

Déploiement d'infrastructures DWDM : retour d'expérience de RENATER

Emilie Camisard
GIP RENATER
emilie.camisard@renater.fr

Thierry Bono
GIP RENATER
thierry.bono@renater.fr

Résumé

Le GIP RENATER a enrichi son expérience en termes de conception et mise en œuvre de réseaux DWDM, à travers les récents déploiements de fibre optique noire (FON) pour RENATER-4 et en Île-de-France.

Des étapes de réflexion indispensables à l'installation et à l'opération d'une infrastructure optique ont ainsi pu être décelées et validées.

Après une analyse des besoins des utilisateurs en ressources réseau, une topologie peut commencer à être ébauchée, en sélectionnant les technologies à utiliser (C ou DWDM, solution de sécurisation, etc.). Puis les caractéristiques des FON permettent de déterminer la gamme d'équipements la plus adéquate (métropolitaine, régionale ou longue distance). Il est ensuite possible de procéder à la livraison des FON et à l'installation des matériels optiques. Enfin, la totalité de l'infrastructure mise en place est validée définitivement par analyse des résultats des recettes de liaisons.

Mots clefs

Fibre optique noire, technologies optiques, DWDM, RENATER

1 Introduction

De grands changements en termes d'infrastructure optique sont survenus sur RENATER durant ces deux dernières années : de la fibre optique noire (FON) a été déployée en 2005 pour le réseau RENATER-4 et en 2006 sur une partie de l'infrastructure RENATER en Île-de-France.

Cet article se propose de présenter à la communauté RENATER les enseignements tirés de ces deux expériences, certes parfois issus de problématiques propres aux transmissions longue distance, mais dont les grandes lignes et principes peuvent être facilement adaptés à d'autres.

La première partie du document décrit les besoins qui ont conditionné le choix des technologies optiques et les deux suivantes se focalisent sur les critères de conception d'une architecture réseau basée sur de la FON, puis sur le déploiement de liaisons DWDM.

2 Les besoins exprimés

2.1 Entre les NR de province

Des besoins en très haut débit ont été identifiés notamment pour de grands projets de grilles. L'infrastructure RENATER-3, avec ses liaisons louées à 2,5 Gbit/s, n'offrait pas les ressources suffisantes pour satisfaire cette demande. Dès lors, ce sont des solutions à base de FON, permettant d'utiliser des interfaces optiques à 10 Gbit/s, qui ont été privilégiées pour répondre à ces besoins.

L'idéal aurait été de pouvoir, dès RENATER-4, disposer de suffisamment de FON de manière à être capable d'effectuer des bouclages physiques pour assurer une sécurisation des trafics au niveau transport (couche optique). Ceci ayant semblé difficilement réalisable en 2005, un objectif plus réaliste a été fixé, consistant en une interconnexion DWDM point à point des différents nœuds RENATER (NR) sur lesquels étaient raccordés les sites participant aux projets scientifiques déjà identifiés.

Ainsi, le trafic lié à des projets de recherche serait transporté via l'infrastructure FON sur laquelle des longueurs d'ondes à 10 Gbit/s peuvent être activées, tandis que le reste du trafic emprunte l'infrastructure de liaisons louées plus classiques (liens 2,5 Gbit/s). L'architecture WDM mise en place au démarrage de RENATER-4 permet une capacité minimum garantie de huit canaux DWDM sur chaque tronçon de fibre et de seize canaux sur l'axe Paris-Lyon.

Certains éléments vitaux d'un réseau optique peuvent être déclinés en différents modèles techniques. C'est notamment le cas des multiplexeurs/démultiplexeurs qui peuvent filtrer soit des longueurs d'ondes (par exemple deux, quatre ou huit), soit des bandes de spectre lumineux. On peut également penser à l'amplification qui peut être réalisée par canal DWDM ou par ligne (on amplifie alors le multiplex des canaux).

En fonction de la technologie employée, le nombre de ports disponibles par carte peut donc varier significativement, de même que la facilité à installer de nouvelles longueurs d'ondes sur des équipements existants. Du choix des équipements dépend donc le coût incrémental d'ajout d'une longueur d'onde sur une liaison et il peut également être intéressant de repérer les différents paliers financiers induits par les ajouts de cartes ou châssis supplémentaires.

2.2 En Île-de-France

L'objectif recherché pour les évolutions du réseau était de remplacer l'infrastructure de liaisons louées entre les principaux NR (Interxion, Jussieu, Cachan et Orsay) par un anneau en FON. Une telle architecture réseau assure ainsi une sécurisation des trafics de production et de projets, qui seront amenés tous deux à circuler sur la fibre.

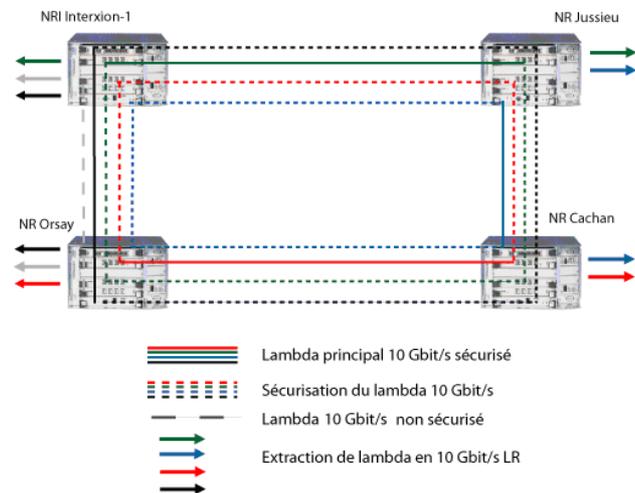


Figure 1 – DWDM en Île-de-France

3 Architecture des réseaux

3.1 Les fibres optiques

La fibre optique est le premier élément à prendre en compte pour élaborer l'architecture future d'un réseau. Ce sont en effet les caractéristiques physiques des liens qui conditionnent en grande partie le type d'équipements optiques à utiliser.

Identification des chemins FON et points possibles d'amplification ou régénération

Il est notamment primordial de connaître le trajet physique de chaque paire de FON. La représentation graphique du cheminement des fibres constitue un moyen simple de déceler d'éventuels tronçons communs à plusieurs liaisons – à éviter pour obtenir une sécurisation optimale du réseau. Ensuite, connaître le positionnement des « shelters » (locaux de ré-amplification ou régénération en ligne), la longueur des liaisons et leur affaiblissement à différentes longueurs d'ondes, permet de vérifier leur adéquation avec le budget optique des équipements WDM proposés par les constructeurs. On peut ainsi en déduire les gammes de châssis et cartes qui auront la capacité de ré-amplifier suffisamment les signaux pour les transporter de bout en bout.

Identification des points de terminaison des FON

Il est de plus préférable de connaître la localisation exacte des extrémités des liaisons optiques dans chaque ville, afin

d'évaluer dès le début du projet si des travaux seront à réaliser entre le point de présence du fournisseur de FON et le nœud RENATER. Si une prolongation de la fibre est jugée nécessaire, il faut alors en tenir compte dans les calculs de bilan optique.

Choix du type de FON

Le type de fibres utilisées doit aussi être connu et donne une idée des longueurs d'ondes que l'on pourra vraisemblablement utiliser, mais aussi des phénomènes de dispersion ou d'interférences que l'on pourra rencontrer. Deux principaux types de fibres sont à distinguer, désignés par leur numéro de recommandation UIT-T :

- La G.652, ou SMF (Single-Mode Fiber) est une fibre au départ dédiée aux réseaux métropolitains, car caractérisée par une dispersion chromatique nulle à 1310 nm. Toutefois, elle est maintenant également utilisée pour de la longue distance car le minimum d'atténuation de la lumière sur cette fibre est localisé à 1550 nm.
- La G.655, ou NZ-DSF (Fibre à dispersion décalée non-nulle) a été créée spécialement pour le transfert de données à très haut débit ($n \times 10$ Gbit/s ou 40 Gbit/s), sur de longues distances et en utilisant des longueurs d'ondes situées dans les bandes C et L. La dispersion chromatique et l'atténuation provoquées par une fibre de ce type sont en effet très faibles pour une longueur d'onde de 1550 nm.

La G.655 a également la particularité de pouvoir compenser une partie des interférences qui peuvent devenir problématiques sur des longueurs d'ondes supérieures ou égales à 10 Gbit/s.

Choix des débits et analyse de PMD pour les FON

Si des débits de l'ordre de 10 ou 40 Gbit/s sont prévus (la tolérance dépend du constructeur choisi), il peut être aussi nécessaire de connaître des résultats de mesure de PMD (Dispersion de Mode de Polarisation) pour s'assurer qu'il ne faudra pas prévoir de compenser une dégradation supplémentaire des signaux lumineux.

3.2 Les gammes d'équipements

L'ensemble des informations énumérées précédemment et le nombre de canaux DWDM souhaités sur chaque lien permettent au constructeur d'équipements optiques de fournir le scénario le plus réaliste et affiné possible, avec le détail des châssis et cartes à utiliser.

L'étude d'un scénario de déploiement et d'exploitation d'un réseau optique demande du temps. Il faut donc avoir intégré dans son planning un certain délai pour qu'elle puisse être réalisée.

Les transmissions optiques actuelles sont en général basées sur des solutions de multiplexage spectral, ou WDM (Wavelength Division Multiplexing). On injecte alors dans une même fibre plusieurs signaux lumineux de longueurs

d'ondes différentes, en se réservant la possibilité d'extraire ou insérer les signaux de son choix à chaque nœud du réseau. Deux principales sortes de WDM existent :

- Le CWDM (Coarse WDM) permet de transporter de manière simple jusqu'à seize longueurs d'ondes sur de courtes distances (60 à 80 km), car il n'existe actuellement pas d'amplificateurs de bandes de canaux CWDM. Le spectre utilisé s'étend de 1270 à 1610 nm. L'espacement entre chaque canal est très important (20 nm) et les émetteurs/récepteurs lasers peuvent subir quelques décalages en longueur d'onde sans que les signaux soient perdus. On peut ainsi s'affranchir d'un asservissement des lasers en température et c'est notamment ce qui rend le CWDM financièrement attractif.
- Le DWDM (Dense WDM) est une solution adaptée au transport de dizaines de canaux à haut débit sur de longues distances (de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de kilomètres), en les ré-amplifiant éventuellement. L'espacement entre les longueurs d'ondes est très faible : de 0,1 à 1,6 nm. Les lasers doivent donc être contrôlés en température pour éviter toute déviation des longueurs d'ondes sur le spectre. L'utilisation d'électronique et de photonique de précision justifie les différences de coûts entre C et DWDM.

En outre, on peut classer les équipements DWDM en fonction de leur portée. On distingue généralement chez les constructeurs les gammes « métropolitaines », « régionales » ou encore « longue distance ». Plus on sera exigeant sur la distance que les signaux lumineux seront capables de parcourir sans ré-amplification ou régénération, plus il faudra faire appel à des technologies de pointe qui augmenteront le coût des installations.

Les gammes métropolitaines, adaptées comme leur nom l'indique aux réseaux d'accès, intègrent en général des fonctions très intéressantes d'agrégation de données (par exemple, agrégation via une seule longueur d'onde à 10 Gbit/s de plusieurs signaux Gigabit Ethernet) et offrent de la souplesse pour augmenter le nombre de canaux DWDM sur les liens. Cette gamme d'équipements était donc particulièrement adaptée à l'architecture souhaitée en Île-de-France.

Pour le backbone national RENATER-4, bien qu'intéressés par les mêmes fonctions de la gamme métró, on a dû en revanche faire face à des distances entre NR plus importantes, jusqu'à 460 km. Une solution « hybride » entre métró et régional a de ce fait été retenue. Ainsi, dans les NR, on retrouve les équipements suivants :

- Un châssis Alcatel 1626 Light Manager (gamme régionale) permet de bénéficier de transpondeurs plus adaptés à la longue distance, car plus sensibles en réception et capables d'émettre des signaux DWDM à forte puissance.
- Les canaux DWDM sont ensuite multiplexés et amplifiés par des cartes montées dans un châssis Alcatel 1696 Metro Span, de gamme métropolitaine.

Pour les opérations de ré-amplification effectuées dans les « shelters », on a suivi le même principe en installant une version compacte d'un châssis de gamme métropolitaine et les amplificateurs associés.

La régénération nécessite l'utilisation de multiplexeurs et de transpondeurs : on utilise alors les mêmes équipements DWDM que dans les NR.

Par cette association d'équipements de la gamme « métró » et « régional », le meilleur compromis entre flexibilité du nombre de longueurs d'ondes, possibilités d'agrégation de services et coûts est ainsi constitué.

Dans RENATER, les architectures tiennent également compte de l'évolutivité possible du nombre de longueurs d'ondes utilisées sur chaque liaison : en province, jusqu'à huit à seize canaux sur chaque FON suivant les axes. Entre les NR parisiens, l'architecture mise en place permet d'évoluer jusqu'à quarante canaux par liaison FON.

3.3 Ré-amplification et régénération

Un signal lumineux parcourant de grandes distances dans une fibre perd progressivement de sa puissance et sa qualité devient moins bonne. Ceci est principalement dû à deux phénomènes causés par les propriétés intrinsèques de la fibre. Il y a d'une part une atténuation de la lumière provoquée par l'absorption des photons par la silice de la fibre (-0,20 dB/km). D'autre part, chaque canal DWDM subit un étalement temporel nommé « dispersion chromatique », causé par le fait que des photons ne circulent pas à la même vitesse si leur longueur d'onde n'est pas identique (17 ps/nm par kilomètre de fibre G.652 parcourue).

Lors du déploiement de liaisons de plusieurs centaines de kilomètres comme dans RENATER-4, ces deux phénomènes limitants sont à prendre en considération, en prévoyant de ré-amplifier ou régénérer régulièrement les canaux DWDM.

L'opération la plus communément réalisée dans les « shelters », localisés tous les 80 à 120 km, consiste en une ré-amplification de signaux et une compensation de la dispersion chromatique accumulée sur le dernier « span » (saut entre chaque point de ré-amplification et/ou régénération). Cette opération est nommée « 2R », pour « Re-amplify, Re-shape ». Elle ne permet toutefois pas d'épurer le signal de ses bruits parasites.

Lorsqu'un lien comporte plusieurs « spans », ceci pose alors un problème : l'atténuation provoquée par la fibre oblige à cascader des amplificateurs qui émettent tous spontanément une certaine quantité de bruit. Au niveau de chaque « shelter », ce sont donc aussi les données et le bruit qui sont amplifiés. Au-delà d'une certaine distance, le bruit devient prépondérant et le signal à transmettre devient inexploitable. Il est alors nécessaire de régénérer le signal lumineux. A l'aide de deux transpondeurs, on le convertit alors en un signal électrique, qui est lui-même reconverti en une longueur d'onde débarrassée de l'ensemble de ses bruits et défauts : cette régénération est alors nommée 3R, pour « Re-amplify, Re-shape, Re-time ».

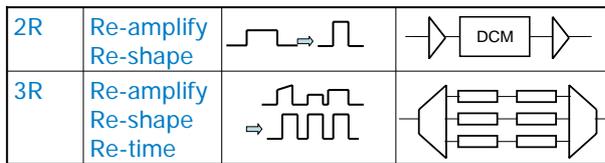


Figure 2 – Ré-amplification et régénération d'un signal lumineux

Dans le projet RENATER-4, les caractéristiques physiques des fibres ont permis de prévoir de mauvais rapports signal/bruit en deux points du réseau, avant même le déploiement de celui-ci. Cette réflexion préalable n'est pas à négliger car les coûts engendrés par du 3R sont plus importants que pour du simple 2R. Heureusement, l'insertion de fonctions 3R dans un réseau optique demeure tout de même une opération exceptionnelle.

En Île-de-France en revanche, on a pu se passer de ré-amplification en ligne car les distances entre les NR sont relativement courtes : une simple amplification 1R (« Re-amplify ») suffit aux extrémités des lignes.

3.4 La sécurisation de liens

La sécurisation de liens optiques est basée sur l'utilisation d'un chemin physique de secours, en considérant plusieurs variantes : on peut soit re-router les données sur un chemin alternatif non utilisé en temps normal, soit utiliser un arc non endommagé d'un anneau destiné à la production.

D'autre part, il est possible de sécuriser des liaisons soit en assurant une redondance au niveau de chaque canal DWDM, soit en raisonnant par ligne (l'ensemble des signaux multiplexés sur une fibre).

Quelle que soit la solution choisie, on sera amené à utiliser des modules de protection qui assurent la commutation rapide entre les cartes redondées : transpondeurs pour la sécurisation par canal, multiplexeurs pour la sécurisation par ligne.

Dans le réseau projets de RENATER-4, une architecture en étoile à double cœur (Paris et Lyon) a été retenue. La sécurisation est limitée et le trafic est restreint au transport de données de projets.

En Île-de-France, un niveau de sécurisation élevé a pu être mis en place. D'abord, la boucle en FON entre les quatre principaux NR assure une redondance des chemins physiques. Dans chaque NR, les canaux sont protégés et peuvent être re-routés rapidement du sens Est - Ouest au sens Ouest - Est et vice-versa. Ensuite, en cas d'incident, l'opérateur retenu est capable de fournir rapidement des

chemins alternatifs le temps que le lien primaire soit rétabli. Enfin, un re-routage au niveau IP est également possible.

Le passage d'un chemin primaire à un chemin alternatif s'effectue en transparence en utilisant des VOA (Atténuateurs Optiques Variables) pour adapter la puissance des signaux lumineux à la longueur du lien utilisé, et des DCU (Unités de Compensation de Dispersion) automatiques.

3.5 Topologies

Dans le réseau RENATER, en fonction des opérateurs retenus, le type de FON sur RENATER est soit de la G.652, soit de la G.655 avec une boucle locale en G.652.

Sur RENATER-4, des longueurs d'ondes de 10 Gbit/s ont été activées et dédiées à de grands projets scientifiques et/ou de grilles comme Grid'5000 ou LHC. Pour cela, une grande partie des NR auxquels des sites directement impliqués dans ces projets sont raccordés, ont été reliés en point-à-point par de la FON. Chaque NR est considéré comme un point d'insertion-extraction de canaux DWDM, appelé OADM (Optical Add and Drop Multiplexer).



Figure 3 – FON sur RENATER-4

Dans les NR, les liaisons provenant de différents projets sont agrégées si besoin par un commutateur. Les trames Ethernet obtenues sont envoyées sur des transpondeurs qui les convertissent en signaux DWDM d'un espacement de 100 GHz. Ceux-ci sont ensuite multiplexés et amplifiés, puis injectés dans la FON.

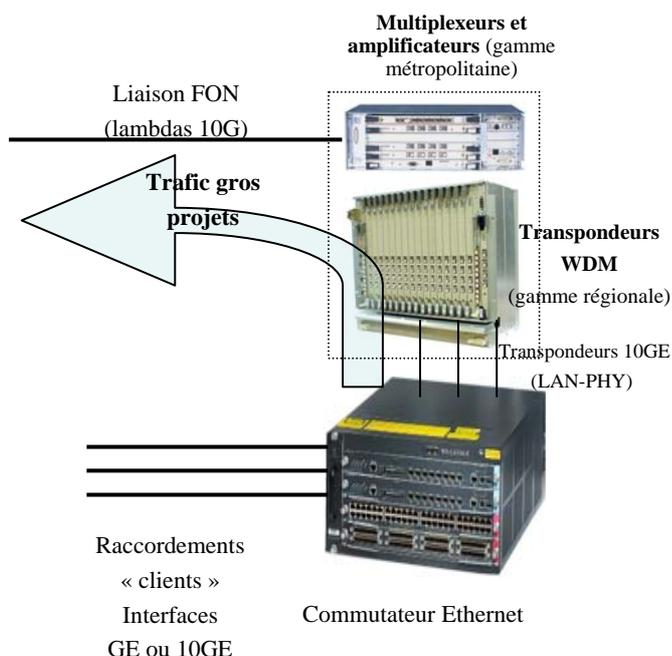


Figure 4 – Nœud RENATER-4 DWDM

En Île-de-France, un bouclage des NR d'Aubervilliers, Jussieu, Cachan et Orsay a été réalisé avec de la FON. Les trafics de production et de projets circulent dans les mêmes fibres, mais des canaux DWDM distincts leur sont dédiés.

3.6 Interconnexion d'équipements hétérogènes

Lors du déploiement de RENATER-4, l'unique solution pour faire circuler des données de bout en bout à travers des équipements WDM de différents constructeurs, était de revenir au niveau 2 entre les différents châssis. C'est donc ce scénario qui a été retenu dans RENATER, où par exemple les données provenant d'Île-de-France sont converties en trames 10 Gigabit Ethernet avant d'être envoyées vers des transpondeurs d'équipements RENATER-4, et vice-versa.

Aujourd'hui, la situation a évolué en termes de technologie. Il est maintenant possible de transporter des signaux DWDM à 10 Gbit/s (appelés « lambdas étrangers ») en passant à travers des équipements hétérogènes. Toutefois, la supervision des signaux de bout en bout demeure délicate, car des solutions propriétaires sont communément implémentées dans les équipements optiques : codes correcteurs d'erreurs, solutions de supervision et bits de contrôle ne sont pas toujours compatibles d'un constructeur à l'autre.

4 Déploiement et opération

4.1 Installation des liens et recette optique

Si de la fibre est déjà présente entre les PoP opérateurs dans les différentes villes, on est amené à compléter la liaison jusqu'au NR, avec une double adduction pour sécuriser la boucle locale. Du génie civil peut donc être à prévoir dans

les rues, campus ou bâtiments pour installer des fourreaux ou tirer des câbles.

On effectue ensuite un bilan optique de liaison pour vérifier que les caractéristiques des fibres proposées sont dans la tolérance définie par le cahier des charges. Quand les résultats ne sont pas conformes à ceux attendus, il est demandé à l'opérateur d'entreprendre de nouveaux travaux. Dans RENATER-4, on a par exemple cherché à minimiser l'atténuation de certains liens en faisant remplacer des connecteurs optiques (0,3 à 0,5 dB d'atténuation) par des soudures (0,1 dB seulement). Toutefois, les objectifs donnés par les opérateurs sont en général relativement larges. L'atténuation mesurée, de 0,25 dB/km en moyenne, est souvent inférieure à celle prévue. Ceci a un impact sur le paramétrage des équipements et notamment sur les amplificateurs, qui permettent des sauts de 35 dB au maximum.

Des contre-valeurs sont obtenues lors de l'installation des matériels DWDM, car les liaisons sont alors de nouveau contrôlées. Le test des liaisons est effectué en raccordant une extrémité du lien à une valise compteuse (délivrant éventuellement du trafic SDH) et en rebouclant l'autre extrémité. Des tests de réflectométrie sont aussi réalisés et permettent de contrôler la longueur des FON, leurs atténuations et la localisation précise d'éléments perturbant la lumière : épissures, connecteurs, bandeaux optiques, défauts du câble.

Une fois les valeurs de l'ensemble des mesures examinées et comparées, la recette peut être validée.

Puis, des tests complémentaires sont réalisés si le service à fournir de bout en bout est de l'IP. On envoie alors des paquets (pings) sur le lien pendant 24 heures et les statistiques sont ensuite analysées.

4.2 Outils et solutions de supervision

La supervision de l'infrastructure DWDM est réalisée grâce à des plates-formes installées au NOC RENATER, propriétaires aux équipementiers. Elles sont interrogeables à distance et peuvent aussi intégrer des fonctionnalités standard comme SNMP. Ce sont les informations concernant chaque baie, châssis, carte et port qui sont remontées, et non pas directement l'état des circuits optiques.

Les données de supervision peuvent être récupérées de deux manières. Tout d'abord, on peut, comme dans RENATER, les transmettre par un canal de supervision (OSC : Optical Supervision Channel) sur la FON. La solution est alors appelée In-Band car les trafics de production et de supervision utilisent le même médium. L'inconvénient est toutefois qu'il n'est en général pas possible de ré-amplifier l'OSC, d'une longueur d'onde de 1510 nm dans le cas des équipements retenus sur RENATER. Il faut donc vérifier lors de la recette des liens qu'il pourra être transporté de bout en bout.

Les données peuvent également être envoyées à la plate-forme de supervision sans emprunter la fibre de production : c'est alors de l'Out-Of-Band (OOB). En cas d'incident sur

la FON RENATER-4 et donc d'impossibilité de supervision In-Band, on peut mettre en place une solution OOB pour faire remonter des informations sur les équipements d'un NR, en utilisant les liaisons WDM louées à 2,5 Gbit/s. Selon les constructeurs, la supervision OOB s'effectue en IP ou en OSI. Dans ce dernier cas, des tunnels OSI sur IP s'avèreront indispensables pour pouvoir remonter les données.

Il arrive qu'une topologie particulière de réseau empêche une supervision classique des équipements optiques par un OSC ou en OOB sans emprunter le medium de production. Une solution intermédiaire peut alors être envisagée, en faisant circuler les données de supervision en OOB dans la FON de production, par un canal DWDM dédié qui n'est pas l'OSC du tronçon.

Ensuite, en arrivant sur un NR d'où il est possible de joindre le NOC via les liaisons louées, la longueur d'onde est démultiplexée et les informations sont envoyées à la plateforme de supervision en passant par les commutateurs et routeurs de RENATER.

4.3 Gestion des incidents

La gestion des incidents survenant sur une liaison optique diffère de celle réalisée sur un lien IP. Un re-routage IP peut être effectué en peu de temps, tandis que la durée d'une réparation d'une FON peut fluctuer, que l'on ait un connecteur à réparer ou que l'on doive localiser un point de rupture en ligne puis reposer de la fibre sur une centaine de mètres. De ce fait, on distinguera deux modèles d'application de la GTR (Garantie de Temps de Rétablissement) sur une FON, selon que l'incident détecté ait été qualifié de mineur ou de majeur. En pratique, un incident mineur devra être corrigé en 4 heures, tandis que la GTR relative à un incident majeur pourra s'étendre à 24 heures ou plus.

La maintenance des équipements optiques, en revanche, est similaire à celle des routeurs et commutateurs.

5 Conclusion

La planification et le déploiement d'un réseau DWDM peut se résumer aux étapes suivantes :

- Evaluation des besoins : quels utilisateurs requièrent une solution optique, quels débits vont être nécessaires, quels PoP interconnecter ?
- Choix d'une technologie de multiplexage des longueurs d'onde dans la FON. Le CWDM est privilégié pour de courts trajets sans amplification et le DWDM pour de longues distances ou des débits plus importants.
- Détermination des modes de sécurisation et éventuellement d'amplification des circuits ou canaux WDM à utiliser.
- Validation de la topologie à mettre en place et de la liste des équipements à installer, par les études théoriques et pratiques des caractéristiques des FON.
- Après livraison des fibres, les équipements sont installés et une recette des liaisons a lieu.

Glossaire

1R : Re-amplify

2R : Re-amplify, Re-shape

3R : Re-amplify, Re-shape, Re-time

CWDM : Coarse Wavelength Division Multiplexing

DCU : Dispersion Compensation Unit

DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing

FON : Fibre Optique Noire

GTR : Garantie de Temps de Rétablissement

NOC : Network Operation Centre

NR : Nœud RENATER

OADM : Optical Add and Drop Multiplexer

OOB : Out Of Band

OSI : Open Systems Interconnection

OSC : Optical Supervision Channel

PMD : Polarization Mode Dispersion

PoP : Point of Presence

RENATER : Réseau national de télécommunications pour la technologie, l'enseignement et la recherche

SDH : Synchronized Digital Hierarchy

WDM : Wavelength Division Multiplexing