

La transmission par solitons

Patrick Vandamme
Jean-Baptiste Thomine
Philippe Gallion

Patrick Vandamme, ENST 73, est chef du département "Etudes de Systèmes de Transmission optiques" au centre Lannion B du CNET et responsable du projet CNET Soliton. Auparavant, il animait des recherches en traitement du signal pour les communications à haut débit sur faisceau hertzien.

Jean-Baptiste Thomine, X83, ENST 88, est responsable d'un groupe de "simulations et modélisations" au centre Paris B du CNET. Il s'intéresse à la conception et au développement des systèmes optiques amplifiés sous-marins et particulièrement à la transmission soliton.

Philippe Gallion, Docteur d'Etat, est professeur et chef du département "Communications" à Télécom Paris (ENST). Il enseigne également à l'Université Pierre et Marie Curie et dans différentes écoles et universités étrangères. Ses recherches portent sur les composants et les fonctions optoélectroniques.

La transmission par solitons

***Solution “non linéaire”
de l'équation des ondes ,
le soliton constitue un mode
pratique de transmission sur
fibre optique, étonnamment
“robuste”, adapté à la fois
aux hauts débits et à
la régénération optique.***

Si les fibres optiques et les composants optoélectroniques associés apparaissent souvent, aux yeux du grand public, comme le pinacle de la technique dans le domaine de la transmission de l'information, les télécommunications optiques par solitons n'en sont pas seulement l'un des derniers raffinements. Elles constituent plutôt, comme nous allons essayer de le montrer, la première application d'un nouveau champ d'investigation extrêmement prometteur pour le chercheur et l'ingénieur. Héritières de la radioélectricité, les transmissions optiques ont vu leur développement basé sur l'existence de trois notions *a priori* indépendantes : le canal de transmission, le signal à transmettre et le bruit. Quelques dérogations à ce grand principe sont bien sûr apparues, comme les non-linéarités parasites ou le bruit quantique associé au signal reçu, mais elles ont été traitées à la marge par un traitement perturbatif, car elles ne remettaient en cause ni les données fondamentales du problème ni la stabilité de ses solutions. Deux évolutions technologiques majeures conduisent aujourd'hui à réviser cette approche.

La première tient à l'apparition de dispositifs rapides autorisant le développement de systèmes monomodes à très hauts débits (quelques Gbit/s). La silice constituant les fibres est un matériau plutôt linéaire et les puissances optiques moyennes qu'elles véhiculent sont relativement modestes. Cependant, la transmission de débits d'information élevés conduit à la propagation d'impulsions très brèves et donc, à énergie donnée, de puissance instantanée assez importante (quelques dizaines de mW). Dans le cœur des fibres, leur énergie se trouve confinée sur une section effective très petite (quelques dizaines de μm^2). Il en résulte des champs optiques très intenses et, partant, des non-linéarités significatives d'autant que leurs effets, même localement faibles, peuvent être cumulés sur de très grandes longueurs (quelques centaines voire quelques milliers de km). Le signal affecte donc dans ce cas le canal de transmission. La seconde est liée à l'apparition des amplificateurs optiques permettant aujourd'hui de compenser l'atténuation de la fibre. Ces amplificateurs engendrent également de l'émission spontanée constituant en régime linéaire un bruit optique additif, amplifié à son tour dans les étages amplificateurs situés en aval, au même titre que le signal. Après une détection quadratique (de puissance), ce bruit n'est évidemment plus additif, le terme de bruit prépondérant étant un terme croisé entre signal et émission spontanée amplifiée. Le bruit dominant cesse alors d'être le classique bruit thermique de l'électronique de photoréception.

Le soliton ou un traitement global de l'ensemble signal, bruit et canal

Signal, canal et bruit sont aujourd'hui en interaction forte dans les études de systèmes de communications optiques. Il en résulte de nombreuses propriétés nouvelles et parfois même déconcertantes dans le référentiel culturel issu de l'histoire déjà longue des transmissions. Nous appuyant sur des métaphores hardies, nous en donnerons deux exemples. Considérons tout d'abord un groupe de coureurs évoluant sur un milieu déformable, un matelas par exemple [1]. Alors que le coureur le plus véloce se porte en tête du groupe, il se trouve contraint de gravir en permanence la dépression mobile provoquée par le poids du groupe, voyant ainsi se réduire ses velléités à s'échapper. A contrario, la descente permanente dans cette dépression évite au moins rapide d'entre eux de se faire rapidement distancer. L'interaction du groupe avec le milieu tend donc à corriger les différences de vitesse entre coureurs. Pour une élasticité du milieu donnée, le contrôle séparé du poids du groupe, de la distance entre coureurs et de la disparité de leur condition physique permet la formation d'un peloton stable au comportement quasi-corpusculaire. De la même manière, dans une fibre optique, l'intensité du champ électrique, jouant un rôle similaire au poids du groupe de coureurs, modifie l'indice de réfraction par un effet non linéaire appelé effet Kerr optique. Ce changement d'indice affecte en retour la propagation de la lumière. Dans certaines conditions, il est de nature à en corriger les effets de dispersion associés aux différentes composantes spectrales de la lumière qui, elles aussi, se propagent avec des vitesses différentes. Il en résulte des impulsions de lumière d'enveloppe constante appelées solitons. Les non-linéarités corrigeant alors la dispersion, c'est donc bien le signal lui-même qui corrige les imperfections du canal.

Le deuxième exemple considère des rames de métro quittant, à intervalles réguliers, leur tête de station. Soumises aux aléas du trafic, notamment aux temps variables de montée et descente des voyageurs, leurs instants de passage aux différentes stations deviendraient, en l'absence de régulation, de plus en plus imprévisibles à mesure qu'elles se rapprocheraient de leur terminus. De manière similaire, l'émission spontanée des amplificateurs optiques produit des fluctuations d'amplitude du signal. En régime non linéaire, ces fluctuations produisent des variations d'indice de réfraction et, en conséquence, des fluctuations de la fréquence moyenne du signal que la dispersion convertit enfin en fluctuations des instants d'arrivée. Cet effet, de variance proportionnelle à la puissance optique et appelé gigue de Gordon-Haus [2], peut conduire à des dégradations importantes des performances du système de transmission car il résiste à toute tentative de masquage par augmentation de la puissance utile du signal !

Comme nous venons de l'illustrer, dans cette approche, le signal n'est plus un vecteur relativement passif de l'information mais peut devenir un moyen de se prémunir contre les imperfections du canal, induisant par là-même des problèmes nouveaux dus, entre autres, aux couplages avec les sources de bruit. Nous sommes là au cœur de la technique de transmission par solitons. Après avoir rappelé les apports fondamentaux de l'amplification optique aux transmissions sur fibres, les effets sur lesquels se fonde le soliton sont rappelés dans le paragraphe suivant ainsi que les limites naturelles auxquelles il est soumis. Le contexte ainsi présenté, les voies d'étude actuelles devant permettre de s'affranchir de ces limites sont ensuite décrites, ainsi que les approches requises. Enfin, le dernier paragraphe esquisse quelques applications potentielles pour des phases d'études ultérieures.

La technique de transmission par solitons

L'état de l'art en transmission optique

L'état de l'art en transmission optique est la conséquence de plusieurs évolutions technologiques. Le passage de la fibre multimode à la fibre monomode a permis, dans un premier temps, de passer d'une portée moyenne d'une dizaine de km entre émetteur et récepteur et de débits de quelques dizaines de Mbit/s à des portées et débits supérieurs d'un ordre de grandeur. La disponibilité de lasers monomodes à réseau distribué a encore augmenté la portée en permettant d'utiliser la fenêtre de longueur d'onde à 1,55 μm et les progrès sur les bandes passantes des composants électroniques et optoélectroniques autorisent maintenant l'obtention de débits de quelques Gbit/s. Pour être plus précis, citons quelques caractéristiques de systèmes installés ou devant prochainement l'être :

- systèmes terrestres à 2,5 Gbit/s avec des portées de 90 km,
- systèmes sous-marins à 560 Mbit/s avec des espacements de 130 km entre régénérateurs principalement, mais aussi à 2,5 Gbit/s avec des espacements de 80 km.

Le point commun à tous ces systèmes, dès lors que la distance sur laquelle on veut transporter l'information est supérieure à la portée, est l'utilisation de régénérateurs optoélectroniques comprenant un laser, une photodiode et un grand nombre de circuits intégrés. Tous ces composants devant fonctionner à fort débit sont chers, complexes, délicats à réaliser et à interfacer. Malgré les progrès incontestables de

[1] Cette métaphore est empruntée à L. F. Mollenauer et G. Evangelides, AT & T.

[2] Du nom de J.-P. Gordon et H. Haus, à l'origine de son identification.

l'électronique large bande, il y a tout lieu de penser que le développement de ce type de régénérateur à des débits supérieurs à 2,5 Gbit/s sera coûteux, voire incompatible avec les exigences de fiabilité.

Pourtant, les besoins en débit ne cessent d'augmenter, au moins sur certains axes : réseaux interurbains et transmissions transocéaniques (Europe-USA et USA-Japon). Cette course à la capacité semblait finalement devoir se ralentir pour des raisons technologiques liées à la faisabilité des régénérateurs optoélectroniques. Avec une bande passante d'une dizaine de Terahertz, la fibre optique monomode semblait définitivement condamnée à véhiculer, sur de longues distances, des débits maximaux de quelques Gbit/s.

La révolution provoquée par l'amplification optique

Les travaux sur l'amplification optique ne sont pas récents : son application aux fibres monomodes est étudiée depuis une quinzaine d'années et est mise à profit depuis longtemps dans le domaine des lasers de puissance. La véritable révolution de la fin des années 80 est l'apparition d'un amplificateur fiable, facile à mettre en œuvre, puissant, à faible bruit et, de plus, couvrant quasiment la moitié de la bande passante de la fibre optique à 1,55 μm : l'amplificateur optique à fibre dopée erbium (AOFD). Le mode de fonctionnement en est extrêmement simple : une fibre optique dopée à l'erbium est "pompe" optiquement à des puissances raisonnables (quelques mW) par un laser semiconducteur. Le résultat est l'apparition d'un milieu amplificateur entre les longueurs d'onde de 1 530 nm et 1 565 nm.

Les principaux problèmes sont résolus : grâce à l'aspect "fibré" de l'amplificateur, les pertes d'entrée-sortie sont très limitées, les longueurs d'onde de "pompage" (1 480 et 980 nm) sont très proches des longueurs d'onde des lasers semiconducteurs classiques (d'où l'absence de problèmes technologiques majeurs),

les temps de saturation d'environ 1 ms stabilisent le gain sur la puissance moyenne du signal en évitant ainsi les distorsions, et enfin, au plus grand étonnement des technologues de la fibre dopée, des niveaux de bruit proches du minimum théorique ont été obtenus dès le début des recherches.

Ainsi, vers 1987/1988, un véritable outil aux innombrables fonctions a été offert aux concepteurs de systèmes optiques. Son application peut-être la plus importante est l'amplification en ligne. L'AOFD devient le concurrent direct du répéteur-régénérateur actuellement utilisé.

Lorsqu'aucune autre fonction n'est exigée, pourquoi conserver un équipement compliqué comprenant un laser, une photodiode et pas moins de cinq circuits intégrés, alors qu'on peut le remplacer par un morceau de fibre dopée et un laser de pompe, ce qui aura en plus l'avantage (théorique) d'être insensible au débit et donc inchangé à chaque mise à niveau du système. La comparaison est aisée et les constructeurs d'équipement ne s'y sont pas trompés.

C'est dans le domaine des liaisons sous-marines que les premiers systèmes dits "amplifiés" seront utilisés : ils sont dès maintenant en développement à des débits de 5 Gbit/s et devraient être posés en 1995/1996 sur des parcours de longueur considérable (6 500 km sur l'Atlantique et 9 000 km sur le Pacifique Nord).

Evidemment, la substitution régénérateur-amplificateur de ligne n'est pas si aisée que les lignes précédentes pourraient le laisser croire et ce que beaucoup considèrent comme un progrès peut aussi être vu comme un retour inopportun vers les problèmes de la transmission analogique : en mode amplifié, tous les défauts et bruits de la ligne se cumulent avec la distance et de nombreux phénomènes, peu étudiés car négligeables sur les portées précédentes, deviennent extrêmement pénalisants. Le paragraphe suivant s'attache à préciser les principales limites de ces nouveaux systèmes amplifiés.

Les contraintes des systèmes amplifiés

Le bruit

Le premier problème, le plus inévitable, est l'apparition de la notion de bruit optique, toute nouvelle pour les concepteurs de systèmes à fibre. Ce bruit est ajouté au signal, se propage avec lui et va venir générer, par l'intermédiaire de la photodiode, d'autres bruits d'amplitude, dits de battement, dans la réception électronique, d'où l'existence d'un niveau de rapport signal à bruit maximal conduisant à un taux d'erreur plancher. Dans le cas où plusieurs amplificateurs sont présents en ligne, ces bruits s'accumulent et viennent dégrader le rapport signal à bruit au fur et à mesure de la propagation.

L'encadré n° 1 montre que la puissance de bruit est proportionnelle à la distance de transmission, mais surtout est une fonction croissante du gain et donc de la distance entre amplificateurs. Pour cette raison, les systèmes amplifiés sur longues distances sont conçus avec des espacements entre répéteurs faibles (de 30 à 50 km), au lieu des 110 km des systèmes régénérés actuels. Dans l'absolu, il semblerait aisé d'augmenter le niveau de sortie des amplificateurs, donc du signal utile, pour augmenter le rapport signal à bruit, mais nous verrons dans le prochain paragraphe que l'on rencontre alors d'autres problèmes de propagation liés au comportement non linéaire en puissance de la fibre.

Encadré n° 1 - Le bruit dans les systèmes amplifiés

Un amplificateur optique de gain G émet un bruit optique de puissance P_B dans la bande optique B_0 , soit

$$P_B = 2(G - 1) h\nu B_0 N_{sp}$$

où h est la constante de Planck, ν la fréquence optique et N_{sp} un facteur plus grand que 1 traduisant un excès de bruit par rapport au minimum théorique.

La somme de tous ces bruits sur une distance totale L fixe comprenant N amplificateurs s'écrit

$$P_{tot} = 2N(G - 1) h\nu B_0 N_{sp}$$

Le gain, supposé égal aux pertes de la longueur l de fibre entre 2 amplificateurs consécutifs, s'écrit

$$G = e^{\alpha l}$$

où α représente le coefficient de perte linéique de la fibre.

La puissance totale de bruit à l'entrée du récepteur vaut donc

$$P_{tot} = 2 h\nu B_0 N_{sp} (G - 1) \frac{L}{l} = 2 h\nu B_0 N_{sp} \alpha L \left(\frac{G - 1}{L_n G} \right)$$

La propagation

En première approche, la propagation dans une fibre monomode est affectée par le fait que son indice de réfraction dépend de la fréquence optique (ou longueur d'onde) du signal et de son intensité instantanée, d'où deux phénomènes principaux à prendre en compte (voir l'encadré n° 2).

L'automodulation de phase, conséquence de l'effet Kerr

L'intensité du signal modifie l'indice de réfraction. L'indice devient ainsi légèrement plus élevé lors du passage de la crête de l'impulsion que lors de celui de ses fronts montant et descendant. Tout comme la différence d'indice statique entre le cœur et la gaine confine latéralement la lumière, cette différence d'indice, produite par l'impulsion elle-même, la confine longitudinalement et l'accompagne dans sa propagation. Cette différence d'indice affecte en retour la phase du signal, les fronts voyant un indice plus faible que la crête. Il en résulte une automodulation

de phase imprimant à l'impulsion un retard de phase croissant avec l'intensité optique, atteignant son maximum avec la crête de l'impulsion, puis décroissant. Une impulsion de lumière jaune verrait ainsi ses fronts montant virer au rouge et descendant au bleu. Dans le cas des fibres optiques, il s'agit bien sûr d'impulsions infrarouges, mais les références au domaine visible y sont encore souvent utilisées. Il en résulte un spectre d'impulsion élargi, donc une plus grande vulnérabilité à la dispersion chromatique.

La dispersion chromatique

Un indice de réfraction fonction de la fréquence conduit à des vitesses de propagation différentes pour chacune des composantes spectrales et donc à un élargissement temporel de l'impulsion. La dispersion chromatique donne pour un écart unitaire en longueur d'onde le retard induit après une distance de propagation unité (en ps/nm.km). Cette dispersion est en plus elle-même fonction de la longueur d'onde à laquelle opère le système.

Pour une dispersion négative, les composantes basse fréquence ("rouge") se propagent plus rapidement, devançant ainsi les composantes haute fréquence ("bleu"). Un tel effet couplé avec l'automodulation de phase conduit à un élargissement encore plus important de l'impulsion.

En revanche, pour une dispersion positive, les composantes les plus rapides étant les composantes haute fréquence, son effet s'oppose clairement à celui de l'automodulation de phase, ce qui laisse imaginer qu'il puisse le compenser.

Les conséquences sur les systèmes

Les deux effets précédents sont proportionnels à la distance de propagation. Leur influence relative quant à elle est fonction de la longueur d'onde de fonctionnement du système et de la puissance optique crête du signal transmis.

Les systèmes de transmission terrestres actuels utilisent une fibre ayant une dispersion chromatique élevée à 1,5 μm (17 ps/nm.km). Leurs performances sont clairement limitées par la dispersion, les effets non linéaires restant négligeables. L'élargissement des impulsions dû à la dispersion étant proportionnel au carré de leur largeur, le débit maximal s'en trouve limité à une dizaine de Gbit/s sur 100 km.

Encadré n° 2 - La propagation

La propagation dans une fibre optique monomode est modélisée par l'équation suivante, dite non linéaire de Schrödinger, dès lors que la largeur typique des impulsions est supérieure à la picoseconde

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = j\gamma |A|^2 A,$$

où z est la distance de propagation, t le temps "retardé" (pour tenir compte de la vitesse de propagation), $A(z, t)$ est l'enveloppe complexe du champ optique, α l'atténuation linéique, β_2 est lié à la dispersion chromatique D de la fibre et γ est le coefficient d'effet non linéaire Kerr.

Omettant le terme lié à α , qui correspond à une atténuation pure, il apparaît que les sources de distorsion proviennent de deux effets bien distincts : la dispersion chromatique (par β_2) qui joue à la fois sur la phase et l'amplitude de A et l'effet Kerr qui déphase A en fonction de sa puissance. Suivant la valeur de β_2 et de la puissance en ligne, l'un ou l'autre de ces deux effets peut prédominer.

$$D < 0 \text{ (régime "normal")}$$

Pour des valeurs de dispersion négatives même faibles, il y a "coopération" entre l'effet Kerr et la dispersion et les impulsions s'élargissent très vite, avec la conséquence système d'apparition d'interférences entre symboles rapidement insupportables.

$$D > 0 \text{ (régime "anormal")}$$

Quand la dispersion est positive, les deux effets ont plutôt tendance à s'opposer et il y a généralement apparition d'instabilité de modulation ("explosion" des impulsions en impulsions beaucoup plus fines et instables, et élargissement démesuré du spectre optique).

Le soliton est la solution à la recherche d'un équilibre stable dans ce régime de propagation. Il s'agit en fait d'une impulsion de forme et de largeur donnée, d'une puissance donnée se propageant dans une fibre de dispersion chromatique (positive) donnée : lorsque toutes ces conditions sont réunies, il y a propagation stable à l'infini (en omettant évidemment le terme de perte linéique de la fibre pourtant bien présent). Plus précisément, le soliton est une impulsion de forme générique

$$A(z, t) = \sqrt{P_c} \operatorname{sech} \left(\frac{t}{\tau} \right)$$

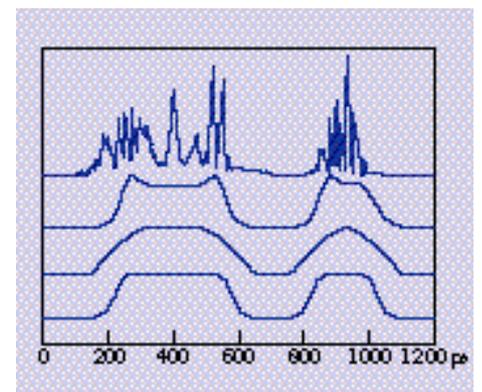
où P_c , puissance crête, et τ , largeur caractéristique de l'impulsion, sont liées par

$$\tau^2 P_c = f(\beta_2, \gamma).$$

Figure 1 - Formes d'onde associées au message "011010" à l'émission et après 6 300 km pour $D = -0,038 \text{ ps/nm.km}$, 0 et $+0,038 \text{ ps/nm.km}$ (de bas en haut).

Pour les systèmes amplifiés transocéaniques, la fibre utilisée (de conception plus récente) a une dispersion chromatique s'annulant dans la plage à $1,5 \mu\text{m}$. Par ailleurs, les effets de l'automodulation s'accumulant avec la distance, ils ne peuvent plus être négligés. L'existence des deux régimes de propagation suivant le signe de la dispersion chromatique (voir encadré n° 2) conduit le concepteur de système à travailler le plus près possible de la longueur d'onde de dispersion nulle de la fibre, avec les conséquences draconiennes sur la stabilité de production des caractéristiques des fibres de ligne et celle des lasers d'émission. Le débit du système en cours de développement est de 5 Gbit/s et tout accrédite l'idée qu'il sera difficile de dépasser 10 Gbit/s avec cette technique. Pour illustrer l'importance de ces phénomènes de propagation, la figure 1 présente le même train d'impulsions à 5 Gbit/s propagé sur $6\,300 \text{ km}$ à trois longueurs d'onde très peu différentes correspondant aux cas $D > 0$, $D = 0$ et $D < 0$.

La possibilité d'une auto-compensation des deux effets de propagation évoqués précédemment va permettre de s'échapper de la logique propre à la conception de ces systèmes pour lesquels la propagation est traitée comme un phénomène pénalisant. Le soliton, impulsion particulière garantissant cet équilibre idéal, en est la clé.



Le soliton

Le soliton, une solution aux distorsions de propagation

Pour une fibre optique de dispersion et de non-linéarité données, la recherche d'un équilibre entre les deux effets conduit naturellement à une relation entre l'intensité de l'impulsion et son spectre. Il en résulte une impulsion particulièrement stable puisque son spectre et sa forme temporelle sont simultanément stabilisés, dès lors que les pertes de la fibre sont supposées exactement compensées par le gain des amplificateurs optiques. L'enveloppe d'une telle impulsion, appelée soliton, résulte d'une parfaite symbiose entre la lumière et la fibre, alors parfaitement adaptées l'une à l'autre dans une sorte de résonance permettant une relative insensibilité à toute sollicitation perturbatrice. Le bénéfice en est une robustesse du soliton aux fluctuations locales de gain et de dispersion, la propagation de l'impulsion restant pour l'essentiel gouvernée par les valeurs moyennes de ces paramètres. De la même manière, une impulsion n'ayant pas les caractéristiques exactes évolue en général, par une sorte d'auto-épuration, vers un soliton. Bien sûr, l'exploitation bénéfique de la non-linéarité du milieu va aussi conduire à des problèmes nouveaux. Nous en citons ici deux exemples à nos yeux les plus limitatifs.

Les difficultés et les limites de la transmission par solitons

Interaction entre solitons adjacents

Le soliton est, comme son nom l'indique, une solution "solitaire" de l'équation de Schrödinger. Un train de solitons n'en est donc plus solution et on peut s'attendre à une propagation différente. C'est effectivement le cas, des solitons proches pouvant interagir très fortement (phénomènes d'attraction ou de répulsion). Pour limiter cette interaction, il est nécessaire d'espacer fortement les impulsions successives, ce qui conduit à l'utilisation d'impulsions beaucoup plus fines (facteur 5 à 10) que le temps bit et donc, d'une certaine manière, à une réduction de débit. La figure 2 illustre l'aspect fondamentalement solitaire du soliton : le soliton le plus à gauche, isolé, se propage sur 14 000 km sans déformation notable, alors que le couple de droite se déforme par attraction et répulsion.

Interaction avec le bruit des amplificateurs

Comme dans les systèmes classiques, le bruit optique a une influence très limitante sur les performances des systèmes à solitons. Il y a bien entendu une dégradation du rapport signal à bruit en réception. Un autre effet, très particulier aux solitons, est la gigue de Gordon-Haus déjà évoquée. Cette gigue induit un taux d'erreur plancher, tout comme le bruit. De variance proportionnelle à la puissance en ligne

et au cube de la longueur de la liaison, elle est donc extrêmement virulente sur des liaisons transocéaniques. Les performances optimales en termes de taux d'erreur d'un système à soliton résultent ainsi d'un compromis entre le rapport signal à bruit et le niveau de gigue de Gordon-Haus, tous deux croissant avec la puissance du signal. Ceci limite, en l'absence de compensation particulière, le débit admissible à 5 Gbit/s sur 9 000 km.

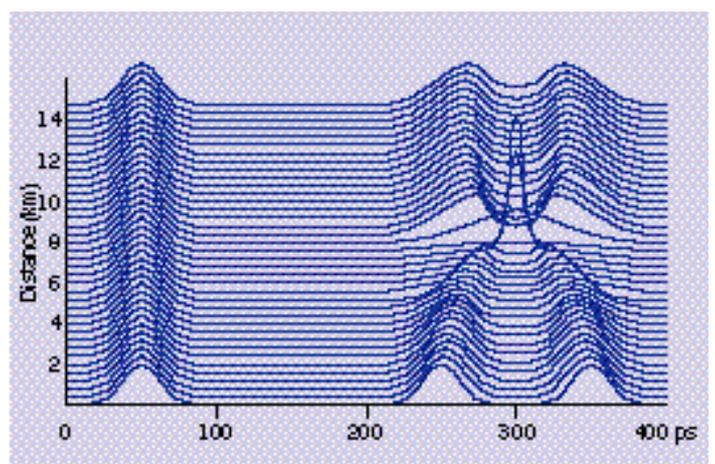
Dépasser les limites induites par le bruit

Le compromis précité a été présenté pendant longtemps comme une limite rédhibitoire pour la capacité d'un système à solitons, limite d'ailleurs peu différente de celles des systèmes conventionnels. C'est la non-linéarité qui en est à l'origine. C'est la nature non linéaire du soliton qui va permettre de s'en affranchir. Différentes techniques ont ainsi été proposées dans la littérature internationale pour outrepasser l'effet délétère de la gigue de Gordon-Haus. Nous en donnons ici brièvement les principes.

Réduction de gigue par traitement en ligne

La non-linéarité de la fibre permet de différencier le comportement des signaux de faible et forte intensité. Elle autorise donc une discrimination de comportement entre signal utile (fort) et bruits (faibles).

Figure 2
Propagation sur
14 000 km de la
forme d'onde soliton
associée au
message "1011".



L'exploitation de ce constat a conduit à des solutions plus ou moins complexes de traitement en ligne permettant de réduire de manière significative les niveaux de gigue de position et de bruit d'amplitude. Deux axes d'étude en cours sont le traitement en ligne dans le domaine spectral (par filtrage en ligne) et dans le domaine temporel (par modulation synchrone).

L'idée du filtrage en ligne est simple : la gigue étant issue des fluctuations en fréquence du soliton, des filtres optiques placés tout au long de la ligne forcent le train de soliton à maintenir sa fréquence quasi-constante. Quant à la modulation en ligne, elle resynchronise directement chaque impulsion par une modulation d'intensité périodique à la fréquence horloge, interdisant ainsi au soliton de s'échapper de sa fenêtre temporelle. Ces traitements sont, au même titre que l'amplification, localisés dans les répéteurs.

Le multiplexage en longueur d'onde

Sous certaines conditions de fonctionnement (espacement fréquentiel entre canaux bien maîtrisé), le multiplexage en longueur d'onde de plusieurs trains de solitons induit des pénalités mineures sur les performances (dues aux collisions entre solitons de canaux différents, donc se propageant à des vitesses différentes). Le débit total étant réparti entre les canaux, la gigue tolérable sur chaque canal est alors augmentée du facteur de multiplexage.

Toutes ces techniques sont récentes et mal connues. De nombreux points importants restent encore à éclaircir, non seulement sur les effets qu'elles engendrent mais aussi sur les conséquences au niveau d'un système : par exemple sa robustesse vis-à-vis des dispersions de productions, des variations de puissance en ligne, etc.

Les axes d'études en transmission par solitons

Les études en matière de transmission par solitons portent naturellement sur les problèmes de propagation précisés dans le chapitre précédent mais couvrent également les aspects de recherche liés aux composants et à la définition des systèmes. Afin de préciser plus clairement ces points, nous allons nous placer dans le cadre d'une transmission de type transocéanique, c'est-à-dire sur une très longue distance (typiquement 9 000 km), application pour laquelle le soliton apparaît naturellement comme une solution potentielle aux problèmes rencontrés. Nous verrons au dernier chapitre que d'autres applications peuvent aussi se révéler prometteuses et donc amener à étendre le champ de ces investigations.

Les axes d'études

La figure 3 donne l'architecture générale d'un système optique de transmission avec amplification en ligne. Les éléments constitutifs sont la source qui délivre un signal optique porteur de l'information numérique à transmettre, la ligne de transmission proprement dite constituée de tronçons de fibre et de répéteurs optiques dont la fonction de base est d'amplifier le signal, enfin le récepteur chargé de la conversion optique-électrique et de la détection du train numérique.

Les études nécessaires à la conception d'un tel système sont, comme nous allons le détailler, pluridisciplinaires.

Etudes de composants

La source, élément critique d'un système à solitons

La source réalise deux fonctions, le plus souvent en cascade : d'abord, la génération d'un train régulier d'impulsions optiques à un taux de répétition égal au débit à transmettre ; ensuite, sa modulation par le train binaire d'information par masquage éventuel de ces impulsions. La difficulté pour réaliser une telle source réside dans le contrôle des caractéristiques de chaque impulsion, contrôle indispensable pour garantir une propagation satisfaisante. Les propriétés des diodes laser actuelles ainsi que des modulateurs optiques (qui permettent l'occultation des impulsions) ne sont pas compatibles avec la génération directe d'impulsions répondant à ces conditions. Disposer d'une source réunissant des caractéristiques de stabilité et de fiabilité compatibles avec un usage industriel, et disposant par ailleurs d'une accordabilité minimale, est un objectif ambitieux. Toutefois, une source sous forme d'un composant intégré remplissant les fonctions de génération de lumière, de mise en forme des impulsions et de modulation est un objectif considéré aujourd'hui comme réaliste. Des études de nouvelles structures de diodes lasers, de modulateurs à large bande et d'intégration de ces derniers contribuent à atteindre cet objectif.

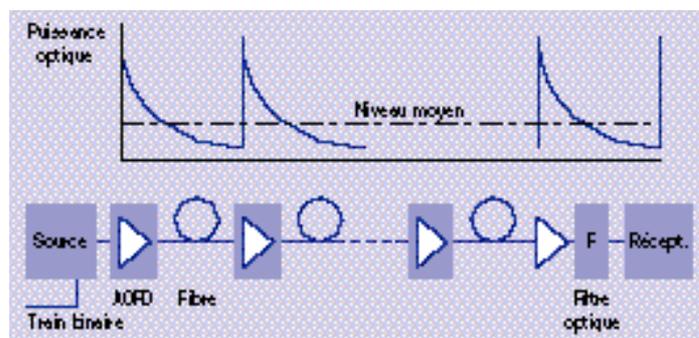


Figure 3
Architecture générale d'un système amplifié.

Les contraintes de bande passante du récepteur

Les fonctions constituant le récepteur ne se distinguent pas fondamentalement de celles d'un récepteur classique basé sur la détection de puissance optique. Leur adaptation à des débits supérieurs ou égaux à 10 Gbit/s oblige à garantir, pour chacun des éléments, des caractéristiques de bande passante pas toujours disponibles avec la technologie actuelle et pose des problèmes d'assemblage que, là aussi, l'intégration devrait aider à résoudre. Une prévision réaliste fixe aujourd'hui à 10 ans le temps nécessaire pour disposer des circuits électroniques compatibles avec un débit de 40 Gbit/s.

Etudes de propagation

Nous avons vu précédemment que la propagation de solitons relevait d'un équilibre parfait entre les effets de deux phénomènes principaux : la dispersion chromatique et l'effet Kerr. Tout autre phénomène tend à nous écarter de cet équilibre théorique.

Ces phénomènes supplémentaires peuvent être classés en deux catégories :

- les phénomènes naturellement présents dans la fibre, entre autres ceux induits par l'atténuation et l'amplification compensatrice ;
- les traitements optiques introduits volontairement en ligne dans le but d'améliorer la propagation, comme ceux réduisant la gigue ou l'interaction.

Les études de propagation concernent la modélisation, l'analyse et la compréhension des effets ainsi engendrés et leur quantification de façon à pouvoir les prendre en compte dans l'étude des systèmes.

Nous précisons ci-après quelques grands thèmes d'étude actuels.

Maîtriser les conséquences de l'amplification optique localisée

En plus de l'introduction du bruit d'émission spontanée et de la gigue de position qu'il induit sur le signal, l'amplification optique, par sa nature localisée, conduit à une distribution non constante du niveau de signal en ligne, la variation relative de puissance optique sur un tronçon reliant deux amplificateurs pouvant dépasser un facteur 10. Cette distribution est rappelée sur la figure 3. Elle semble *a priori* incompatible avec la possibilité d'équilibre recherché dans lequel l'effet Kerr est directement fonction de la puissance optique. La robustesse du régime de propagation soliton aux stimuli extérieurs se traduit par un régime moyen de propagation qui tient compte de la puissance du signal moyennée spatialement sur la liaison. Au deuxième ordre, ce régime est toutefois affecté par les variations de la puissance autour de cette valeur moyenne. Quantifier les limites admissibles de cette perturbation (en termes de période et d'amplitude), c'est-à-dire rechercher les limites de validité du "soliton moyen", est un objectif déterminant pour la configuration du système. Cela permet d'en déduire l'espacement maximal tolérable entre répéteurs pour une atténuation de fibre et un traitement en ligne donnés, avec les conséquences économiques directes d'un tel résultat.

Réduire le bruit de position

Suivant la présentation faite précédemment, deux axes d'étude importants se dégagent aujourd'hui, à savoir le filtrage et la modulation en ligne.

■ Le filtrage en ligne

Le filtrage en ligne laisse espérer des réductions de gigue importantes. Il affecte également le niveau de bruit et modifie les forces d'interaction entre solitons. Une limite existe toutefois dans la sévérité du filtrage admissible, un filtrage trop étroit pouvant conduire à une destruction des impulsions. La détermination des caractéristiques de filtrage optimales doit prendre en compte ces différents effets.

Une technique dérivée permet d'utiliser des filtres nettement plus étroits, et donc de diminuer considérablement la gigue, tout en réduisant fortement le niveau de bruit. Les filtres sont disposés à des fréquences centrales légèrement décalées les unes par rapport aux autres. Le soliton, grâce à ses propriétés non linéaires, glisse en fréquence, alors que le bruit et les perturbations (qui sont en régime linéaire) ne peuvent suivre et sont absorbés par la cascade de filtres. En bref, la ligne devient transparente au signal et opaque aux bruits ! La maîtrise de ces techniques passe par une nécessaire quantification des tolérances sur la dispersion des paramètres des filtres. Pour les filtres décalés, s'ajoute la détermination de la vitesse de glissement optimale, elle-même fonction de la largeur des filtres.

■ La modulation en ligne

La modulation en ligne, qu'il est nécessaire de stabiliser par un filtrage complémentaire, conduit à un résultat remarquable : les niveaux de bruits et de gigue, croissant en début de propagation, se stabilisent ensuite à des valeurs indépendantes de la distance. Ce résultat, trop récent pour avoir été complètement exploré, ouvre la porte à la notion de régénération optique distribuée. Classiquement, la fonction (non linéaire) de régénération est avant tout un moyen d'élimination du bruit. Avec la propagation soliton, on dispose en quelque sorte d'une régénération distribuée tout au long de la liaison, dont l'effet n'est plus directement localisé dans le répéteur. A nouveau, les études portent sur les caractéristiques d'un couple modulation-filtrage optimal, et sur l'évaluation de ses tolérances

A terme, exploiter les autres degrés de liberté du soliton

Les études de propagation couvrent aussi l'exploitation des autres degrés de liberté du soliton parmi lesquels nous pouvons citer :

- la possibilité de transmettre plusieurs trains de solitons à des longueurs d'onde différentes (multiplex en longueur d'onde),
- l'utilisation de la polarisation comme moyen de discrimination,
- l'utilisation des paramètres de phase et d'amplitude relative des impulsions pour réduire l'interaction et donc le bruit de position et ce, sans traitement en ligne.

Etudes des systèmes de transmission

L'objectif des études de système est l'identification des points de fonctionnement possibles pour le débit à transmettre et la longueur de la liaison. Pour ce faire, le taux d'erreur par élément binaire est l'élément de mesure principal, même s'il est difficilement accessible par des moyens non expérimentaux. Par ailleurs, dans la comparaison des points de fonctionnement, le critère de qualité retenu ne peut pas être exclusivement technique et devra aussi intégrer des paramètres économiques. Définition de l'architecture du système, choix et dimensionnement du traitement en ligne, choix de l'espacement entre répéteurs, détermination de la (des) longueur(s) d'onde de fonctionnement, du régime de fonctionnement des amplificateurs sont autant de tâches délicates s'appuyant sur une démarche la plus exhaustive possible.

La notion de meilleur point de fonctionnement est par ailleurs indissociable de celle de marges. Ces dernières ont pour but de quantifier les tolérances du système aux dérives de différents paramètres imputables au vieillissement des différents sous-ensembles ou à une éventuelle défaillance de l'un d'entre eux.

Là aussi, la nature non linéaire de la propagation modifie l'approche habituelle en la matière. Par exemple, se garantir une protection accrue vis-à-vis des bruits d'amplitude par un excès de puissance en ligne n'est plus possible, cette dernière étant une des caractéristiques principales définissant le régime de fonctionnement. Redéfinir le formalisme, anticiper les conséquences sur les exigences de fiabilité font aussi partie intégrante des études de système à solitons.

Les approches

Des approches complémentaires

Trois approches complémentaires sont généralement utilisées dans les études de propagation et de système décrites précédemment :

- une approche par modélisation analytique des phénomènes,
- une approche par simulation du système ou d'une de ses parties,
- une approche expérimentale.

L'approche par modélisation analytique consiste en deux étapes : la mise au point de modèles, qui comprend leur validation, puis leur exploitation dans le cadre de l'étude. La mise au point des modèles contribue aussi de manière significative à la compréhension de phénomènes observés soit par l'intermédiaire de simulations, soit par expérimentations, et à leur interprétation physique. L'exploitation de ces modèles est double : d'une part l'identification par des moyens rapides des domaines d'investigation *a priori* utiles dans le cadre de l'étude du système en cours, domaines à analyser ultérieurement plus finement par d'autres techniques ; d'autre part, leur insertion, en tant que modèle de représentation d'un sous-ensemble, dans une modélisation numérique globale du système.

Complexe dans le cas de la propagation soliton, l'approche par modélisation s'appuie principalement sur l'application de la théorie des perturbations à l'équation de Schrödinger non linéaire.

L'approche par simulation numérique permet de quantifier les performances du système le plus fidèlement possible. L'influence de chacun des paramètres est ainsi accessible sans avoir recours à des expérimentations délicates. Malgré les progrès considérables de l'informatique ces dernières années, la simulation d'un système transocéanique reste une tâche lourde obligeant à traiter des tranches de signal temporel de durée réduite (typiquement inférieure à 100 symboles). Il en résulte une difficulté d'accès au taux d'erreur.

Reste enfin l'approche expérimentale indispensable et complémentaire des deux approches précédentes. Cette approche couvre deux volets. Le premier concerne l'analyse des phénomènes physiques à l'étude par des moyens de laboratoire. Le second porte sur les démonstrations de faisabilité de transmission par solitons.

Les contraintes de l'approche expérimentale

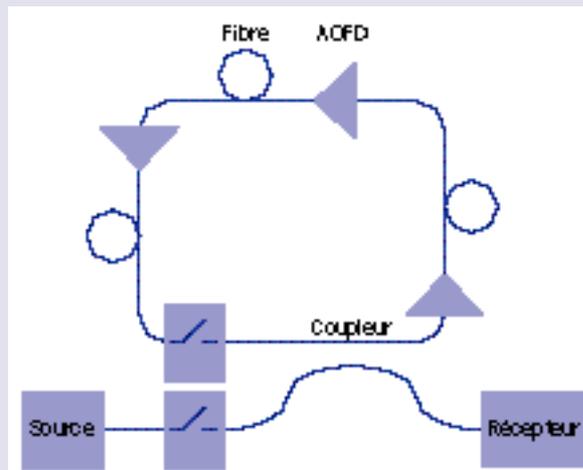
Reproduire en laboratoire une transmission de 9 000 km nécessiterait un effort humain et financier considérable. Par ailleurs, une telle liaison expérimentale ne présenterait pas les caractéristiques d'adaptabilité et de versatilité demandées à un outil d'investigation. La boucle à recirculation, dont le principe est de piéger une tranche de signal sur un tronçon de ligne comprenant un ou plusieurs répéteurs et disposé en boucle, apporte une solution élégante au problème posé. L'encadré n° 3 donne un principe de réalisation d'une telle boucle et en précise les principales contraintes. En faisant varier, de manière synchrone avec le chargement de la boucle, la fenêtre temporelle d'observation du signal en sortie du coupleur, on peut ainsi visualiser et mesurer le signal après une distance de transmission quelconque.

Encadré n° 3 - La boucle à recirculation

La boucle à recirculation amène des contraintes dont l'expérimentateur doit tenir compte :

- le signal observable est discontinu ce qui rend les mesures basées sur un moyennage délicates voire impossibles ;
- la répartition statistique des défauts en ligne risque d'être fortement biaisée par rapport à une liaison réelle ce qui peut entraîner soit une pénalisation par accumulation soit une amélioration par absence des pires cas ;
- la ligne ainsi constituée présente un excès d'atténuation (donc de bruit) dû aux organes de couplage et de commutation.

D'une manière générale, les effets de ces contraintes diminuent en augmentant la longueur de la boucle.



Exemple de boucle à recirculation.

Conclusions et perspectives

Les systèmes transocéaniques ont constitué le domaine d'application privilégié de la transmission soliton pour au moins deux raisons :

- leur très longue portée rend leur régime de fonctionnement naturellement non linéaire,
- aucune contrainte (fiabilité mise à part) n'est imposée sur la constitution du système, ce qui autorise une certaine flexibilité de conception.

Simple ligne de transmission point à point, c'est l'application de base exploitant au mieux mais uniquement les propriétés de propagation du soliton. Les autres applications potentielles du soliton concernent la transmission avec contraintes mais aussi la commutation optique.

Nous en donnons ici deux exemples.

Les liaisons terrestres à longue distance

Les réseaux terrestres à haut débit actuels sont organisés en réseau maillé et mettent en œuvre des systèmes régénérés, la portée maximale étant typiquement de 90 km. L'introduction prévisible de l'amplification optique dans ces réseaux va sensiblement en modifier les contraintes de portée. Les réflexions actuelles menées au niveau européen font référence à des systèmes de transmission multigigabit/s sur des distances de l'ordre de 1 000 à 2 000 km. Bien que ces distances soient sensiblement inférieures à celles des systèmes sous-marins, la conception de tels systèmes nécessite des études particulières qui, entre autres, devront prendre en compte les deux contraintes suivantes. La première est un positionnement des répéteurs basé sur l'infrastructure existante, c'est-à-dire acceptant des espacements variables et pouvant atteindre 90 km. La seconde est la compatibilité avec une fibre de ligne dont la dispersion des paramètres

critiques sera plus défavorable que celle de la fibre d'un câble sous-marin.

On envisage pour ces systèmes des débits dans la plage 10-40 Gbit/s. Ils constitueraient la charpente d'un super-réseau paneuropéen, alimenté en ses nœuds par les réseaux nationaux existants.

Les réseaux locaux

A l'autre extrémité dans l'échelle des distances, les réseaux locaux à très haut débit (typiquement 100 Gbit/s) conduisent eux aussi, même sur des distances de quelques dizaines de km, à des problèmes de propagation pour lesquels le soliton peut à nouveau être une solution élégante. En effet, les fonctions d'insertion-extraction nécessaires pour les entrées-sorties du réseau peuvent être réalisées en utilisant une autre caractéristique des solitons. Construisant le signal véhiculé par multiplexage temporel de signaux au débit élémentaire, ces derniers peuvent être extraits du signal global ou insérés dans les intervalles de temps disponibles.

Les procédés optiques à mettre en œuvre utilisent la robustesse de l'impulsion soliton et sa caractéristique de phase constante sur toute sa durée, ce qui la rend facilement commutable. La seule contrainte d'un tel réseau, par exemple de structure en anneau, reste la gestion de sa synchronisation. En plus des fonctions de commutation, les moyens de récupérer optiquement, c'est-à-dire sans conversion optique-électrique, l'information de synchronisation en tous points du réseau doivent alors être maîtrisés.

Vers la régénération optique

L'opération de régénération électrique du signal, fondement de la transmission numérique, a permis de rendre les performances des systèmes de transmission quasiment indépendantes de la distance. Pour les raisons que nous avons rappelées, l'amplification optique constitue une étape importante dans l'évolution des systèmes sur fibres, même si elle remet en cause cette indépendance. Avec la transmission par solitons, c'est la possibilité de régénérer optiquement, c'est-à-dire sans conversion vers l'électrique, qui se dessine. Elle a été déjà expérimentée sous forme distribuée. La régénération optique localisée, aussi basée sur l'exploitation des propriétés non linéaires des impulsions transmises, constitue un objectif ambitieux mais réaliste. Elle doit donner à la transmission "tout optique" tous les bénéfices attendus d'un système de transmission numérique. C'est un domaine d'études majeur de ces prochaines années.