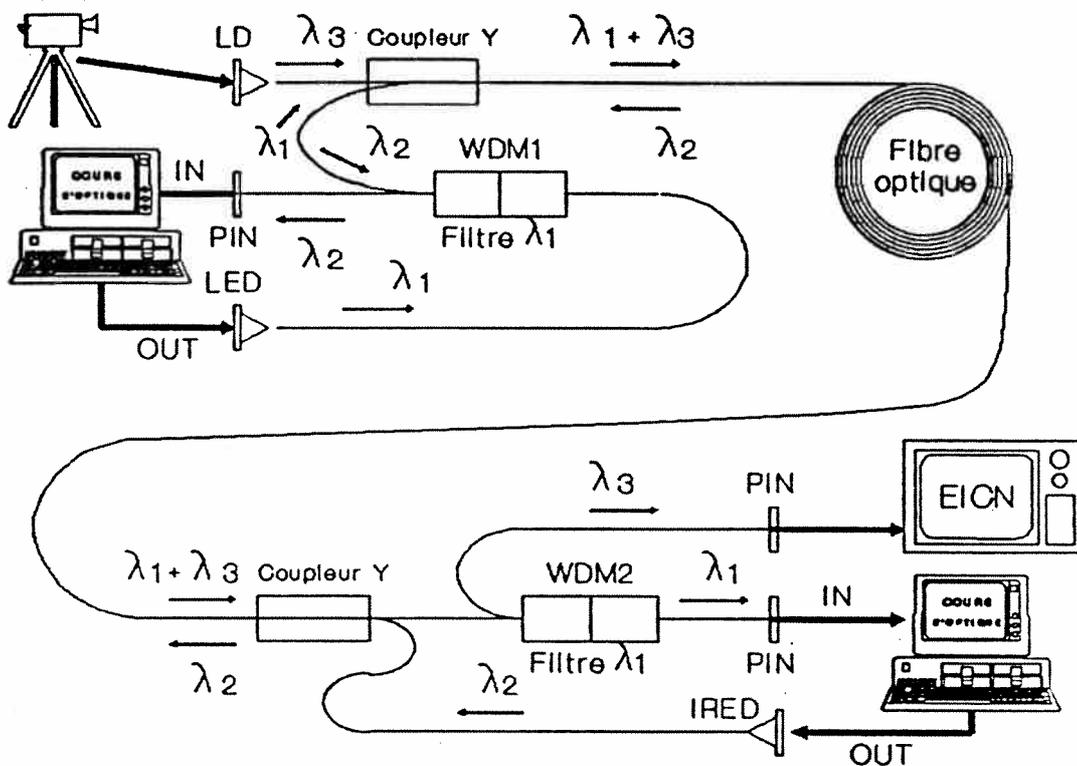


Société des Enseignants Neuchâtelois de Sciences



bulletin n° 10, oct. 1991

Une conférence, un livre, une réaction d'élève sont susceptibles d'intéresser d'autres collègues. Pourquoi de pas faire figurer cette information dans le bulletin ?

Edition: Société des enseignants neuchâtelois de sciences (SENS).

Comité de la SENS: Françoise Jeandroz (présidente), Andrée Boesch, Pierre-André Bolle (caissier), Christian Bazzoni (vice-président, délégué coll. informatique), Christian Berger, Gérard Gast, Jean-Pierre Launaz (secrétaire), Michel Favre (délégué coll. mathématique), Denis Sermet, Eric Vaucher (délégué coll. physique-chimie).

Equipe de rédaction du Bulletin: Jacques-André Calame, Michel Favre, François Jaquet, Françoise Jeandroz, Jacques Méry, Luc-Olivier Pochon.

A, en outre, collaboré à ce numéro: Philippe Bovay, Jean-Marie Moine.

Contact: Michel Favre, rte de la Jonchère 13a, 2208 Les Hauts-Geneveys

Couverture: Illustration tirée de l'article de Philippe Bovay.

Délaï pour transmettre vos contributions au prochain numéro: 1 décembre 1991

technologie

La fin du XXème siècle sera-t-elle photonique ?

L'exemple de la ligne de télécommunication

Philippe Bovay, Ecole d'ingénieurs du Canton de Neuchâtel

1. INTRODUCTION

En 1800, la découverte de la pile par Volta ouvre la voie à l'électricité dynamique et au transport par fil, sur une grande distance, d'un signal électrique. Les connections et dérivations sont tout simplement assurées par des contacts entre conducteurs. L'interrupteur permet la commutation (relais) et la modulation : le code inventé par Morse en 1837 offre la possibilité de transmettre un vrai message intelligible, numérisé ! Toutefois la transmission analogique va rapidement s'imposer pour plus d'un siècle. Grâce aux travaux de Graham Bell en 1876, les variations de courant électrique générées par un microphone porteront dans le monde la parole humaine. En 1887, à la suite des travaux théoriques de Maxwell, Heinrich Hertz produit les premières ondes auxquelles son nom restera dorénavant attaché. Avec le cohéreur à limaille (détecteur d'ondes hertziennes) découvert par Branly en 1890, tout est prêt pour que, six ans plus tard, Marconi nous offre ce qu'on appelle aujourd'hui "la radio". La TSF (télégraphie, puis transmission sans fil) est née ! L'apparition de la triode en 1906, due à Lee de Forest, fera faire un pas de géant à ce nouveau messenger : amplification, oscillateur fournissant une onde porteuse, modulation d'amplitude, modulation de fréquence (1928), multiplexage (1938), hétérodynage. Simultanément, l'amélioration des transducteurs électromécaniques, électroacoustiques ou électromagnétiques permet la mémorisation et la diffusion publique du savoir humain : l'électrophone en 1908, le haut-parleur familial en 1922, le magnétophone en 1935, la télévision en 1936, cette dernière mettant le pied dans la porte de l'optoélectronique. En 1939, Reeves remet l'idée de Morse au goût du jour par une proposition bien plus originale : le codage par impulsions du signal analogique. Il faudra cependant attendre l'avènement du transistor (Bardeen, Shockley, Brattain en 1948) puis de la microélectronique (dès 1960) pour que la transmission numérisée prenne son envol (ces dernières années seulement).

Aujourd'hui le bon vieux fil électrique tend à être remplacé, partout où cela est possible, par un porteur de photons : la fibre optique. Mais le signal est toujours initialement électrique; l'optoélectronique se charge de transformer ce flux d'électrons en flux lumineux. Cette substitution n'est cependant pas limitée à la seule ligne de transmission; jusqu'où les techniques que nous venons de parcourir sont-elles applicables ?

Assisterons-nous même à un renversement de situation la TSF redevenant TPF (transmission par fil) lorsqu'on sait que des fibres de plusieurs dizaines de km sont lancées par fusées au-dessus des mers, que le téléguidage des missiles tend à se faire par la technique du fil à la patte (fibre ultra-légère se déroulant comme la ficelle du cerf-volant) et que l'analyse des coûts s'est montrée plus favorable à la transmission intercontinentale par fibre que par satellite ?

Telles sont les réflexions qui nous sont venues à la suite d'un travail de diplôme mené à l'Ecole d'Ingénieurs du canton de Neuchâtel (ETS) et portant sur la réalisation d'une ligne de transmission à une seule fibre, bidirectionnelle et multiplexée, réflexions dont nous désirons faire part ci-dessous. Le champ d'investigation est très vaste car l'optique moderne est loin de se cantonner dans les télécommunications (métrologie, analyses chimiques, traitement d'images, informatique, médecine, optronique, etc).

2. NAISSANCE DES TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES

2.1 La lumière, première TSF

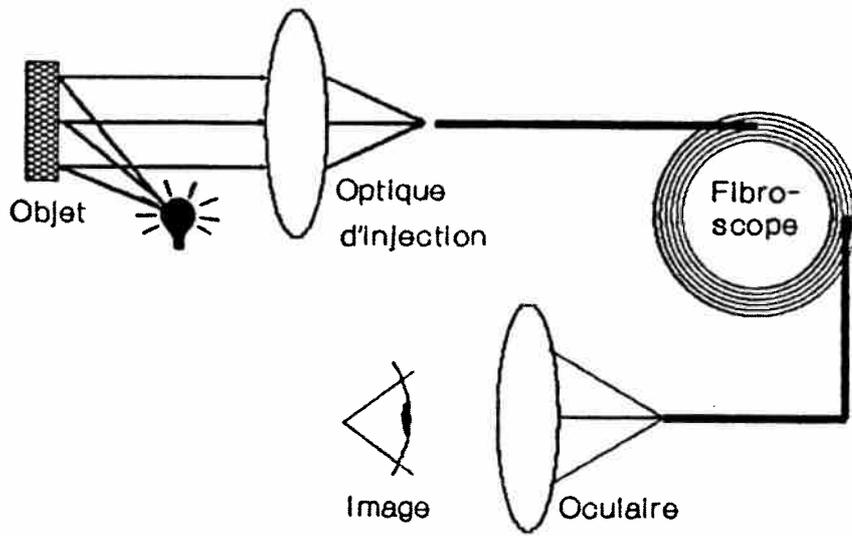
Contrairement à la TSF hertzienne, il n'est pas besoin d'expériences fines pour deviner que la lumière est un support idéal pour la transmission de messages codés sans fil. Qui n'a en effet joué aux messages "secrets" avec sa lampe de poche ou, éclaireur, transmis un texte en "morse" ? Depuis que l'homme se promène sur les mers, on utilise les relais sémaphoriques, pendant la seconde guerre mondiale, la Kriegsmarine allemande utilisa le "lichtsprecher", système de téléphonie utilisant une source IR (infrarouge) orientable et collimatée. L'attractivité de la lumière comme onde porteuse est évidente : sa fréquence se chiffre en 10^{14} Hz, soit 10^6 fois celle d'une onde radio FM courante, permettant une bande passante de modulation dans le même rapport. L'inconvénient majeur d'une source naturelle est sa haute divergence conduisant à des flux lumineux très rapidement affaiblis et perturbés par les variations aléatoires d'indice du milieu de propagation. Dans les années 1960, l'apparition du LASER et sa haute directivité relance l'intérêt de telles transmissions : en 1970 on mesure "photoniquement" la distance Terre-Lune à 15cm près. La même année, les LED's (diodes électroluminescentes) et les LD's (diodes lasers) permettent la naissance de l'Autofocus et du CD (disque compact).

2.2 Le fibroscope

Bien que très peu divergente, la lumière du laser possède un défaut rédibitoire en milieu libre : elle se propage en ligne droite, d'où la nécessité de toujours voir son interlocuteur. La fibre optique va apporter un remède idéal à cette faiblesse. Les fontaines lumineuses illustrent le principe simple de l'optique guidée : il "suffit" que la lumière soit maintenue captive dans un milieu d'indice de réfraction supérieur à celui du milieu ambiant. Cependant, la fontaine est précisément lumineuse parce que de la lumière s'en échappe : il y a des pertes. La première réalisation sérieuse d'un "conduit de lumière" n'apparaît qu'en 1950 avec le "fibroscope" (Heel, Hopkins, Kanapy). Celui-ci est constitué d'un cordon de nombreuses fibres parallèles, elles-mêmes formées d'un coeur de verre gainé d'un verre d'indice à peine supérieur à celui du coeur. Le fibroscope (Fig.2.1) est l'ancêtre de l'endoscope permettant d'examiner des objets inatteignables (organes internes en médecine, éléments d'une chambre de réacteur, etc.). C'est le système optoélectro-

nique primitif : la source est le transducteur électro-optique, le fibroscope propage le message (l'image) et l'oeil forme le récepteur opto-électronique.

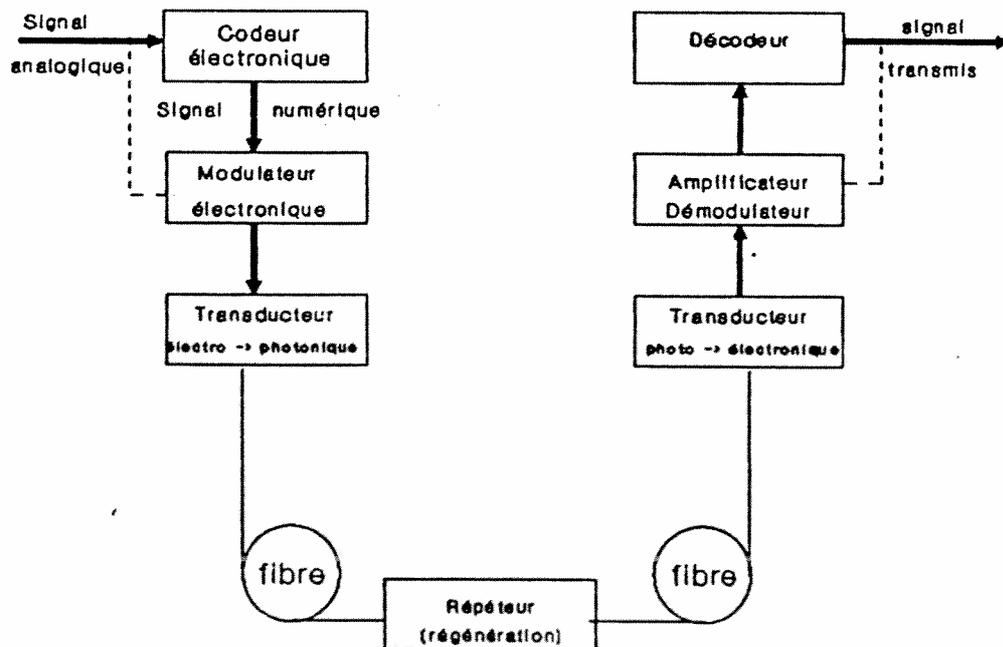
Fig.2.1. Le fibroscope, premier système optoélectronique



3. LA FIBRE MONOCANAL

La configuration de base de systèmes de transmission de signaux par FO (fibre optique) est donnée par le schéma-bloc de la figure 3.1.

Fig.3.1. La ligne de transmission à fibre optique monocanal



Jusqu'à récemment, les améliorations apportées à un système de communication optique n'ont pratiquement concerné que la transmission mono-locuteur-écoutateur. (Nous allons parcourir en quelques traits les progrès réalisés pour obtenir aujourd'hui des éléments proches de leur optimum.)

3.1 La fibre optique

Il n'est pas question ici de décrire le processus de guidage d'une fibre optique. Rappelons néanmoins les avantages d'une telle liaison : linéarité (puissance de sortie proportionnelle à celle d'entrée), immunité aux interférences électromagnétiques (émissions radio, foudre, etc), pas de retour par la masse, interception du message difficile (perte de lumière décelable), faible poids, pas d'électrocution (seul un danger visuel restreint). Mais pour que ces avantages soient utilisables, il faut obtenir deux propriétés fondamentales préalables : la transparence et la rapidité.

La course à la transparence : Un verre à vitre atténue un flux lumineux de 10'000 dB/km, ce qui indique qu'une tige de verre de 1m de long ne laisse passer qu'un dixième de la lumière incidente ($1/10^{10}$ pour 10m !). Il est donc exclu d'envisager une ligne de transmission supportée par du verre à vitre. En 1967, dans le fibroscope, les pertes sont encore de 1000 dB au km. L'événement date de 1970 lorsque des chercheurs de Corning Glass (Kapron, Keck et Maurer) élaborent une fibre à seulement 20 dB/km de pertes. Ces dernières sont essentiellement dues aux impuretés et aux irrégularités de la fibre provoquant une diffusion de la lumière. Cette diffusion dépend de la longueur d'onde (minimum à 1550m) et actuellement on obtient des valeurs proches de la limite théorique de la silice pure, puis dopée pour obtenir les bons indices de réfraction. Les valeurs standard de production sont aujourd'hui les suivantes :

< 3 dB/km à 850nm
 < 1 dB/km à 1300nm
 < 0,5 dB/km à 1550nm.

Fibres en verre fluoré : A des longueurs d'onde encore plus grandes (2 à 3 μ m) l'espoir repose sur le verre fluoré dont l'atténuation théorique est de 0,01 dB/km seulement on est encore supérieur au dB/km !). De telles fibres permettraient des liaisons transatlantiques sans répéteur !

Fibres à maintien de polarisation : Nous verrons que la détection cohérente, déjà en fonction dans certains systèmes, exige que l'information sur l'état de polarisation de la lumière transmise ne soit pas perdue. Dans cette perspective, on a développé des fibres spéciales, dites à maintien de polarisation. Malheureusement, l'atténuation de telles fibres est encore trop élevée pour leur utilisation à grande distance.

Fibres plastiques : A l'autre extrême des spécifications (100-200 dB/km) nous mentionnerons les fibres tout polymère. Celles-ci peuvent être obtenues, pour un prix modéré, en kits de transmission de systèmes locaux limités à quelques dizaines de mètres. Plus intéressantes sont leurs caractéristiques spectrales permettant la transmission d'UV ou leur fluorescence exploitée dans la détection de particules élémentaires. Il existe également des fibres "PCS" à coeur de silice et gaine en polymère, d'atténuation un peu meilleure.

Les grands débits : Par fibre optique, on peut transmettre des signaux soit analogiques (les codeurs de la fig.3.1 ne sont alors pas nécessaires), soit numériques. La capacité de transmission de la fibre est chiffrée dans le premier cas par la bande passante B en Hz et par la capacité de débit b en bits/s dans le second cas. La transmission codée étant la mieux adap-

tée à la FO, nous considérerons essentiellement le cas d'impulsions binaires dans ce qui suit. La bande passante est principalement limitée par l'élargissement d'une impulsion avec la distance parcourue. La capacité étant approximativement inversement proportionnelle à la longueur de la fibre, il est habituel de la caractériser par le produit constant $B \cdot l$ en Hz·km ou $b \cdot l$ en bits/s·km. Les premières fibres étaient formées d'un coeur d'indice n_1 et d'une gaine (cladding) d'indice $n_2 < n_1$, dites à saut d'indice. Ces fibres ont une bande passante limitée car la lumière injectée se distribue en divers "modes" se propageant selon des chemins optiques et des temps différents. L'élargissement des impulsions qui en résulte réduit la capacité de transmission à des valeurs relativement modestes (typiquement 10-50 Mbits/s·km). Les fibres multimodes à "gradient d'indice" tendent à regrouper les différents modes en ayant un indice de réfraction qui diminue progressivement du centre du coeur à sa périphérie (la gaine). Les fibres GI normalisées ont 50 μm de coeur et 125 μm de gaine en diamètre. Les capacités nominales sont alors bien meilleures (typiquement de 100 Mbits/s·km à 850nm jusqu'à 2 Gbits/s·km à 1300nm). Il est dès lors évident que le meilleur remède à la limitation de bande passante est de ne laisser passer plus qu'un seul "mode" dans la fibre, ce qui est possible en diminuant le diamètre du coeur à 10 μm . La fibre est dite monomode et sa capacité atteint des sommets (typiquement de l'ordre de 400 Gbits/s·km à 1300nm). A titre de comparaison, une fibre polymère a une capacité 10^5 fois inférieure (typiquement 5 Mbits/s·km à 650nm).

Les valeurs précédentes montrent que la capacité dépend également de la longueur d'onde de la porteuse optique : les différentes longueurs d'onde émises par la source lumineuse ne se propagent pas à la même vitesse, il y a dispersion. Cette nouvelle limitation au débit transmissible est minimum à 1300nm ce qui plaide pour les porteuses IR.

On cherche actuellement à obtenir des fibres dont le minimum d'affaiblissement (1550nm) coïncide avec le minimum de dispersion (1900nm) en déplaçant ce dernier vers 1550nm.

3.2 Les composants d'extrémités

Les caractéristiques globales d'une ligne de télécommunication à FO sont actuellement bien plus limitées par les composants d'extrémités que par la fibre elle-même, à la limite de ses possibilités pour les matériaux utilisés aujourd'hui.

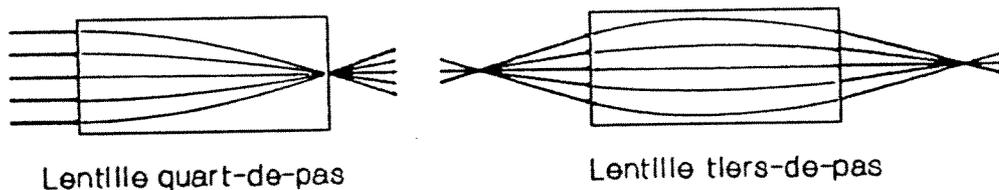
Les sources : L'évolution très rapide des systèmes à FO est due à l'apparition simultanée, dans les années 70, des grandes transparences et des sources à semiconducteurs facilement modulables. Les premières LED's utilisées en télécommunications furent obtenues par épitaxie de couches GaAlAs sur substrat GaAs et émettant dans le proche IR (max à 850-900nm). Mais, nous l'avons vu, les grands débits exigent des longueurs d'onde de 1300nm et 1550nm. Au-dessus du μm , on doit changer de matériau de base et les LED's émettant dans ces deux longueurs sont en GaInAsP/InP. Pour éviter que la lumière ne soit émise dans toutes les directions (ce qui est le cas des diodes courantes), on configure la jonction sous forme d'un canal de lumière (diodes à double hétérojonctions); les photons sont alors guidés vers les flancs de la puce en un flux directif, comme si une micro-fibre optique était insérée à l'intérieur du semiconducteur.

Le principal inconvénient des LED's concerne leur spectre d'émission relativement large ($\Delta\lambda > 40\text{nm}$) autour d'un maximum λ_p . Pour diminuer cette largeur spectrale d'émission, produisant une dispersion dans la fibre (et une diminution du débit), on a mis au point les diodes laser LD. On oblige la lumière à se réfléchir de nombreuses fois sur les faces polies de la diode (stimulation LASER). Le spectre de la lumière émise est beaucoup plus étroit (typ. 3 à 5nm), mais est encore formé de plusieurs raies spectrales très proches, chacune correspondant à un nombre entier de demi-longueurs d'onde entre les deux miroirs.

On appelle LD monomode une diode laser n'émettant que sur une seule raie spectrale ($\Delta\lambda < 1\text{nm}$) grâce à une structure périodique du canal d'émission formant un filtre diffractif très sélectif et remplaçant les miroirs d'extrémités (voir optique intégrée). Pour des λ de 2 à 3 μm (verres fluorés) des sources en InAsSbP/InAs et GaAlSb/GaSb sont déjà disponibles.

L'injection : La nature obligatoirement divergente de la lumière émise par la source est en opposition à la nature convergente du cône d'acceptance de la fibre (son ouverture numérique). Par leur faible divergence, les sources cohérentes améliorent déjà la solution. Afin de perdre le moins de puissance possible, une des techniques est de rapprocher au maximum la surface d'émission de l'extrémité de la fibre et c'est pourquoi la plupart des sources destinées aux télécommunications sont directement montées avec une amorce de fibre (pigtail). Une autre possibilité intéressante est fournie par une microoptique telle que la lentille GRIN (à gradient d'indice) dite aussi SELFOC. Cette lentille est un petit cylindre d'environ 1mm de diamètre et 2mm de longueur. C'est en fait une petite portion d'une grosse fibre à gradient d'indice (Fig.3.2).

Fig.3.2. Deux types de lentilles GRIN (SELFOC)



Les principales causes de pertes d'injection sont les pertes Fresnel (pertes dues aux réflexions sur les variations d'indices de réfraction entre la zone émissive et l'intérieur de la fibre), les problèmes d'alignement et le dimensionnement géométrique pour obtenir un cône d'injection optimum à l'entrée de la fibre. Ces pertes sont de quelques dB dans le meilleur des cas.

La réception : Les problèmes dimensionnels à la réception sont moins critiques qu'à l'injection, l'aire du détecteur étant généralement plus grande que celle du coeur de la fibre. Les récepteurs de télécommunication sont également livrés sous la forme "pigtail". Pour $\lambda < 1 \mu\text{m}$, le détecteur universel est à base de Si. Comme pour les sources, les matériaux adaptés à la détection 1300nm et 1550nm sont InGaAs et InGaAsP. On utilise également le Ge.

Deux principales structures intégrées sont à la base des transducteurs électro-optiques à semiconducteurs : les photodiodes PIN (zones positive-intrinsèque-négative) et les APD (avalanche photodiodes). L'examen des paramètres entrant dans le choix et les performances d'un détecteur particulier sortirait largement du cadre de cet article.

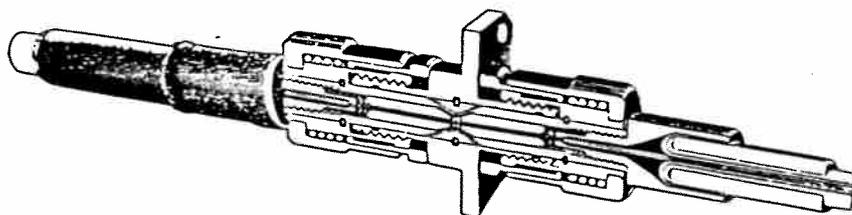
Signalons encore qu'un photodétecteur ne délivre des courants électriques que de quelques μA au maximum. Ils doivent être suivis d'un étage amplificateur électronique transformant ce courant en tension supérieure au volt pour être directement utilisable par les circuits logiques subséquents. Le rapport d'amplification, en V/A , est appelé la transimpédance du dispositif.

C'est ainsi que sont nés les récepteurs PIN-FET où un transistor à effet de champ est directement intégré à la sortie de la photodiode PIN sur le même substrat. Si ces détecteurs sont un peu moins rapides que les diodes PIN seules, leur gain par contre est près de 1000 fois supérieur à celles des APD de sorte que la tension délivrée est immédiatement exploitable.

Côté IR lointain, les détecteurs en Ge, InGaAs, PbS, PbSe, InAs, InSb, mais surtout HgCdTe permettent de couvrir les domaines spectraux $1,5\text{-}6\ \mu\text{m}$ et $8\text{-}16\ \mu\text{m}$ (pyrométrie) !

Les connexions : Pour réunir deux extrémités de fibres, on utilise soit des connexions fixes, soit des connexions enfichables. Les premières sont obtenues par fusion des deux extrémités à assembler et sont dénommées épissures (splices); elles permettent d'éviter les pertes dues aux variations d'indice de la connexion (pertes $<0,1\ \text{dB}$). Le connecteur enfichable, le raccord BNC de l'optique, est bien plus compliqué; il exige un alignement extrêmement précis des extrémités de fibres (tolérances inférieures à $0,5\ \mu\text{m}$ pour la fibre monomode); une perte de l'ordre du dB en moyenne est obtenue (Fig.3.3).

Fig.3.3. Exemple de connecteur



3.3 Les systèmes complets

La modulation : On appelle modulation toute opération visant à modifier un paramètre de l'onde porteuse optique de manière à lui donner le contenu d'information à transporter. Actuellement, on n'utilise pour la FO "commerciale" que la modulation d'intensité par commande électronique, en amont de la source (nous verrons ci-dessous les types de modulations du futur). La forme la plus simple de modulation d'amplitude est la modulation analogique DIM (direct intensity modulation). Elle est possible grâce à la bonne linéarité des sources et détecteurs à semiconducteur au-dessus du seuil de fonctionnement : le signal est directement appliqué (avec un offset adéquat) à l'entrée électrique de la source et le photodétecteur suivi d'une transimpédance le transforme en un signal qui devrait être rigoureux-

sement proportionnel au signal initial. Cette méthode nécessite de tous les composants électroniques une excellente linéarité et un rapport S/N (signal/noise) très élevé.

Les exigences de linéarité sont moins sévères pour les modulations binaires où les signaux sont convertis en impulsions. Le contenu d'information est indiqué en variant soit l'amplitude des impulsions (PAM), soit leur fréquence (PFM), soit leur position (PPM), soit encore leur largeur (PWM), soit enfin leur intervalle (PIM). Des techniques de codages permettent de diminuer le rythme de ces impulsions (en bits/s) en éliminant certaines redondances (codage MIC-PFM p.ex.). La transmission optique des messages est ainsi réduite à des présences ou absences de lumière facilement régénérables par une optoélectronique photodétecteur + détecteur de seuil, dans les répéteurs ou en fin de ligne. Le prix à payer est une électronique plus sophistiquée de démultiplexage reformant le signal initial et une largeur de bande nécessairement plus élevée. La tendance actuelle est à ce type de communication dite numérique (ou digitale), bien que la détection cohérente pourrait à l'avenir redonner de l'intérêt à la modulation analogique de la fréquence de la porteuse optique. Mentionnons encore qu'il existe des oscilloscopes à entrée connecteur FO permettant de caractériser directement la fin de ligne.

Les systèmes normalisés : Bien que des taux de transmission de plusieurs GHz soient possibles en laboratoire et que les BELL Laboratories annoncent une transmission sans répéteur sur 6000 km grâce à des impulsions laser ultra-courtes (solitons) et un conditionnement périodique de la fibre, les systèmes commerciaux actuels sont beaucoup plus modestes dans leurs capacités. Pour fixer les idées, nous donnons dans le tableau ci-dessous les systèmes européens normalisés par la CCITT.

Source	λ (nm)	Fibre	Nbre fibres	Détecteurs	Capacité Mbits/s	Distance (km)	Application	Types d'information
LD	1550	Monomode Si	2	FET	565	>100	Réseaux	7680 voies tél. à 64 Kbits/s ou 8 voies TV à 70 Mbits/s
LD	1300	Monomode Si	2	PIN - PIN	140	~ 10	Distribution locale	1920 voies tél. ou 2 voies TV
LED	850	Multimode Si	1	ou APD	5	≤ 5	Informatique (type Ethernet)	256 voies de données à 19200 bits/s
LED	660	PCS	1		5	≤ 0,2	Réseaux industriels	"

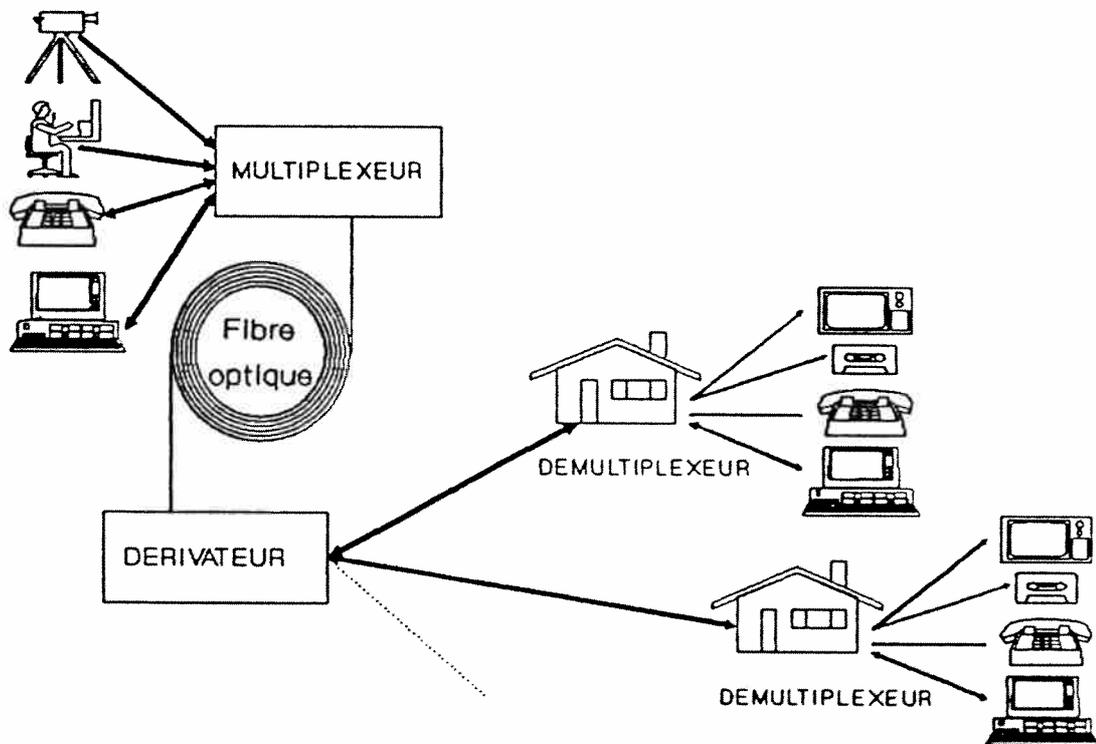
Tableau des capacités normalisées des systèmes européens

Par exemple, en 1988 a été posée la première liaison trans-atlantique à FO à 2 x 140 Mbits/s par paire de fibres ($\lambda = 1300\text{nm}$, sections de 45 km) entre la France et les EU, les EU et la GB, la GB et la France. Dès 1989 sera posée une liaison 565 Mbits/s par paire de fibres ($\lambda = 1550\text{nm}$, sections de 120 km) reliant des stations situées aux EU, au Canada, en GB, en Espagne et en France. Aux EU, plusieurs millions de km de fibre sont déjà en fonction, un bilan complet des coûts ayant montré la supériorité des systèmes à FO pour relier les deux côtes américaines sur la transmission par satellite. Des systèmes fonctionnant à 24 bits/s 100 km avec LD monomode sont déjà installés depuis 1988 en Floride et au Japon. Des capacités et distances plus élevées sont envisagées pour le futur proche ou lointain selon les succès de nouvelles approches que nous allons exposer très succinctement dans ce qui suit.

4. LE MULTIPLEXAGE

Le tableau précédent montrait le nombre de voies possibles lorsqu'un seul type de message est à transmettre (réseaux spécifiques). Pour l'utilisation domestique, si l'on désire bien disposer de plusieurs chaînes TV, on ne possède le plus souvent qu'un seul numéro de téléphone et un seul modem lié à un PC (ou vidéotexte, Fax, etc.). De plus, si la transmission TV est unidirectionnelle, le téléphone et la transmission de données sont bidirectionnelles (Fig.4.1). Les techniques permettant ce transport, uni ou bidirectionnel, de divers types de messages sur une seule fibre sont appelés multiplexages. Nous allons en mentionner les principes.

Fig.4.1. Principe du multiplexage



4.1 Multiplexage électronique

Parmi les multiplexages connus depuis longtemps en télécommunication coaxiale et applicables à la modulation d'intensité des sources optiques, on distingue deux principes de base :

Le multiplexage temporel simple : Les signaux numériques codés sont envoyés séquentiellement par paquets à un débit supérieur à la somme des débits individuels de chaque voie d'entrée.

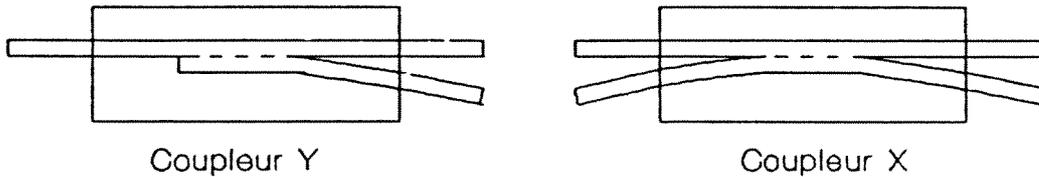
Le multiplexage statistique : Il consiste à transmettre les divers signaux avec un débit plus faible que la somme des débits individuels. Une mémoire tampon, dont la taille est déterminée par la probabilité d'apparition des signaux d'entrée, mémorise puis transmet à un rythme constant les bits d'entrée. On profite ainsi des "temps morts" des signaux. En contre-partie, des contrôleurs de gestion alourdissent fortement l'électronique de commande et de démultiplexage.

4.2 Multiplexage optique (WDM)

Le multiplexage optique est le pendant du multiplexage fréquentiel en ondes hertziennes : on transmet chaque voie sur une fréquence porteuse différente et des filtres de démultiplexage séparent les signaux à la réception. Par exemple, avec quatre longueurs d'onde, il est possible, sur la même fibre, de transmettre 32 chaînes TV au lieu de 8 normalisées à 565 Mbits/s. La difficulté réside dans les problèmes de diaphonies qui réapparaissent lorsque les porteuses sont trop proches en fréquences et/ou lorsque les filtres ne sont pas suffisamment sélectifs. L'immense avantage de la méthode est de multiplier par le nombre de porteurs la capacité d'une fibre monocanal déjà installée ! La transmission peut également être bidirectionnelle : une porteuse dans un sens, une autre porteuse en sens inverse.

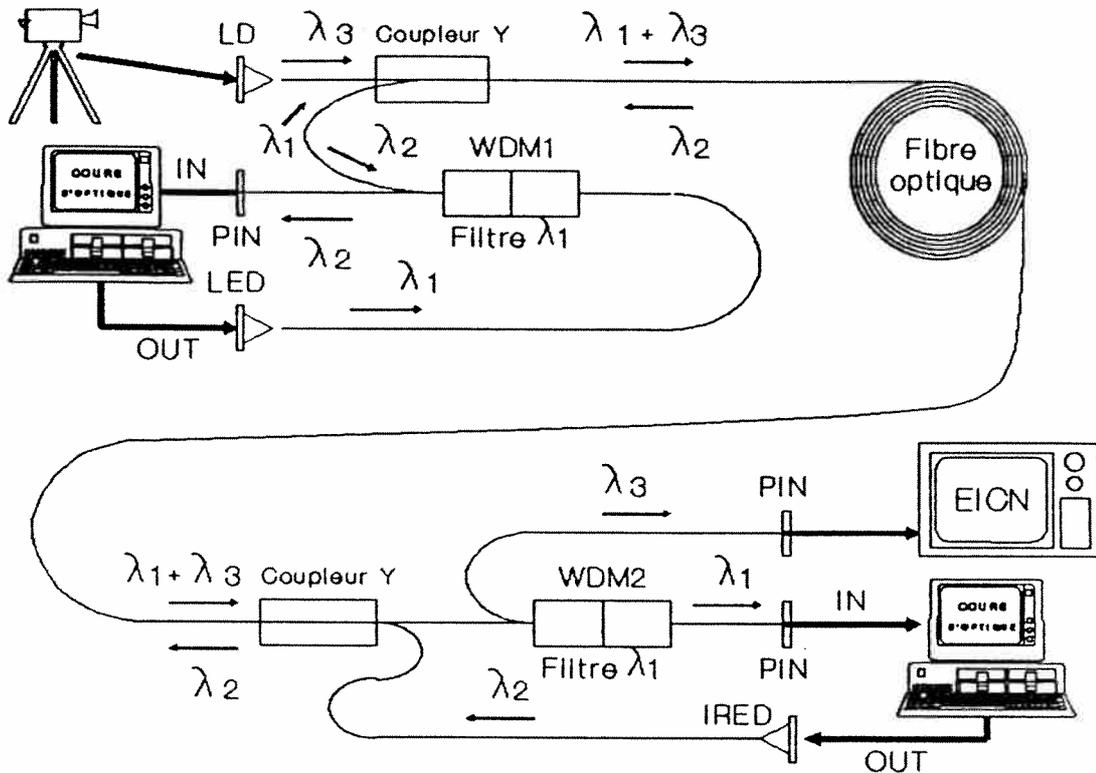
Le multiplexage à plusieurs sources : On utilise plusieurs sources émettant chacune à une longueur d'onde différente. Il existe actuellement des chips multi-sources parallèles. Chaque source est modulée séparément par l'un des messages à transmettre. Les signaux optiques sont injectés dans une seule fibre via un coupleur (Fig. 4.2) où ils sont transportés sans aucune interaction.

Fig.4.2. Exemples de coupleurs



A l'autre extrémité de la fibre, un filtre très sélectif ou une structure dispersive (réseau) sépare les diverses longueurs d'onde. La figure 4.3 montre le principe de réalisation d'une transmission bidirectionnelle à trois λ (LED à 600nm, IRED à 850nm et LD à 1300nm), transmettant des données ASCII sur les voies lentes et un signal vidéo analogique sur la voie rapide. Le démultiplexeur WDM utilise deux lentilles, GRIN munies d'un filtre interférentiel ne laissant passer qu'une longueur d'onde et réfléchissant toute autre λ .

Fig.4.3. Exemple d'une ligne bidirectionnelle à 3 longueurs d'onde



Les difficultés de réalisation sont essentiellement dues aux alignements micromécaniques précis des éléments, surtout au niveau des WDM, et aux pertes qui peuvent vite devenir importantes. Pour remplacer le WDM2, il existe également des photodiodes à deux couches superposées, chacune sensible à une longueur d'onde différente par filtrage.

Le multiplexage à une seule source : Le principe est le même que le précédent à la seule différence près que les diverses raies spectrales sont soit directement émises par la source (LD bifréquence à 1300nm et 1535nm p.ex.), soit créées par optique non linéaire (voir plus loin). La difficulté supplémentaire réside dans la fabrication de structures diffractives très fines permettant de séparer des λ proches (réseaux holographiques p.ex.).

Le multiplexage par polarisation : Nous avons vu qu'il existait des fibres à maintien de polarisation qui permettraient de doubler encore le nombre de voies en émettant chaque λ sur deux polarisations orthogonales indépendantes. Malheureusement l'atténuation supérieure de telles fibres et la difficulté de maintenir l'état de polarisation sur de grandes longueurs font que cette technique n'est actuellement possible que dans le domaine des capteurs à FO.

à suivre ...

excursion

Un tour du côté des mathématiques Védiques

Le Véda, textes religieux et poétiques qui forment les premiers documents littéraires de l'Inde, écrits en sanscrit archaïque, fournissent 16 règles de 120 mots qui permettent réaliser de nombreux calculs (voir page 4 de couverture).

Ce système, complet et cohérent dépasse la simple collection de recettes. Les propriétés utilisées sont suffisamment fondamentales pour être utilisables à plusieurs niveaux, du simple calcul à la résolution d'équation différentielle. Elles insistent sur la 'qualité' des nombres.

La règle 2 (Nikhilam sutra) se formule par : "tous de 9 et le dernier de 10". Cette règle permet de chercher la 'déviations' d'un nombre par rapport à un nombre de base plus grand. Exemples :

nombre : 9856, base : 10000, déviation : -0144 (9-9=0 ; 9-8=1 ; 9-5=4 ; 10-6=4)

nombre : 937, base 1000, déviation : -063

nombre : 13, base 10, déviation : +3

Un algorithme de multiplication est défini sur cette base. Pour multiplier 13 par 11, par exemple, les nombres sont notés suivis de leur déviation (ici par rapport à 10). Le produit est décomposé en deux parties; à gauche : la somme diagonale d'un des facteurs et de la déviation de l'autre (13 + 1 ou 11 + 3); à droite le produit des déviations (3 x 1).

$$\begin{array}{r}
 13 \quad +3 \\
 11 \quad +1 \\
 \hline
 14 \quad / \quad 3 \quad \text{résultat} : 143
 \end{array}$$

Voici d'autres exemples :

produit : 1099 x 1001

base : 1000

calcul : 1099 +99

1001 +01

1100 | 099

résultat: 1100099

103 x 13

10

103 +93

13 +3

106 | 27 9

106+27 | 9 = 1339

103 x 97

100

103 +3

97 -3

100 | -9

100-1 | 100-9 = 9991

Il est difficile de saisir la portée philosophique qui sous-tend ces techniques. Mais l'intérêt pédagogique est certain.

Bibliographie : Puri, N. An Over View of Vedic Mathematics. Workshop on Vedic Mathematics, University of Rajasthan, Jaipur, 1988.

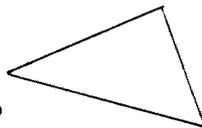
mathématique

Quels problèmes peut se poser un mathématicien ?

En hommage à Ferdinand Gonseth

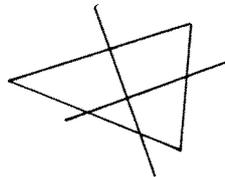
Jean-Marie Moine

Chacun de nous est parfois un peu un mathématicien ou un peu philosophe. Permettez-moi de vous citer un événement que j'ai personnellement vécu. Une mère de famille s'approcha d'un de nos collègues de l'Ecole secondaire du Locle et lui dit: "Mon fils qui était bon en calcul fait maintenant de mauvais résultats en mathématiques modernes ! Pourquoi ? Quelle est la différence entre calcul et mathématiques modernes ?" Ce collègue dessina sur une feuille la figure suivante:



- Qu'ai-je dessiné, Madame ?
- Vous avez dessiné un triangle.
- Bien, Madame.

Puis il dessina:



- Et maintenant ?
- C'est un triangle avec une croix dessus !
- Non Madame; c'est un non-triangle.

La pauvre femme repartit mal à l'aise.

On est en droit de se poser des questions, par exemple celles-ci: Qui a tort ? Qui a raison ? L'un a-t-il entièrement raison ? L'autre a-t-il entièrement raison ? Les deux ont-ils partiellement raison, partiellement tort ?

Je m'abstiendrai de répondre.

Mais au fait, qu'est-ce que mathématique et philosophie ? Voici ce que dit le dictionnaire.

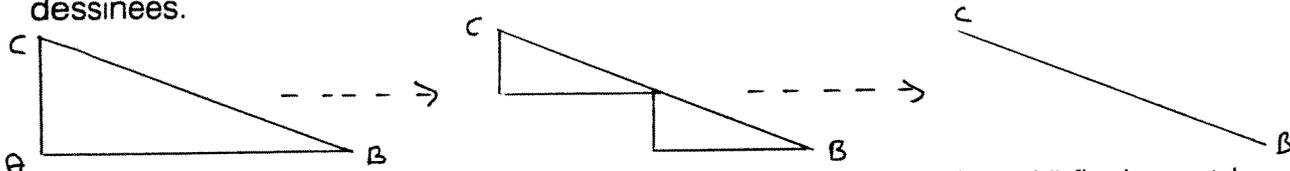
Mathématicien : personne qui cultive ou enseigne les mathématiques.

Mathématiques : disciplines étudiant, par le moyen du raisonnement déductif, les propriétés des êtres abstraits, tels que les nombres, les figures géométriques, etc.

Philosophie : science générale des principes et des causes. Essai de démêler les principes généraux de l'univers, et d'ordonner les connaissances et les observations en un système cohérent.

L'observation et le raisonnement sont deux piliers sur lesquels reposent les mathématiques et la philosophie. L'observation et le raisonnement peuvent parfois conduire à des problèmes plus ou moins épineux ! Je vous soumetts deux exemples.

Exemple 1 : A partir du triangle $A B C$, construisons successivement les figures dessinées.



Si l'on continue indéfiniment la construction, la figure semble "devenir" finalement le côté BC du triangle. Or, la somme de la longueur du côté AB et de la longueur du côté AC est-elle égale à la longueur du côté BC ?

Exemple 2 (paradoxe d'Achille) : Achille, courant pour rattraper une tortue qui chemine devant lui, ne la rejoindra jamais parce qu'au préalable il doit atteindre la place d'où elle est partie; quand il y sera parvenu, la tortue l'aura quittée et se retrouvera en avant; en répétant ce raisonnement, on voit que la tortue sera toujours en avant d'Achille !

Vous vous rendez certainement compte que les problèmes posés par les deux exemples ci-dessus ne sont pas tout à fait élémentaires. Ils sont un peu plus compliqués que les problèmes soumis à des élèves de l'Ecole primaire ou de l'Ecole secondaire. Bien sûr, Ferdinand Gonseth a été confronté, comme chacun de nous à de tels problèmes, ne serait-ce que lorsqu'il était jeune étudiant. Mais un homme d'une telle intelligence a certainement vite abandonné de tels problèmes qu'il résolvait, sans doute, sans difficulté, pour réfléchir à d'autres problèmes. Mais quels peuvent être ces problèmes ?

Un de ces problèmes est *le problème de l'espace*. Pour essayer de comprendre de quoi il s'agit, je me propose de le suivre dans le début de : **La géométrie et le problème de l'espace**, de Ferdinand Gonseth (L'ensemble de l'oeuvre compte 6 chapitres, publiés en 1945 par les Editions du Griffon, Neuchâtel).

Connaissance intuitive ou par évidence

"Pour savoir, il n'est pas nécessaire de savoir comment on sait". L'homme "épouse par l'esprit la forme et la nature des objets qui l'entourent. Les épouse-t-il complètement et parfaitement ?" Pour percevoir l'espace, "l'homme normal n'a qu'à ouvrir les yeux pour en percevoir la vision". "Dans cet espace qu'il perçoit sans penser à la façon dont il le perçoit, il se déplace sans se demander par quel miracle il sait s'y déplacer". "A ce niveau, il n'y a pas de problème de l'espace".

L'aide de l'instrument

Pour soumettre "nos appréciations individuelles des distances ou des volumes au contrôle expérimental" nous devons inventer des instruments et acquérir une technique de la mesure. Or toute technique, même très simple, nécessite réflexion et imagination. "Mais l'activité de l'esprit qui accompagne l'exercice de nos fonctions naturelles est également une fonction naturelle." En mesurant "nous ne mettrons aucunement en doute la qualité de notre représentation spatiale". "Nous ne rencontrerons pas le problème de l'espace."

Passage d'une figure matérielle à une figure abstraite

C'est le "moment où nous concevons le point, la droite, le cercle comme des notions séparables des choses matérielles ...". "Nous apercevons en elles (en ces notions abstraites) une réalité d'un autre ordre, présentant ses évidences propres, objet d'une connaissance de nature nouvelle; notre technique de la mesure se complètera d'une technique mentale de la déduction et de la démonstration".

"La distinction entre l'idéal et le réel peut s'installer en nous comme un simple élément de connaissance. Sans que nous y prenions garde, elle peut se joindre, comme une ombre fidèle, à tous les objets de la connaissance spatiale. Pourquoi ferait-elle naître une question ou un remords ? L'ombre qui suit tous nos pas ne nous gêne guère, à moins que nous nous avisions de sauter plus loin qu'elle. De même, tant que l'idée pourra se tenir aux côtés de la connaissance primaire (intuitive) de l'objet, sans que celle-ci cesse d'être sûre d'elle-même, le problème de la connaissance, et tout spécialement le problème de l'espace, pourront rester latents".

Le problème de l'espace

La connaissance que nous avons de l'espace peut-elle donner lieu à un problème de connaissance?" Quittons momentanément Ferdinand Gonseth, pour essayer de comprendre comment cela s'est justement produit lors de la découverte des géométries non euclidiennes. De quoi s'agit-il ?

Citons d'abord cinq mathématiciens, dont les travaux ont influencé particulièrement la science de la géométrie. *Euclide*, 11ème siècle avant J.-C. (Grèce) ; *Legendre*, 1752-1833 (France) ; *Gauss*, 1777-1855 (Allemagne) ; *Lobatchevsky*, 1792-1856 (Russie) ; *Bolyai* (fils), 1802-1860 (Hongrie).

Disons d'emblée que les notions de géométrie enseignées à l'Ecole primaire, à l'Ecole secondaire, et dans les Gymnases, font partie de la géométrie euclidienne, géométrie ainsi nommée en l'honneur d'Euclide, qui est le père de cette géométrie. Pour élaborer sa théorie, Euclide a formulé, entre autre, 4 axiomes.

Axiome : Proposition évidente par elle-même et qui n'est susceptible d'aucune démonstration.

Voici ces quatre axiomes :

1er axiome : par deux points distincts, on peut mener une ligne droite.

2ème axiome : on peut prolonger indéfiniment une droite.

3ème axiome : on peut décrire un cercle de centre donné et de rayon donné.

4ème axiome : tous les angles droits sont égaux entre eux.

Il y a une telle harmonie entre ce que disent ces axiomes (même pour le deuxième axiome) et ce qu'on peut observer en faisant des constructions sur une feuille de papier, que personne n'en a été étonné. A partir de ces axiomes, on peut montrer que : par tout point A non situé sur une droite d , on peut mener une droite d' parallèle à d ; de plus, d et d' sont sans point commun.



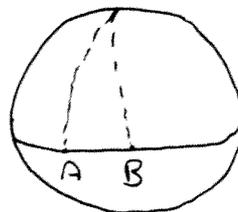
On ne peut toutefois, à partir de ces axiomes, montrer que d' est unique. Euclide énonça alors un postulat qui porte son nom.

Postulat : Proposition qui n'est ni évidente par elle-même, ni logiquement démontrable.

Voici le **postulat d'Euclide** : d' est la seule parallèle à d passant par A .

Ce postulat fut l'objet de grandes discussions, déjà à l'époque d'Euclide. Pendant plus de deux mille ans, on a essayé, sans succès, de démontrer le postulat d'Euclide à partir des premiers axiomes. Legendre a même démontré que ce postulat ne pouvait être faux. Devant tant d'insuccès, Gauss (vers 1816) puis indépendamment Bolyai et Lobatchefski (vers 1830) eurent une idée nouvelle : rejeter le postulat d'Euclide autrement dit admettre l'existence de plusieurs parallèles menées par un point à une droite. La géométrie **non-euclidienne** était née, et avec elle, **un problème de l'espace**.

En anecdote, signalons que Gauss s'est refusé à publier ses travaux de recherches à ce sujet. Il aurait dit : "j'appréhende trop les clameurs des Béotiens si j'exprimais complètement mes vues". L'idée d'imaginer qu'il existe plusieurs parallèles à une droite passant par un même point, ou que deux droites parallèles peuvent se couper, peut sembler farfelue. Permettez-moi de vous exposer un exemple qui n'a rien à voir avec le problème de l'espace qui nous préoccupe; mais vous comprendrez cet exemple, qui vous montrera, je l'espère, qu'une idée qui paraît farfelue, l'est peut-être moins qu'on pourrait le penser. Voici cet exemple :



Imaginons notre terre comme une sphère parfaite. Deux individus qui ignorent qu'ils vivent sur une sphère, sont en deux points distincts A et B de l'équateur. Ils tracent deux segments de droites parallèles au voisinage de A et B . Puis ils décident de les prolonger. Surprise, leurs "droites" se coupent au pôle nord !

Laissons à Ferdinand Gonseth le soin de commenter ce problème de l'espace et

essayons de le suivre dans son idée pour tenter d'apporter une réponse à ce problème : "C'est au nom de l'évidence que certains commentateurs d'Euclide mirent en doute le postulat des parallèles; c'est dans le climat de l'évidence que bien des géomètres en tentèrent la démonstration. C'est de l'évidence que se réclamaient aussi bien Legendre faisant la preuve que le postulat ne pouvait être faux que Bolyai et Lobatchevsky construisaient la géométrie hyperbolique dans laquelle il ne peut être juste".

"La géométrie euclidienne, concurrencée efficacement par une seconde géométrie, tout aussi vraisemblable du point de vue d'une évidence arithmétique, se trouvait ébranlée jusque dans son fondement : **la notion de l'espace.**"

"Pour sortir de cette impasse, le géomètre ne pouvait éviter de répondre à l'une ou à l'autre des questions suivantes, si ce n'est aux deux : **Quelle est la vraie géométrie? Qu'est-ce que l'espace ?** La question de la vérité de l'une ou l'autre des géométries en présence perdait d'ailleurs sa signification au niveau de l'analyse, au sens de laquelle ces deux géométries sont complètement équivalentes; le problème crucial est donc bien celui de l'espace".

"La connaissance a ses remous. Dans sa progression, l'esprit ne cesse d'expérimenter et ne cesse d'être exposé à tous les risques de la recherche. Même en géométrie, le plus grand de ces risques ne lui est pas épargné : celui de **découvrir sa propre relativité**".

"Le problème qui surgit ainsi ne peut pas être traité en continuant à géométriser suivant les normes observées jusque-là. Ce n'est plus un problème de géométrie; c'est un **problème de critique**". "Il s'agit d'un problème philosophique..."

"Mais le problème de l'espace comporte-t-il une solution ? La question qu'il soulève ne recevra-t-elle jamais une réponse ? S'il est vrai que le progrès de la connaissance disjoint la notion d'espace en aspects qui ne se recouvrent plus entièrement, pourrions-nous jamais effacer ces disparités ? L'unité une fois perdue n'est-elle pas à jamais compromise ?

Comment essayer de donner une réponse aux problèmes de l'espace ?

Suivons encore Ferdinand Gonseth : "Jusqu'ici nous imaginons que l'aspect théorique de la géométrie euclidienne correspondait de façon schématique à notre représentation intuitive de l'espace. Dans le cadre des géométries non-euclidiennes, le divorce entre ces deux aspects est complet. Il nous faut reconstruire une représentation concrète de l'espace à la mesure de l'aspect des nouvelles géométries".

"Le concret se réalise alors sous la forme d'un **nouvel espace, l'espace universel** qui joue vis-à-vis du non-euclidien, un rôle équivalent à celui de l'espace sensible vis-à-vis de la géométrie euclidienne. En dernière analyse, le problème de la synthèse de l'euclidien et du non-euclidien se ramène à l'étude de la compatibilité de ces deux espaces". "Ils sont compatibles en ce sens que l'homme, considérant l'espace universel, en reçoit une image qu'il peut confondre en première approximation avec l'espace euclidien".

agenda

Séminaire de mathématiques élémentaires, Institut de mathématiques et d'informatique, Chantemerle 20, salle de travaux, 3e étage nord, les mardis de 16h15 à 17h45 aux dates suivantes: 29 octobre, 12 et 26 novembre, 10 décembre 1991, 7 et 21 janvier, 4 et 18 février, 3 mars 1992.

Le thème du semestre d'hiver 1991-92 est le suivant:

Quelques aspects de l'oeuvre mathématique de Léonard EULER au regard de l'enseignement actuel.

Dans l'immense oeuvre d'Euler, nombre de travaux ont été écrits en français et sont accessibles sans préparation particulière. Les textes qui seront étudiés touchent à la combinatoire (marche du cavalier sur l'échiquier), à l'arithmétique (problèmes de divisibilité), à l'algèbre (nombre de points d'intersection de deux courbes), au calcul des probabilités et à la géométrie (droite et cercle d'Euler).

Renseignements: André Calame, Chargé de cours, "Les grands champs", 2026 Sauges

* * *

Colloques du mardi, Institut de mathématique et d'informatique, Auditoire nord, 2e étage, les mardis dès 16 h 15.

29 octobre 1991 : Sur un invariant topologique intéressant: la catégorie de Lusternik-Schnirelmann (K. Hess, EPFL, Lausanne).

5 novembre 1991 : Martin boundaries (M. Picardello, Roma II)

12 novembre 1991 : Modèles statistiques pour des polluants atmosphériques (M. Graf, IMI, Neuchâtel)

26 novembre 1991 : Sur les noyaux L1 des représentations des groupes de Lie semi-simples (M. Bekka, Université de Lausanne).

17 décembre 1991 : Techniques quantitatives et finances (M. Dubois, Groupe de gestion d'entreprise, Université de Neuchâtel).

Renseignements: Alain Valette, Institut de mathématique et d'informatique, Chantemerle 20, cp 2, 2007 Neuchâtel.

* * *

Les **Jeudis de l'Atelier** servent de lieu d'échange et d'information sur l'usage de l'ordinateur dans des apprentissages de base. Les séances ont lieu de 19h30 à 21h environ dans les locaux de l'Atelier de formation continue, rue des Terreaux 1, Neuchâtel. Voici le programme des prochaines séances :

Jeudi 21 novembre 1991 : *Des interactions sociales à l'interaction homme-machine* (Michèle Grossen, Séminaire de psychologie de l'Université de Neuchâtel).

Jeudi 12 décembre 1991 : *Présentation de vidéo interactive* (Alain Favre, "Analyse et archivage d'images"). **Attention** : cette séance aura lieu à l'IRDP, 43, fbg de l'hôpital

Jeudi 30 janvier 1992 : *Quelle utilisation pédagogique des 'hypertextes' ?* (L. Gagnebin, L.-O. Pochon).

Renseignements : Atelier de Formation continue, CPLN, Rue des Terreaux 1, 2000 Neuchâtel, Tél: 20 78 40

Introduction à la pensée et à l'action systémique

Le cours d'introduction à la pensée et à la pratique systémique a lieu tous les jeudis, à 12h15 salle D63.

Colloques

Les colloques ont lieu le **mercredi** tous les 15 jours à **17h.15**, à l'Université, Av. du 1^{er} Mars 26, salle D 63 (2^{ème} étage).

- 6 novembre. Eric Schwarz, CIES, Université de Neuchâtel, Neuchâtel.
La société et ses mythes. Les civilisations sont-elles autopoïétiques?
- 20 novembre Henri-Charles Tauxe, micropsychanalyste, Corseaux.
Une approche systémique de la micropsychanalyse.
- 4 décembre René Chopard, Centre d'études bancaires, Lugano.
Un regard systémique sur la monnaie.
- 18 décembre Xavier Arreguit, Pierre Marchal, Centre suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM), Neuchâtel.
Réseaux neuronaux et auto-organisation.
- 15 janvier 1992 Alberto Munari, Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation Université de Genève, Genève.
Les implications de la pensée systémique en psychologie.
- 29 janvier Thiébaud Moulin, Ecole nationale supérieure de techniques avancées, (ENSTA), Paris.
Le relateur arithmétique, un outil formel pour décrire les systèmes naturels.
- 12 février Jean-Jacques Wunenburger, philosophe, Centre Gaston Bachelard, Université de Bourgogne, Dijon.
Triade, émergence et complexité. Quelques modèles philosophiques.
- 26 février Vincent Gibiat, Laboratoire ondes et acoustique, Université Paris VII, Paris.
Ondes et chaos dans le son musical.

Renseignements : Eric Schwarz, CIES, Université de Neuchâtel, 26, av. du 1^{er} Mars, Tél. 038 25 38 51, fax : 038 25 18 32

SOMMAIRE , No 10

La fin du XXème siècle sera-t-elle photonique ?	Philippe Bovay p. 1
Un tour du côté des mathématiques Védiques	p. 12
Quels problèmes peut se poser un mathématicien	Jean-Marie Moine p. 13
Agenda	p. 18

सूत्र :-

- | | |
|-----------------------------|--------------------------|
| १ एकाधिकेन पूर्वेण | ६ चलनकलनाभ्याम् |
| २ निखिलं नवतश्चरमं दशतः | १० यावदूनम् |
| ३ ऊर्ध्वतिर्यग्भ्याम् | ११ व्यष्टिसष्टिः |
| ४ परावर्त्यं योजयेत् | १२ शेषाण्यङ्केन चरमेण |
| ५ शून्यं साम्यसमुच्चये | १३ सोपान्त्यद्वयमन्त्यम् |
| ६ (आनुरुप्ये) शून्यमन्त्यत् | १४ एकन्यूनेन पूर्वेण |
| ७ संकलनव्यवकलनाभ्याम् | १५ गुणितसमुच्चयः |
| ८ पूरणपूरणाभ्याम् | १६ गुणकसमुच्चयः |

Pour vous abonner au bulletin (10 Frs pour une année) adressez-vous à:

Michel Favre, rte de la Jonchère 13a, 2208 Les Hauts Geneveys (038/ 53 38 81)

Pour demander votre adhésion à la Société des enseignants neuchâtelois de sciences prenez contact avec la présidente:

Françoise Jeandroz, Les Allées 30, 2300 La Chaux-de-Fonds (039/ 23 09 56)