

20 Quarante ans de télécommunications optiques. Souvenirs d'un chercheur Isépien à France-Télécom

François AUZEL (ISEP 1961)
FAConseil*

De l'ISEP à la première observation d'une émission à la longueur d'onde de 1,5 microns dans un verre dopé Erbium, puis à la généralisation des transmissions optiques à grandes distances, 40 ans de télécommunications optiques sont rapidement parcourus. Les futurs développements et leurs conditions prévisibles, guides amplificateurs optiques et "fibres-à-la-maison" (FTTH) sont mentionnés. En conclusion et dans le contexte récent de la crise de la recherche, un point de vue "expérimental" personnel est présenté sur le rôle de la recherche en général, sur les qualités nécessaires aux chercheurs et aux grands organismes de recherche qui les emploient.

1. De la radio à la physique du solide

En 1958 quand on entrait à l'ISEP, il était conseillé par notre Directeur, l'Abbé Vieillard, non seulement d'obtenir le diplôme d'ingénieur mais aussi si possible de préparer pendant les vacances quelques certificats de licence pour l'Université. En effet, l'ISEP n'étant alors pas connue, c'était une assurance pour l'avenir. Nous avions aussi mission de faire croître le renom de l'ISEP. En choisissant des certificats de licence correspondant plus ou moins aux programmes internes, je me retrouvais ainsi en 1961 avec le diplôme ISEP et une "licence libre" de Sciences Physiques.

Quoique mon goût pour la "radio" depuis l'enfance m'ait poussé à entrer à l'ISEP, la physique des semi-conducteurs commençait à m'intéresser. Elle était appliquée aux transistors découverts quelques années auparavant et utilisés encore seulement dans les applications basse fréquence (domaine des 10 kHz). Cela ajouté à quelques paroles fortes de notre professeur d'électricité en deuxième année, Norbert Segard, Directeur-Fondateur de L'ISEN, qui nous expliquait que "le mathématicien était un âne sur lequel montait le physicien", me prédisposait à m'intéresser à la physique. Comme il nous le conseillait, j'achetais la "série des Bruhat", livres de bases pour les licences es-science

qui "devaient devenir nos livres de chevet". Vers cette même époque une visite au "salon de la pièce Détachée Radio", salon présentant les nouveautés industrielles en matière d'électronique, me faisait découvrir le CNET (Centre National d'Etudes de Télécommunications), le laboratoire de recherche du "ministère des Postes et Télécommunications". Son stand présentait un oscillateur à 30 MHz utilisant un transistor révolutionnaire, le Technetron, un transistor à effet de champ dont le gain "augmentait avec la fréquence" ! Ce mystère reste encore entier pour moi mais m'a fait connaître le CNET !

Peu après, le cours de Physique des solides de Maurice Bernard me convertissait définitivement à la Physique et je faisais mon stage de fin de quatrième année dans son laboratoire au CNET (sujet : Mesure de la durée de vie des porteurs minoritaires dans le silicium par effet photo-magnéto-électrique). Après mon service militaire, en 1963-64 dans la Marine, j'essayais d'y revenir pour y faire une thèse, mais n'ayant plus de place dans son propre laboratoire de physique des semi-conducteurs, Maurice Bernard me dirigeait vers le laboratoire d'Otto Deutschbein, un scientifique d'origine allemande que le gouvernement français avait invité à venir travailler en France après la guerre. Le CNET était, quoique géré par les "Postes et Télécommunications" un centre de recherche interministériel et travaillait donc pour l'armée. La spécialité d'Otto Deutschbein était la "luminescence" et en particulier celle des ions terre-rares. Il avait mis au point les "métascopes" permettant de visualiser l'infrarouge par une méthode passive de changement de valence entre ions terres-rares. L'application militaire était le regroupement de parachutistes vers un point de rassemblement réalisé par une ampoule 6 volts filtrée de sa lumière visible et hissée à un mât, chacun étant muni de bracelets métascopes. Ayant trouvé dans mon "Bruhat d'Optique, revu par Kastler", que "la première observation d'un dipôle magnétique dans un spectre optique" avait été faite par Deutschbein dans l'ion Europium trivalent, j'étais sûr d'être arrivé au bon endroit pour faire une thèse, une nécessité pour un chercheur !

* FAConseil, 11 Place Levitt, 78320, Le Mesnil St.Denis.

2. Le choix d'un sujet de thèse

Le régime des thèses à l'Université était en train de changer avec l'établissement des DEA (Diplôme d'Etude Approfondie) et la création des "thèses de 3^{ème} cycle". Sans préparer un DEA, ce que je ne pouvais pas faire ayant été embauché au CNET, je ne pouvais présenter qu'une thèse de Docteur-ingénieur, un DEA étant nécessaire pour les autres thèses. Travaillant alors sous la direction de Deutschbein sur les premiers verres dopés Neodyme (cet ion est le premier ion terre-rare ayant montré l'effet laser) en vue d'obtenir l'effet laser dans des verres, ce qui n'avait pas encore été obtenu, je lui demandais s'il était possible qu'il me donne un sujet à partir des travaux que je faisais. Sa réponse fut surprenante mais très utile pour la suite : "il avait un ami allemand qui avait donné un sujet de thèse à son étudiant et ce dernier, ayant eu le prix Nobel alors que l'idée venait de son professeur, il n'était pas question qu'il me propose un sujet ni que j'utilise mes travaux sur le Neodyme". Le prix Nobel en question était Mossbauer dont l'effet qui porte son nom est maintenant une méthode d'analyse physico-chimique universellement connue.

Il me fallait donc trouver un sujet ainsi qu'un professeur à l'Université qui accepte mon sujet.

Je considérais alors l'ensemble des ions terres-rares trivalentes (voir tableau 1).

Deutschbein m'avait expliqué qu'il avait observé de manière empirique que seules les terres-rares vers le centre de la liste (N=7) correspondant au remplissage progressif des électrons 4f^N (N de 1 à 14) montraient une luminescence, que le Neodyme (N=3) émettant à 1,06 micron était une limite, que dans les liquides, seuls les trois ions du centre (N= 6,7,8), Europium (Eu³⁺, Gd³⁺, Tb³⁺) émettaient. Je décidais d'expérimenter des verres dopés par l'ion symétrique du Neodyme par rapport à N=7, c'est-à-dire dopés Erbium (Er³⁺) (N=11), et le suivant l'ion Holmium (Ho³⁺) (N=10) dont aucune émission était alors connue. Le problème était de savoir ce qui était dû aux limites physiques des ions eux-mêmes ou aux limites des détecteurs alors accessibles. Avec des détecteurs PbS (sulfure de plomb), alors utilisés pour contrôler l'échauffement des bogies de wagons, j'obtenais le premier spectre d'émission à 1,5 micron d'un verres dopé Er³⁺ (Figure 1). Deutschbein ayant accepté que je mène cette étude en parallèle avec celles du laboratoire, ce pouvait être mon sujet de thèse si un professeur à l'Université en était d'accord.

Couche →		K	L		M			N				O				P		
Configur. →		1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d
7.	Elément ↓																	
57	La (Lanthane)	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6	1		2		
58	Ce (Cérium)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	2	6			2		
59	Pr (Praseodyme)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	3	2	6			2		
60	Nd (Neodyme)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	4	2	6			2		
61	Pm (artificiel)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	5	2	6			2		
62	Sm (Samarium)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	6	2	6			2		
63	Eu (Europium)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6			2		
64	Gd (Gadolinium)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	8	2	6			2		
65	Tb (Terbium)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	9	2	6			2		
66	Dy (Dysprosium)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	10	2	6			2		
67	Ho (Holmium)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	11	2	6			2		
68	Er (Erbium)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	12	2	6			2		
69	Tm (Thulium)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	13	2	6			2		
70	Yb (Ytterbium)	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6			2		

Tableau 1. Nombre d'électrons sur chacune des configurations électroniques ; les chiffres, en gras, montrent d'où sont pris les trois électrons participant à la liaison de l'ion lorsqu'il est trivalent. Par exemple, Er³⁺ perdant par rapport à l'atome neutre deux électrons 6s et un électron 4f, a une configuration 4f¹¹.

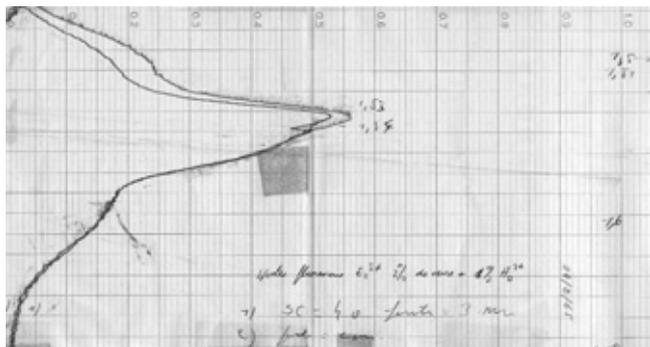


Figure 1. Le premier spectre d'émission de Er^{3+} à 1,5micron jamais obtenu dans un verre; ici un verre phosphate $(PO_3)_6MgLi_4$ dopé 2 % Er^{3+} et 1% Ho^{3+} . (Document original daté du 24 février 1965).

Le Professeur Alfred Kastler alors directeur du laboratoire de physique de l'Ecole Normale Supérieure pouvait être cette caution car il avait eu connaissance des travaux de Deutschbein avant guerre puisqu'il les citait dans son livre ; mais ils ne se connaissaient pas directement. C'est Anne-Marie Sautier (M^{me} Berland) (ISEP 1961), une amie de promo qui, ayant trouvé un poste d'ingénieur chez Kastler,

facilita notre rencontre. Le sujet fut accepté parmi deux autres que je proposais simultanément : l'utilisation des ions terres-rares pour l'étude et la réalisation des "compteurs quantiques infra-rouge (IRQC)" que Bloembergen venait de proposer dans un court article et "filtres saturables" sous irradiation laser. Kastler préféra le sujet des verres dopés E^{3+} car plus classique et plus dans les possibilité du laboratoire Deutschbein au CNET. Comme Deutschbein préférait aussi ce sujet, il fut décidé ainsi d'un commun accord que ce serait mon sujet de thèse. Le sujet IRQC avec terres-rares semblait impossible à Deutschbein ; il me suggérait de "démontrer plutôt que c'était une idée qui ne tenait pas debout", car il considérait à juste titre que la probabilité d'avoir en un point d'un solide dopé un même ion deux fois excité par deux photons différents durant la durée de vie d'un niveau excité, était très faible. En essayant de répondre à cette objection au cours de mes recherches, je fus amené à trouver l'effet que je nommais APTE (Addition de Photons par Transferts d'Énergie) maintenant universellement connu comme ETU (Energy Transfer Upconversion) [1].

Insert1.

LES IONS TERRES-RARES OU UN ÎLOT DE PHYSIQUE ATOMIQUE EN PHYSIQUE DES SOLIDES.

On montre ici d'abord la spécificité des T.R. parmi tous les autres atomes du tableau de Mendeleev. Cette spécificité est liée à l'existence de la couche électronique 4f incomplète qui les caractérise, ce qui permet à leurs ions, généralement trivalents, d'avoir un comportement particulier quasi-atomique même lorsqu'ils sont insérés dans une matrice solide soit comme dopants soit comme constituants.. Ce sont les transitions entre les niveaux correspondants qui vont commander les propriétés optiques des ions TR. On peut montrer en particulier que ces propriétés sont plus liées aux transitions non-radiatives que radiatives car les premières sont très sensibles à l'environnement de l'ion TR alors que les secondes le sont beaucoup moins. Les interactions ions-ions peuvent jouer un rôle important dans les propriétés optiques liées aux transferts d'énergie.

1. La spécificité des ions TR.

1.1. La configuration électronique 4f.

Comme on peut le voir sur le tableau I, les ions TR correspondent au remplissage progressif de la couche interne 4f après que les couches les plus externes 5s, 5p, et 5d ont déjà été remplies. Ceci est une anomalie par rapport au comportement des autres atomes du tableau de Mendeleev pour lesquels les couches les plus internes se remplissent d'abord lorsqu'on procède d'un atome au suivant par charge Z croissante. De cette anomalie résultent les propriétés particulières qui font l'intérêt de ces ions. Ces atomes, ne différant pas par leurs couches externes, ont des propriétés chimiques analogues car ces couches participent aux liaisons chimiques de manière identique.

Cette propriété qui est un inconvénient pour la séparation des TR par voie chimique, devient un avantage pour le dopage. En effet, les TR peuvent se remplacer facilement l'une par l'autre dans une composition chimique donnée. Leurs propriétés optiques étant au contraire liées aux transitions entre les niveaux électroniques de la couche 4f protégée de l'extérieur par les couches pleines 5s et 5p, ont un comportement plus proche de celui des atomes dans les gaz que celui des atomes ordinaires dans un cristal.

1.2. Un "îlot" de physique atomique en physique du solide.

Ainsi les niveaux d'énergie des ions TR dans un solide ne vont pas s'organiser en bandes comme dans tout autre solide, mais restent sous forme discrète à position moyenne prévisible et fixe.

La qualité de la matrice hôte, contrairement au cas des autres ions dans un solide (semi-conducteur), n'a que peu d'influence sur les propriétés optiques. Ces ions sont ainsi peu sensibles au désordre, même au désordre extrême d'un verre. Cela laisse prévoir une fiabilité intrinsèque des dispositifs en ce qui concerne les propriétés de ces ions. De même que les niveaux d'énergie sont peu sensibles au désordre statique (défauts permanents des cristaux), ils sont aussi peu sensibles aux fluctuations rapides des atomes voisins (vibrations). Il en résulte que les couplages électron-phonon sont faibles (d'un facteur 200 environ par rapport aux atomes ordinaires). Ces couplages faibles font que les transitions électroniques (d'absorption et d'émission) seront peu élargies à température ambiante, et que les transitions non-radiatives seront faibles, ce qui entraînera des rendements quantiques pouvant atteindre l'unité. D'une manière générale, les niveaux seront décrits en première approximation par des nombres quantiques propres à l'atome lui-même, tout comme en physique atomique. Cela est une exception en physique du solide propre aux couches f.

Quant au troisième sujet mettant en jeu des transitions optiques de semi-conducteurs et non d'ions terres-rares, il n'en était pas question.

3. L'effet laser à 1,5 micron

De 1965 à 1968, je travaillais sur la mise au point de verres de diverses sortes : silicates, phosphates, tungstates, fluorures, germanates et fluorophosphates particulièrement efficaces car leur composition particulière supprime les résidus d'OH existants a priori dans tous les verres ; les ions OH, non désirés mais difficiles à supprimer même par une fusion à haute température, constituent une source efficace de transitions non-radiatives. En 1963, j'eus la chance de pouvoir suivre chaque samedi matin le cours du Professeur Brian Judd dans la "petite salle de physique" de la Sorbonne sur la théorie des propriétés optiques d'absorption des terres-rares. Il venait de publier en 1962 la première approche théorique quantitative du problème [2] et je calculais pour la première fois les transitions radiatives de Er^{3+} dans les verres [3,4].

En particulier, je proposais d'utiliser la théorie de Judd pour calculer les probabilités entre niveaux excités (voir Figure 2) à partir de la mesure des probabilités d'absorption.

Ainsi je pouvais déterminer les rendements quantiques de chaque transition et montrer que tous les niveaux de terres-rares étaient susceptibles d'émettre si leur rendement quantique était non négligeable. La "malédiction" des terres-rares "hors du centre du tableau" était levée. J'obtenais l'effet laser à 1,5 micron en impulsion dans des verres germanates et fluorophosphates [3,4].

Au début de 1968, Kastler sans doute prévoyant les événements de mai 1968, me poussait à présenter ma thèse dès que possible ; ce fut fait le 1^{er} Avril 1968.

4. L'avenir des télécommunications optiques en cause ?

En 1969, la partie "physique des solides" du CNET déménageait d'Issy-les Moulineaux à Bagneux. Et peu de temps après (le 24/06/70), une réunion importante des directions du CNET se tenait sur le nouveau site. Le sujet était : "Les études d'application du laser aux télécommunications". A cette époque, le laboratoire de Bagneux travaillait sur les lasers à gaz, à semi-conducteurs, à verres et à cristaux dopés terres-rares. Le laboratoire de Lannion, plus tourné vers les

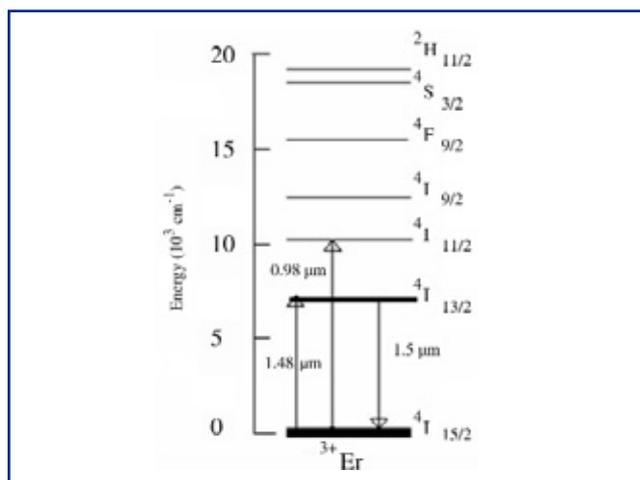


Figure 2. Niveaux d'énergie de Er^{3+} mis en jeu dans l'amplification optique à 1,5 micron ; les flèches vers le haut indiquent les transitions de pompage (absorption), celle vers le bas la transition procurant le gain.

applications, faisait les premières expériences de télécommunications optiques en espace libre avec des lasers à gaz dans l'infrarouge. Nous-mêmes, dans le groupe Deutschbein, nous essayions de percer le brouillard avec des impulsions puissantes de laser à verres silicates dopés Nd^{3+} émettant à 1,06 micron dans l'espoir de faire un "trou" pour un laser à gaz à émission continue de faible puissance. Au CNET-Issy, un théoricien proposait de guider le laser de télécommunication le long d'un guide d'onde thermique spiralé pour combattre la convection !

Les travaux concernant les fibres optiques considérées aux USA étaient mentionnés mais les quelques 1600 dB au km d'atténuation, alors mesurés chez Corning Glass, les rejetaient d'office.

La conclusion générale de la réunion fut qu'il ne fallait plus considérer les transmissions optiques mais le guide d'onde circulaire développé à Lannion pour les ondes millimétriques !

Heureusement que nous n'avons pas arrêté nos travaux immédiatement car très vite le changement de direction fut de 180° à l'annonce que Corning Glass venait d'obtenir l'atténuation record de 12dB/Km à 1,3 micron. L'utilisation de méthode gazeuse pour l'obtention de silice ultra pure (vis-à-vis des métaux de transition et des terres-rares) avait fait ce "miracle". Les lasers utilisés étaient essentiellement à semi-conducteurs de même que les amplificateurs envisagés. Le problème était encore que les diodes émettrices étaient essentiellement multimodes de même que les fibres. Il n'était pas question d'avoir alors plusieurs porteuses optiques, ce qui limitait les transmissions optiques aux largeurs de bandes électroniques.

Ainsi, de 1975 à 1980, nous avons travaillé sur les matériaux cristallins dopés terres-rares pour obtenir des sources

lasers monomodes compacts pompés par des semi-conducteurs à émission spontanée ou laser multimode. On envisageait aussi d'obtenir ainsi des émetteurs à 2,6 micron [5], la longueur d'onde théorique du minimum d'absorption des fibres fluorées : elles devaient présenter une absorption limite de 10^{-3} dB/Km devant permettre la traversée de l'Atlantique sans répéteur ou amplificateur !

En 1981, le CNET-Bagneux décide d'arrêter les études terre-rares au profit des études laser à semi-conducteur qui, en utilisant des réseaux de diffraction intégrés (laser DFB), devenaient monomodes. J'étais chargé de résoudre le problème de la fiabilité de ces diodes laser. De fait c'était un nouveau sujet pour moi où j'essayais d'introduire l'aspect transition non-radiative multiphonon que j'avais dû explorer pour les matériaux terre-rares. Je pensais que c'était l'énergie ainsi perdue qui participait à la dégradation. Ainsi je devais aussi m'investir dans les procédés de microanalyse, la microscopie électronique à balayage et à transmission, devenant de fait responsable du département de microanalyse au CNET-Bagneux.

Comme sujet de recherche, les terres-rares étaient perdues pour moi apparemment !

5. Le dopage par Er des fibres silice relance les télécommunications optiques

Bien que des expériences historiques sur des fibres de verre dopées Nd aient été faites dès 1961, c'est essentiellement le dopage par Er des fibres silice qui devait redonner récemment un grand développement aux lasers et aux amplificateurs à fibres dopées TR.

L'expérience initiale a été celle de Mears, qui a obtenu un effet laser accordable à $1,5 \mu$ dans une fibre silice dopée Er [6]. Cette équipe anglaise cherchait initialement à réduire l'atténuation des fibres silices utilisées pour les premières tentatives de télécommunications optiques avec amplificateurs à semi-conducteurs. Pour cela, il fallait réduire les absorptions résiduelles des métaux en général et des terres-rares éventuellement. Pour reconnaître les impuretés métalliques néfastes, il fallait au préalable doper les fibres avec quelques centaines de ppm de chaque métal et de chacune des terres-rares et Er en particulier. Au cours de ses expériences, cette équipe obtenait l'effet laser de Er^{3+} en pompant la fibre avec un laser à semi-conducteur. C'était, sans que les auteurs s'en soient rendu compte, la première expérience d'un laser à 3-niveaux à température ambiante, c'est-à-dire

avec émission laser se terminant sur le niveau fondamental et fonctionnant en régime continu (CW). C'est grâce au confinement optique sur la grande longueur d'interaction que procurent les fibres que cela a été possible de même que le développement ultérieur des amplificateurs à fibre dopés Erbium (en anglais EDFA). Nous savions depuis longtemps chez Deutschbein que la silice, spécialement ultra pure, était le pire hôte pour une terre-rare car ces dernières sont rejetées par le verre silice. La terre-rare entre alors sous forme d'amas et la quantité acceptable est de quelques dizaines de ppm ; ces amas sont une source de perte pour l'émission [7]. Le dopage de quelques ppm était par chance suffisant pour réaliser des amplificateurs ayant des longueurs plus grandes que celles utilisées pour les sources lasers non fibrées, c'est-à-dire de l'ordre de quelques mètres à quelques dizaines de mètres au lieu de quelques centimètres.

La philosophie de cette histoire est une illustration d'une autre parole forte de Norbert Segard "ce qui, à un instant donné est considéré comme un défaut, sera après considéré comme un avantage".

Ainsi peu de temps après, en 1987, une amplification à $1,5 \mu$ de 28 dB était obtenue avec un pompage par diode laser pour une longueur de fibre de 3m et une largeur de bande de 4 THz (30 nm) [8].

Ces résultats ne laissèrent pas le CNET indifférent et les études de terres-rares redémarrèrent dans plusieurs centres du CNET. Au Centre grenoblois "Norbert Segard" (après l'ISEP et l'ISEN, notre professeur était devenu ministre des télécommunications) pour les terres-rares dans des semi-conducteurs et au centre de Lannion qui s'investissait largement dans les études de fibres pour la transmission et l'amplification [9].

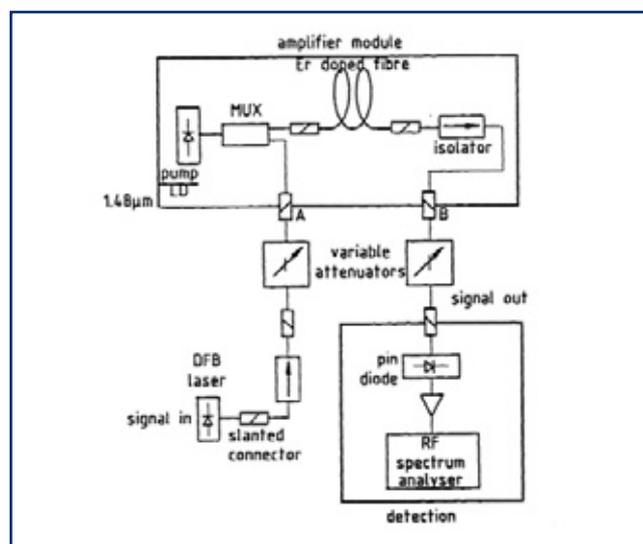


Figure 3. Schéma typique d'un amplificateur à 1,5 micron à fibre ZBLAN dopée Er^{3+} (EDFA) [9].

Très rapidement ensuite, de nombreuses autres expériences démontraient que des gains de 30 db pour 10 m de fibre étaient couramment obtenus avec des facteurs de bruit de 0,2 dB au-dessus de la limite quantique théorique de 3 dB. Ces amplificateurs présentent essentiellement l'avantage d'une puissance de saturation supérieure (15 dbm) à celles des amplificateurs à semi-conducteurs (-3 à +8 dBm) et aussi une meilleure insensibilité à la polarisation. La Figure 3 donne le schéma général d'un EDFA à 1,5 μ , ainsi que la Figure 4 sa courbe de gain en fonction des puissances de signal et de sortie. Ces types d'amplificateurs sont utilisés en ligne dans les câbles sous-marins en particulier transatlantique (TAT12). Ces amplificateurs et leur mise en oeuvre sont largement décrits dans la ref.[10].

Les années suivantes (1990-1994) ont vu diverses améliorations dont la réduction des amas d'ions dopants ("clusters") mais on savait déjà (voir 4,2) qu'il ne fallait pas de silice seule, d'où l'apparition de verres silice à plusieurs composants ou non silice. Le problème des fibres de transmission était différent de celui des fibres amplificatrices, même si les pertes devaient être réduites pour ne pas perdre sur le gain. On montrait alors que ce qui était considéré comme une perte (background loss) qu'auraient introduit des défauts inconnus liés au dopage terre-rare, était en fait une transition multiphonon de la terre rare [11] ; dès que la terre-rare est dans un solide, on ne peut plus considérer ses niveaux d'énergie comme discrets (voir Figure 2) mais comme un continuum provenant des transitions multiphonon (Figure 5) et accompagnant chacune des transitions électroniques proprement dites.

On étudiait aussi les amplificateurs à gains plus plats que ceux que donnaient les premiers amplificateurs à fibre silice

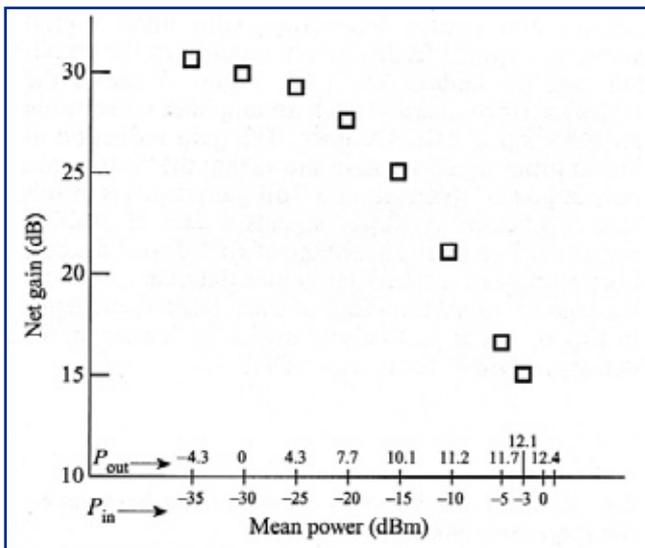


Figure 4. Gain en fonction du signal de sortie et d'entrée pour un EDFA typique en ZBLAN[9].

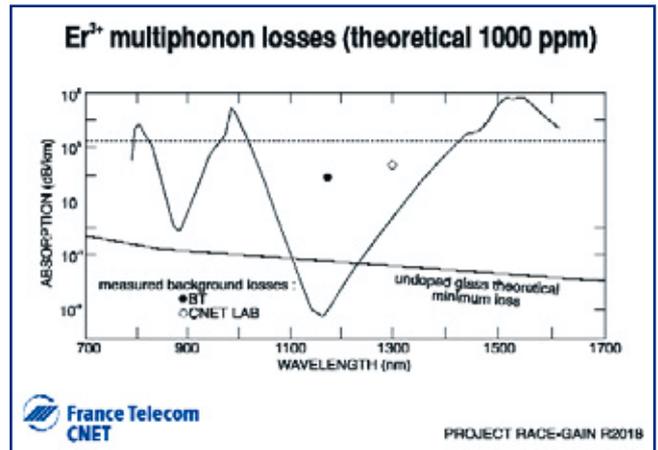


Figure 5. "Pertes résiduelles multiphonon théoriques" entre niveaux électroniques de Er^{3+} dans un verre fluoré ZBLAN. Comparaison avec l'état de l'art au CNET et à British Telecom en 1994. Comparaison avec la limite théorique d'un verre non dopé.

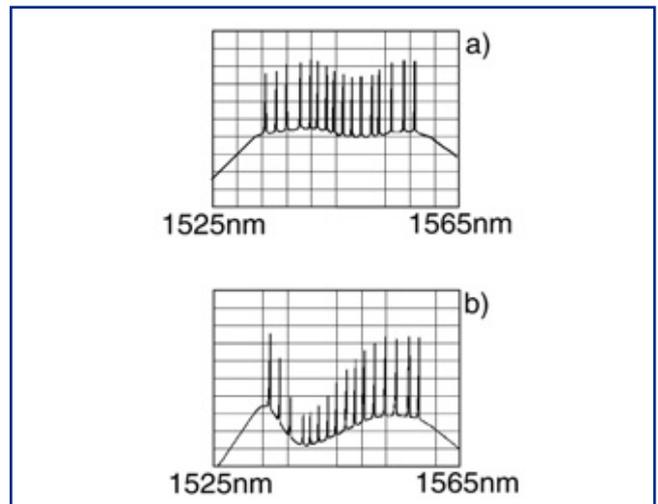


Figure 6. Bande passante d'un amplificateur large bande pour multiplexage en longueur d'onde (WDM à 16 canaux) dans une fibre ZBLAN (a) et dans une fibre silice (b) [12].

de manière à augmenter le nombre des canaux du multiplexage en longueur d'onde (Figure 6) [12].

On comprend bien alors l'intérêt des télécommunications optiques car le multiplexage en longueur d'onde (WDM) donne une bande passante totale égale au produit du nombre de canaux optiques par la largeur de chaque canal électronique. Ici on a 16 fois 10 ou 20 GHz.

Les fibres fluorées semblaient la solution jusqu'à ce que l'on sache corriger la courbe du gain en introduisant des pertes en fonction de la longueur d'onde par des réseaux de diffraction inscrits dans la fibre.

En participant aux projets européens, je me raccrochais ainsi aux terres rares étudiés dans les laboratoires de Lannion, en leur servant de conseil, et me joignant de fait au projet RACE-Gain comme "Work Package Leader".

En 1994, n'ayant plus de personnel CNET pour ces sujets, je créais une équipe mixte CNET-CNRS, le GOTR (Groupe Optique des Terres-Rares). Cette équipe, financée par le CNET pour le fonctionnement et l'équipement, pouvait utiliser les compétences de cinq personnes du CNRS de Meudon-Bellevue. Nous pouvions ainsi étudier des aspects fondamentaux des propriétés optiques des terres-rares, entre autres les aspects multiphonon qui gouvernent les propriétés non-radiatives des verres dopés, cela jusqu'à mon départ du CNET en 1998 par ma mise à la retraite.

6. Les derniers développements et le retour aux sources

Les recherches les plus récentes ont trait aux amplis en guide d'onde optique (Figure 8). Le problème à résoudre est d'obtenir en quelques centimètres le même gain qu'avec des fibres de plusieurs mètres. C'est un problème ardu comme on peut aisément le voir en mettant des chiffres sur l'équation de gain suivante :

$$G_{lim} = 10 \log_{10} [\exp(\sigma_{gain} N L)]$$

où G_{lim} est une limite supérieure asymptotique au gain en supposant une inversion de population de 100 % ce qui bien entendu n'est pas possible. N est la concentration en ion dopant, L est la longueur de l'amplificateur en supposant un seul passage.

On a $\sigma_{gain} = \beta \sigma_e - (1 - \beta) \sigma_a$: avec respectivement σ_e et σ_a les sections efficaces d'émission et d'absorption, β est le coefficient d'inversion de population défini par le rapport $n_1 / (n_1 + n_2)$ avec n_1 et n_2 les populations respectives des niveaux

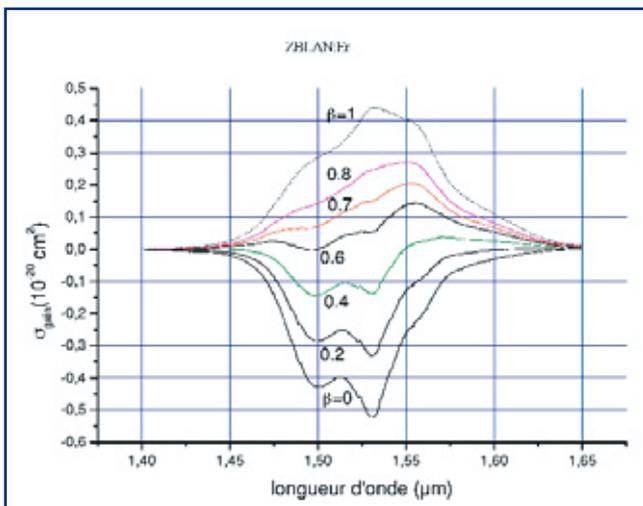


Figure 7. Section efficace de gain pour un verre fluoré ZBLAN dopé Er^{3+} en fonction du paramètre d'inversion de population β .

d'énergie mis en jeu dans la transition considérée. Un exemple de section efficace en fonction du taux de pompage est donné Figure 7 pour un verre fluoré dopé Er^{3+} (ZBLAN).

Dans une fibre dopée Er^{3+} , les valeurs typiques sont :

σ_{gain} (pour $\beta=1$) = $5 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$; $N = 1,4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (en mole% : 200ppm); $L = 10 \text{ m}$ ce qui donne: $\sigma_{gain} N = 7 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$

soit : $G_{lim} = 10 \log_{10} e^7 = 30,4 \text{ db}$; c'est une limite quel que soit le pompage.

Si l'on recherche le même gain pour un guide d'onde de 1 cm de long avec le même ion Er^{3+} , on voit qu'il faut augmenter $\sigma_{gain} N$ par un facteur 1000. Comme les sections efficaces varient peu d'un verre à l'autre, c'est la concentration qu'il faudra augmenter dans cette proportion. Il est clair que la silice ne pourra pas être la solution comme expliqué en 4.2. En revanche, les verres phosphatés dopés Er^{3+} que j'avais étudiés pour la thèse constituent une solution. Ainsi en 2001, je créais FAConseil avec pour principal client Teemphotonics à Grenoble qui s'intéressait justement aux verres phosphatés. Ils avaient déjà obtenu les meilleurs résultats au monde pour des amplificateurs [13]. Malheureusement la crise générale des télécommunications en 2002 devait nous être fatale à tous les deux.

Quarante ans de recherches sur les verres dopés Er^{3+} se terminaient pour moi, mais le domaine des télécommunications optiques reste encore ouvert. L'ADSL à la mode récemment, n'est certainement pas la solution avec ses limites : distances de quelques Km, vitesse de quelques MHz. Pour relier des machines tournant à plusieurs GHz, la solution FTTH (Fiber To The Home) devrait "pointer son nez" mais les solutions actuelles semblent trop chères pour ces applications. Au lieu d'utiliser le précepte actuel qui a régi jusqu'alors les télécommunications optiques : l'adaptation de la technique à la longueur d'onde du minimum d'atténuation de la fibre, pour le FTTH, il faudra sans doute chercher à adapter la technique au coût des composants [14].

7. Conclusion

Pour conclure, je voudrais seulement présenter quelques réflexions construites sur ces quarante années de recherche qui m'ont donné l'occasion de côtoyer de près deux grands organismes de recherche : le CNET et le CNRS et de plus loin des centres de recherche industriels.

Le CNET, avant la privatisation de France Telecom et avec sa structure pyramidale, offrait une certaine liberté aux chercheurs, qui devaient cependant rendre des comptes chaque année. Avec ses moyens suffisants, le CNET a été un endroit béni pour la recherche. Lorsque la politique de recherche a été abandonnée parce qu'il était pensé plus économique et

possible d'acheter "on the shelf", il n'y a plus eu de raison d'avoir la maîtrise du savoir. Pour le futur, la dépendance vis-à-vis de l'extérieur ne pourra qu'augmenter. La "délocalisation" ne sera alors pas qu'industrielle. Durant mes dix dernières années au CNET, les seuls thésards et "postdoc" que j'ai pu avoir, étaient chinois !

J'ai côtoyé le CNRS grâce à mon équipe mixte et parce que pendant quatre ans j'ai siégé comme "personnalité extérieure" au Comité National. Le CNRS, organisme d'état, reste théoriquement le grand créateur de savoir. Il souffre cependant de deux gros défauts. En 1981, il a transformé tous ses contractuels en fonctionnaires qui sont persuadés d'être "propriétaires" de leur poste (certains me l'ont dit alors qu'ils venaient juste d'entrer!). Environ 95% du budget annuel sert à régler les salaires de ces 25000 fonctionnaires dont seulement 12000 environ font de la recherche. Seuls quelques passionnés qui savent se donner à eux-mêmes les buts et les moyens produisent pour tous les autres. La course aux moyens mine cependant l'énergie même des mieux disposés ; la course aux contrats européens et autres, génère des méthodes plus ou moins déviantes. Le deuxième défaut est sa structure quasi-horizontale : chacun des 40 groupes de spécialistes et syndicalistes de 30 personnes constituant le Comité National doit chacun gérer la carrière de 300 personnes environ qu'il ne connaît que par un rapport tous les quatre ans. Cette gestion génère des astuces plus ou moins correctes pour la présentation des rapports car il n'y a pas d'analyse des travaux eux-mêmes mais seulement comptabilité du nombre des publications, d'où marchandage dans l'établissement de la liste des auteurs, publications à répétitions, etc...

Enfin, je dirais qu'avant tout, quel que soit l'endroit où il se trouve, le chercheur doit être passionné. La curiosité et les idées d'un individu ont plus d'importance qu'une grosse équipe ou un gros budget. La taille de l'équipe et le budget joueront sur la vitesse ; le manque d'idées dans une grosse équipe avec un gros budget conduit à la duplication et non à l'innovation.

Au cours de ces souvenirs, on a vu que la recherche est soumise à des aléas, mais que seule la persévérance apportée par la passion permet de bâtir une tradition, c'est-à-dire un réservoir de savoir. Les ingénieurs pourront alors venir y puiser

même s'ils sont soumis à des conditions économiques perturbantes et à variations certainement toujours trop rapides.

Pour finir, je voudrais donner à méditer cette réflexion de Philippe Busquin (Commissaire Européen pour la Recherche de 1999 à 2004) qui regrette cette situation : "Les élites n'ont pas intégré que la moitié de la croissance vient de l'innovation" [Le Figaro du 26/10/2004]... Le dire dans un journal à grand tirage est je l'espère un signe très positif pour l'avenir !

Références

- [1] F.Auzel, Chem.Rev., 104 (2004)139.
- [2] B.R.Judd, Phys.Rev., 127 (1962)750.
- [3] F.Auzel, Ann.Telecom., 24 (1969) 199.
- [4] F.Auzel, Ann.Telecom., 24 (1969) 363.
- [5] F.Auzel, A.Kaminskii, D.Meichenin, Phys.Stat. Sol.,131 (1992) K63.
- [6] R.J.Mears, L.Reekie, S.B.Pool, D.N.Payne, Electron.Lett.,22 (1986) 159.
- [7] F.Auzel, D.Meichenin, F.Pellé, P.Goldner, Opt.Mat., 4 (1994) 35.
- [8] L.Reekie, J.M.Joucey, S.B.Pool, D.N.Payne, Electron.Lett., 23 (1987) 1076.
- [9] D.Ronarc'h, M.Guibert, H.Ibraim, M.Monerie, H.Poignant, A.Tromeur, Electron.Lett., 27 (1991) 908.
- [10] E.Desurvire, *Erbium-doped fiber amplifier- Principle and applications*, Wiley New York (1994).
- [11] F.Auzel, Phys.Rev., B13 (1976) 2809.
- [12] B.Clescla, D.Bayart, L.Hamon, J.L.Beylat, C.Coeurjolly, L.Berthelou,Electron.Lett., 30 (1994) 586.
- [13] D.Barbier, P.Bruno, C.Cassagnettes, M.Trouillon, R.L.Hyde, A.Kervokian, J-M.Delavaux, OSA Technical Digest Series, 12,(1998)45.
- [14] G.Baldacchini, F.Bonfigli, R.M.Montereali, F.Auzel, *Colored LiF amplifier: a key device for a low cost active optical network in FTTH distribution system?* ENEA Internal Report RT/2003/67/FIS, (Roma, Italy, 2003).