répartition d'éclairement sur la face d'écriture du modulateur modifiant localement l'impédance d'un photosenseur, module la polarisation du faisceau de lecture après réflexion sur le miroir diélectrique (Fig. 4).

Les caractéristiques de la valve sont résumées sur le tableau I. On notera le temps de réponse de 60 ms du modulateur. Nous avons choisi la valve à cristaux liquides comme modulateur de notre réseau pour deux raisons :

- certaines architectures peuvent s'accommoder d'un temps de commutation relativement long,
- il existe des composants plus rapides (miroir déformable...) mais ils ne sont pas actuellement disponibles sur le marché.

3.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DE CARACTÉRISATION DU RÉSEAU. — Nous avons réalisé un montage expérimental de caractérisation du réseau optique crossbar utilisant la valve à cristaux liquides. Le

Tableau I. — Valve optique à cristaux liquides. Hughes Modèle H 4060.

Configuration :

Alignement des cristaux liquides : Hybrid field effect.

Surface utile : 12×12 mm pour une planéité de $\lambda/4$.
25 $\times$ 25 mm totale.

Caractéristiques :

Tension : 6,5 V rms.

Fréquence : 10 kHz.

Lecture : 632,8 nm (autres longueurs d'onde possibles sur demande).

Ecriture : $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ à 514,5 nm (possible entre 500 et 600 nm).

Résolution : MTF > 50 % à 16 pl/mm.

Temps de réponse (100-10 %) : 60 ms.

Facteur de contraste : 150/1.

Fig. 4. — Valve optique à cristaux liquides Hughes.
 (a) = faisceau d'écriture 500-600 nm (optimisé à 514,5 nm)
 (b) = électrodes transparentes
 (c) = couches inertes
 (d) = verre
 (e) = faisceau de lecture (632,8 nm)
 (f) = couche antireflet
 (g) = cristal liquide
 (h) = miroir diélectrique
 (i) = couche bloquante
 (j) = photoconducteur (CdS)
 (k) = face d'écriture en verre.

[Hughes liquid crystal light valve.

- (a) = writing light 500-600 nm (optimized at 514,5 nm)
 (b) = transparent conductive electrodes
 (c) = liquid crystal alignment films
 (d) = optical glass substrate
 (e) = reading light (632.8 nm)
 (f) = antireflection coating
 (g) = nematic liquid crystal
 (h) = dielectric mirror
 (i) = light blocking layer
 (j) = photosensor
 (k) = optical glass substrate.]

montage expérimental est représenté sur la figure 5. La valve optique est un commutateur de polarisation pour le faisceau de lecture. Le faisceau de lecture, à droite de la valve, est issu d'un laser He-Ne couplé à deux fibres optiques.

Un cube séparateur C assure l'isolation des polarisations horizontale et verticale.

L'ensemble optique O + L₂ permet de matérialiser pour chaque fibre, une ligne horizontale sur la face de lecture de la valve.

L₃ est un système optique sphérocyindrique imageant avec un grossissement inférieur à 1 dans le plan vertical, la face d'écriture de la valve et la

Fig. 5. — Dispositif expérimental de caractérisation du réseau optique d'interconnexions :

- L = laser He-Ne
 O₁ = objectif de microscope
 L₁ = lentille de Fresnel
 P = polariseur
 O = objectif (f = 50 mm)
 C = cube séparateur de polarisation
 L₂ = lentille cylindrique divergente
 L₃ = système sphérocyindrique réducteur
 D = barrette de photodiodes
 F₁ et F₂ = filtres verts
 (a) vue de profil à l'émission
 (b) vue de profil à la réception
 (c) vue de dessus.

[Experimental system to characterize the optical crossbar network.

- L = He-Ne Laser
 O₁ = microscope objective
 L₁ = Fresnel lens
 P = polarizer
 O = objective (f = 50 mm)
 C = prism polarizer
 L₂ = negative cylindrical lens
 L₃ = spherocylindrical reductor system
 D = linear array of photodetectors ; green filters.
 (a) lateral view at the emission
 (b) lateral view at the reception
 (c) general view.]

barrette de photodétecteurs. L'adressage est assuré par deux fibres couplées à deux sources blanches filtrées dans le vert.

En l'absence de faisceau d'écriture, le faisceau de lecture conserve sa polarisation initiale après réflexion et reprend le chemin inverse.

En présence d'un faisceau d'adressage, la polarisation a tourné localement de 90° et le faisceau de lecture en ce point est réfléchi vers l'élément correspondant de la barrette.

Les figures 6a et b représentent les signaux délivrés sur un oscilloscope par la barrette pour deux fibres de lecture et deux fibres de commande. La photo du haut correspond à deux fibres d'adressage

accollées, celle du bas à deux fibres en bord de champ.

a)

b)

Fig. 6. — Signal reçu pour deux entrées et deux sorties :
(a) deux fibres d'adressage accolées
(b) deux fibres d'adressage en bord de champ.

[Signal received for two inputs and two outputs :
(a) two joined fibers
(b) two fibers on the field edge.]

3.3 PERFORMANCES DU RÉSEAU. — Les caractéristiques principales d'un réseau d'interconnexions de type crossbar sont :

- le nombre de voies,
- le temps de commutation du SLM,
- le débit d'information.

Le critère de base pour analyser la validité d'une ligne optique repose sur l'établissement du bilan de liaison entre l'entrée et la sortie. Ceci permet d'établir le rapport signal sur bruit en réception qui conditionne le taux d'erreur de la ligne et le débit possible d'information.

Le niveau de signal dépend de l'efficacité du

modulateur, des pertes le long de la ligne optique et du nombre de voies puisque dans notre principe de crossbar chaque émetteur diffuse sur tous les récepteurs.

Le bruit est de deux natures qui sont le bruit électronique de la chaîne de réception et le bruit optique qui comprend le bruit propre de la source mais aussi la diaphonie optique du fait que le modulateur n'a pas un rapport de contraste infini.

Le rapport de contraste maximal ON/OFF du modulateur étudié est de 400 et reste supérieur ou égal à 100 sur une zone de $20 \times 10 \text{ mm}^2$.

Le facteur d'atténuation de l'optique qui comprend l'efficacité du modulateur est tel que pour une puissance de source de 2 mW en sortie de fibre, un détecteur de largeur 0,3 mm reçoit une énergie de $0,5 \mu\text{W}$.

Le nombre de voies possible avec de telles caractéristiques n'est pas limité par des considérations d'ordre géométrique telle que la résolution du modulateur mais par le rapport signal/bruit en réception.

Pour déterminer ce nombre N , nous avons utilisé le modèle de la référence [14] qui établit la relation entre le rapport signal/bruit, le débit d'information et le taux d'erreur dans lequel nous avons inclus le bruit de diaphonie. Avec un taux d'erreur de 10^{-9} , il apparaît que notre système permettrait de réaliser un crossbar à 70 voies maximum, un débit d'information de 10 à 20 Mbits et un temps de reconfiguration égal au temps de réponse du modulateur de 60 ms.

4. Conclusion.

La valve à cristaux liquides décrite précédemment va nous permettre de réaliser un réseau crossbar selon le schéma présenté sur la figure 6.

Un réseau de diodes laser couplées à un peigne de fibres assurera le transfert des informations sur la voie de lecture du modulateur. La commande du réseau, donc sa reconfiguration, sera effectuée par un tube cathodique suffisamment énergétique (analogue aux tubes équipant les projecteurs vidéo grand écran). Le débit sera de 10 à 20 Mbits/s. Les signaux de sortie du réseau seront reçus sur une barrette de photodiodes semblable à celle qui équipe le dispositif actuel.

Ce réseau crossbar optique constituera le fondement d'une architecture parallèle constituée d'une dizaine de processeurs élémentaires (microprocesseurs Transputer) à 4 liaisons bidirectionnelles chacun. Il comportera donc 40 entrées et 40 sorties. Par nature même du crossbar, les liaisons entre processeurs élémentaires seront programmables, toutes les combinaisons étant *a priori* possibles.

Cette maquette dont nous envisageons la réalisation prochainement ne devrait être qu'une première

étape vers la construction d'architectures multiprocesseurs massivement parallèles nécessitant des réseaux d'interconnexions à plusieurs milliers de voies en parallèle, et à des débits de l'ordre du Gbits/s. Nous pensons que l'intensification des

recherches dans le domaine des modulateurs spatiaux de lumière (cuves acousto-optiques, miroirs déformables, effet magnéto-optique...) et les progrès rapides accomplis ces dernières années nous offriront cette possibilité dans un proche avenir.

Bibliographie

- [0] HAYNES, L. S., SIEWIOREK, D. P., A survey of highly parallel computing, *IEEE Computer* (1982) 9.
- [1] ANDRÉ, FRISON, QUINTON, *Algorithmes Systoliques de la théorie à la pratique*, IRISA Rennes. Publication interne n°196, mars 83.
- [2] KUNG, H. T., Why Systolic architectures ? *IEEE Computer* (1982) 37-46.
- [3] SNYDER, L., Introduction to the configurable highly parallel computer, *IEEE Computer* (1983) 47-56.
- [4] CHUROUGH, LAUG, TRAORE, *Calcul optique numérique*, Rapport final contrat DRET 2/6146.00.RO, décembre 85.
- [5] COMTE, D., SIRON, J. C., Les Supercalculateurs, *La Recherche* **147** (1983) 1083-1095.
- [6] SIEGEL, H. J., *The universality of various types of SIMD machine interconnection networks*, 4th annual Symp. Computer architecture (1977) 70-79.
- [7] FENG, T., A Survey of Interconnection Networks, *Computer* **12** (1981).
- [8] FRANKLIN, M. A., VLSI Performance comparison of banyan and Crossbar communication networks, *IEEE Trans. Computers* **C 30** n° 4, 283.
- [9] BROOMELL, G., HEATH, J. R., *An Integrated circuit Crossbar switching System Design*, Proc. on the 4th int. Conf. on Distributed Computing Systems, May 84, 278-287.
- [10] SAWCHUCL, A. A., JENKINS, B. K., *Optical interconnection networks*, Proc. of the 1985 int. Conf. on parallel processing, August 85, 388-392.
- [11] BIBEL, W., BUCHBERGER, B., *Towards a connection machine for logical inference*, FGCS, 177.
- [12] CLYMER, B., COLLINS, Jr, S. A., Optical computer switching network, *Opt. Eng.* **24** (1985) 74-81.
- [13] MCAULAY, A. D., Optical crossbar interconnected digital processor with basic algorithms, *Opt. Eng.* **25** (1986) 82-90.
- [14] COZANNET, A., FLEURET, J., MAITRE, H., ROUSSEAU, M., *Optique et Télécommunications*, Collection technique et scientifique des Télécommunications (Editeur Eyrolles) 1981.