



Etude des réseaux optiques translucides : évaluation de leur faisabilité technique et de leur intérêt économique

Annalisa Morea

► To cite this version:

Annalisa Morea. Etude des réseaux optiques translucides : évaluation de leur faisabilité technique et de leur intérêt économique. domain_other. Télécom ParisTech, 2006. English. NNT: . pastel-00003161

HAL Id: pastel-00003161

<https://pastel.hal.science/pastel-00003161>

Submitted on 16 Jan 2008

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

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



Thèse

présentée pour obtenir le grade de docteur

de l'Ecole Nationale Supérieure
des Télécommunications

Spécialité : Informatique et Réseaux

Annalisa Morea

Contribution à l'étude des réseaux optiques translucides : évaluation de leur faisabilité technique et de leur intérêt économique

Soutenue le 27 octobre 2006 devant le jury composé de

Ing. Michel JOINDOT
Prof. Bernard COUSIN
Prof. Jean-Michel DUMAS
Dr Thierry ZAMI
Dr Esther Le ROUZIC
Prof. Maurice GAGNAIRE

Président
Rapporteurs

Examineurs

Directeur de thèse

Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications

Quid de rerum natura querimus?

*Illa se benigne gessit
vita, si uti scias, longa est.*

*...
exigua pars est vitae qua vidimus.
(Seneca, Cap. II, par. 1,2)*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Maurice Gagnaire d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse, Stéphane Gosselin de m'avoir offert la possibilité d'effectuer cette thèse à France Télécom Division Recherche & Développement, ainsi que Salim Gurib de m'avoir donné les moyens dans son unité de mener à bien cette thèse.

Mes remerciements les plus sincères vont à Esther Le Rouzic, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et a fortement contribué à ma formation sur les communications optiques. La bonne ambiance qui s'est créée quand nous avons travaillé ensemble et dans le bureau que nous avons partagé sera un souvenir marquant de cette thèse.

Je suis particulièrement honoré que Jean-Michel Dumas et Bernard Cousin aient accepté d'être rapporteurs de ce mémoire de thèse et que Michel Joindot et Thierry Zami fassent partie du jury.

Je tiens à remercier particulièrement Julien Poirrier et Benoît Charbonnier qui ont mis à disposition leur expertise pour permettre le bon déroulement de cette thèse et pour leur soutien dans le travail et en dehors. Les nombreuses discussions que nous avons eues m'auront été d'une aide précieuse.

Je remercie également Isabelle Boyer-Heard, Hélène L'Haridon, Huber Poignant pour m'avoir donné les informations concernant l'indisponibilité et les coûts des systèmes, permettant à ce travail d'obtenir des résultats intéressants parce que basés sur des hypothèses fournies par un opérateur.

Ce travail s'inscrit dans le projet RNRT RYTHME, je remercie donc tous les partenaires du projet avec qui j'ai pu travailler, avec lesquels j'ai toujours eu des échanges enrichissants.

Merci aussi aux différentes personnes de l'URD TALE qui m'ont permis d'acquérir des compétences pointues sur le réseau de transport au travers des discussions sur le domaine. Merci en particulier à Nicolas Brochier et Marc André pour avoir contribué à rendre mes journées au travail très agréables.

Merci également à tous les stagiaires, thésards et post-doc pour la très bonne ambiance et le soutien réciproque : Catherine, Franck, Thomas, Nayla, Christian, ...

Et pour finir, un grand merci à ma mère pour son soutien tout au long de ces années et à Ronaldo pour avoir toujours cru en moi.

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	ii
Table des figures	vii
Liste des tableaux	xii
Liste des abréviations	xiv
Introduction	1
1 Contexte des études	5
1.1 Le réseau de transport	5
1.2 Réseau opaque	8
1.3 Réseau transparent	10
1.3.1 Les avantages d'un réseau transparent	11
1.3.2 Les désavantages d'un réseau transparent	12
1.4 Les réseaux translucides	13
1.5 Enjeux des différents types de réseaux	14
1.6 Comparaison entre les performances des différents réseaux	15
1.7 Conclusions	16
2 Conception et dimensionnement des réseaux optiques hybrides	19
2.1 Nomenclature	19
2.2 Hypothèses sur le réseau	20
2.2.1 Matrice de trafic	20
2.2.2 Topologie du réseau	21
2.2.3 Structure des liens	22
2.2.4 Structure des nœuds	23
2.2.5 Sécurisation d'un réseau	24
2.3 Dimensionnement	26
2.3.1 Définition du modèle de réseau en couches	27
2.3.2 Choix de l'algorithme de dimensionnement utilisé	29
3 Fonctions optiques de transmission et de commutation dans un réseau optique hybride	33
3.1 Impact de la transparence sur l'ingénierie de transmission	34
3.1.1 Fibre	34

3.1.2	Amplificateurs optiques	35
3.1.3	DGE	36
3.1.4	Modules de compensation de dispersion chromatique	37
3.1.5	Transpondeurs	39
3.1.6	Régénération et conversion de longueur d'onde	39
3.1.7	Multiplexage/Démultiplexage	40
3.2	Brassage et commutation	41
3.2.1	Nœud opaque	41
3.2.2	Nœuds transparents	42
3.2.3	Nœuds hybrides	42
3.2.4	Absence de brassage automatique dans la couche optique	45
3.3	Fonctions de surveillance pour la sécurisation des réseaux	48
3.3.1	Organisation générale de la gestion de réseau	48
3.3.2	Problématiques soulevées par les réseaux de transport translucides	48
3.3.3	Gestion de performance envisagée dans un réseau transparent	49
3.4	Veille proactive	50
3.4.1	Détection, localisation et notification de l'origine de la panne	50
3.4.2	Déclenchement d'une alarme	50
3.5	Les systèmes optiques de surveillance (OPM)	51
3.5.1	Limites des contrôles opérés par les OPM	51
3.5.2	Une proposition opaque pour la résolution des problèmes de surveillance dans les réseaux transparents	52
3.6	Architecture de réseau proposée	53
3.7	Conclusions	57
4	Impact des imperfections de la couche physique sur la transmission	59
4.1	Description des effets	60
4.1.1	Effets linéaires	60
4.1.2	Effets non-linéaires	65
4.1.3	Vieillessement	66
4.2	Modélisation des effets considérés : accumulation et impact	66
4.2.1	Limite en transmission d'une connexion	67
4.2.2	Modélisation de l'OSNR le long de la ligne de transmission	69
4.2.3	Modélisation de la PMD	73
4.2.4	Modélisation de la dispersion chromatique	73
4.2.5	Effets non-linéaires	76
4.2.6	Effet du filtrage	80
4.3	Impact de l'architecture	80
4.3.1	Architecture des noeuds	81
4.3.2	Architecture des liens	83
4.4	Estimation de la qualité d'un signal	84
4.4.1	Méthode de la limite de transmission	85
4.4.2	Méthode du pire cas	85
4.4.3	Méthode empirique	85
4.4.4	Méthode des échanges des marges	86
4.4.5	Méthode choisie pour les études d'évaluation de la qualité de transmission d'un signal	86
4.5	Hypothèses	87

4.5.1	Hypothèses physiques	87
4.5.2	Définition des réseaux simulés	90
4.5.3	Définition du trafic utilisé pour effectuer les études	91
4.6	Présentation des résultats : mise en forme	91
4.7	Faisabilité physique des réseaux translucides	94
4.7.1	DC cas idéal	94
4.7.2	DC cas non idéal mais indépendant de la φ_{NL}	96
4.7.3	DC cas non idéal et dépendance de la φ_{NL}	98
4.7.4	DC cas non idéal et dépendance de la φ_{NL} avec l'introduction de la carte de dispersion adaptée à la longueur des liens	99
4.7.5	Impact de la granularité des modules de compensation et de la pente des fibres de compensation	100
4.7.6	Etude statistique de l'erreur de mesure	101
4.7.7	Validité des résultats obtenus dans les études avec la prise en considération des erreurs de mesure sur l'OSNR et la phase non linéaire	106
4.7.8	Validations du modèle de l'échange de marge vis à vis autres modèles présents dans la littérature	108
4.8	Conclusions	110
5	Modèle de coût et intérêt économique des réseaux optiques translucides	111
5.1	Coûts associés à un réseau	111
5.2	Définition du modèle de coût	112
5.3	Les modèles de coût choisis	113
5.4	Comportement d'un réseau transluide en fonction du modèle de coûts	116
5.4.1	Impact des modèles de coûts	119
5.4.2	Etude de la fourchette de prix	122
5.4.3	Impact de l'évolution dans le temps des prix des systèmes	123
5.4.4	Etude de sensibilité	124
5.5	Impact des évolutions technologiques des différents systèmes	128
5.5.1	Transpondeurs robustes	128
5.5.2	OPM économiques	130
5.5.3	Baisse de la pente des prix pour les systèmes de très longue portée	131
5.6	Evolution des architectures des nœuds opaques	132
5.6.1	Emploi de cartes colorées	133
5.6.2	Absence de matrice de brassage	134
5.7	Evolution des architectures des nœuds hybrides	135
5.7.1	Etude d'une architecture de nœud hybride avec une batterie de régénérateurs	136
5.7.2	Etude d'une architecture de nœuds présentant des OADM et des WSS	137
5.8	Impact de la protection	140
5.9	Impact de la matrice de trafic	142
5.9.1	Impact de la distribution du trafic	142
5.9.2	Etude générique	144
5.10	Considérations sur l'OPEX	146
5.10.1	Définition de l'OPEX	146
5.10.2	Etude de fiabilité	147
5.11	Conclusions	150

6 Comparaison technico-économique de l'introduction de la transparence dans différents types de réseaux	151
6.1 Hypothèses des études globales	152
6.2 Résultats du dimensionnement	152
6.2.1 Dimensionnement du réseau TI	153
6.2.2 Dimensionnement du réseau DT	154
6.2.3 Dimensionnement du réseau EBN	156
6.2.4 Dimensionnement du réseau NSFNET	157
6.3 Conclusions	158
Conclusions et perspectives	159
Conclusions	161
Perspectives	163
Annexes	164
A Description de l'outil de dimensionnement employé pour les études du chapitre 6	165
A.1 Description des poids administratifs	166
A.2 Description des options de routage	168
A.3 Description de l'outil	168
A.4 Cas opaque	169
A.5 Cas transparent	170
A.6 Cas translucide	171
B Etude de propagation de l'erreur de mesure	173
B.1 Impact des erreurs de mesure sur l'estimation des effets physiques	175
B.1.1 Erreur de mesure sur l'OSNR	175
B.1.2 Impact de l'erreur de mesure sur le gain des amplificateurs	175
B.1.3 Impact de l'erreur de mesure de l'atténuation des pas	176
B.1.4 Erreur due à l'incertitude de puissance	177
B.1.5 Erreur due à l'incertitude sur le facteur de bruit	177
B.2 Erreur de mesure sur la PMD	177
B.3 Incertitude sur la phase non-linéaire	178
B.4 Erreur de mesure sur la dispersion chromatique	179
B.5 Conclusions	180
C Caractéristiques des parcours utilisés dans les études de dimensionnement du chapitre 6	181
C.1 Réseau italien	181
C.1.1 Routage sans protection	181
C.1.2 Routage avec protection	182
C.2 Réseau allemand	183
C.2.1 Routage sans protection	183
C.2.2 Routage avec protection	183
C.3 Réseau paneuropéen	184
C.3.1 Routage sans protection	184
C.3.2 Routage avec protection	185
C.4 Réseau américain	185

C.4.1	Routage sans protection	185
C.4.2	Routage avec protection	186
Bibliographie		195
Liste des publications		197

Table des figures

1.1	Schématisation d'architecture d'un réseau transport optique (cœur, métro et accès).	6
1.2	Evolutions des couches d'un réseau de transport.	7
1.3	Architecture des couches réseau.	8
1.4	Représentation d'un réseau opaque.	9
1.5	Répartition des coûts dans une liaison optique avec deux longueurs et deux charges différentes.	10
1.6	Représentation d'un réseau transparent.	11
1.7	Représentation d'un réseau hybride (translucide).	14
2.1	Exemple de topologies de réseau : (a) à anneau et (b) maillé.	22
2.2	Exemple d'un lien physique (câble) bi-directionnel avec sa paire de fibres.	23
2.3	Structure bidirectionnelle d'un lien et représentation employée dans l'étude.	24
2.4	Représentation d'un nœud avec $2n$ ports bidirectionnels : demande bidirectionnelle en transit par le nœud N indiquée par la ligne pointillée et demande insérée/extraite du nœud en ligne continue.	25
2.5	Représentation d'un réseau en simple et sa projection sur les différentes longueurs d'onde (réseau en couches).	27
2.6	Types d'approches pour le routage d'un signal : (a) algorithme R+WA et (b) algorithme RWA& φ .	30
3.1	Schématisation des fonctions principales des liens et des nœuds.	34
3.2	Exemple de non uniformité de gain sur la bande optique.	35
3.3	Représentation d'une liaison optique entre deux nœuds avec la disposition des DGE et les amplificateurs double étage.	38
3.4	Exemple d'un site d'amplification en ligne comprenant un module de compensation de la dispersion chromatique.	38
3.5	Représentation d'un transpondeur.	39
3.6	Schématisation d'un dispositif de régénération réalisé par deux transpondeurs dos-à-dos (a) et un dispositif dédié (b).	40
3.7	Représentation d'un brasseur opaque avec des TSP plus ports opaques (a) ou des cartes colorées (b).	41
3.8	Exemple d'architecture de nœud hybride avec les dispositifs OEO greffés sur l'OXC (a) et externes (b).	43
3.9	(a) Nœud hybride avec une matrice OXC et une matrice EXC dédiée à la l'insertion/extraction et régénération des signaux ; (b) nœud hybride avec une matrice OXC sur laquelle l'EXC est dédié à l'insertion/extraction des signaux et avec une batterie de régénérateurs en parallèle ; nœud hybride sans matrice EXC et avec une batterie de régénérateurs et de transpondeurs.	44

3.10	Représentation d'un nœud privé de la matrice de brassage dans le cas opaque, (a), et hybride, (b).	46
3.11	Exemple d'organisation hiérarchique pour la gestion du réseau.	48
3.12	Représentation d'un nœud opaque.	54
3.13	Représentation d'un nœud hybride, dont la partie transparente est réalisée par la technologie MEMs.	55
3.14	Représentation d'un nœud hybride, dont la partie transparente est réalisée par la technologie WSS.	55
3.15	Représentation d'un R-OADM hybride, dont la partie transparente est réalisée par la technologie WB.	56
4.1	Décomposition d'un signal sur les deux PSP principaux.	61
4.2	Evolution de la dispersion chromatique dans une liaison. Les traits continus représentent l'évolution de la dispersion en ligne et les traits pointillés l'évolution de la dispersion dans les modules de compensation.	63
4.3	Modélisation de l'étude sur la qualité du signal transmis.	67
4.4	Evolution de l'OSNR pendant la propagation d'un signal.	70
4.5	Composition d'un site d'amplification en ligne à double étage.	71
4.6	Schématisation de l'amplificateur en ligne avec le DGE.	72
4.7	Exemple du comportement de migration et de rétrécissement de l'intervalle d'acceptabilité de la dispersion chromatique.	77
4.8	Structure d'un nœud en technologie MEMs et opérations possibles par un signal.	81
4.9	Structure d'un nœud en technologie WSS et opérations possibles par un signal.	82
4.10	Pertes dans un nœuds en technologie WSS en fonction du degré de connectivité et en fonction des opérations effectuées sur le signal.	83
4.11	Structure d'un nœud R-OADM en technologie WB et opérations possibles par un signal.	84
4.12	Organigramme de la méthode utilisée pour calculer la qualité du signal.	87
4.13	Schématisation d'architecture d'un réseau transport optique (cœur, métro et accès).	92
4.14	Portée optimale en fonction de la taille du réseau et de la distribution des demandes.	93
4.15	Limites de transmission déterminées par l'OSNR, la φ_{NL} , la PMD et le filtrage.	94
4.16	Degré de transparence et nombre moyen de régénérateur dans le cas idéal.	95
4.17	Limites de transmission déterminées par la DC sans considérer l'interaction avec φ_{NL} .	97
4.18	Degré de transparence et nombre moyen de régénérateurs pour tous les paramètres de la DC sauf l'interaction avec φ_{NL} .	97
4.19	Limites de transmission déterminées par la DC avec considérer l'interaction avec φ_{NL} .	98
4.20	Degré de transparence et nombre moyen de régénérateur pour tous les paramètres de la DC avec l'interaction avec φ_{NL} .	98
4.21	Degré de transparence et nombre moyen de régénérateurs avec la nouvelle carte de dispersion.	99
4.22	Limites de transmission déterminées par l'utilisation de modules à mauvais RDS.	101
4.23	Degré de transparence et nombre moyen de régénérateur avec l'utilisation de modules à mauvais RDS.	101
4.24	Limites de transmission déterminées par l'erreur de mesure statistique et systématique.	102

4.25	Limites de transmission déterminées par l'erreur de mesure statistique et systématique.	102
4.26	Régénérateurs en plus en cas d'erreur de mesure sur les paramètres de DC, PMD, OSNR et φ_{NL}	107
4.27	Régénérateurs nécessaires dans un réseau non-homogène si l'algorithme de calcul de la qualité du signal est celui proposé ou du <i>pire cas</i>	109
5.1	Nombre de dispositifs nécessaires dans les différents scénarios appliqués au réseau choisi. Les scénarios étudiés sont : opaque, translucide (pour les portées en kilomètres de 600, 1 400 et 2 000 km et la portée en nœuds de 5) et transparent (portée en kilomètres de 3 600 km et en nœuds de 11).	117
5.2	Nombre de brasseurs électroniques et optiques (en pourcentage) en fonction de leur taille et du scénario. Les scénarios étudiés sont : opaque, translucide (pour les portées en kilomètres de 600, 1 400 et 2 000 km et la portée en nœuds de 5) et transparent (portée en kilomètres de 3 600 km et en nœuds de 11).	118
5.3	Evolution du prix d'un réseau translucide vis-à-vis de celui du réseau opaque. . .	119
5.4	Distribution des parcours en fonction de la longueur équivalente des connexions et du nombre de nœuds par connexion.	120
5.5	Prix cumulé des dispositifs en fonction de la portée en kilomètres (portée en nœuds égale à 5).	121
5.6	Variation du rapport des coûts pour les prix associés aux fourchettes du modèle de coût (portée 5 nœuds).	122
5.7	Rapport des coûts du réseau translucide sur le réseau opaque avec une prévision des prix à 5 ans.	124
5.8	Etude de sensibilité sur les prix des amplificateurs.	126
5.9	Etude de sensibilité par rapport aux dispositifs optiques.	127
5.10	Etude de sensibilité par rapport aux dispositifs opaques.	127
5.11	Comparaison du coût du réseau translucide versus opaque avec l'introduction des TSP robustes avec un surcoût compris entre 0 et 100% par rapport aux TSP LH.	129
5.12	Comparaison du coût du réseau translucide versus opaque avec l'utilisation de OPM dans les nœuds du même type que celui présent dans les DGE.	130
5.13	Comparaison prix réseau translucide et opaque pour différentes caractéristiques de systèmes.	132
5.14	Evolution des prix des deux types de réseaux pour l'introduction de cartes colorées à la place de transpondeurs et ports opaques.	133
5.15	Comparaison du rapport de prix entre réseaux translucide et opaque pour un noeud avec et sans matrice de brassage.	135
5.16	Introduction de dispositifs de régénération dédiés.	136
5.17	Rapport de prix entre les deux réseaux pour l'emploi d'OADM dans les nœuds de degré 2 avec l'hypothèse classique et avec des cartes colorées.	138
5.18	Comparaison des prix d'un noeud réalisé en technologie WSS vis-à-vis de celui réalisé en technologie MEMs.	139
5.19	Rapport de prix entre les deux réseaux pour l'emploi de WSS dans tous les nœuds avec des transpondeurs classique ou des cartes colorées.	139
5.20	Distribution des parcours en kilomètres et noeuds traversés pour un trafic sans et avec protection.	140
5.21	Rapport de transparence obtenu pour le dimensionnement de la matrice de trafic sans et avec protection.	141

5.22	Comparaison de coûts entre le réseau pour un trafic avec protection.	142
5.23	Impact de la distribution du trafic.	143
5.24	Rapport de transparence obtenu pour le dimensionnement de la matrice de trafic sans et avec protection.	144
5.25	Portée optimale en fonction de la taille du réseau et de la distribution des demandes.	145
5.26	Comparaisons sur la fiabilité entre le réseau translucide et opaque.	149
6.1	Comparaison entre les scénarios opaque et translucide appliqués au réseau italien ; les carrées représentent le trafic $5 \times N$, les cercles indiquent le trafic $10 \times N$; les courbes représentent la moyenne de chaque distribution.	154
6.2	Comparaison entre les scénarios opaque et translucide appliqués au réseau alle- mand ; les carrées représentent le trafic $5 \times N$, les cercles indiquent le trafic $10 \times N$; les courbes représentent la moyenne de chaque distribution.	155
6.3	Comparaison entre les scénarios opaque et translucide appliqués au réseau pa- neuropéen ; les carrées représentent le trafic $5 \times N$, les cercles indiquent le trafic $10 \times N$; les courbes représentent la moyenne de chaque distribution.	156
6.4	Comparaison entre les scénarios opaque et translucide appliqués au réseau améri- cain ; Les carrées représentent le trafic $5 \times N$, les cercles indiquent le trafic $10 \times N$; les courbes représentent la moyenne de chaque distribution.	158
A.1	Relation entre un réseau en couches transparent/translucide, sa matrice de connexion et de poids administratifs.	167
A.2	Organigramme de l'algorithme de routage pour le scénario opaque.	170
A.3	Organigramme de l'algorithme de routage pour le scénario transparent.	171
A.4	Organigramme de l'algorithme de routage pour le scénario translucide.	172
B.1	Evolution de l'erreur sur l'OSNR à cause de l'écart de gain des amplificateurs.	176
B.2	Evolution de l'erreur sur l'OSNR à cause de la mesure sur l'atténuation des fibres en présence de DGE.	176
B.3	Impact de l'erreur de mesure sur le calcul de la PMD.	178
B.4	Impact de l'erreur de mesure sur le calcul de la phase non-linéaire.	179

Liste des tableaux

1.1	Pour et contre associés à un réseau de transport de type opaque et transparent. .	12
1.2	Comparaison des enjeux vis-à-vis des trois types de réseaux opaque, transparent et translucide.	17
3.1	Résumé des caractéristiques des différents nœuds opaques et hybrides	47
4.1	Résumé des effets physiques en étude pour la transmission d'un signal à 10 Gbit/s. .	67
4.2	Relation entre le BER, facteur Q et OSNR pour un système avec et sans FEC. .	69
4.3	Liste des pénalités sur l'OSNR.	69
4.4	Dégradations physiques introduites par les dispositifs des nœuds.	81
4.5	Dégradations physiques d'un signal dans une matrice MEMs.	82
4.6	Dégradations physiques d'un signal dans un nœud de connectivité 3 réalisé avec WSS.	83
4.7	Dégradations physiques d'un signal dans un R-OADM réalisé avec WB.	84
4.8	Caractéristiques réseau/trafic.	88
4.9	Données relatives au calcul de l'OSNR.	88
4.10	Données relatives au calcul de la PMD.	88
4.11	Données relatives au calcul de la DC.	89
4.12	Données relatives au calcul de φ_{NL}	89
4.13	Données relatives au calcul de l'interaction DC - φ_{NL}	89
4.14	Limites en nombre de nœuds à traverser dues à la granularité et au filtrage. . . .	95
4.15	Comparaison RDS des fibres.	100
4.16	Nombre moyen de modules DCF dans les réseaux.	103
4.17	Différence de prix entre modules de granularités différentes et à granularité 10 km. .	105
4.18	Caractéristiques des amplificateurs pour différents types de fibres (chaque pas est de 80 km).	108
5.1	Caractéristiques d'un modèle de coût.	113
5.2	Variation des prix des systèmes.	113
5.3	Modèle de coût pour les dispositifs dépendant de la portée en kilomètres.	115
5.4	Modèle de coût pour les dispositifs dépendant de la portée en nœuds.	115
5.5	Modèle de coût pour les dispositifs indépendants de la portée.	115
6.1	Caractéristiques du réseau italien.	153
6.2	Caractéristiques du réseau allemand.	155
6.3	Caractéristiques du réseau paneuropéen.	156
6.4	Caractéristiques du réseau américain.	157
B.1	Erreurs de mesure sur les paramètres de calcul des effets physiques.	174

B.2	Prise en considération des erreurs de mesure dans les calculs sur la dégradation de la qualité du signal.	180
C.1	Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau italien, sans protection. . . .	181
C.2	Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau italien, sans protection. . .	182
C.3	Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau italien, avec protection. . . .	182
C.4	Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau italien, avec protection. . .	182
C.5	Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau allemand, sans protection. . .	183
C.6	Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau allemand, sans protection. .	183
C.7	Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau allemand, avec protection. . .	183
C.8	Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau allemand, avec protection. .	184
C.9	Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau paneuropéen, sans protection. .	184
C.10	Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau paneuropéen, sans protection. .	184
C.11	Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau paneuropéen, avec protection. .	185
C.12	Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau paneuropéen, avec protection. .	185
C.13	Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau américain, sans protection. . .	185
C.14	Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau américain, sans protection. .	186
C.15	Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau américain, avec protection. .	186
C.16	Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau américain, avec protection. .	186

Liste des abréviations

Pour des raisons de lisibilité, la signification d'une abréviation ou d'un acronyme n'est souvent rappelée qu'à sa première apparition dans le texte d'un chapitre. Par ailleurs, puisque nous utilisons toujours l'abréviation la plus usuelle, il est fréquent que ce soit le terme anglais qui soit employé, auquel cas nous présentons une traduction.

3R	Reamplification, Reshape, Retiming regeneration	Réamplification, Remise en forme et synchronisation
A	Availability	Disponibilité
A/D	Add/Drop	Insertion/Extraction
ASE	Amplified Spontaneous Emission	Emission spontanée amplifiée
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Mode de transfert asynchrone
BER	Bit Error Rate	Taux d'erreur
CAPEX	CAPital EXpenditure	Coût d'investissement
CSRZ	Carrier Suppressed Return to Zero	Retour à zéro avec suppression de la porteuse
DC	Chromatic Dispersion	Dispersion chromatique
DCF	Dispersion Compensation Fiber	Fibre compensatrice de dispersion
DCM	Dispersion Compensation Module	Module (compensateur) de dispersion chromatique
DGD	Differential Group Delay	Retard de groupe différentiel
DGE	Dynamic Gain Equalization	Egalisation de gain dynamique
EBN	European Backbone Network	Réseau dorsal européen
EDFA	Erbium Doped fiber Amplifier	Amplificateur à fibre dopée erbium
ELH	Extended Long Haul	Très longue portée
EMS	Element Management Systems	Élément de gestion des systèmes
EOP	Eye-Opening Penalty	Pénalité sur l'ouverture de l'œil
EXC	Electrical Cross Connect	Brasseur électronique
FEC	Forward Error Correction	Code correcteur d'erreur

FIT	Failure in Time	Nombre de pannes pour 10 ⁹ heures
FWM	Four Wave Mixing	Mélange à quatre ondes
GDR	Group Delay Ripple	Ondulation du retard de groupe
GFP	Generic Framing Procedure	Encapsulation des signaux de données
ID		Intervalle d'acceptance en Dispersion
IP	Internet Protocol	Protocole internet
ISI	Inter-Symbol Interference	Interférence entre symboles
ITU	International Telecommunication Union	union internationale des télécommunications
LGM	Layered Graph Model	Réseau en couches
LH	Long Haul	Longue portée
MEMs	Micro-Electro-Mechanical Systems	Micro-systèmes électro-mécanique
MTBF	Mean Time Between Failure	Temps moyen entre deux pannes
MTTF	Mean Time To Failure	Temps moyen jusqu'à la défaillance
MTTR	Mean Time To Repair	Temps moyen de remise en service
Mux/Démux	Multiplexer/Demultiplexer	Multiplexeur/Démultiplexeur
NE	Network Element	Élément de réseau
NMS	Network Management Systems	Gestion des systèmes
NRZ	Non Return to Zero	Non return à zéro
OE	Electrical-to-Optical conversion	Conversion électrique-optique
OEO	Optical-to-Electrical-to-Optical	Conversion optique-électrique-optique
OPEX	OPerational EXpenditure	Coût opérationnel
OPM	Optical Performance Monitoring	Contrôleur de performance optique
OS	Operations Systems	Systèmes d'exploitation
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio	Rapport signal optique à bruit optique
OTN	Optical Transport Network	Réseau de transport optique
OXC	Optical Cross Connect	Brasseur optique
PSP	Principal States of Polarization	Etats principaux de polarisation
Q	Quality factor (of transmission)	Facteur de qualité (de transmission)
QoS	Quality of Signal	Qualité du signal
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy	Hierarchie numérique plésiochrone
PDL	Polarization Dependent Loss	Pertes dépendantes de la polarisation
PMD	Polarization Mode Dispersion	Dispersion modale de polarisation
RDB	Reliability Block Diagram	Blocs diagrammes de fiabilité
RDS	Ratio Dispersion over Slope	Rapport entre dispersion et pente
RFP	Request For Proposal	Appel d'offre
(R)OADM	(Reconfigurable) Add/Drop Multiplexer	Multiplexeur d'insertion extraction (reconfigurable)
RWA	Routing and Wavelength Assignment	Routage et allocation de la longueur d'onde
RZ	Return to Zero	Retour à zéro
SBS	Stimulated Brillouin Scattering	Diffusion brillouin stimulée
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	Hierarchie numérique synchrone

SLA	Service Level Agreement	Garantie de la qualité de service
SMF	Single Mode Fiber	Fibre monomodale
SPM	Self Phase Modulation	Automodulation de phase
SRS	Stimulated Raman Scattering	Diffusion Raman stimulée
TSP	Transponder	Transpondeur
U	Unavailability	Indisponibilité
ULH	Ultra Long Haul	Ultra longue portée
WB	Wavelength Blocker	Bloqueur de longueur d'onde
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexage en longueur d'onde
WSS	Wavelength Selective Switch	Commutateur sélectifs en longueur d'onde
XPM	Cross-Phase Modulation	Modulation de phase croisée
YRR	Yearly Return Rate	Nombre annuel moyen de pannes

Introduction

Le réseau de transport (aussi appelé cœur ou dorsal) relie les points les plus importants du territoire couvert par un opérateur ; il s'appuie aujourd'hui exclusivement sur la technologie optique.

Notre étude part de deux constatations principales :

1. le réseau de transport optique actuellement en service nécessite de nombreuses conversions optoélectroniques à chaque nœud traversé et même à l'intérieur des liens dont la longueur dépasse une certaine limite. Le réseau est alors dit opaque ;
2. les performances des nouveaux systèmes de transmission et de brassage optiques permettent de transporter des quantités élevées d'informations sur des milliers de kilomètres et de traverser les nœuds intermédiaires de manière transparente (sans conversions optoélectroniques). Ces systèmes commencent à s'imposer de plus en plus sur le marché à des prix de plus en plus compétitifs vis-à-vis des dispositifs optoélectroniques.

En examinant le coût total associé à un réseau nous observons que les dispositifs optoélectroniques constituent une partie prépondérante de ce coût. Il est important alors pour un opérateur de comprendre comment les nouveaux systèmes peuvent être intégrés dans le réseau pour qu'il soit économiquement plus intéressant.

Intuitivement la solution la plus évidente consiste à supprimer toutes les conversions optoélectroniques aux nœuds intermédiaires. Un réseau ainsi obtenu est appelé transparent. Mais, sur un réseau de transport il s'avère que les longueurs des parcours sont parfois plus élevées que la portée maximale des systèmes de transmission optique employés, et finalement il se peut que certaines connexions ne puissent pas être réalisées avec la qualité voulue : le réseau transparent ne peut pas être mis en place.

Une autre solution consiste à supprimer une partie seulement des conversions optoélectroniques : à mi-chemin entre le réseau opaque et le réseau transparent se situe le réseau translucide (aussi appelé hybride pour sa double nature). Un réseau translucide prévoit la transmission transparente d'un signal jusqu'à ce qu'une conversion optoélectronique soit requise. Puisque les réseaux translucides sont aussi des réseaux partiellement transparents, quand nous parlerons de transparence dans le réseau, nous ne ferons pas uniquement référence au réseau complètement transparent mais aussi au réseau translucide.

Le but de cette étude consiste à mettre en évidence quels sont les avantages introduits dans un réseau dorsal par le concept de réseau translucide (et transparent) en comparaison avec un réseau opaque. Notre comparaison *in fine* se base sur l'évaluation du coût total des équipements à mettre en œuvre lorsque le réseau est opaque ou translucide.

Ce travail est divisé en deux parties principales : la première partie introduit l'ensemble des notions nécessaires à l'étude et la deuxième regroupe les principaux résultats associés à l'introduction de la transparence dans un réseau.

La première partie est composée de trois chapitres. Le premier chapitre introduit les concepts de scénario opaque, transparent et translucide. Les avantages et inconvénients liés à ces scénarios sont analysés de manière macroscopique : le réseau translucide permet d'optimiser les besoins de dispositifs optoélectroniques tout en conservant la plupart des fonctionnalités relatives à un réseau opaque.

Le deuxième chapitre décrit les modèles de réseau et de trafic utilisés dans notre étude, il introduit un bref état de l'art sur les méthodes de dimensionnement associées aux différents types de réseaux et justifie le choix des méthodes de dimensionnement utilisées dans l'étude notamment aux chapitres cinq et six.

Le chapitre trois présente dans une première partie les différentes fonctions optiques de transmission et de commutation puis les fonctions de sécurisation nécessaires pour la mise en place d'un réseau. Les techniques utilisées pour la réalisation des différents dispositifs et les choix d'architecture dépendent du scénario considéré. Certains dispositifs nécessaires pour assurer des fonctionnalités dans le réseau transparent ne sont pas encore disponibles sur le terrain ou même sur le marché. Pour que le réseau transparent ou translucide soit comparable (en termes de fonctionnalités) au réseau opaque, nous avons identifié les nouveaux besoins du réseau et déduit les caractéristiques et le type de dispositifs pour répondre à ces besoins. Les dispositifs introduits et les scénarios choisis dans la suite sont ceux qui nous ont semblé être les plus plausibles dans une vision à court et moyen terme.

La deuxième partie de ce document présente les hypothèses de transmission et de coûts des systèmes pris en compte dans notre étude. Sur la base de ces hypothèses nous commentons les résultats quantitatifs relatifs à la comparaison réseau opaque – réseau translucide.

Le chapitre quatre décrit les différents effets physiques affectant un signal à 10 Gbit/s pendant sa propagation dans un réseau dorsal. Dans un réseau opaque, grâce aux régénérations effectuées dans chaque nœud, tous les signaux transmis sur un lien subissent les mêmes dégradations. Du fait de la régénération systématique du signal à chaque nœud, le caractère cumulatif de certaines dégradations peut être négligé. Dans un réseau transparent, certains de ces effets cumulatifs ne peuvent plus être négligés. En particulier, nous nous sommes intéressés à la modélisation de la dispersion chromatique pour montrer que l'hypothèse selon laquelle celle-ci pouvait être parfaitement compensée induit une mauvaise estimation des performances d'un système de transmission.

Dans le cinquième chapitre nous effectuons des comparaisons économiques entre les réseaux opaques et translucides. Les hypothèses sur les prix des systèmes adoptées dans ces comparaisons sont basées sur les prix actuels. Nous analysons différents scénarios d'évolution de prix et de technologies liées aux systèmes de transmission. Ces scénarios prennent en compte l'évolution du réseau dans un futur proche. Nous évaluons, alors, à quelles conditions le réseau translucide pourra s'imposer économiquement vis-à-vis du réseau opaque. Nous mettons en évidence un ensemble de facteurs ayant un impact déterminant sur la comparaison de l'approche opaque vis-à-vis de l'approche translucide ; à titre d'exemple, ces facteurs peuvent être : le modèle de

coût, les caractéristiques des systèmes utilisés et, non le moins important, les caractéristiques du trafic à écouler (volume et distribution). En conclusion de ce chapitre nous introduisons quelques considérations sur les coûts opérationnels relatifs à chaque réseau.

Le chapitre six vise, de manière plus générale, à comparer les réseaux opaques et translucides en considérant différents types de topologies et différentes matrices de trafic. A l'encontre du chapitre cinq, pour lequel la stratégie de routage est négligée (plus court chemin), le chapitre six propose une stratégie de routage alternative. Pour une stratégie de routage différente, eu égard aux critères de comparaison entre réseaux opaque et translucide utilisés, nous montrons que les atouts de l'un vis-à-vis de l'autre restent inchangés.

Enfin le dernier chapitre est consacré aux conclusions et à la présentation des perspectives qui découlent de cette étude.

Chapitre 1

Contexte des études

Un réseau de télécommunication peut être décomposé en trois sous-réseaux indépendants, comme illustré sur la figure 1.1 :

- le réseau d'accès - couvrant des dimensions de l'ordre de quelques kilomètres à quelques dizaines ;
- le réseau métropolitain - ayant des dimensions de quelques dizaines de kilomètres à quelques centaines ; et
- le réseau cœur - s'étendant sur plusieurs centaines de kilomètres.

Chacun de ces sous-réseaux a différentes fonctions à accomplir, auxquelles sont associés différents enjeux, besoins techniques et exigences de recherche [Ilyas 2003]. L'étude décrite dans ce manuscrit se concentre sur les **réseaux cœur**, aussi appelés *réseaux de transport optique* ou *longue distance* ou *dorsaux*, utilisant comme support pour la transmission des signaux la **fibres optique**.

1.1 Le réseau de transport

Le réseau de transport est divisé en différentes couches, chacune dédiée à une fonction particulière pour assurer le transport d'un signal entre deux points différents du réseau. Dans ce travail nous étudierons les différentes architectures liées à la conception de la **couche physique** d'un réseau de transport optique commuté. Cette couche transporte le signal analogique (la lumière dans le cas d'un réseau optique) sur le lien physique (la fibre optique) en établissant une connexion entre deux points du réseau, puis en la maintenant durant un temps donné et en la désactivant en fin de communication.

Au dessus de cette couche se trouve une couche cliente qui peut être constituée aujourd'hui par la couche SDH (Synchronous Digital Hierarchy), suivie par les couches ATM (Asynchronous Transfer Mode) et IP (Internet Protocol) [Ramaswami 1998], mais qui peut être aussi directement la couche IP, moyennant des adaptations de la couche physique ; ces adaptations servent entre autres à envoyer des messages à la couche physique pour obtenir la connexion des requêtes provenant des couches supérieures. Les évolutions des architectures réseau permettent d'envisager une couche de transport convergente intégrant les fonctionnalités habituelle-

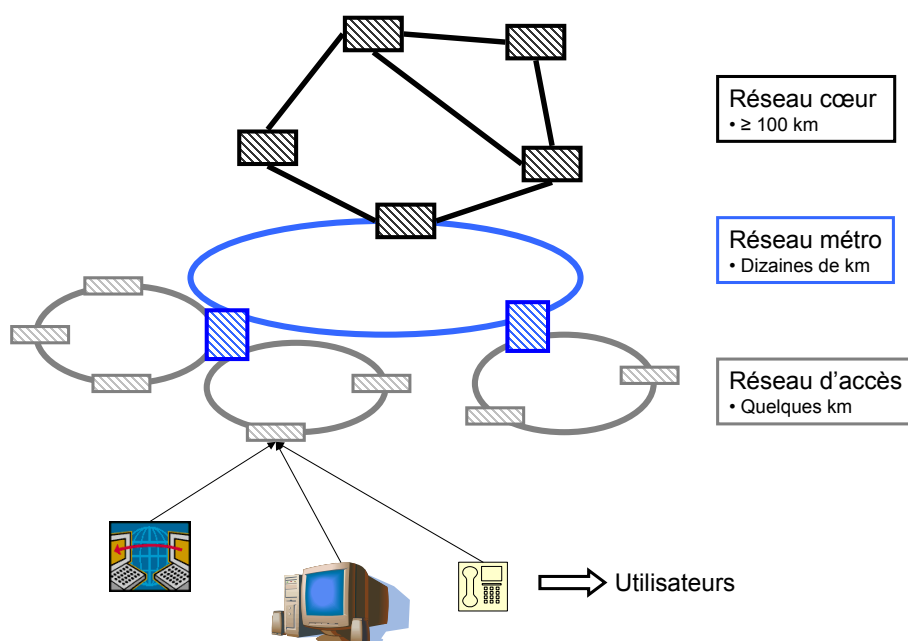


FIG. 1.1 – Schématisation d'architecture d'un réseau transport optique (cœur, métro et accès).

ment réalisées par les couches supérieures. Ainsi la recommandation Optical Transport Network, OTN, [Ramaswami 1998] utilisant comme couche de transport la fibre optique assure les fonctions de transport, multiplexage, brassage et supervision des signaux optiques présents dans le réseau [ITU 2001b]. OTN intègre à la fois la couche physique fibre optique et aussi une sous-couche d'adaptation (comme GFP, Generic Framing Procedure), [Vasseur 2004], [Strand 2002]. La figure 1.2 représente l'évolution des couches d'un réseau de transport optique [Vasseur 2004].

L'évolution du transport est également un moteur de l'évolution de la couche physique. Dans la suite de cette étude nous évaluerons cette évolution de la couche physique en termes de besoins en ressources ¹ selon les différentes architectures de réseaux envisagées. Pour étudier ces besoins, des requêtes provenant de la couche cliente seront prises en considération sans spécifier le type de protocole associé. L'étude est également limitée au cas des réseaux commutés (circuits optiques). L'étude des ressources nécessaires au traitement d'une demande est faite à partir de l'arrivée de la demande dans la couche examinée sans se soucier des opérations qui pourraient être effectuée dans les couches supérieures ou des dispositifs nécessaires pour accomplir ces opérations.

La figure 1.3 montre la couche physique et la couche cliente, avec les dispositifs utilisés pour les dialogues entre les deux couches. La couche cliente peut être SDH ou directement IP, les nœuds y sont représentés par des cylindres ; le trait pointillé dans la couche indique une liaison logique, c'est-à-dire une liaison entre deux points appartenant à cette couche. La couche physique est reliée à la couche cliente par l'intermédiaire des brasseurs électroniques. Dans la figure nous représentons cette liaison par une jonction entre le brasseur électronique et le nœud appartenant à la couche cliente. Si la couche cliente est SDH alors la matrice EXC adossée au nœud client est

¹Nous appelons ressources l'ensemble des éléments de la couche physique : fibres, éléments des systèmes de transmission (transpondeurs, amplificateurs, multiplexeurs), éléments de brassage lorsque cela est adéquat.

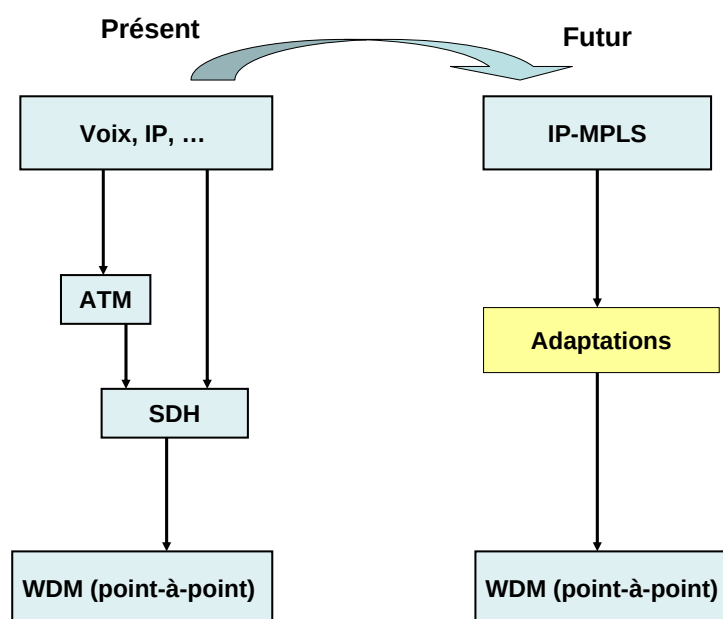


FIG. 1.2 – Evolutions des couches d'un réseau de transport.

un seul et même brasseur SDH (même objet), si la couche cliente est IP alors il y a une liaison entre la matrice de brassage électronique et le routeur IP. Les nœuds appartenant à la couche physique sont indiqués par des cubes et connectés par des liaisons physiques indiquées par des traits continus. Une connexion entre deux nœuds de la couche cliente est établie de la manière suivante : la requête passe de la couche cliente à la couche physique à travers les dispositifs de communication entre les deux couches et la réservation des ressources du réseau est effectuée selon un protocole de routage et de réservation ; lorsque les interfaces entre les nœuds sont correctement configurées, le signal est converti du domaine électrique au domaine optique et inséré dans la couche physique ; si le signal optique traverse des nœuds intermédiaires dans la couche physique, alors il pourra subir ou non une conversion optoélectronique (en fonction de l'architecture de nœud choisie), avant de continuer la propagation jusqu'au nœud physique de destination. Arrivé au nœud de destination, le signal remonte dans la couche cliente. Ce trajet est indiqué dans la figure 1.3 par des flèches pointillées. L'architecture du nœud physique de la partie droite de la figure 1.3 est l'une des architectures possibles [Ramaswami 1998] ; d'autres architectures ne prévoient pas de brasseur optique et les systèmes WDM sont directement branchés sur la matrice électronique. La zone pointillée englobant la couche physique matérialise le domaine considéré dans cette étude.

Dans la suite nous analysons les différentes architectures de réseaux de transport envisagées dans le futur et présentons un bref état de l'art sur les études comparatives qui ont déjà été menées sur ces différentes architectures.

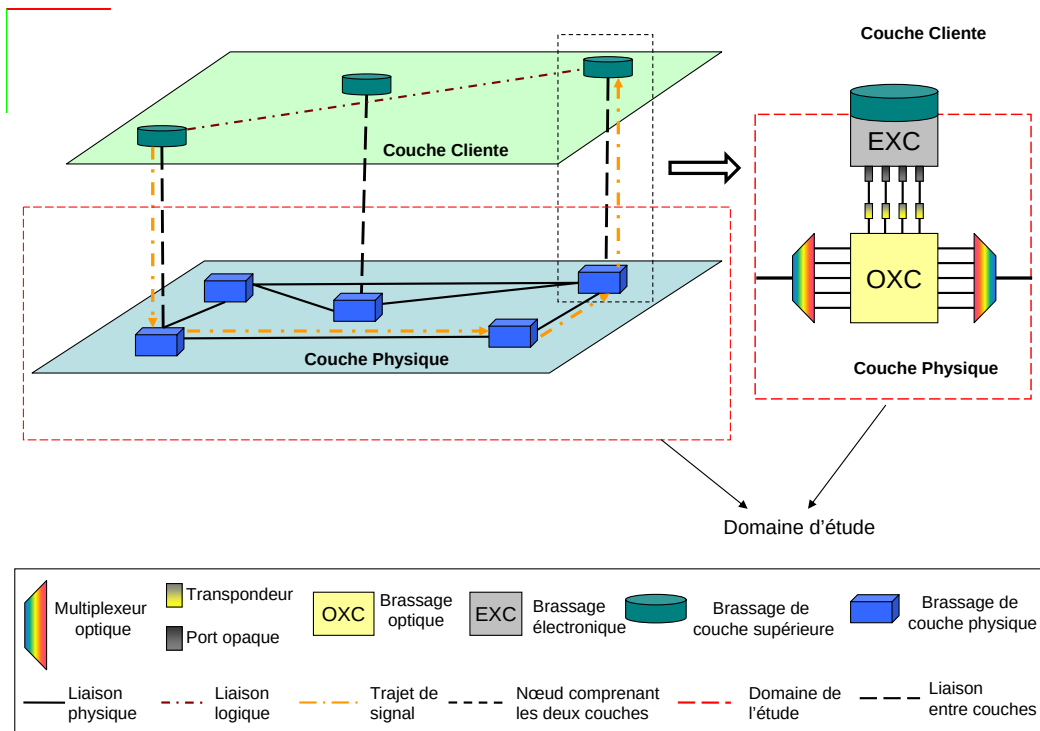


FIG. 1.3 – Architecture des couches réseau.

1.2 Réseau opaque

Historiquement, les réseaux optiques sont appelés **opaques**, la couche optique sert uniquement pour le transport point à point entre deux sites distants. Des conversions optoélectroniques ont lieu dans chaque site situé aux extrémités de chaque lien : le signal est prélevé de la couche optique pour être converti en électrique grâce à des dispositifs dédiés (les transpondeurs), les signaux électriques sont ensuite traités au sein de cette couche (agrégation, supervision, aiguillage, ...). Si le site électronique rejoint est le point de destination, le signal sort du réseau longue distance ; dans le cas contraire, le signal est renvoyé dans la couche optique à travers une opération inverse de la précédente. Les sites électroniques (appelés aussi nœuds du réseau) correspondent en particulier à tous les points d'entrée du réseau longue distance et permettent d'agréger le trafic provenant des autres couches du réseau ; ces sites électroniques sont également placés entre deux points d'entrée lorsque la distance entre ces derniers est trop grande pour assurer une transmission correcte du signal optique de bout en bout.

En résumé, un réseau opaque prévoit des conversions optiques-électroniques et vice-versa dans chaque nœud traversé, comme indiqué de manière schématique dans la figure 1.4. Dans cette figure, le réseau considéré est constitué de 6 nœuds (disques gris) et 7 liens (lignes noires). Le signal est routé du nœud appelé "Entrée" au nœud "Sortie". Le parcours emprunté par le signal

est indiqué par une ligne pointillée ; les disques gris indiquent une opération optoélectronique systématique.

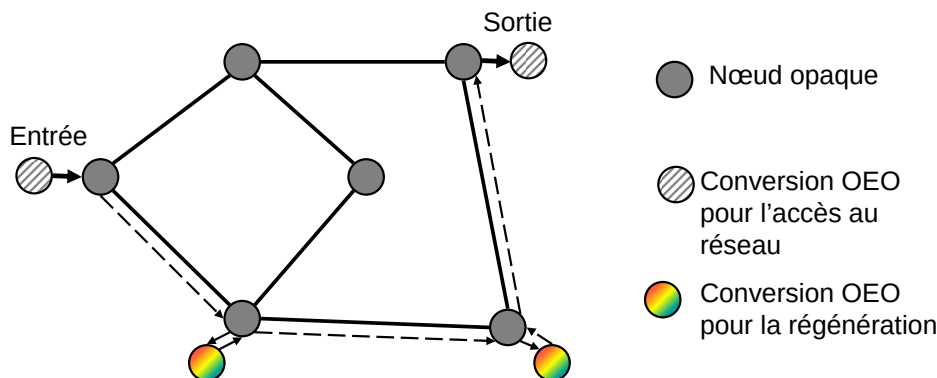


FIG. 1.4 – Représentation d'un réseau opaque.

Si la conception des réseaux optiques a peu évolué, depuis les années 1990, grâce aux technologies WDM, les systèmes de transmission, eux, ont constamment augmenté leur performances en termes de portée (de quelques centaines de km à plusieurs milliers), et en termes de capacité et de débit par canal. Ils sont passés de 120 – 160 Tbit/s $\times$ km (égal à 80 canaux à 2,5 Gbit/s sur une portée de 600 km ou 40 canaux à 10 Gbit/s sur une portée de 400 km) à 1 600 - 2 400 Tbit/s $\times$ km (égal à 80 canaux à 10 Gbit/s sur 3 000 km) [Chrapple 1993]; et, des produits portée-capacité de l'ordre de 3 200 - 4 800 Tbit/s $\times$ km sont déjà annoncés pour le futur proche [Strand 2002]. Les prix des systèmes de transmission ont également baissé de manière vertigineuse, si bien que ces systèmes sont disponibles sur le marché à des prix de plus en plus accessibles. Cette évolution pousse les opérateurs à repenser leur conception de la couche physique, poussés également par le besoin d'économiser leurs dépenses en investissement.

Dans un réseau deux nœuds sont rarement espacés de plus de 3 000 km ; pour un réseau européen, par exemple, les distances moyennes entre les nœuds sont inférieures à 500 km [Bodamer 2006]. Cela implique qu’un réseau optique opaque employant des systèmes de transmission de nouvelle génération prévus pour des distances de plusieurs milliers de km comportera un grand nombre de conversions optiques-électroniques-optiques (OEO) non nécessaires. Ainsi le coût lié à ces conversions (c’est-à-dire le coût des transpondeurs) représente une partie d’autant plus importante dans une liaison optique (et donc dans une connexion constituée de plusieurs liaisons juxtaposées) que le nombre de canaux dans la fibre est élevé et que les distances entre les nœuds sont faibles. La figure 1.5 représente la répartition des contributions des éléments d’une liaison dans le coût total de la liaison pour deux longueurs 500 km (liaison moyenne européenne, [Saleh 2003]) et 1000 km (liaison moyenne américaine [Saleh 2003]) et deux charges différentes (le “trafic 1” est constitué de 20 demandes en longueur d’onde et le “trafic 2” de 30) ; les prix des systèmes sont issus des hypothèses présentées dans la section 5.3. Certaines contributions sont proportionnelles à la longueur totale du lien (celle des amplificateurs) et d’autres sont proportionnelles au trafic (multiplexeurs/démultiplexeurs et transpondeurs). Pour le lien ayant une longueur de l’ordre d’un réseau européen ($Lien_1$), le coût des transpondeurs constitue 50% du coût total de la liaison ; par contre pour le lien de longueur de l’ordre d’un réseau américain ($Lien_2$) le coût des transpondeurs constitue environ 35% du coût total.

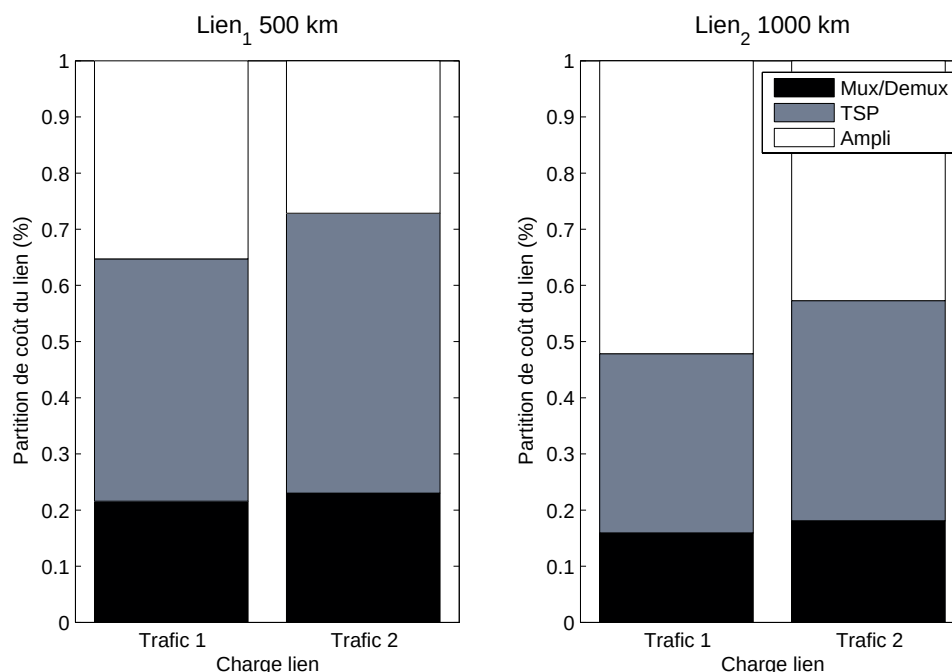


FIG. 1.5 – Répartition des coûts dans une liaison optique avec deux longueurs et deux charges différentes.

Ainsi cet exemple simple montre que le coût des transpondeurs dans un réseau opaque est extrêmement important et d'autant plus que les distances entre les nœuds sont faibles et que le volume de trafic est important. Réduire le nombre de ces dispositifs en supprimant les conversions inutiles est donc une solution envisagée pour réduire le coût des réseaux de transport.

1.3 Réseau transparent

Ces dernières années ont vu l'apparition de nouvelles conceptions de nœuds dont certaines structures sont déjà ou presque sur le marché [Mechels 2003], [Marom 2005]. Ces nœuds sont basés sur un cœur de type photonique : un signal optique pourra traverser ce nœud sans subir forcément une conversion OEO systématique. Ce type de nœud est capable d'aiguiller un signal arrivant d'une fibre d'entrée sur une autre fibre de sortie et d'insérer ou d'extraire un signal du réseau cœur.

Les Multiplexeurs d'Insertion/Extraction (Reconfigurable) ((R)OADM, (Reconfigurable)-Optical Add/Drop Multiplexer) sont un premier exemple de nœud photonique. Ils permettent d'extraire toutes ou une partie des longueurs d'onde et de réinsérer d'autres longueurs d'onde. Un autre exemple de nœud photonique est représenté par les Optical Cross Connect (OXC). Ce type de nœud permet la réalisation de réseaux de connectivité plus complexe. L'union de ces nouveaux systèmes d'aiguillage de longueur d'onde (ou brassage) dans les nœuds avec la disponibilité de systèmes de transmission permettant d'atteindre des distances de plus en plus longues permet la conception de réseaux optiques brassés où les opérations optoélectroniques sont en-

visagées uniquement au moment de l’insertion/extraction du signal dans le réseau. Ces réseaux sont appelés **transparents** ; la figure 1.6 présente un exemple de réseau transparent. Dans cette figure, la ligne pointillée allant du nœud “Entrée” au nœud “Sortie” indique le cheminement du signal. Par opposition à la figure 1.4, le signal traversant les nœuds, disques bleu clair, ne subit aucune conversion optoélectronique (sauf pour l’insertion/extraction).

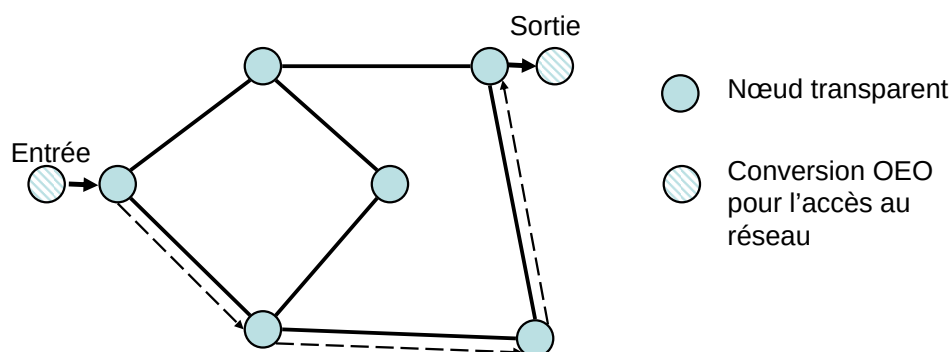


FIG. 1.6 – Représentation d’un réseau transparent.

La notion de transparence ne se réfère pas seulement à l’absence de conversion optoélectronique le long de la propagation des signaux dans le réseau. La transparence peut s’appliquer aussi à d’autres niveaux, par exemple :

- la **transparence** des dispositifs réseau au **format de transmission** (SDH, ATM, PDH, ...) ;
- la **transparence** des dispositifs réseau au **débit binaire** (155 Mbit/s, 10 Gbit/s, ...) ;
- la **transparence** des dispositifs réseau au **format de modulation** (RZ, NRZ, CSRZ, ...) ; et
- La **transparence** des dispositifs aux **paramètres physiques** d’un signal, [RYTHME], c’est-à-dire le fait que le dispositif ne modifie pas l’accumulation des caractéristiques physiques du signal.

D’autres notions de transparence sont données dans [Anderson 2000]. Dans la suite de cette étude, la transparence implique l’absence de toute conversion optoélectronique.

1.3.1 Les avantages d’un réseau transparent

Les avantages liés à l’introduction des réseaux transparents s’appuient sur deux points principaux :

- *indépendance du format* : un réseau transparent est indifférent aux caractéristiques du signal transporté, exception faite de certains paramètres physiques qui doivent satisfaire certaines contraintes (qualité du signal, par exemple). Cette propriété permet - dans l’absolu - aux signaux écoulés dans le réseau d’avoir différents formats (formats de modulation ou de transmission, débit) ou de passer d’un format à un autre sans être obligé d’adapter le réseau installé [Ramaswami 1998] ; et
- *réduction du prix de transmission* : puisque dans un réseau transparent les conversions optoélectroniques ne sont plus systématiquement obligatoires dans chaque nœud intermédiaire, le réseau transparent permet d’économiser le nombre de conversions optoélectroniques, les

dispositifs utilisés devant tout de même être capables d'atteindre les portées plus élevées par rapport aux dispositifs utilisés dans un réseau opaque.

1.3.2 Les désavantages d'un réseau transparent

L'introduction de la transparence dans un réseau implique aussi des complications dans sa conception et sa réalisation :

- *contraintes physiques* : la transmission dans une fibre optique présente des dégradations sur le signal qui dépendent des caractéristiques de la fibre (pertes, dispersions, facteur de non-linéarité, ..., c.f. section 4.1), du signal (débit, format de modulation) et du nombre de canaux présents dans la fibre et l'espacement en fréquence entre ces canaux. Ces dégradations limitent les parcours réalisables dans le réseau ;
- *contrainte sur la continuité de longueur d'onde* : interdire l'utilisation de dispositifs opto-électroniques pendant la propagation dans le réseau implique des restrictions sur l'utilisation des longueurs d'onde : la longueur d'onde empruntée au début de la transmission ne pourra pas être changée ; cela implique une réduction de la capacité du réseau (fonction de l'efficacité des algorithmes de routage). Il peut aussi s'avérer que pour éviter une collision de longueur d'onde, les parcours choisis soient plus longs que ceux choisis dans un réseau opaque, induisant ainsi une augmentation du nombre de ressources (amplificateurs par exemple) ; et
- *interopérabilité entre les systèmes tout-optiques* : la réduction des conversions OEO implique aussi une réduction des communications entre les différents dispositifs installés. Cela induit des difficultés pour les fonctions de supervision et de détection des pannes dans le réseau.

Le tableau 1.1 résume le pour et le contre associés aux réseaux opaques et transparents, [Livas 2005], [Giles 2002].

TAB. 1.1 – Pour et contre associés à un réseau de transport de type opaque et transparent.

	Opaque	Transparent
Limitation sur le format du signal	Oui	Non
Limitation sur le débit	Oui	Non
Limitation sur la distance de transmission	Non	Oui
Contrainte sur la longueur d'onde	Non	Oui
Limitation sur la gestion	Non	Oui
Surcoût dû aux nombre d'interfaces OEO	Oui	Non

Le choix entre le réseau opaque ou complètement transparent n'est pas évident. Pris séparément, les degrés de maturité des technologies de transmission point à point et de brassage permettent d'envisager la transparence [Livas 2005], il n'en reste pas moins vrai qu'elle est difficile à mettre en œuvre, particulièrement pour les réseaux dorsaux. En première approximation, un réseau opaque apparaît plus simple à gérer et à optimiser ; mais cette simplicité se fait au détriment du nombre de ressources consommées. Un avantage des réseaux transparents est justement la possibilité de réduire les opérations OEO à chaque nœud ; mais cette réduction n'est

possible qu'à condition d'avoir des systèmes de transmission extrêmement performants. Pour résoudre les problèmes liés à la transparence en gardant ses avantages, une nouvelle conception de réseau a commencé à prendre corps : le réseau translucide (ou hybride). Les réseaux hybrides permettent de faire un compromis entre économie et performance, en garantissant la souplesse du routage.

1.4 Les réseaux translucides

Un réseau est défini comme translucide (ou hybride, [Zami 2004], ou partiellement transparent, [Giles 2002]) quand il utilise la combinaison de dispositifs opaques avec des dispositifs transparents. Cela peut se traduire par :

- des nœuds complètement opaques et d'autres complètement transparents, conception de réseaux à îlots transparents, [Strand 2002], [Filho 2003a] ;
- des nœuds hybrides pouvant traiter les signaux de manière opaque (permettant une conversion OEO) comme de manière transparente (pour le cas d'un transit), [Filho 2003b].

La présence de dispositifs OEO placés dans certains nœuds du réseau permet de dépasser les contraintes rencontrées dans la réalisation d'un réseau transparent :

- *contrainte physique* : si la transparence dans un réseau ne peut pas s'appliquer parce que les longueurs des parcours sont trop grandes pour assurer une qualité de transmission adéquate (blocage dû à la qualité de transmission), l'insertion d'une opération de régénération ² permet de couper le parcours en deux (ou plus) sous-parcours, chacun respectant les limites de transmission, [Ramamurthy 1998] ;
- *contrainte de continuité de longueur d'onde* : si le trafic à router dans un réseau est important, il se peut que dans un réseau transparent, l'occupation des fibres soit telle que l'insertion d'un nouveau canal ne soit pas possible non parce qu'il n'y a pas de disponibilité de canaux, mais parce que certains canaux disponibles sur les fibres à emprunter n'ont pas la même longueur d'onde (blocage dû à la contrainte de longueur d'onde). L'insertion d'une ou plusieurs conversions OEO pendant la propagation du signal permet justement de changer de longueur d'onde et donc d'assurer son acheminement. Cela permet d'exploiter complètement la capacité du réseau, [Giles 2002].
- *interopérabilité entre les systèmes tout-optiques* : la disponibilité dans les nœuds d'une partie opaque permet d'assurer certains échanges d'informations sur l'état du réseau et favorise les fonctions de surveillance du réseau.

Un exemple de transmission d'un signal dans un réseau translucide utilisant la deuxième conception de réseau est montré en figure 1.7. Le réseau représenté est le même qu'en figures 1.4 et 1.6, mais avec la présence de nœuds transparents (où les opérations optoélectroniques sont interdites, disques bleus clairs) et hybrides (disques bicolores : gris et bleu clair). Le signal transmis passe de manière transparente dans le premier nœud traversé ; dans le deuxième il subit une conversion OEO grâce à la présence de dispositifs placés dans le nœud.

²Nous supposons dans cette étude que les opérations de régénération et conversion de longueur d'onde sont effectuées grâce à des dispositifs optoélectroniques réalisant des régénérations de type 3R, c'est-à-dire que le signal analogique est "remis à neuf" quand il sort de la couche électronique. Cependant il faut noter que l'information peut être altérée et que la probabilité d'avoir des erreurs sur les données augmente avec le nombre de conversions OEO effectuées [Karlsson 2004].

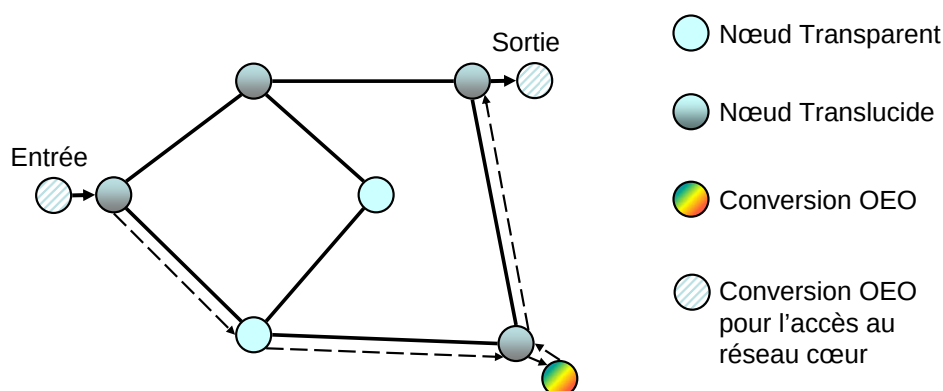


FIG. 1.7 – Représentation d'un réseau hybride (translucide).

Dans la suite de cette étude, le réseau sera conçu avec des nœuds soit de type hybride, soit complètement transparents quand aucune opération OEO n'est requise. D'autres exemples de conception de réseaux avec l'introduction de la transparence sont donnés dans [Wagner 2000].

1.5 Enjeux des différents types de réseaux

Dans cette section nous analysons plus finement les différences entre les trois types de réseaux définis, en se basant sur différents enjeux résumés dans le tableau 1.2 ; pour chaque propriété nous avons associé des catégories qui sont spécifiées dans la suite.

Les enjeux sont classés par catégorie suivant la liste suivante :

1. **sensibilité aux caractéristiques du signal** : toutes les interfaces optoélectroniques présentes dans un réseau sont fortement liées aux caractéristiques des signaux. La réduction du nombre de ces dispositifs permet d'avoir une souplesse vis-à-vis de l'évolution du réseau.
2. **sensibilité aux effets physiques** : pendant la propagation d'un signal dans la fibre et dans les nœuds de type transparent (ou photonique), plusieurs phénomènes physiques dégradent la qualité du signal et seulement une partie d'entre eux peuvent être compensés (par exemple la dispersion chromatique, c.f. section 3.1.4). La dégradation du signal qui en résulte dépend de la distance de transmission, du type et du nombre de nœuds traversés, du débit du signal, etc. Les dispositifs OEO permettent de limiter les erreurs dues à l'accumulation des dégradations physiques.
3. **fonction de surveillance** : il est nécessaire de connaître l'état du réseau à chaque instant pour détecter des fautes et des mauvaises connexions, pour pouvoir ainsi activer des fonctions de sécurisation.
4. **influence sur le coût de réseau** : chaque dispositif installé dans un réseau a un impact sur le coût total. Cet impact dépend de sa fonction et de ses performances. A l'heure actuelle, ce sont les dispositifs effectuant une conversion OEO et les dispositifs assurant la transmission sur de longues distances (ULH, Ultra Long Haul) qui influencent le plus le coût total d'un réseau.

5. **agrégation/désagrégation** : la conversion OEO permet aussi de bénéficier dans la couche électrique de diverses opérations d'agrégation et désagrégation, qui permettent de mieux remplir les canaux transportés entre chaque nœud.
6. **problème d'allocation de longueur d'onde** : le routage pour les réseaux opaques ne considère que la disponibilité de canaux libres dans une fibre pour router une demande ; dans les réseaux transparents, il faut vérifier la disponibilité d'une longueur d'onde spécifiée sur toutes les fibres que le signal doit parcourir. Dans le cas d'un réseau translucide, le routage est un compromis des deux cas précédents, dans lequel le besoin de changement de longueur d'onde doit être minimisé.
7. **optimisation des ressources** : dans un réseau il y a principalement deux types de ressources :
 - ressources optiques, qui sont partagées par les signaux (amplificateurs, fibres, multiplexeurs/démultiplexeurs, ...) qu'on rentabilise lorsqu'on exploite toutes les longueurs d'onde à disposition dans une fibre ;
 - ressources électroniques, qui ne sont pas partagées et dont on cherche à réduire le besoin (transpondeurs).

1.6 Comparaison entre les performances des différents réseaux

De nombreuses études ont déjà été menées sur le dimensionnement des réseaux translucides et permettent d'avoir des idées précises sur les avantages procurés par ce nouveau scénario en comparaison avec ceux déjà existants. Ces études peuvent être classées en fonction des différents aspects liés à la transparence :

- **emplacement des sites de régénération et conversion de longueur d'onde** : les études [Yaragolra 2000], [Lee 1999], [Lao 2004] ont considéré les avantages d'avoir les systèmes de régénération et/ou de conversion de longueur d'onde distribués selon différents critères dans les nœuds. Lorsque les réseaux sont peu chargés, il n'y a pas de blocage dû à des conflits de longueurs d'onde, donc les convertisseurs n'apportent aucun bénéfice. Au-delà d'un certain seuil de trafic, ces trois références montrent que l'introduction de convertisseurs de longueurs d'onde diminue le taux de blocage à condition que le taux d'occupation reste inférieur à un deuxième seuil ; dans le cas contraire, les bienfaits des convertisseurs diminuent. En effet pour des volumes de trafic trop élevés le blocage des demandes est d'abord dû au manque de ressources réseau plutôt qu'à la contrainte en longueur d'onde. [Baworntummarat 2000] confirme que ces bienfaits sont négligeables si le réseau est peu occupé (taux d'occupation des fibres inférieur à 20%) car il y a suffisamment de longueurs d'onde libres dans les fibres pour pouvoir satisfaire la contrainte de continuité en longueur d'onde. [Cavendish 2004] montre que la réduction du nombre de convertisseurs peut être obtenue en augmentant la taille des parcours, en contournant les liens qui provoquent les collisions ; nous pensons qu'il faut faire attention à cette option car choisir des parcours trop longs peut nécessiter davantage de régénérateurs. Les études de [Garnot 1999] et [Filho 2003a], par contre, considèrent l'avantage d'avoir à l'intérieur du réseau des sous-réseaux complètement transparents connectés à travers des nœuds présentant des éléments opaques. L'introduction de régénérateurs parsemés dans le réseau garantit les mêmes performances que dans un réseau opaque ; un critère pour le choix de ces nœuds est de considérer le routage des demandes dans un premier temps et de placer

- les dispositifs de régénérations dans les nœuds les plus chargés.
- **comparaison des ressources nécessaires pour les scénarios transparents, opaques et translucides** : des comparaisons entre les trois types de réseau ont été effectuées en termes de nombre de dispositifs dans le réseau, sans introduire la notion de coût ou de performance [Giles 2002]. D'autres études ont été réalisées introduisant la notion de contraintes physiques liées à la transmission et comparant les ressources qui varient en fonction du type de réseau étudié [Saleh 2003].
 - **impact de la qualité du signal sur le blocage des demandes** : [Ramamurthy 1998] démontre pour la première fois la nécessité de prendre en compte la dégradation des signaux pendant la propagation et montre les différences en termes de blocage de demandes pour les trois réseaux considérés dans les cas de propagation idéale et réelle. [Ramamurthy 2001] montre l'impact du nombre de régénérateurs disponibles dans un réseau sur le blocage en fonction du trafic écoulé dans le réseau et montre que pour des réseaux avec des trafics importants, un nombre élevé de régénérateurs peut diminuer la probabilité de blocage (de manière générale la présence de régénérateurs diminue le taux de blocage).
 - **intérêt économique** : Les comparaisons entre les différents réseaux en termes de coûts sont effectuées suivant deux critères différents : les dispositifs employés dans le réseau sont dépendants ou non de la portée. [Filho 2003b] montre l'avantage des réseaux caractérisés par la transparence par rapport à un réseau opaque : vu l'indépendance des prix des systèmes vis-à-vis de la portée, plus les réseaux sont transparents, plus ils sont économiquement avantageux. [Simmons 2005] considère la dépendance des prix des systèmes de transmission par rapport à la portée des systèmes et les avantages liés aux réseaux translucides sont visibles sous certaines hypothèses de trafic et de portée des systèmes à employer.

1.7 Conclusions

L'apparition et la maîtrise des nouvelles technologies pour la transmission et le brassage des signaux dans un réseau optique permettent l'introduction de la transparence dans le réseau cœur. Dans une première analyse, l'attrait des réseaux transparents est contestable dans un réseau longue distance à cause de son extension géographique et de la diversité des liens, causant des pénalités physiques qui s'accumulent de façon très variable. La complexité de gestion d'un grand réseau transparent force également à envisager la transparence pour des réseaux non seulement de petite taille en termes de longueur, mais aussi en termes de volume de trafic.

Pour surmonter les problèmes liés au manque de souplesse et de capacité de transmission propres au réseau transparent, une solution consiste à autoriser un nombre limité d'opérations optoélectroniques pour une connexion. Le réseau obtenu, résultant de la fusion des concepts de transparence et d'opacité, est appelé translucide (ou hybride). Ce nouveau concept de réseau présente un certain nombre d'avantages pour un opérateur :

- la limitation du nombre d'éléments opaques permet de réduire le coût du réseau en maintenant des performances de transmission satisfaisantes, obtenant un bon compromis entre performance et le coût total de transmission ; et
- le niveau de transparence introduit dans le réseau le rend plus souple et évolutif.

Le but de cette étude est de déterminer la faisabilité technique d'un réseau hybride et les avantages que ce nouveau concept réseau peut apporter au réseau dorsal.

TAB. 1.2 – Comparaison des enjeux vis-à-vis des trois types de réseaux opaque, transparent et trans lucide.

Catégorie, cf. 1.5	Enjeu	Type de réseau		
		Opaque	Transparent	Hybride
(1)	Flexibilité aux changements de débit	NON	PARTIEL	PARTIEL
(1)	Flexibilité à la reconfiguration	OUI	POSSIBLE	POSSIBLE
(1)	Hétérogénéité des dispositifs	NON	OUI	OUI
(1), (2), (5)	Dispositifs de régénération	OUI	NON	POSSIBLE
(1), (5), (6)	Possibilité de conversion de longueur d'onde	OUI	NON	POSSIBLE
(1), (2)	Prise en compte des effets physiques dans le routage	NON	OUI	OUI
(1), (2), (4)	Dispositifs de compensation	SIMPLES	COMPLIQUES	MOYENS
(2)	Extension du réseau	PAS DE LIMITES	LIMITÉE	PAS DE LIMITES
(2), (3), (4)	Surveillance	NON	OUI	OUI
(4), (7)	Prix des dispositifs de transmission	- CHERS	+ CHERS	+/- CHERS
(2), (4), (5), (6), (7)	Optimisation des ressources électroniques	NON	OUI	OUI
(4), (6), (7)	Optimisation des ressources optiques	OUI	NON	POSSIBLE
But de l'étude	Performances technico-économiques	A comparer au cours de travail		

Chapitre 2

Conception et dimensionnement des réseaux optiques hybrides

L'objectif final de l'étude est de faire une comparaison du coût des différents types de réseaux étudiés (opaque, transparent et hybride). Mais avant d'arriver à ce résultat il est nécessaire de déterminer quelles ressources sont nécessaires et à quels endroits il faut les placer, c'est le *dimensionnement* du réseau. Le but de ce chapitre est définir les hypothèses sur les réseaux que nous étudierons et la méthode utilisée pour le dimensionnement de ces réseaux.

Avant de définir les hypothèses liées au dimensionnement du réseau, nous définissons certains termes pour préciser l'acception avec laquelle ils sont employés ici (ces termes sont courants dans la littérature mais présentant différentes nuances en fonction des contextes).

2.1 Nomenclature

Canal optique : longueur d'onde transportant un signal entre l'émetteur et le récepteur.

Chemin : succession des liens et des nœuds empruntés par une connexion entre le nœud d'entrée (source) et le nœud d'arrivée (destination). Il peut aussi être appelé **parcours physique**.

Chemin optique (*lightpath*) : chemin établi entre les nœuds source-destination constitué par les liens traversés et les longueurs d'onde occupées dans chaque lien. Ce concept fait la fusion entre les canaux optiques et le parcours physique.

Connectivité : la connectivité d'un nœud exprime le nombre de liens (bidirectionnels) desservant le nœud. Le degré de connectivité du réseau représente la moyenne des connectivités des nœuds du réseau.

Connexion : dans cette étude il s'agit d'une liaison entre deux nœuds du réseau à travers laquelle un signal optique est transporté. Par rapport à la notion de chemin, aucune connaissance de la série de nœuds traversés n'est requise.

Cycle : connexion dont le nœud de départ coïncide avec le nœud d'arrivée et de taille non nulle.

Demande (requête) : besoin d'une connexion entre deux nœuds (source et destination) appartenant au réseau.

Granularité : correspond à la plus petite unité traitable (par un nœud, par la matrice de trafic, ...). Un trafic de granularité de 10 Gbit/s signifie que les canaux optiques ne pourront pas avoir des débits plus faibles et que les débits plus élevés sont des multiples de cette unité.

Topologie du réseau : schématisation du réseau par des liens et des nœuds.

Trafic : ensemble de demandes à établir (matrice de trafic) ou établies (trafic présent dans le réseau). La matrice de trafic est la liste des requêtes à écouler dans le réseau : sources, destinations et débits associés. La différence entre les demandes à établir et celles établies est appelée **trafic bloqué**.

2.2 Hypothèses sur le réseau

Les hypothèses utilisées pour le réseau concernent le trafic, la topologie, mais aussi la structure des liens et celle des nœuds qui sont des hypothèses plus “physiques”. Nous expliqueront également les notions de protection nécessaires à la sécurisation des réseaux.

2.2.1 Matrice de trafic

L'étude menée prendra en considération des demandes exprimées en multiples de 10 Gbit/s, qui est la granularité minimum ; chaque demande est transportée sur un canal (canal optique ou longueur d'onde) modulé à un débit donné. Dans cette étude la fréquence de modulation de la porteuse optique coïncide avec le débit du signal considéré ; nous avons fait ce choix car les besoins de la couche cliente nécessitent des débits de plus en plus importants, [Düser 2005], [Coffman 2002], [Masetti 2005] et aussi parce que les dispositifs fonctionnant à ce débit sont maintenant disponibles à des prix abordables.

Une matrice de trafic peut être figée dans le temps - trafic statique, ou peut être en évolution constante - trafic dynamique, [Yang 2005a]. Comme nous considérons le dimensionnement de réseaux dorsaux, nous avons restreint l'étude au cas de matrice de trafic statique où le trafic est égal au plus grand flux prévu pour chaque artère du réseau.

Les matrices de trafic considérées sont bidirectionnelles, c'est-à-dire que pour toute demande du nœud i au nœud j $D_{Ni} \rightarrow D_{Nj}$ il existe une demande $D_{Nj} \rightarrow D_{Ni}$, [Düser 2005]. La bidirectionnalité du trafic sur les réseaux dorsaux est justifiée pour différentes raisons :

- Les interfaces de transmission optique point à point sont par essence à débit symétrique ;
 - La base de trafic voix TDM est symétrique ;
 - Grâce aux nouveaux services (Peer2Peer, vidéo conf, ...) la transmission de données a
-

tendance à redevenir de plus en plus symétrique y compris dans l'accès. Il y a donc une forte chance pour que le trafic de cœur de réseau reste de type symétrique.

- Certaines applications (web, téléchargement ...) introduisent une asymétrie du trafic, par exemple la matrice de trafic des réseaux de données paquet. Cependant, au moment où l'on dimensionne le réseau, on prend habituellement la bande passante correspondant à la valeur maximale des débits dans les deux directions (pour la première raison citée plus haut). En général, l'écart de trafic entre les deux directions reste inférieur à la granularité considérée. Nous supposons que le traitement de l'asymétrie est fait dans les couches supérieures et que les agrégations de plus haut niveau tendent à réduire cette asymétrie ; ainsi, les demandes dans les deux directions restent dans les mêmes proportions en termes de granularité. Le trafic sur le réseau cœur étant un trafic moyenné, il n'existe finalement pas de fortes asymétries.

2.2.2 Topologie du réseau

Un réseau peut avoir une topologie en anneau ou maillée. Dans le premier cas, il est décomposé en anneaux simples et tous les nœuds les composants ont un degré de connectivité égal à deux ; les signaux circulant à l'intérieur d'un anneau, du nœud 'A' au nœud 'B' par exemple, peuvent emprunter l'une ou l'autre direction, comme indiqué sur la figure 2.1.a. Dans le cas d'une connexion sécurisée, la transmission des signaux sur les deux chemins (soit simultanément soit lors d'une panne du premier chemin), permet de protéger le trafic écoulé vis-à-vis des pannes possibles. Cette topologie a été très employée dans les réseaux d'ancienne génération (réseau à boucle SDH) et elle est encore utilisée dans les réseaux métropolitains, [Ilyas 2003]. Grâce à l'introduction de nœuds capables d'aiguiller les signaux sur différentes sorties, il est possible de réaliser des réseaux avec des degrés de connectivité supérieurs à deux et réaliser ainsi des topologies plus complexes : le réseau maillé.

Un réseau est maillé quand il existe plusieurs cycles possibles entre les nœuds du réseau. Le degré de connectivité des nœuds varie d'un minimum de 2 à un maximum qui n'est pas vraiment défini et qui dépend des limites technologiques de faisabilité d'un nœud.

La figure 2.1.a représente un réseau en anneaux constitué par deux anneaux connectés entre eux grâce à des ponts établis dans la couche supérieure indiqués par des traits pointillés-grisés (les deux anneaux sont physiquement séparés). La figure 2.1.b montre un réseau de type maillé ayant les mêmes nœuds que le réseau en anneau de la figure 2.1.a ; tous les nœuds sont connectés par la couche physique.

[Gerstel 2000] montre qu'un réseau maillé cœur vis-à-vis d'un réseau en anneau permet de réduire le taux d'occupation du réseau de 20 à 60%, ce qui justifie l'évolution des réseaux cœurs dans cette direction.

Les réseaux étudiés ici sont de type maillé. Le réseau de référence est le réseau EBN constitué par 38 nœuds et 63 liens, [Morea 2004a]. D'autres réseaux ont également été analysés pour extraire des résultats invariants (valables quelques que soient les topologies). Le réseau est, en général, représenté par un graphe (topologie logique), avec comme sommets les nœuds du réseau et comme liens logiques (ou arcs) les groupes de fibres qui relient deux sommets adjacents.

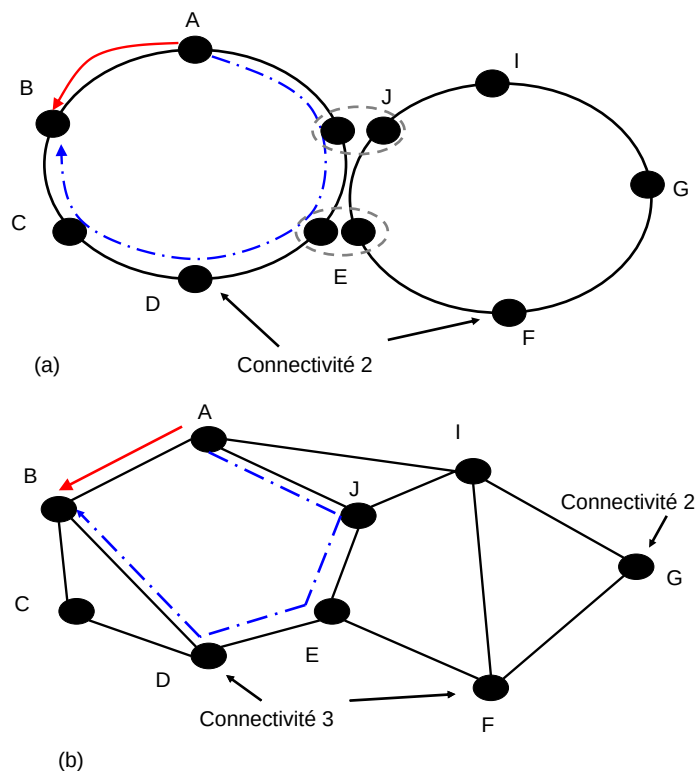


FIG. 2.1 – Exemple de topologies de réseau : (a) à anneau et (b) maillé.

2.2.3 Structure des liens

Un lien logique représente l'ensemble des fibres physiquement déployées (ou à déployer) entre deux nœuds adjacents ; ces fibres doivent suivre le même parcours et se trouver dans le même conduit. Si cela n'est pas le cas, il faut considérer autant de liens distincts qu'il y a de parcours distincts. Nous appelons lien physique une paire de fibres présente dans le lien logique. Le lien physique est bidirectionnel, c'est à dire qu'une fibre pourra transporter le trafic allant en direction Ouest-Est (O-E) et l'autre fibre le trafic en direction contraire E-O, comme illustré en figure 2.2.

Chaque lien physique est composé par un ensemble de pas (ou *span* en anglais) qui sont les tronçons de fibre compris entre deux sites d'amplification consécutifs. Chaque pas est constitué d'un couple de fibres allant du site d'amplification $(n - 1)$ au site (n) du lien.

Dans un réseau réel la longueur des pas est variable, généralement comprise entre une longueur minimale de quelques kilomètres et une longueur maximale pouvant être supérieure à 100 km. La longueur des pas résulte d'un compromis entre la dégradation du signal, [Strand 2002], le type d'amplificateur, le coût total lié au nombre de pas requis dans un lien et la possibilité pour un opérateur de pouvoir installer un site d'amplification dans un endroit géographique. Dans cette étude nous supposons que les tous les pas sont de la même longueur (80 km), représentative de la longueur moyenne des pas du réseau existant.

Aux extrémités d'un pas (mis à part dans les nœuds) il y a un site d'amplification, chaque site

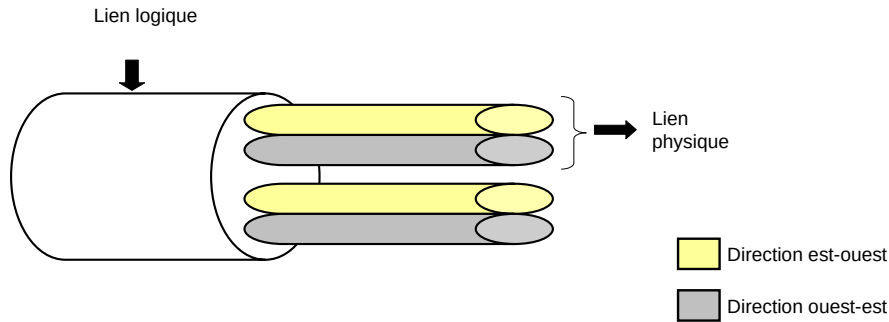


FIG. 2.2 – Exemple d'un lien physique (câble) bi-directionnel avec sa paire de fibres.

est composé par un couple d'amplificateurs (un pour chaque direction du couple bidirectionnel). Vu le caractère biunivoque des directions des fibres, à partir du moment où nous parlerons de lien, nous ne ferons aucune mention de sa direction et automatiquement les deux directions seront considérées. Par conséquent, quand nous indiquerons un site d'amplification à l'extrémité d'un pas, il sera sous-entendu un amplificateur pour chaque direction de propagation. En figure 2.3 nous représentons la structure bidirectionnelle d'un lien et la représentation qui sera adoptée par la suite.

2.2.4 Structure des nœuds

Un nœud est caractérisé par son degré de connectivité. En fonction du type de réseau (scénario opaque, transparent ou translucide) étudié, les ports du nœud destinés à l'accès de la couche cliente peuvent être de type électronique et/ou optique (ports opaques ou optiques d'insertion/extraction du trafic), ce nombre d'accès pouvant être quelquefois limité (selon les architectures de nœuds choisies). Un port est composé par deux dispositifs ayant des directions opposées (si le port est opaque, nous parlons d'un dispositif ayant un côté récepteur et un côté émetteur) ; vu le caractère bidirectionnel des demandes, nous associons à une demande un seul port (optique ou opaque) et dans la phase de comptage du nombre total de ports d'un nœud, nous considérerons le nombre de demandes traversant le nœud. Pour une opération de transit, deux ports sont associés à la demande ; pour une opération d'insertion/extraction seulement un port est associé. En figure 2.4 nous avons représenté les deux opérations et indiqué les ports occupés.

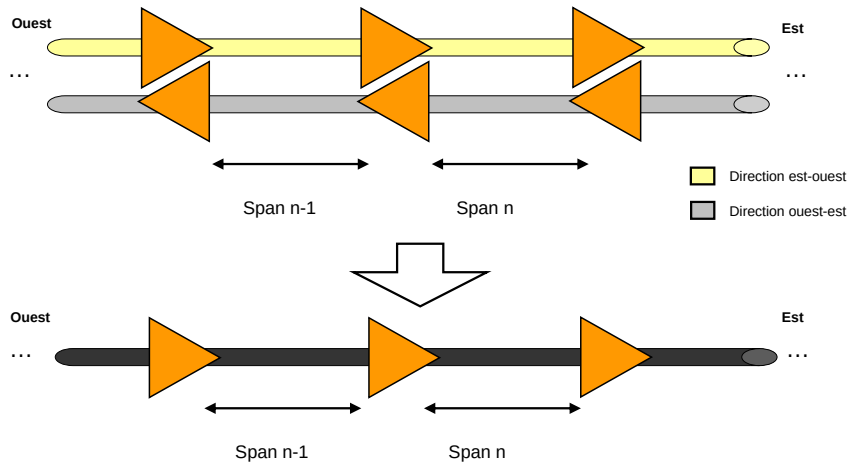


FIG. 2.3 – Structure bidirectionnelle d'un lien et représentation employée dans l'étude.

2.2.5 Sécurisation d'un réseau

Le but d'un réseau de transport est d'établir et de maintenir des connexions entre les nœuds. Mais des pannes peuvent survenir soit au niveau des nœuds, soit au niveau des liens. Pour prévenir le blocage d'une demande dû à une panne, deux mécanismes de sécurisation sont possibles : la protection et la restauration, [Vasseur 2004].

La protection consiste à emprunter un chemin de secours prédéterminé durant la phase de planification du réseau lorsque les ressources utilisées par le chemin principal sont défaillantes. Les avantages liés à la protection sont sa simplicité, sa robustesse et sa rapidité de mise en œuvre, [Gerstel 2000]. Trois types de protection sont possibles :

- **1+1** (un plus un) : le signal utile est simultanément écoulé sur deux chemins distincts. En réception le meilleur des deux signaux est sélectionné. Il s'agit d'une protection dédiée, à opposer à une protection partagée, car un chemin de secours est spécifiquement associé à chaque chemin principal. La transmission des deux signaux (nominal et de secours) est effectuée en même temps. En cas de panne sur le parcours principal, la réception est basculée et effectuée sur le signal empruntant le parcours de secours.
- **1 : 1** (1 pour 1) : en fonctionnement normal, le signal est acheminé sur un seul chemin (principal) ; en cas de panne une commande est envoyée sur le transmetteur source et la transmission est basculée sur le chemin de secours. Ce type de protection nécessite également l'association d'un chemin de secours pour chaque chemin principal, il s'agit encore d'une protection dédiée. Les ressources réservées pour la protection peuvent être occupées par du trafic "préemptable" (c'est-à-dire du trafic non prioritaire).
- **M : N** (M pour N) : M chemins de secours sont allouées pour la protection de N chemins

2.3 Dimensionnement

Pour effectuer des comparaisons entre différents types de réseaux, l'approche suivie est de déterminer le nombre de ressources nécessaires (et leur emplacement) pour que le nombre maximal de demandes soit routées (sans blocage), c'est le *dimensionnement* du réseau. Deux types de dimensionnement sont possibles : calcul des ressources nécessaires pour établir toutes les demandes présentes dans la matrice de trafic ; calcul des ressources nécessaires pour établir le plus grand nombre de demandes dans un réseau à nombre de ressource fini. De manière générale, un dimensionnement est optimisé quand le résultat donné minimise :

- le nombre total de ressources employés (ou coût total du réseau) ; et
- le nombre total de demandes bloquées.

Dans un réseau de type opaque, le problème de dimensionnement est résolu de la manière suivante :

1. router la matrice de demandes selon le critère choisi (router les demandes prioritaires les premières est le critère le plus évident pour un opérateur), suivant différentes méthodes d'optimisation (heuristiques et/ou exactes) ; pour plus de détails sur ces méthodes le lecteur pourra se référer à [Zang 2000] qui donne un état de l'art exhaustif sur les différents algorithmes de routage présents dans la littérature.
2. compter le nombre de dispositifs nécessaires pour l'établissement des demandes en fonction de la solution de routage.

Un blocage a lieu uniquement si les ressources disponibles dans le réseau ne sont pas suffisantes pour les besoins exprimés dans la matrice de trafic.

Dans un réseau transparent le problème du dimensionnement doit considérer deux aspects supplémentaires par rapport au cas opaque :

1. dans la phase de routage il faut intégrer la contrainte de continuité de longueur d'onde ; c'est-à-dire qu'une demande routée sur un parcours doit emprunter la même longueur d'onde (ou canal optique) sur chaque lien traversé ;
2. après (ou pendant) la phase de routage, il faut vérifier que le parcours choisi garantit les contraintes d'ingénierie (par exemple, respect des marges, pour garantir que le signal n'est pas trop dégradé en réception, c.f. section 4.2.1).

Les problèmes de routage considérant la contrainte de la continuité de longueur d'onde sont appelés RWA dans la littérature (Routing and Wavelength Assignment). Les problèmes de RWA ont une complexité d'autant plus grande que la taille du réseau est élevée et que le l'ensemble des paramètres considéré est vaste (prise en compte de convertisseurs de longueur d'onde, contraintes sur la taille des nœuds, contraintes sur la disponibilité des ressources, ...). La résolution du problème RWA peut s'effectuer de deux manières différentes :

1. R+WA : les phases de routage et d'affectation de la longueur d'onde sont exécutées indépendamment l'une de l'autre [Ramaswami 1994], [Birman 1995] ;
2. R&WA : le routage est effectué en même temps que l'allocation de la longueur d'onde, [Cavendish 2004].

La solution R&WA présente des résultats meilleurs que ceux du R+WA, car dans cette approche le choix des routes associées à chaque demande tient compte de la disponibilité en longueur d'onde [Chen 1996]. Les méthodes de résolution du problème R&WA s'appuient sur le modèle de réseau en couches.

2.3.1 Définition du modèle de réseau en couches

Un réseau est simple s'il satisfait la définition de graphe donnée en précédemment. Un réseau en couches (ou LGM, layered graph model) est un modèle logique obtenu de la manière suivante à partir du modèle de réseau initial :

- chaque nœud du graphe est répliqué W fois, où W est égal au nombre de longueurs d'onde disponibles dans une fibre. Ainsi, chaque un nœud i appartenant au réseau "simple", est représenté par un ensemble de nœuds v_i^w , avec $w = 1, \dots, W$.
- un lien l_{ij} appartenant à L (l'ensemble des liens) dans le graphe simple est représenté par un ensemble de liens v_{ij}^w dans le graphe en couches.

Chacun des nœuds destiné à être source v_s (ou destination v_d) d'une requête est représenté par un nœud fictif relié à tous les v_s^w (resp. v_d^w) ; ces nœuds permettent l'insertion et l'extraction du trafic dans le graphe en couches.

En figure 2.5 nous illustrons un exemple de réseau simple et en couches pour un réseau ayant 5 nœuds et 2 canaux par fibre. Dans le réseau en couches les nœuds ayant la même couleur représentent une projection du réseau simple sur un plan de longueur d'onde donné ; la connexion entre les différentes couches est possible grâce aux dispositifs de conversion de longueur d'onde (flèches colorées dans la figure), en leur absence le nœud est transparent ; l'insertion/extraction d'une demande est possible grâce aux transpondeurs qui émettent sur la longueur d'onde associée à la demande.

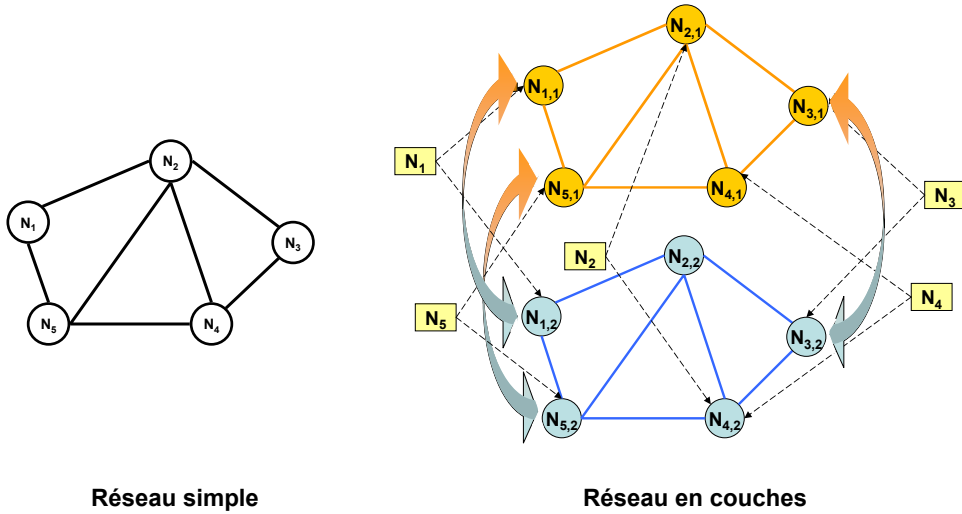


FIG. 2.5 – Représentation d'un réseau en simple et sa projection sur les différentes longueurs d'onde (réseau en couches).

Le déplacement dans un graphe en couches peut être de deux types : horizontal, au sein d'une même couche (déplacement dans le réseau simple en utilisant la même longueur d'onde) et vertical, d'une couche à l'autre (le passage d'une couche à l'autre s'effectue dans un même nœud par un changement de longueur d'onde). Le modèle de graphe en couches permet également de représenter un réseau hétérogène [Maier 2005] composé de nœuds transparents, hybrides et complètement opaques.

Grâce à ce modèle, la recherche des parcours associés à une longueur d'onde se résume en un problème de routage simple mais de complexité très élevée puisque le nombre de nœuds du réseau en couche est $|N| \times W$ et le nombre de liens est supérieur à $|L| \times W$, en effet il faut considérer les liaisons entre les différentes couches obtenues par les convertisseurs de longueur d'onde.

Pour la résolution des problèmes RWA, les algorithmes peuvent se baser sur des solutions heuristiques [Li 2003], [Y. Wang 2005], ou exactes [Saad 2004]. [Zang 2000] donne une schématisation et comparaison des différentes techniques utilisées dans la solution ce problème : le problème R&WA utilisant des méthodes exactes pose des problèmes sur la taille et sur le nombre de longueurs d'onde par fibre des réseaux à étudier ; des réseaux plus grands peuvent être étudiés seulement si le problème de routage et allocation en longueur d'onde est divisé en deux étapes distinctes.

En plus de la contrainte de continuité de longueur d'onde, la validité physique des parcours doit être vérifiée. Différents critères peuvent être utilisés dans ce processus de validation, comme cela sera présenté dans la section 4.4. Les parcours ne satisfaisant pas la contrainte d'ingénierie sont directement bloqués ou re-routés sur d'autres chemins jusqu'à ce que leurs parcours soient "physiquement valides" dans la mesure du possible.

En résumé, les causes d'un blocage dans le dimensionnement d'un réseau transparent peuvent être dues à :

1. un manque de ressources libres ;
2. un conflit de longueurs d'onde ;
3. un défaut de faisabilité physique.

Dans un réseau hybride, le dimensionnement est composé d'une étape supplémentaire par rapport au cas complètement transparent : le placement de régénérateurs ou(/et) de convertisseurs de longueur d'onde. Le problème revient à éviter les blocages dus aux conflits de continuité de longueur d'onde et aux contraintes physiques et en même temps minimiser l'emploi de ressources supplémentaires (régénérateurs, convertisseurs de longueur d'onde).

De nombreuses méthodes destinées à minimiser le nombre de ces dispositifs supplémentaires ainsi que le blocage des demandes sont décrites dans la littérature, [Yang 2005b], [Cardillo 2005], [Huang 2005], [Kulkarni 2005], [Ramamurthy 1998], [He 2006]. Ces méthodes supposent le choix des parcours en considérant les performances associées à la longueur d'onde ou cherchent à grouper les régénérateurs dans des points précis du réseau en fonction du trafic écoulé.

Comme pour le problème RWA, les algorithmes minimisant le nombre de convertisseurs peuvent employer des méthodes heuristiques [Lee 1999], [Lao 2004], ou exactes [Yang 2005b]. Les méthodes exactes sont limitées par le nombre d'équations à résoudre qui est proportionnel à la taille du réseau (liens) et au nombre de canaux présents dans les liens. Les méthodes heuristiques sont capables de traiter des problèmes de taille plus grande en ayant des performances proches des méthodes exactes [Ye 2003], [Jaumard 2004].

Le placement des régénérateurs a été résolu principalement avec des techniques heuristiques, [Yaragolra 2000] ; ce choix est dû à la difficulté de linéariser l'emplacement d'un régénérateur (connaissance de l'histoire du chemin et division du parcours en sous-parcours assurant les contraintes physiques), en effet le problème est d'autant plus complexe que le réseau est grand

et que le nombre de longueurs d'onde par lien est élevé [Ye 2003], [Yang 2005b].

Différentes études comparant les résultats de blocage et l'utilisation de ressources pour le placement de régénérateurs après ou pendant la phase de RWA ont été proposées : [Yang 2005b], [Sabella 1998]. Etudier la performance physique d'une connexion pendant la phase RWA permet toujours de minimiser le blocage des demandes et parfois le nombre de ressources occupées. Les algorithmes qui évaluent la performance physique pendant la phase RWA sont appelés RWA& φ .

2.3.2 Choix de l'algorithme de dimensionnement utilisé

Le choix de l'algorithme a un impact sur les résultats des comparaisons entre scénarios mais nous avons vérifié que des algorithmes relativement simples pouvaient donner un résultat proche (sauf effets de bord). Aussi nous avons choisi d'adopter :

1. un algorithme simple pour les discussions de faisabilité physique. En effet dans ce cas, la faisabilité des chemins est évaluée indépendamment les uns des autres (première approximation). Dans ce cas, seul compte le chemin et peu importe la façon dont il est obtenu ;
2. une heuristique d'optimisation pour les résultats de dimensionnement avec contraintes physiques.

Nous démontrons plus loin que si le choix de l'algorithme est crucial pour une analyse fine, un algorithme moins performant peut tout à fait donner des résultats représentatifs. Et c'est ce que nous recherchions durant ces travaux.

Pour effectuer les études sur les contraintes physiques dans un réseau transparent et pour les premières comparaisons entre les différents scénarios réseaux, nous avons donc choisi d'utiliser un algorithme simple basé sur la recherche du plus court chemin [Dijkstra 1959]. L'algorithme (que nous appellerons Dijkstra pour simplifier) est une heuristique simple. D'abord, nous recherchons la route la plus courte entre les deux nœuds source et destination des demandes (problème de simple routage). Nous avons choisi le plus court chemin en termes de distance kilométrique et non en termes de nœuds traversés. Nous allouons la longueur d'onde dédiée à la transmission du signal (problème WA). Pour chaque route sélectionnée, nous contrôlons si le signal peut être transmis correctement (s'il satisfait les contraintes physiques), suivant les méthodes qui seront expliquées au paragraphe 4.2. Si le signal est trop dégradé pendant sa propagation, nous plaçons autant de régénérateurs que nécessaire le long de sa route, si on suppose que le nombre de fibres est limité, quand tous les canaux disponibles sont occupés, le lien n'est plus utilisable pour établir de nouveaux chemins (pratiquement, nous supprimons le liens de la matrice de distances utilisée par l'heuristique). Si le nombre de fibres n'est pas limité, aucune contrainte n'est imposée sur le nombre de canaux dans le lien.

Cette approche est de type R+WA (les trois phases de routage, validation physique et allocation de longueur d'onde sont disjointes) avec des validations physiques successives, comme indiqué en figure 2.6.a.

La comparaison finale entre les différents réseaux (opaques, transparents et translucides) est effectuée en utilisant un algorithme plus complexe, permettant d'optimiser le routage. Cet algorithme est une heuristique de type RWA& φ (indiqué en figure 2.6.b) dans laquelle les trois

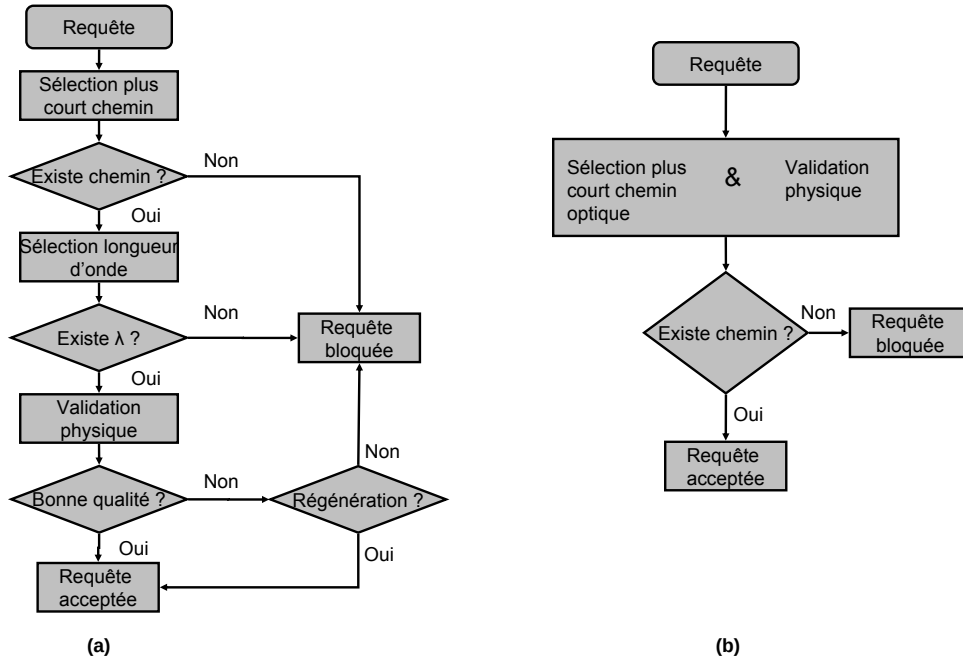


FIG. 2.6 – Types d’approches pour le routage d’un signal : (a) algorithme R+WA et (b) algorithme RWA& φ .

phases du dimensionnement (routage, allocation de longueur d’onde et placement des régénérateurs ou convertisseurs de longueur d’onde) sont effectuées en même temps, en maximisant le nombre de demandes routées (minimisant le blocage) et en minimisant le coût du réseau. Cet algorithme effectue une première phase de présélection de k chemins sur le réseau logique simple (sans considération de longueur d’onde), puis une deuxième phase alloue des poids aux chemins présélectionnés transposés sur le réseau logique en couches.

Les k chemins présélectionnés (plus courts en termes de kilomètres) dans la première phase de résolution du problème sont ensuite routés dans le réseau en couches. Chaque lien du réseau en couches a un poids qui représente, soit le nombre d’amplificateurs présents dans le lien du réseau logique et la disponibilité de canaux libres si ce lien représente un lien physique, soit une conversion de longueur d’onde si le lien représente la transition d’une couche à une autre. Pour chaque parcours appartenant au réseau simple, nous sélectionnons le parcours du réseau en couches (c’est-à-dire le chemin optique) qui minimise le nombre de convertisseurs de longueur d’onde ainsi que le nombre de fibres à employer dans le réseau. Dans cette étude une conversion de longueur d’onde permet aussi une régénération du signal, car il s’agit d’une conversion OEO du même type que la régénération.

La phase finale examine la faisabilité physique des parcours et ajoute des régénérateurs si nécessaire dans chaque parcours (la qualité du signal est vérifiée en utilisant le critère énoncé au paragraphe 4.4.5) et si cette ressource est disponible. La présence d’une (ou plusieurs) régénération(s) est prise en compte en ajoutant des poids supplémentaires aux parcours du réseau en couche. Finalement, le parcours sélectionné est celui parmi les k parcours en couches qui a le poids administratif le plus faible (poids prenant en compte le nombre de régénérations, de

conversions en longueur d'onde et l'utilisation de fibres supplémentaires).

Dans l'annexe [A](#), nous détaillons plus précisément cet algorithme. L'avantage de cette méthode par rapport à l'algorithme simple est la prise en compte du besoin de ressources supplémentaires (régénérateurs, convertisseurs de longueur d'onde ou fibres) au moment du routage. Comme les valeurs des poids administratifs sont des variables d'entrée qui peuvent être changées ([Morea 2003](#)) en fonction des éléments qu'on veut minimiser au cours du routage, cette méthode permet d'avoir des routes qui optimisent mieux l'utilisation des ressources.

Chapitre 3

Fonctions optiques de transmission et de commutation dans un réseau optique hybride

Un réseau optique, qu'il soit opaque, hybride ou transparent, doit assurer les deux tâches suivantes :

- la transmission de tous les signaux en assurant en réception une qualité minimale ;
- la sécurisation des chemins optiques en fonction du niveau de service demandé.

Ceci étant dit, les techniques mises en place pour réaliser ces objectifs seront bien sûr différentes en fonction du type de réseau envisagé.

En ce qui concerne le premier point c'est-à-dire l'assurance sur la qualité de transmission, il est clair que la transparence implique une adaptation des règles d'ingénierie point à point des systèmes puisque par exemple, les distances de transmission peuvent être plus importantes et les chemins très variés. Dans ce chapitre nous étudierons ce premier aspect.

Le deuxième point concernant la sécurisation des chemins optiques implique la surveillance de la performance en transmission des canaux, d'une part, et les mécanismes de résilience, d'autre part. Nous avons choisi dans cette étude de considérer la sécurisation du trafic par protection : nous avons vu au paragraphe 2.2.5 que pour garantir en permanence l'acheminement des demandes, on sécurise les systèmes de transport en installant des systèmes supplémentaires de réserve. Cette protection est dédiée et elle est effectuée de bout en bout (au sens de la connexion optique). Ce choix implique une modification de la matrice de trafic et le problème de protection est équivalent au problème de routage avec de nouvelles contraintes (par exemple choix de parcours disjoints).

Si à première vue, la transparence n'induit pas de différence de traitement du problème de protection, elle implique un changement sur la façon d'évaluer la qualité de la transmission. Nous étudierons ce point dans un deuxième temps.

3.1 Impact de la transparence sur l'ingénierie de transmission

L'introduction de la transparence demande aux systèmes des nouvelles fonctionnalités (brasseurs optiques) et pour ce qui concerne les fonctionnalités classiques (amplification, compensation de dispersion, ...) de meilleures performances de la part des équipements. Ces exigences viennent des besoins qu'ont les signaux de parcourir dans la couche physique des distances de plus en plus longues, englobant aussi la traversée de nœuds. Nous allons passer en revue les éléments constitutifs d'un réseau afin d'introduire la notion d'ingénierie d'une ligne de transmission, d'une part, et comprendre les implications de la transparence, d'autre part.

Une transmission est l'acheminement d'un signal entre deux points du réseau. Elle est assurée par les éléments présents dans les liens et dans les nœuds traversés. La figure 4.1 schématise les fonctions principales relatives aux liens et aux nœuds du réseau et pour chaque fonction les dispositifs correspondants. On remarque que certains dispositifs sont présents à la fois dans les liens et les nœuds. Pour cette raison, dans la description suivante des dispositifs et de leurs caractéristiques, il ne sera pas fait de séparation entre les liens et les nœuds.

Nous avons souhaité cadrer l'étude pour une évolution à court et moyen terme. Ainsi l'étude menée considère l'introduction de la transparence sur un réseau typique pour France Télécom, employant des ressources déjà présentes sur le terrain ou qui peuvent être introduites dans un futur proche. Ainsi, la plupart des considérations faites reposent sur des fonctions classiques ; dans la suite on fera une brève liste des choix d'architecture faits et de ce qui est requis en plus dans un réseau hybride/transparent par rapport à un réseau opaque.

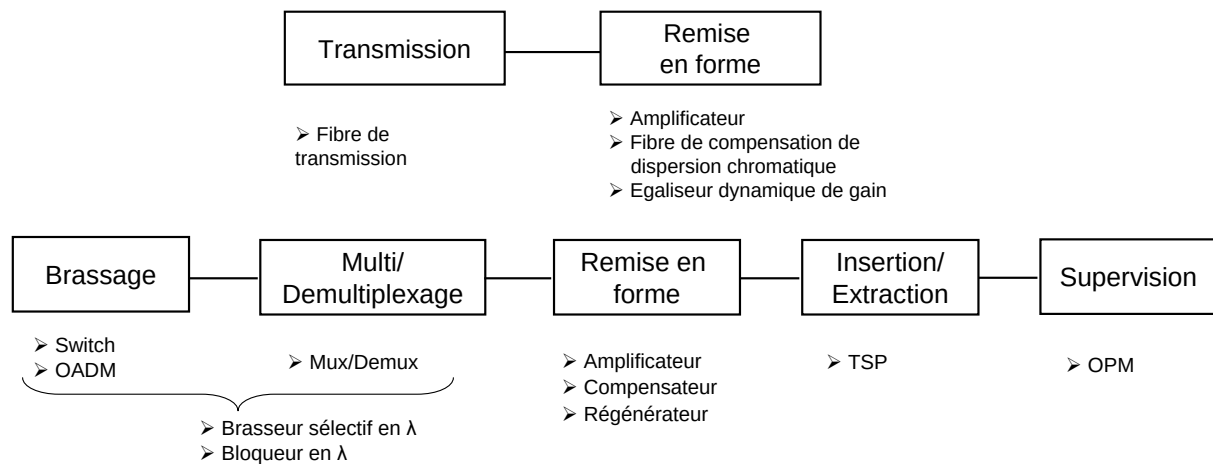


FIG. 3.1 – Schématisation des fonctions principales des liens et des nœuds.

3.1.1 Fibre

Comme nous l'avons dit, l'étude s'appuie sur une infrastructure déjà existante et qui pourrait évoluer par l'ajout de nouveaux arcs. Les fibres choisies pour la réalisation des réseaux avec de la transparence sont donc les mêmes que celles utilisées dans le cas d'un réseau opaque. Pour des

transmissions à 10 Gbit/s, la fibre de transmission utilisée doit garantir les spécifications de la norme correspondant au type de fibre utilisée. Pour l'étude menée, nous avons considéré la fibre standard monomode (SSMF, Standard Single Mode Fiber), de la recommandation [ITU 2005], car cette fibre est utilisée dans la quasi totalité des réseaux dans le monde.

3.1.2 Amplificateurs optiques

Les amplificateurs servent à reconstituer la puissance du signal, après que celui-ci a été affaibli par la transmission dans la fibre ou la traversée de plusieurs dispositifs. Pour cette raison ils sont employés régulièrement à chaque section de fibre le long des liens, en fonction des critères de transmission choisis et après la traversée des nœuds.

Les amplificateurs considérés dans cette étude sont seulement les amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier) car c'est ce type d'amplificateur qui est utilisé de manière classique dans les réseaux de transmission actuels. Il existe un autre type d'amplification, l'amplification Raman, mais celle-ci (bien que commercialement disponible) est encore très peu utilisée car la technique est moins mature du point de vue opérationnel et l'usage de ces amplificateurs est pour l'instant réservé à la compensation des pertes dans les pas très longs, en complément de l'amplification classique par EDFA. Le choix d'architecture effectué dans cette thèse prévoit l'utilisation d'amplificateurs à double-étage aussi bien dans les nœuds d'aiguillage que dans les sites d'amplification (parfois appelés répéteurs par abus de langage). Ceci permet d'introduire des modules de compensation de la dispersion chromatique dans le réseau (dans l'inter-étage de l'amplificateur), c.f. section 3.1.4. De plus, nous supposons que le gain des amplificateurs de ligne est le même que celui des amplificateurs des nœuds (les pertes d'un pas de transmission sont équivalentes aux pertes dans les nœuds, c.f. 4.5.1).

Un amplificateur est caractérisé par sa courbe de gain. Celle-ci n'est pas plate et donc il y a des longueurs d'onde qui sont plus amplifiées que d'autres (figure 3.2). En général, ces défauts sont assez similaires d'un amplificateur à l'autre, [Avanex], [Cisco]). Ainsi, plus on traverse d'amplificateurs, plus la différence de puissance entre les canaux sera accentuée. Cette inégalité entre les puissances des différents canaux a plusieurs conséquences.

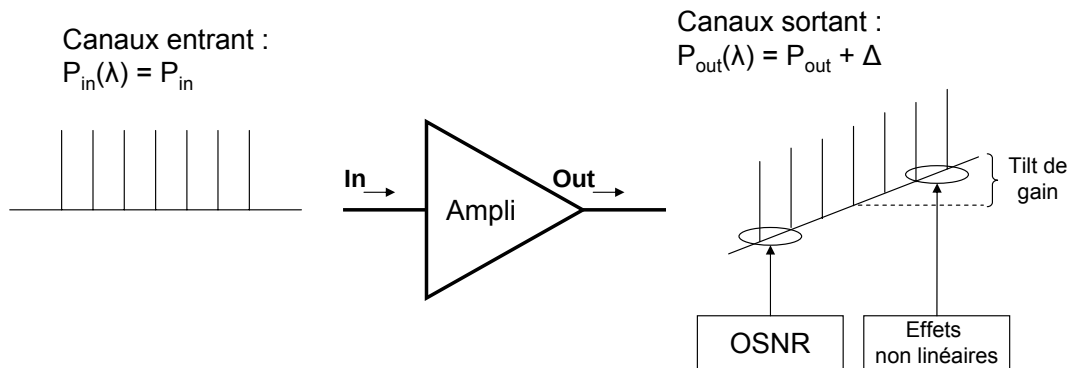


FIG. 3.2 – Exemple de non uniformité de gain sur la bande optique.

Les canaux ayant des puissances trop faibles seront affectés par des dégradations dues à une diminution de leur rapport signal à bruit ou OSNR (c.f. section 4.1.1). De plus, lors du démultiplexage, ils seront plus sensibles aux phénomènes de diaphotie (crosstalk) (c.f. section 4.1.2) car au moment du démultiplexage des canaux, l'impact de la présence de puissance résiduelle des canaux voisins sera d'autant plus fort que la puissance du canal démultiplexé sera faible. Les canaux ayant des puissances trop élevées, sont eux aussi sujets à des dégradations en ligne dues aux effets non-linéaires, car ces effets sont proportionnels à la puissance (c.f. section 4.1.2). De plus, dans le cas d'un nœud, l'insertion d'un canal suppose que le canal qui se trouvait éventuellement sur la même longueur d'onde ait été préalablement effacé (i.e. atténué). Donc, plus le canal à effacer a une puissance élevée, moins il sera possible de l'effacer efficacement, ceci aboutissant à une pénalité accrue pour le canal inséré. Pour ces raisons, dans les réseaux à longue distance il est souhaitable de réduire les différences de puissance entre les canaux. Ainsi, des amplificateurs capables de limiter les différences de puissances entre canaux sont disponibles sur le marché pour la transmission à très longue portée (Extra Long Haul, ELH, et Ultra Long Haul, ULH) : amplificateurs à gain plat, fournissant une ondulation de gain de l'ordre de 0,5 dB [Alcatel], [Avanex]. Nous verrons dans la partie suivante comment l'utilisation de dispositifs d'égalisation permet en plus de relâcher une partie de ces contraintes.

Une autre caractéristique des amplificateurs est leur facteur de bruit, c.f. section 4.1.1. Ce paramètre intervient dans la dégradation du rapport signal à bruit des canaux à la traversée de l'amplificateur et détermine donc le besoin de régénération. Dans les systèmes à longue portée il sera donc demandé d'avoir des amplificateurs avec des facteurs de bruit faibles. Sur la bande de transmission considérée, ce facteur de bruit est relativement plat, donc on ne considérera pas de variations sur la bande utilisée pour le transport optique.

3.1.3 DGE

Comme énoncé dans la section précédente, pour garantir la transmission de canaux sur plusieurs pas d'amplification, tout en évitant une différence de puissances trop élevée, on recherche des amplificateurs dont les courbes de gain soient les plus plates possibles et qui compensent parfaitement les inégalités d'atténuation de la fibre de transmission. Mais, dans la réalité ce n'est pas le cas, du fait des limites propres à la fabrication des amplificateurs et, aussi, à cause de la courbe d'atténuation des fibres qui n'est pas uniforme.

De plus, l'accroissement des inégalités de puissance en ligne dépend aussi du nombre de canaux présents sur la ligne (effet Raman intra-bande d'une part, changement du point de fonctionnement des amplificateurs d'autre part). Pour résoudre au premier ordre le problème des inégalités de puissance dans la ligne, c'est-à-dire le "*tilt*", il est possible de jouer sur le gain des amplificateurs [Alcatel], [Cisco]. Mais, l'adaptation de la courbe de gain n'est pas capable de corriger les inégalités plus fines de puissance, appelées ondulations de gain ("*ripple*" en anglais) [Antoniades 2001].

En plus des inégalités engendrées par la transmission en ligne, la traversée d'un nœud (c.f. section 4.3 pour les types de traversée qu'il peut y avoir), peut encore accentuer les différences de puissance entre les signaux. Enfin, dans un réseau transparent les inégalités de puissance proviennent également de la transmission de signaux ayant des histoires différentes : signaux

qui viennent d'être insérés dans le réseau ou signaux ayant traversé divers nœuds et parcouru diverses distances auparavant.

Pour éviter que la différence de puissance entre les canaux soit trop élevée, on introduit dans le réseau des égaliseurs dynamiques de gain (DGE, Dynamic Gain Equalizers) [Avanex], [LightConnect], [Avanex], [JDS]. Les DGE sont toujours suivis par un contrôleur de performance optique (OPM, Optical Performance Monitoring) qui opère une contre-réaction et permet de bien régler les puissances en sortie de l'amplificateur. Ces dispositifs sont aussi utilisés dans les réseaux opaques pour les liens constitués par un grand nombre d'amplificateurs. L'aspect dynamique du dispositif facilite le réglage des éléments de la ligne, et permet de s'adapter à l'évolution des paramètres de transmission (vieillessement, insertion de nouveaux canaux, ...).

Dans les systèmes point à point, les règles de placement des DGE (égaliseurs de puissance de bande) dans les liens sont propres aux fournisseurs des systèmes. On l'exprime en général par une période en nombre de pas d'amplification. Nous supposons une règle identique pour l'emplacement des DGE dans les liens dans notre étude : un DGE tous les N amplificateurs traversés. Par exemple, $N = 5$ correspond à une période raisonnable vis-à-vis des performances des systèmes ULH actuels. L'architecture que nous envisageons dans la suite de cette étude prend pour hypothèse que les canaux sont égalisés en puissance à la sortie de chaque nœud grâce à une fonctionnalité d'égalisation disponible dans le nœud. Placer un DGE en amont des nœuds pour égaliser la puissance des canaux avant que ceux-ci ne pénètrent dans les nœuds présente l'avantage de réduire les effets de la diaphotie. Toutefois, la fonction d'égalisation fournie par le DGE a une résolution limitée, c'est-à-dire que des canaux de forte puissance entourés de canaux de faible puissance ne pourront être égalisés correctement. Il est donc nécessaire de compléter cette fonction d'égalisation grossière par une égalisation plus fine assurée par le nœud (égaliseurs de puissance de canaux). Le réglage de la puissance des canaux ajoutés ou insérés est fait par l'intermédiaire d'un moniteur de canaux qui joue sur la puissance de sortie des transpondeurs locaux. Nous supposons par la suite que s'il est nécessaire d'égaliser la puissance des canaux dans un nœud, l'utilisation d'un DGE juste en sortie du nœud est suffisante (ceci est justifié par le fait que les inégalités de puissance apparaissent entre les canaux ayant parcouru des trajets différents). Dans une ligne composée par N amplificateurs, le nombre de DGE en ligne est obtenu par la division entière de N par la période entre deux DGE en ligne. Un exemple de liaison avec le nombre d'amplificateurs et de DGE nécessaires est donné en figure 3.3.

3.1.4 Modules de compensation de dispersion chromatique

Au cours de cette étude on utilisera des modules de fibre compensatrice (DCF, Dispersion Compensating Fiber ou DCM Dispersion Compensating Module), qui sont des compensateurs optiques statiques. Ces modules sont placés en ligne dans les sites d'amplification et dans les amplificateurs des nœuds, voir figure 3.4

Le premier critère de performance de ce type de module est la qualité de compensation. Dans les réseaux considérés, les signaux traversent plusieurs nœuds sans subir aucune conversion optoélectronique, donc on demande aux caractéristiques des DCM de mieux compenser les effets de dispersion sur toute sa bande de transmission (c.f. section 4.2.4) que pour des liaisons de

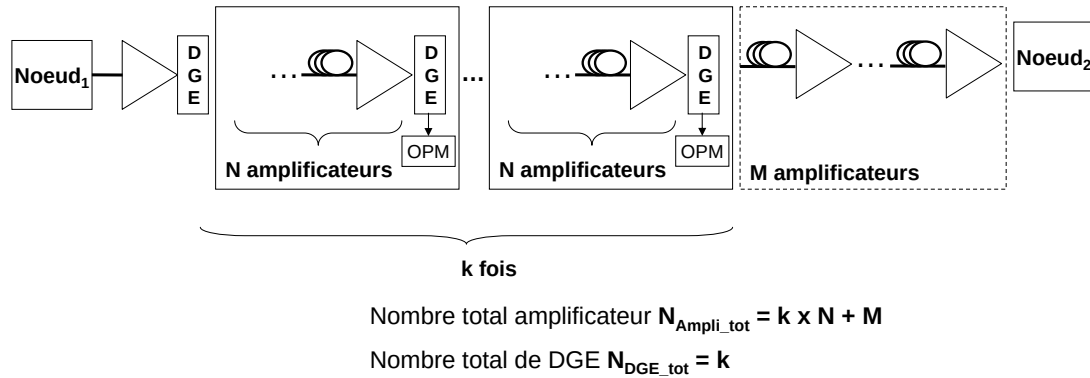


FIG. 3.3 – Représentation d’une liaison optique entre deux nœuds avec la disposition des DGE et les amplificateurs double étage.

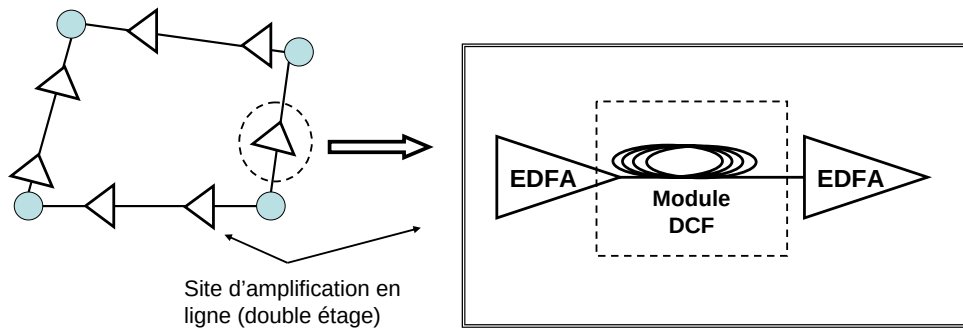


FIG. 3.4 – Exemple d’un site d’amplification en ligne comprenant un module de compensation de la dispersion chromatique.

plus courte portée. La qualité de la compensation est exprimée par le rapport entre la dispersion et la pente de dispersion des modules RDS (Ratio Dispersion over Slope) et par la granularité des modules (c.f. section 4.2.4). Plus les distances à parcourir sont élevées, plus on demandera aux fibres de compensation d’avoir un comportement qui s’approche du cas idéal : compensation parfaite de la dispersion sur toute la bande de transmission d’une part et d’autre part une gamme de modules plus précise. A l’heure actuelle, les constructeurs proposent diverses gammes de modules de dispersion avec différents RDS [Grüner-Nielsen 1999b] et des granularités plus fines en fonction de la portée du système à étudier.

Un autre paramètre important associé à un module est sa perte d’insertion qui va impacter sur la conception des amplificateurs utilisés dans le réseau. Par exemple, un module de compensation destiné à un pas de 80 km de SMF induit des pertes de l’ordre de 9 dB ; cela entraine l’ajout un étage d’amplificateur pour compenser les pertes additionnelles.

3.1.5 Transpondeurs

Un transpondeur est un dispositif qui effectue une double conversion optoélectronique : une première conversion transforme le signal client d'une porteuse optique dite non colorée (interface de type courte portée à 1 300 nm, utilisée par les signaux clients) en signal électrique ; une deuxième conversion transforme ce signal électrique en un signal optique dit coloré, sur une longueur d'onde réservée aux transmissions WDM et en accord avec les grilles spectrales de la recommandation [ITU 2001a]. Une partie du signal électrique est destinée à la gestion du système de transmission et n'appartient pas au client (par exemple le surdébit FEC, l'encapsulation du signal client sur un format de transmission de type OTN ou SDH). Les transpondeurs actuels offrent la possibilité d'accorder la longueur d'onde d'émission sur tout ou partie de la bande de transmission. La figure 3.5 montre la structure d'un transpondeur.

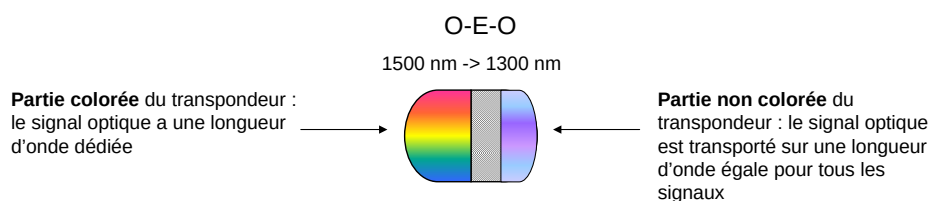


FIG. 3.5 – Représentation d'un transpondeur.

Dans notre étude les transpondeurs (TSP) sont complètement caractérisés par leur relation entre l'OSNR et le taux d'erreur (ou taux d'erreur binaire). Cette relation dépend de :

- **débit de transmission** : dans ce travail tous les signaux sont modulés à une fréquence de 9,95328 Gbit/s (débit qui correspond à la transmission de signaux SDH STM64).
- **format de modulation du signal** : le format choisi est le NRZ (*Non Return to Zero*), car pour des débits de 10 Gbit/s et pour la transmission terrestre, c'est actuellement le meilleur compromis performance/prix sur une fibre de type SMF.
- **code correcteur d'erreurs** : FEC (*Forward Error Correction*) [Zyskind 2002], qui nécessite un "surdébit". Le FEC considéré dans cette étude est décrit dans la recommandation [ITU 2003b] qui modifie le débit nominal de 9,95328 à 10,7 Gbit/s.

Cette relation dépend aussi des effets physiques qui affectent la qualité du signal pendant sa propagation, c.f. section 4.2.1. Une modification de la relation due à ces effets sera comptabilisée sous forme d'incrément de l'OSNR nécessaire pour réaliser un certain taux d'erreur (c.f. 4.2.1).

3.1.6 Régénération et conversion de longueur d'onde

La régénération est une opération qui permet de réamplifier et/ou de remettre en forme le signal et/ou de le resynchroniser voire de le transférer sur une autre longueur d'onde. Dans cette étude nous considérerons des régénérations effectuant ces trois opérations en même temps, aussi

appelées régénérations 3R. Une opération de conversion de longueur d'onde consiste à copier le signal d'une longueur d'onde vers une autre longueur d'onde.

Aujourd'hui, ces deux fonctions peuvent être effectuées soit dans le domaine électronique, soit dans le domaine optique. Les fonctions tout-optique ne seront pas prises en compte dans cette étude vu leur manque de maturité technologique. La solution électronique consiste à utiliser deux transpondeurs. La fonction de conversion optique-électronique-optique (OEO) obtenue en utilisant deux transpondeurs en dos-à-dos ("*back-to-back*") permet d'effectuer une régénération du signal sur la longueur d'onde d'origine ou sur une longueur d'onde différente. La même structure est donc utilisée pour le convertisseur. Dans un futur proche, le besoin de régénération et de conversion de longueur d'onde dans les réseaux transparents peut faire apparaître dans le marché des dispositifs dédiés à la conversion OEO, donc moins chers que la solution actuelle. Nous avons représenté les dispositifs de régénération et conversion en longueur d'onde en figure 3.6.

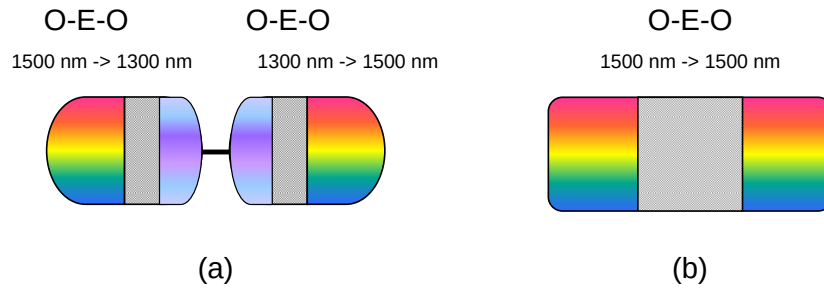


FIG. 3.6 – Schématisation d'un dispositif de régénération réalisé par deux transpondeurs dos-à-dos (a) et un dispositif dédié (b).

Ces dispositifs ont une technologie mature et fiable, mais leur caractère opaque ne garantit aucune flexibilité (excepté la flexibilité vis-à-vis de la longueur d'onde des lasers accordables, aucune flexibilité n'est garantie sur le format de modulation, sur le débit, sur la compatibilité entre les différents fournisseurs). De plus ils sont très gourmands en puissance électrique.

3.1.7 Multiplexage/Démultiplexage

L'opération de multiplexage (et réciproquement démultiplexage) agrège (resp. sépare) un ensemble de signaux de N entrées différentes portés par N longueurs d'onde différentes vers une seule sortie (resp. 1 entrée sur N sorties). Ces opérations sont requises dans chaque nœud pour permettre de séparer un signal des autres en fonction de la direction qu'il doit emprunter. Dans les structures des nœuds les plus communes (c.f. section 3.2), ces opérations sont effectuées par des dispositifs (multiplexeurs/démultiplexeurs) situés à l'extérieur du nœud qui séparent tous les signaux provenant d'une fibre pour les adresser chacun vers une entrée dédiée du nœud. Dans les architectures de nœuds transparents de nouvelle génération, cette opération peut être intégrée à l'intérieur du nœud (nœuds basés sur des bloqueurs de longueur d'onde ou sur des WSS).

3.2 Brassage et commutation

Dans une conception transparente des réseaux, les dispositifs utilisés jusqu'à aujourd'hui pour brasser et commuter un signal dans les nœuds ne pourront plus être utilisés à cause de leur caractère opaque. Différentes techniques sont explorées encore aujourd'hui pour garantir ces fonctions de manière transparente [Mechels 2003], [Marom 2005], [Doerr 2006], [Keyworth 2006]. Dans cette section, nous analysons la structure des nœuds dans le cas opaque, transparent et hybride.

3.2.1 Nœud opaque

Un nœud opaque est composé d'un cœur de commutation et d'un ensemble de ports. Le cœur de commutation peut être basé sur une structure ou matrice électronique, où la commutation est réalisée dans le domaine électrique, ou sur une structure photonique/tout-optique, où la commutation est réalisée dans le domaine optique, [Ramaswami 1998]. Au cours de cette étude, nous n'avons considéré comme nœud opaque que le nœud à cœur électronique, permettant la commutation et les opérations d'agrégation, en même temps. Ce choix est justifié par la maturité de la technologie et par des fonctionnalités qui offrent jusqu'à maintenant le compromis le plus avantageux entre prix et performances. Le signal traversant le nœud est converti du domaine optique de la couche physique au domaine électrique de la couche cliente grâce à des transpondeurs dont l'interface client non colorée est connectée à la matrice à travers des "ports opaques" (interfaces non colorées effectuant une conversion optique/électronique du signal client), comme indiqué en figure 3.7. Un nouveau type d'interfaces colorées destinées à être directement connectées à la matrice électronique commence à apparaître dans le commerce : ce sont des ports opaques ayant également la fonction de transpondeurs. Cette solution évite d'avoir de la redondance de conversion OE et d'économiser le nombre d'interfaces nœuds-liens. En l'état actuel, le problème lié à ce dernier type de dispositif réside dans le besoin de compatibilité entre les systèmes de transmission (systèmes en ligne WDM) et les nœuds.

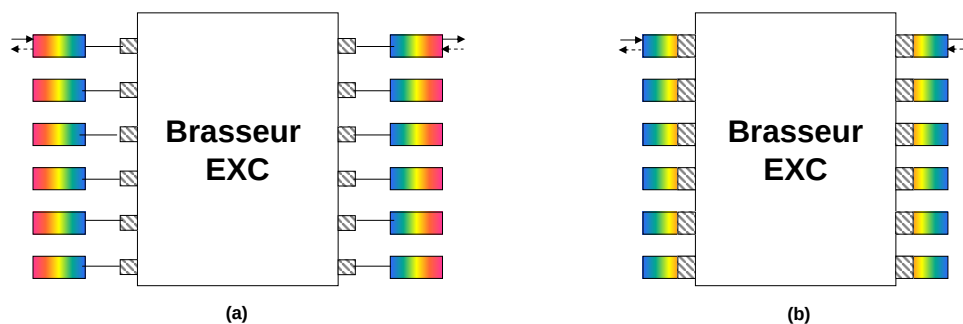


FIG. 3.7 – Représentation d'un brasseur opaque avec des TSP plus ports opaques (a) ou des cartes colorées (b).

3.2.2 Nœuds transparents

Une particularité des nœuds transparents est que l'architecture d'un nœud dépend de son degré de connectivité : si il est égal à deux on peut utiliser un (R)-OADM ou une matrice de commutation (OXC, Optical Cross-Connect) ; s'il est supérieur on ne peut pas utiliser de (R)-OADM. Les deux structures permettent l'insertion/extraction de certains canaux et le passage transparent des canaux en transit ; les OXC permettent en outre l'aiguillage des canaux vers différentes fibres de sortie (en fonction du routage). La réalisation de ces nœuds repose sur différentes technologies : modules discrets (comprenant un étage de filtrage et un étage de commutation) ou modules intégrés (où les opérations de filtrage et de commutation sont faites en même temps). Différentes réalisations sont proposées dans la littérature, [Titchmarsh 1994], [Marom 2005]. Dans l'étude menée, nous avons choisi trois techniques qui nous apparaissent les plus probables à court terme et avec les meilleures caractéristiques performance-coût :

- pour les R-OADM les structures basées sur des bloqueurs de longueur d'onde (WB, Wavelength Blocker) ;
- pour les nœuds de degré supérieur à deux, les matrices constituées par des MEMs, technologie fiable et mure, et des dispositifs WSS (Wavelength Selective Switch) qui commencent à émerger. Pour simplifier nous utiliserons le terme OXC quelle que soit la technologie associée.

Dans cette étude un nœud transparent est un nœud où aucune fonction optoélectronique ne peut avoir lieu.

3.2.3 Nœuds hybrides

Les architectures de nœuds présentées ci-dessus sont utilisées dans les nœuds complètement transparents. C'est-à-dire que les opérations d'insertion, extraction sont effectuées à l'extérieur de la partie optique du nœud présentée jusque là. Dans un réseau translucide, en plus des insertions et extractions, il faut garantir aussi les opérations de régénération. Deux choix sont possibles, voir figure 3.8 :

- greffer un dispositif OEO 3R sur une partie du cœur photonique du nœud considérée ;
- placer les dispositifs de régénération à l'extérieur de la partie optique du nœud (batterie de régénérateurs).

Dans le premier cas la flexibilité du nœud est liée au nombre de convertisseurs OE dédiés à chaque fibre. Plus ce nombre est élevé plus le nœud est flexible (et moins il est transparent). Réciproquement, la flexibilité du nœud vis-à-vis des évolutions du routage sera d'autant plus réduite que le nombre de longueurs d'onde qui subiront des conversions sera petit ; dans le deuxième cas, on peut avoir plus de flexibilité car avant de passer par les régénérateurs, les signaux traversent la matrice de brassage photonique : l'aiguillage à travers la matrice photonique permet de mieux partager les dispositifs OE entre les différentes fibres d'entrée. Dans cette étude nous avons choisi des architectures de nœud ayant les dispositifs OEO extérieurs à la matrice OXC. Encore une fois, différentes structures de nœuds peuvent être proposées ; dans la suite trois structures sont analysées avec leurs avantages et inconvénients.

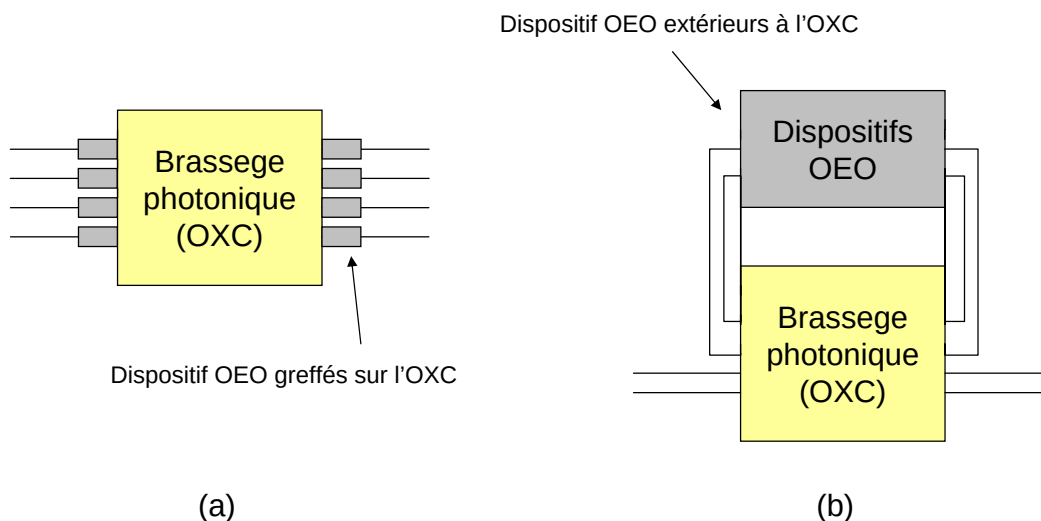


FIG. 3.8 – Exemple d’architecture de nœud hybride avec les dispositifs OEO greffés sur l’OXC (a) et externes (b).

Structure 1 : EXC sur OXC

Cette structure hybride est la plus proche à l’état actuel des nœuds utilisés dans les réseaux opaques. La matrice EXC permet à tout moment d’avoir de nouvelles insertions/ extractions et/ou régénération, à condition qu’il y ait des ports disponibles sur l’EXC et l’OXC, voir figure 3.9.a. Les fonctionnalités assurées par cette structure sont les mêmes que pour une matrice opaque, [Ramaswami 1998] :

Avantages : surveillance (c.f. 3.3) facile à effectuer. Flexibilité de longueur d’onde pour les opérations de A/D ou la régénération, grâce à l’accordabilité des transpondeurs ; possibilité d’échanger les ports dédiés à l’A/D avec ceux dédiés à la régénération.

Inconvénients : utiliser une matrice EXC rajoute des coûts supplémentaires au nœud transparent, indépendamment du nombre de ports électroniques.

Structure 2 : EXC sur OXC, EXC uniquement pour Insertion/extraction et ajout d’une batterie de régénérateurs sur l’OXC pour régénération

La matrice EXC assure uniquement les fonctions d’insertion et extraction. Les fonctions de régénération sont assurées par une batterie de régénérateurs toujours à l’extérieur de la matrice OXC pour une question de flexibilité, voir figure 3.9.b. La régénération opérée par deux TSP back-to-back (ou tout autre dispositif dédié à la régénération) permet de corriger des erreurs mais les informations de performance échangées avec les logiciels de surveillance du réseau sont limitées (c.f. 3.3).

Avantages : utilisation d’EXC de petites tailles, donc plus économiques ; possibilité de groo-

ming (agrégation de plusieurs requêtes à faible débit en une seule ayant le même débit de transmission) uniquement des ports insertion/extraction. Grâce à la présence de la matrice électronique, les fonctions surveillance sont assurées pour les canaux extraits ou ajoutés.

Inconvénient : les ports dédiés à la régénération (ou à l'insertion/extraction) ne peuvent pas être utilisés pour l'insertion/extraction (resp. la régénération) contrairement à la structure précédente.

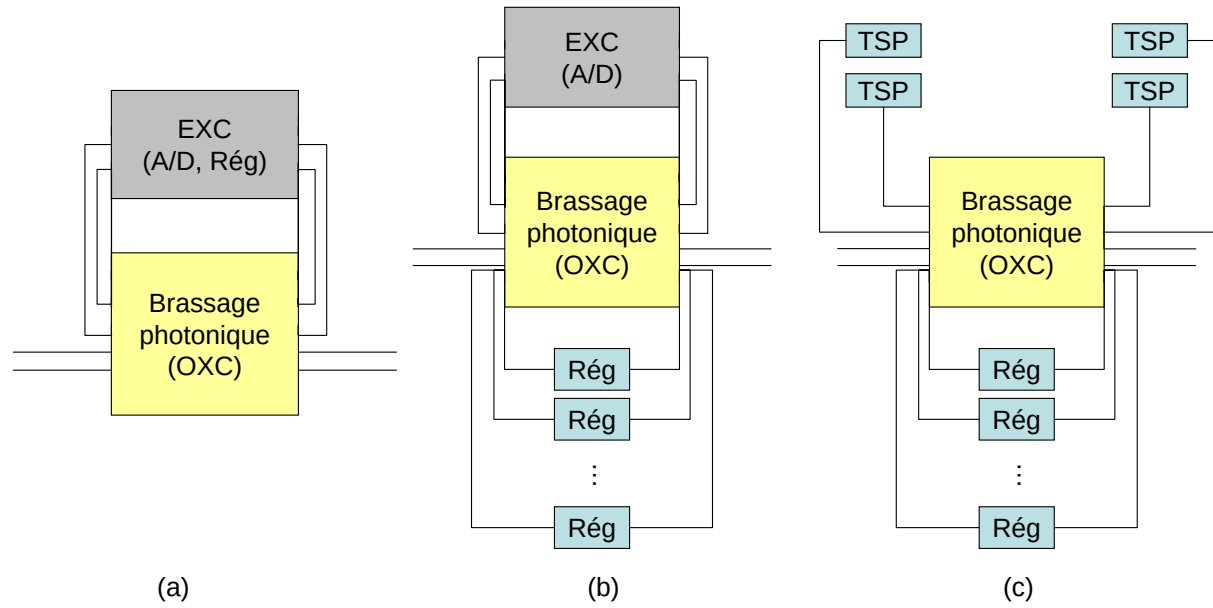


FIG. 3.9 – (a) Nœud hybride avec une matrice OXC et une matrice EXC dédiée à la l'insertion/extraction et régénération des signaux ; (b) nœud hybride avec une matrice OXC sur laquelle l'EXC est dédié à l'insertion/extraction des signaux et avec une batterie de régénérateurs en parallèle ; nœud hybride sans matrice EXC et avec une batterie de régénérateurs et de transpondeurs.

Structure 3 : Pas d'EXC sur OXC

On enlève la matrice EXC et on connecte directement les transpondeurs dédiés à l'insertion et extraction des signaux au brasseur optique et les conversions de régénération optoélectroniques sont garanties grâce à une batterie de régénérateurs situés à l'extérieur du brasseur. Une représentation de ce type de nœud est donnée en figure 3.9.c.

Avantage : absence d'EXC et donc grande économie sur la partie opaque du réseau de transport (ce coût est reporté sur les couches supérieures).

Inconvénients : la connectivité du réseau de transport n'est pas connue par la couche supérieure, les opérations de surveillance à effectuer sur les demandes reçues ne sont plus effectuées dans le réseau de transport : la connaissance de la qualité du réseau est distribuée sur toute les liaisons. Pour assurer la réception correcte du signal, les différentes opérations de surveillance

sont effectuées par la couche cliente supérieure. De plus, les opérations d'agrégation doivent être faites dans cette couche. Comme la comparaison entre les réseaux translucides et opaques doit être faite avec les mêmes fonctionnalités il est souhaitable de considérer un coût supplémentaire pour intégrer cette opération dans la couche supérieure pour que la comparaison soit cohérente. mais ce coût supplémentaire n'est pas facile à estimer.

3.2.4 Absence de brassage automatique dans la couche optique

Certaines architectures de nœuds peuvent ne pas présenter la fonction de brassage de longueur d'onde que l'on a supposée jusqu'ici, que ce soit pour les nœuds opaques, hybrides ou transparents. Le nœud ainsi obtenu prévoit la présence de la matrice EXC uniquement pour permettre l'insertion/extraction des canaux du réseau. Les signaux portés par les longueurs d'onde dans les fibres sont aiguillés de manière fixe par une série de jarretières (portions de fibres ou de câbles) connectées manuellement aux multiplexeurs et aux démultiplexeurs. Dans cette architecture on distingue le cas opaque du cas l'hybride par l'insertion systématique de régénérateurs entre les ports du démultiplexeur et du multiplexeur ; dans le cas d'un réseau hybride la régénération est effectuée selon les besoins. Un exemple de ce type de nœud est donné en figure 3.10. Comme pour les architectures de nœuds précédentes, nous présentons les avantages et désavantages liés à ce choix architectural.

Avantages : la batterie de régénérateurs externe à la matrice électronique permet l'utilisation de matrices EXC de taille plus petite, donc moins onéreuses. Cela permet aussi de diminuer le nombre de ports opaques qui constituent une dépense équivalente à celle des transpondeurs. De ce point de vue, cette architecture est la plus économique. Pour le nœud hybride, l'absence de la matrice OXC est également une source d'économie, quoique les opérations de brassage manuel soient certainement une source de dépenses opérationnelles supérieures.

Inconvénients : cette architecture est avant tout statique, une fois que les câbles sont connectés, si une variation du trafic et du routage est envisagée il faut soit avoir prévu cette évolution, soit remanier les interconnexions entre les multiplexeurs/démultiplexeurs manuellement. Ce caractère statique du réseau va à contre courant par rapport à l'évolution du réseau vers une structure automatiquement reconfigurable et dynamique. De plus elle est moins robuste que celle utilisant une matrice de brassage à cause des erreurs humaines possibles au moment du branchement des câbles et de la difficulté dans la gestion des erreurs, car les régénérateurs ne communiquent pas avec la matrice électronique et donc aucune information sur l'état du réseau peut être échangée (dans le futur proche, des systèmes permettant cette communication sont toutefois envisagés).

Pour permettre d'avoir des comparaisons cohérentes entre les réseaux translucides/transparents et les réseaux opaques, l'architecture de nœud prise en considération est la première structure avec brassage photonique. Elle apparaît comme un bon compromis entre le coût d'investissement dû à l'utilisation d'un EXC, la supervision du réseau et sa flexibilité. Le tableau 3.1 résume les avantages et inconvénients des structures présentées plus haut.

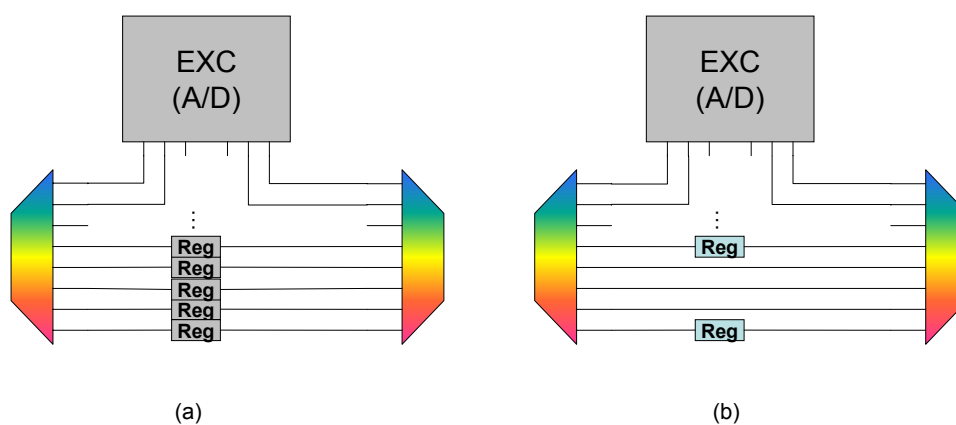


FIG. 3.10 – Représentation d'un nœud privé de la matrice de brassage dans le cas opaque, (a), et hybride, (b).

TAB. 3.1 – Résumé des caractéristiques des différents nœuds opaques et hybrides

Type de nœud	Avantages	Désavantages	Fonctionnalités	Coût	Etudié
Opaque	Implémentée dans le réseau actuel	Utilisation systématique des systèmes OEO	Complète : Aggregation / grooming Régénération Surveillance / gestion Brassage de la couche optique	Cher	Oui
EXC/OXC	Intégration facile à partir du réseau (scénario tangentiel), fonctionnalités du réseau identiques à opaque	Utilisation de deux matrices de brassage	Complète	Cher	Oui
EXC/OXC + batterie de régénérateurs	Utilisation de matrices EXC de taille plus petite. Intégration facile à partir du réseau actuel (scénario tangentiel).	Faible flexibilité sur les ports dédiés à la régénération	Complète	Moyen	Oui
Absence d'EXC	Absence de la matrice EXC.	Aucune fonctionnalité du réseau opaque n'est garantie. Pas d'intégration facile à partir du réseau actuel (scénario de rupture)	Pas d'agrégation, défaut de surveillance	Economique	Non
Absence de matrice de brassage (opaque et transparente)	Utilisation de matrice EXC de petite taille	Pas de flexibilité, pas de contrôle optique sur les signaux en transit	Pas de brassage, surveillance	Economique	Oui

3.3 Fonctions de surveillance pour la sécurisation des réseaux

Comme expliqué auparavant les fonctions de surveillance sont nécessaires pour garantir le bon fonctionnement du réseau. La surveillance d'un réseau est liée à la gestion du réseau, qui s'appuie sur les trois briques suivantes :

- Surveiller l'état de fonctionnement des systèmes et des signaux propagés et gérer l'établissement ou la suppression d'une connexion et les fonctions de restauration.
- Signaler l'état de fonctionnement d'un réseau. Avec la signalisation on connaît l'occupation des systèmes composant le réseau et leur état de fonctionnement, on diffuse les informations sur les signaux affectés par des erreurs de transmission ou sur les défaillances des systèmes, pour lancer le plus rapidement possible les fonctions de résilience.
- Configurer le réseau en assurant sa flexibilité vis-à-vis des évolutions des trafics à écouler et des fonctions de résilience.

3.3.1 Organisation générale de la gestion de réseau

L'organisation de la gestion d'un réseau est hiérarchique et inclut plusieurs catégories de systèmes, un exemple est donné en figure 3.11. Chaque élément du réseau communique avec des éléments de gestion des systèmes (EMS, element management systems) ; chaque EMS gère uniquement les éléments (NE, Network Elements) auxquels il a accès, et peut échanger des informations avec les EMS voisins. Tous les EMS communiquent avec le système de gestion de réseau, NMS (Network Management System) qui aura une vision complète sur l'ensemble du réseau. Le système de gestion est composé par un certain nombre de systèmes d'exploitation (OS, Operations Systems) qui collaborent entre eux [Strand 2002] ; chacun est dédié à une fonction propre, telle que la restauration, l'échange d'informations réseau, etc, [Bischoff 1996]. Grâce au système de gestion du réseau, il est possible de connaître à tout moment l'état du réseau et si nécessaire d'établir/supprimer une connexion.

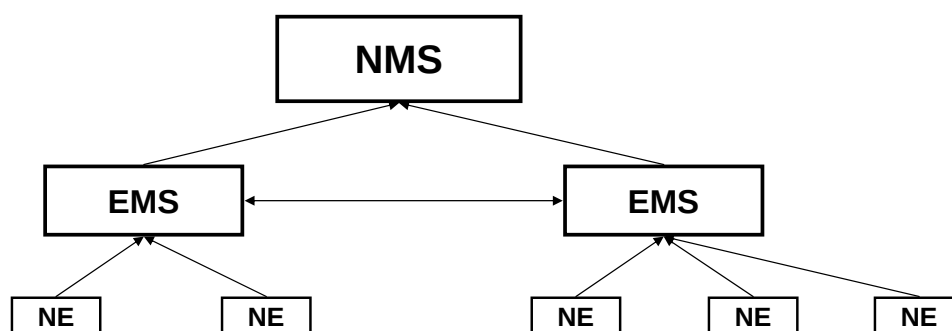


FIG. 3.11 – Exemple d'organisation hiérarchique pour la gestion du réseau.

3.3.2 Problématiques soulevées par les réseaux de transport translucides

Dans le cas d'un réseau opaque, la gestion du réseau est possible grâce aux signalisations échangées entre les systèmes en ligne et les brasseurs. Ces échanges sont rendus possibles, entre

autres, par :

- la lecture des informations de gestion/commande transportées par les signaux effectuée pendant le passage dans la couche électrique des conversions optoélectroniques : une partie du signal contient des informations destinées au gestionnaire de réseau qui sont insérées et extraites à chaque nœud traversé par le signal ;
- les signaux de contrôle envoyés par les systèmes en ligne pour communiquer leur état de fonctionnement.

Toutes ces communications s'effectuent dans la couche électronique des brasseurs où il y a la présence de logiciels dédiés à l'échange d'informations entre les systèmes en ligne et les différentes couches pour la gestion du réseau cité auparavant.

L'impossibilité de lire les entêtes des signaux traversant optiquement les nœuds (réduction des fonctions OEO systématiques) et la présence de nœuds complètement optiques, impliquent une réduction des communications entre les différents systèmes de control [Maeda 1998] ; pour pallier cette réduction, d'autres types d'information doivent être récoltés et échangés entre les logiciels des différents EMS. La communication entre les systèmes en ligne et les brasseurs est indispensable pour un bon fonctionnement du réseau. Ainsi, il faudra assurer, comme dans le cas opaque, que les systèmes en ligne puissent échanger des informations avec les nœuds même si ces derniers sont complètement transparents (besoin de communication entre les gestionnaires ligne/brasseur). De plus, il faudra que la communication entre les nœuds et les liens soit effectivement possible et ne soit pas ambiguë malgré la diminution du nombre de dispositifs d'interface entre eux (les transpondeurs dans le cas opaque), [Shukla 2006].

Aujourd'hui, pour éviter toute manque d'interopérabilité il faut utiliser un seul type d'équipement mono-fournisseur. Puisque ce choix n'est pas toujours possible ou envisageable, les organismes de normalisation tentent de trouver un standard sur les interfaces entre les systèmes en ligne et les brasseurs et les échanges d'informations entre les différents systèmes. Il y a différentes propositions de recommandations à l'étude sur ce sujet, dont la [ITU 2003a] qui a déjà été approuvée.

3.3.3 Gestion de performance envisagée dans un réseau transparent

Dans un réseau ayant de la transparence, les transpondeurs, qui permettent de connaître avec précision l'état du signal, sont situés à des endroits spécifiques du parcours associé au signal (insertion/extraction ou régénération). Cela signifie qu'il n'est pas possible de connaître la qualité d'un signal (QoS, quality of Signal) à chaque nœud et pour le NMS il sera difficile d'avoir une description complète de l'intégrité du signal [Ramaswami 1998], [Lalk 1994]. Dans ce type de réseau il faudra utiliser à la fois la gestion de la performance de bout en bout et la gestion au cœur du réseau.

- *Gestion de la performance de bout en bout (aux extrémités d'une connexion optique)* : une surveillance sur le signal est réalisée lors d'une opération de conversion optoélectronique. La réalisation de ce contrôle est la même que dans le cas opaque : vérification électronique de la qualité du signal reçu. Grâce à cette opération un opérateur vérifie et garantit le SLA (Service Level Agreement) offert au(x) client(s). Si un signal ne répond pas aux exigences sur la qualité en réception, alors tous les systèmes de résilience sont activés.
- *Gestion au cœur (interne) du réseau* : notamment la surveillance sur l'état et le fonction-

nement du réseau par la veille pro-active, la détection des dégradations, la localisation de leurs origines. Cette vérification automatique est réalisée avec un prélèvement d'une partie de puissance des signaux optiques. Le prélèvement devra être de type rapide, non-intrusif, correct, non ambigu, compréhensible et économique.

Dans la suite nous allons détailler le problème de la gestion d'un réseau translucide et proposer des solutions.

3.4 Veille proactive

Un réseau de transport est en évolution continue : d'une part à cause des variations de volume et de distribution du trafic existant et d'autre part à cause des variations des points de fonctionnement du réseau. Les conditions de fonctionnement sont les conditions dans lesquelles les systèmes opèrent ; il suffit d'un changement de la température, d'une évolution des effets physiques (c.f. paragraphe 4.2) ou d'une défaillance d'un système (section 5.10.2), pour que le réseau opère sous d'autres conditions et il peut arriver que dans certains cas ces nouvelles conditions ne permettent pas une transmission correcte des signaux. Pour assurer la surveillance du réseau transparent, plusieurs solutions de contrôle spécifique au réseau transparent sont à l'étude : les OPM (Optical Performance Monitoring), décrits dans la section 3.5.

3.4.1 Détection, localisation et notification de l'origine de la panne

Les trois fonctions de détection, localisation et notification de la panne sont importantes car elles permettent de déclencher les systèmes de sécurisation (automatique ou pas) : ce mécanisme de sécurisation entraîne la perte de données. Pour réussir à diagnostiquer une panne il est opportun avoir une connaissance globale du réseau. Les techniques pour la détection des erreurs s'appuient sur l'analyse des symptômes et des conséquences générées par la présence de la panne. Encore une fois, le manque de conversions optoélectroniques limite les échanges d'informations sur l'état des dispositifs dans le réseau. Dans les réseaux transparents, comme les défaillances sont situées dans des sections plus grandes (une panne dans un réseau opaque est confinée sur un lien), il en résulte un ralentissement des algorithmes de localisation. De plus il faudra prendre en considération la possibilité qu'une panne engendre d'autres pannes sur les dispositifs proches [Machuca 2003], [Mas 2005] ; dans le cas particulier des systèmes translucides la complexité de la localisation des défaillances est accrue à cause du partage de dispositifs réseaux entre des signaux qui empruntent ensuite des routes différentes, ce qui peut engendrer une sorte de diffusion des défaillances. Des recherches sont encore en cours pour adapter les techniques des réseaux opaques à un réseau transparent [Mas 2005].

3.4.2 Déclenchement d'une alarme

Une défaillance dans le réseau peut engendrer soit une dégradation du signal (petite défaillance), soit une complète interruption du signal (grosse défaillance). Pour associer à une faute le besoin de lancer une alarme, il faut connaître l'état global du réseau et envoyer des procédures pour pouvoir déterminer la nature et la localisation de la faute [Machuca 2003]. Une liste de

défaillances possibles est donnée dans [Berthelon 1998]. En fonction des dégradations apportées sur le signal, les dispositifs de surveillance décident l'envoi d'une alarme. Mais, surtout dans les réseaux transparents, il n'est pas facile d'estimer l'importance d'une faute parce que dans un réseau transparent les systèmes ont une portée beaucoup plus longue que dans le réseau opaque et hétérogène, si bien qu'une dégradation inoffensive pour un réseau opaque peut s'avérer néfaste dans le cas transparent. De plus, dans un réseau optique, les données sont transportées à haut débit et si la gestion des fautes n'est pas suffisamment rapide on risque la perte d'une importante quantité d'information, perte qui est accentuée par les longs temps de latence du réseau [Rejeb 2003], ...

A cause des temps de réalisation des actions de sécurisation, il est préférable de déclencher des processus de sécurisation de bout en bout des connexions dès qu'une panne a été détectée.

3.5 Les systèmes optiques de surveillance (OPM)

Les dispositifs de surveillance effectuent des mesures de manière non intrusive : ils prélèvent de manière transparente (en introduisant cependant des pertes de puissance) une partie du signal pendant sa transmission et effectuent une mesure analogique mais pas forcément transparente de la qualité du signal. [Kilper 2004] propose une série de techniques de surveillance possibles de type non intrusif pour répondre aux besoins des réseaux transparents : ces dispositifs vérifient l'état du signal sans effectuer de conversions OEO. Les systèmes de mesure pour la surveillance des performances optiques sont appelés OPM. Diverses propositions d'OPM compatibles avec la transparence sont proposées dans la littérature [Meflah 2005] ; ils sont capables de :

- avoir un contrôle plus ponctuel du réseau et permettre un meilleur fonctionnement des dispositifs de compensation ;
- favoriser les opérations de gestion du réseau, qui incluent le déclenchement des signaux d'erreur et la localisation des défaillances.

Ces mesures ne permettent aucun contrôle sur la connectivité de la couche transparente. Avec ces dispositifs, la localisation des sources de défaillance est plus difficile car le signal est vulnérable à des dégradations que le système de gestion ne peut pas détecter [Maeda 1998], [Machuca 2003]. En effet, si on n'effectue que des mesures sans aucune référence au BER, on ne peut connaître qu'une partie de l'état du signal. Par exemple, connaître le rapport signal à bruit ne donne aucune information sur les distorsions des impulsions causées par la phase non-linéaire ou par la dispersion chromatique : un signal peut posséder un bon OSNR et en même temps être trop distordu pour être bien détecté, [Strand 2002], [Maeda 1998].

3.5.1 Limites des contrôles opérés par les OPM

Une des problématiques des réseaux transparents est la localisation des sources d'erreurs quand sur le récepteur il s'avère que : le signal présente trop d'erreurs, n'est pas celui attendu, ou il n'arrive pas de signal, [Tkach 1998]. Comme énoncé dans la section précédente, pour mieux estimer la qualité du signal des nouveaux dispositifs de surveillance sont en cours d'étude, mais à cause de la nature transparente du réseau, toutes les erreurs ne pourront pas être détectées. Pour cette raison, les dispositifs de contrôle complètement transparents ne pourront pas être utilisés pour détecter la cause d'un mauvais adressage des signaux, quelqu'en soit le choix du type

d'adressage. Dans un réseau opaque, la conversion optoélectronique systématique permet de vérifier à chaque nœud la présence d'un signal et son état ; si un signal est trop dégradé ou n'a pas été reçu, une alarme est lancée immédiatement et la cause d'erreur sera trouvée au niveau du lien traversé. Si un problème se présente au niveau de la matrice de brassage, puisque le tout est fait de manière électronique, l'erreur est immédiatement détectée avant que le signal puisse être transmis en ligne. Dans un réseau transparent, les logiciels de contrôle propres aux nœuds ne peuvent pas vérifier si le brassage a été bien effectué ni s'il y a eu des pertes de signaux ou des mauvais adressages à moins de rajouter un label lisible sans avoir besoin de détecter le signal. Ces méthodes utilisent généralement un système de surmodulation ou de codage CDMA (Code Division Multiple Access), [Shen 2000]. La [Tropic Net] propose d'ailleurs un produit destiné à gérer les longueurs d'onde en absence de détection. [Ciaramella 2005] également présente une méthode pour éviter de détecter des signaux qui ont été aiguillés vers les mauvaises interfaces pour des raisons de performances. Dans ce dernier cas l'erreur d'adressage est prévisible.

3.5.2 Une proposition opaque pour la résolution des problèmes de surveillance dans les réseaux transparents

Pour reporter le problème de surveillance du BER et d'autres mesures sur la QoS, [Kilper 2004] propose l'utilisation d'une conversion OE qui soit partagée par les signaux appartenant à un lien. Ce dispositif est réalisé avec un récepteur et un filtre optique accordable. Le filtre sélectionne périodiquement une longueur d'onde et l'envoie au récepteur qui opère une estimation numérique de la qualité du signal. Pour permettre une surveillance non intrusive, on utilise un coupleur prélevant une faible partie du signal. Avec un tel dispositif on peut aussi faire un contrôle sur l'occupation des canaux et donc savoir si l'opération de brassage a été bien effectuée. Grâce à telle opération on peut avoir une connaissance de la totalité du réseau échantillonné à certains moments et savoir quel signal est associé à chaque canal WDM. De plus, à l'aide de ce dispositif on peut effectuer des opérations de recherche et détection des sources de dysfonctionnement au moment d'une alarme. En effet, si une erreur a été détectée sur un signal, ce dispositif peut dans chaque nœud se dédier au contrôle du signal corrompu, en opérant comme si le signal était transmis dans un réseau opaque. De cette manière on arrive à établir la correspondance assez facilement les caractéristiques du signal sur les liens intéressés et découvrir les causes des défaillances rencontrées. Pour permettre une interaction efficace avec les logiciels de supervision des réseaux, le déclenchement des alarmes, etc., ces dispositifs doivent être placés dans chaque nœud, indépendamment de son architecture. L'ensemble des objets employés pour la réalisation d'un tel dispositif le rend plus cher par rapport aux OPM analogiques, mais en même temps il assure plus de fonctionnalités et permet une connaissance correcte de l'état du réseau et des signaux transmis. Nous avons expliqué pourquoi ce genre de dispositif est nécessaire au bon fonctionnement du réseau. Dans la suite de l'étude nous supposons donc que ces dispositifs sont utilisés dans chaque nœud, même s'ils ne permettent pas la même flexibilité qui caractérise les réseaux transparents (indépendance au débit, au format de transmission, au format de modulation, ...).

3.6 Architecture de réseau proposée

Dans la section 2.2 nous avons donné une définition générique de réseau, dans ce chapitre nous avons détaillé les éléments de réseau nécessaires pour la transmission correcte d'un signal dans un réseau opaque et translucide. Maintenant, pour conclure, nous expliquons les règles de comptage de ces dispositifs. Ces règles sont nécessaires pour évaluer correctement le dimensionnement du réseau et elles sont intimement liées aux architectures choisies. Par simplicité de présentation nous divisons ces éléments en deux groupes : les dispositifs présents dans la ligne de transmission et ceux présents dans les nœuds du réseau.

La structure d'un lien est indépendante du type de réseau (seule la performance des dispositifs concernés peut différer). Un lien regroupe :

- un nombre de **sites amplificateurs** égal au nombre total de pas constituant la ligne moins un, car le dernier amplificateur de la ligne de transmission est supposé appartenir au nœud ;
- chaque amplificateur est composé par un double étage contenant un **module DCM**. La longueur des modules accumulés sur toute la fibre sert à compenser la dispersion chromatique totale du lien ;
- un **DGE** après chaque groupe de cinq amplificateurs ;
- un **OPM** après chaque DGE (c.f. section 3.1.3).

La représentation d'une ligne avec ses éléments est donnée en figure 3.3.

Les dispositifs présents dans un nœud se divisent en deux catégories : indépendant et dépendant du scénario étudié. Les ressources indépendantes du type de nœud sont les amplificateurs des nœuds et les multiplexeurs/démultiplexeurs, dont le nombre est égal au degré de connectivité du nœud.

Ces dispositifs sont groupés dans un même châssis qui dans la suite sera simplement appelé site terminal (ST). Le nombre de châssis correspond au degré de connectivité du nœud et leur prix dépend de la charge en longueur d'onde des liens. Le degré de connectivité correspond au nombre total de fibres arrivant dans le nœud (ce degré de connectivité peut différer du degré physique si un lien présente un nombre de fibres supérieur à 1). Les amplificateurs des nœuds intègrent des dispositifs d'égalisation si le nœud est hybride ou transparent. En ce qui concerne les ressources dépendantes du type de réseau, nous présentons une liste pour les différents cas considérés :

- un nœud opaque est constitué par :
 - un **brasseur électronique** dont la taille dépend du nombre de TSP connectés. Si la taille de la matrice requise dépasse celle des équipements disponibles, plusieurs matrices peuvent être cascadiées pour réaliser la fonction ;
 - un **couple TSP–ports opaques** pour chaque canal entrant/sortant du réseau (ou seulement une carte colorée, si c'est cette option qui est sélectionnée) ;
 - pour chaque canal en transit dans le nœud il peut y avoir **deux couples TSP - ports opaques** (ou deux cartes colorées) si la fonction de brassage est intégrée ; sinon, un couple de dispositifs OEO dos-à-dos, comme illustré en figure 3.3. l'ensemble des TSP assure la fonction d'égalisation de puissance des canaux (grâce au réglage de la puissance en sortie de chaque TSP).
- un nœud translucide est constitué par :
 - un **brasseur optique** dont la taille dépend de l'architecture choisie : proportionnelle

au nombre total de longueurs d'onde pouvant être brassées (cas d'une matrice MEMs) ou au nombre total de fibres arrivant dans le nœud (cas d'un nœud à base de WSS) ; si le brassage est opéré par un OADM, les règles de dimensionnement sont les mêmes que pour un WSS avec degré de connectivité égal à 2. Ces brasseurs ne peuvent pas être cascades comme dans le cas électronique ;

- si l'architecture choisie est la matrice MEMs, alors à chaque canal bidirectionnel entrant/sortant dans le réseau, correspond un **couple de ports optiques** ;
- si le brassage est fait avec une matrice MEMs, alors nous prévoyons un châssis la contenant ; si, par contre, il est réalisé avec des modules WSS, nous posons une carte WSS dans chaque site terminal ;
- pour un signal en transit transparent dans le nœud, le nombre total de ports optiques requis est également de 2 ; si un signal doit être régénéré, cette opération étant équivalente à une extraction et une réinsertion dans le réseau, le nombre total de ports demandé est 4 ;
- un brasseur électronique si les opérations d'insertion/extraction et/ou de régénérations sont prévues dans le nœud. Pour ces opérations, le nombre de transpondeurs et de ports opaques sera déterminé par les mêmes règles expliquées précédemment pour un nœud opaque. Les transpondeurs peuvent avoir différentes caractéristiques en fonction de leur portée ;
- un **égaliseur de puissance** (DGE) est requis pour permettre d'équilibrer les signaux ayant des histoires de transmission différentes et qui peuvent ainsi présenter des puissances inhomogènes à la sortie du nœud. Les égaliseurs sont placés généralement en correspondance d'un multiplexeur, donc leur nombre dépend de celui des multiplexeurs ;
- un système permettant la **surveillance de la performance des signaux**, OPM des nœuds (c.f. section 3.5.2) doit être placé pour remplacer les contrôles systématiques sur la qualité des signaux faite dans un réseau opaque. Ce dispositif peut être opaque comme transparent.

En figure 3.12, 3.13, 3.14 et 3.15 nous avons indiqué les éléments comptés pour les différents cas de réalisation des nœuds.

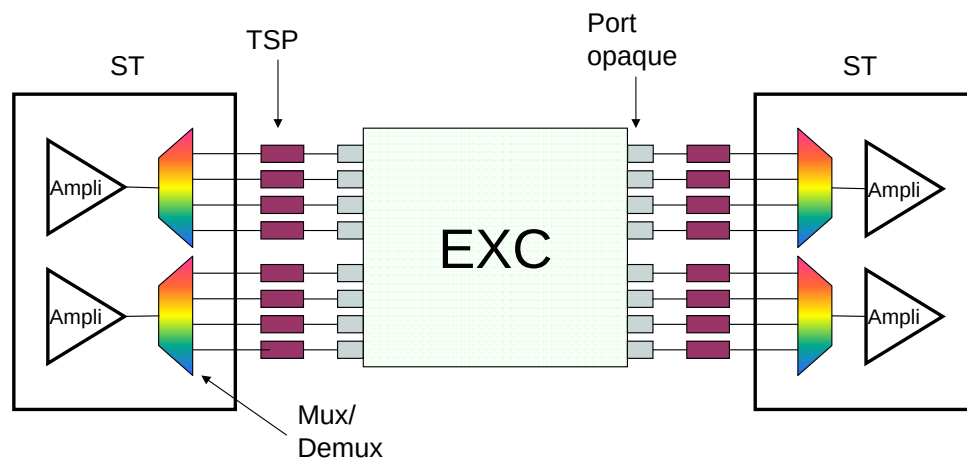


FIG. 3.12 – Représentation d'un nœud opaque.

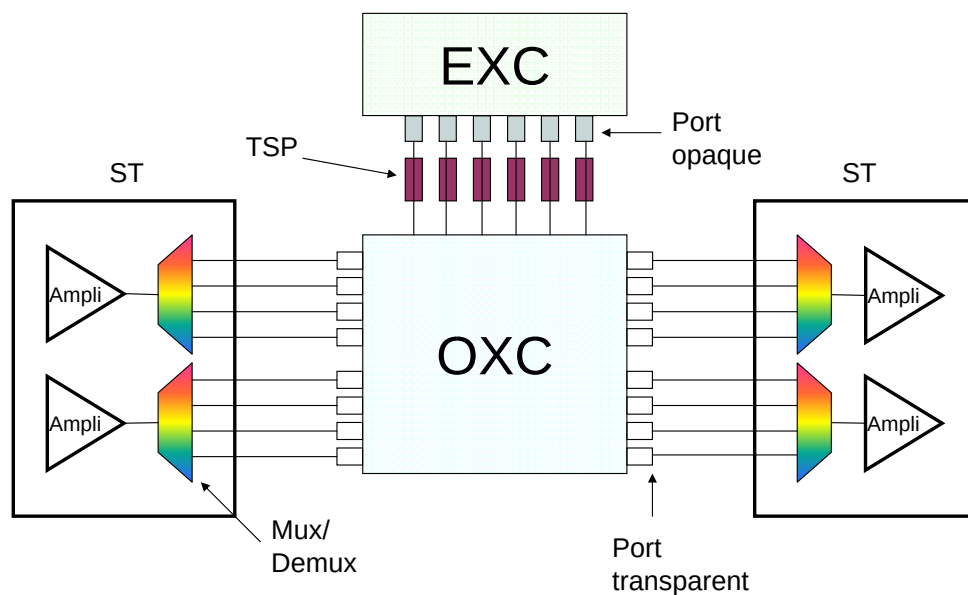


FIG. 3.13 – Représentation d'un nœud hybride, dont la partie transparente est réalisée par la technologie MEMs.

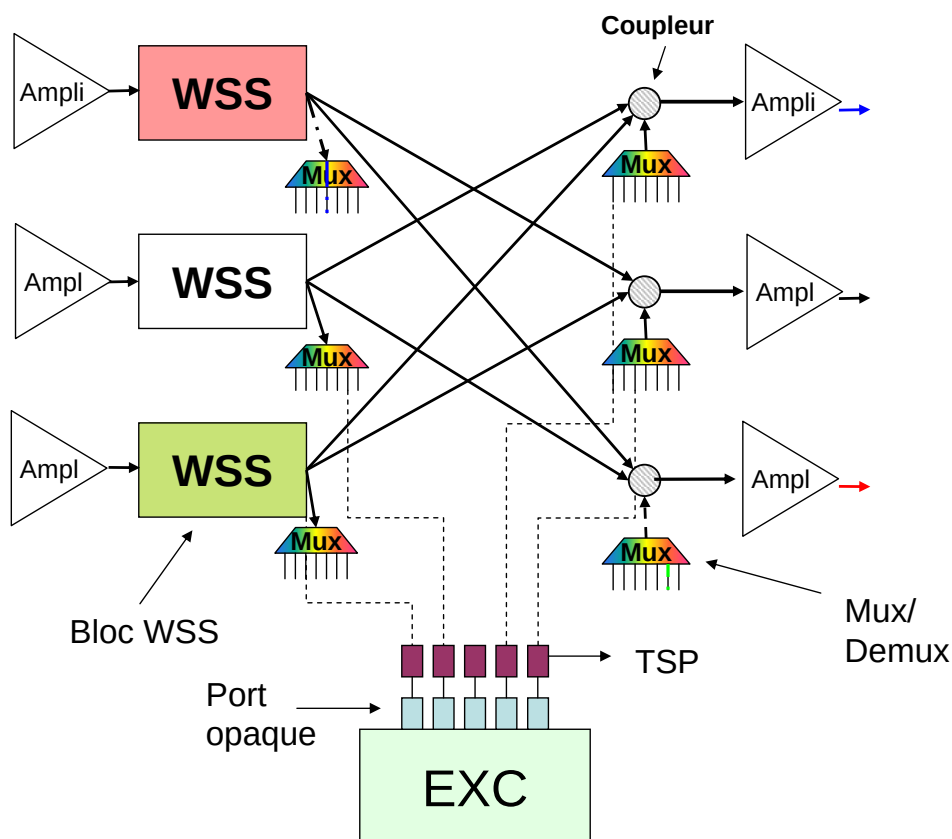


FIG. 3.14 – Représentation d'un nœud hybride, dont la partie transparente est réalisée par la technologie WSS.

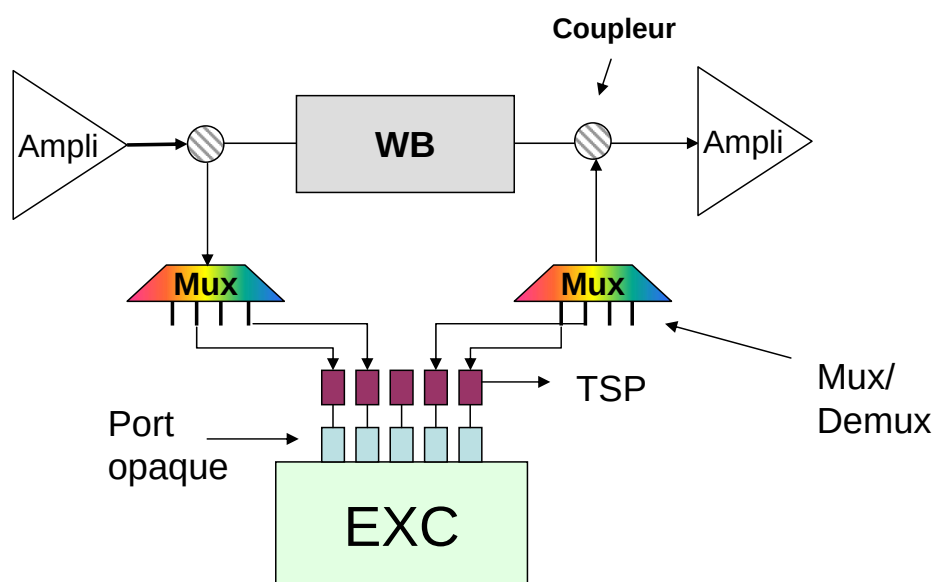


FIG. 3.15 – Représentation d'un R-OADM hybride, dont la partie transparente est réalisée par la technologie WB.

3.7 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté quels étaient les éléments nécessaires à la construction et au bon fonctionnement du réseau de transport. Nous avons exposé différents choix d'architecture pour les liens et les nœuds en discutant leurs performances par rapport au cas opaque. Nous avons également décrit les règles que nous utilisons pour le dimensionnement.

Certains des dispositifs nécessaires pour assurer la transparence du réseau ne sont pas encore installés sur le terrain ou même disponibles sur le marché. Pour cette raison les scénarios choisis pour l'étude sont ceux qui nous semblent s'intégrer plus facilement dans une vision à court et moyen terme du réseau de transport (évolution tangentielle). Le choix effectué représente une des réalisations possibles du réseau. Par exemple, nous avons intégré les modules WSS dans les sites terminaux de chaque ligne, alors que la conception actuelle du réseau tend à séparer ces sites des modules dédiés au brassage dans deux châssis distincts et dans le futur nous ne savons pas si cette séparation sera ou ne sera pas gardée.

Aux considérations sur le choix d'architecture correspond un modèle de coût, car les deux sont étroitement liés. Le modèle de coût a été établi sur la base des données disponibles actuellement (c.f. section 5.3). Nous avons décidé de nous focaliser sur ce qui nous est apparu être le meilleur compromis entre l'évolutivité du réseau et les contraintes imposées par la transparence.

Chapitre 4

Impact des imperfections de la couche physique sur la transmission

Dans ce chapitre nous décrivons l'impact des dégradations physiques sur le signal pendant sa propagation. Les dégradations sont déterminées par différents facteurs :

- le choix de conception des équipements du côté des fournisseurs ;
- les caractéristiques des fibres ;
- la taille des réseaux ;
- la topologie du réseau du côté des opérateurs et les stratégies d'utilisation de l'infrastructure.

Donc le comportement global d'un réseau change en fonction des hypothèses considérées ; ainsi, les résultats sur la faisabilité physique d'un réseau transparent seront différents pour des signaux à 2,5 ou 40 Gbit/s, pour un réseau métropolitain ou un réseau dorsal, et pour différents choix d'ingénierie du côté opérateur.

Il serait trop difficile de faire une étude générale sur ces scénarios car ils sont trop différents entre eux (débit des demandes et taille du réseau) et il ne serait pas possible d'extraire de conclusions générales. Pour cette raison, tout au long de ce chapitre nous nous focalisons sur un seul type de réseau : les réseaux longue distance et le transport à 10 Gbit/s.

Pour les spécifications des dispositifs employés, nous avons considéré des valeurs moyennées sur l'ensemble des valeurs fournies par les équipementiers ou spécifiées dans les normes.

En ce qui concerne les hypothèses sur l'ingénierie des systèmes de transmission, nous avons gardé une certaine flexibilité pour obtenir des résultats permettant d'estimer les meilleurs choix pour l'ingénierie du réseau avec de la transparence et plutôt à court qu'à moyen terme.

Le but final est de trouver les scénarios et les stratégies d'ingénierie qui offrent les meilleures performances dans le cas d'un réseau caractérisé par la transparence et d'estimer la sensibilité aux dégradations physiques de chacun des scénarios en fonction de leurs paramètres.

La première partie de ce chapitre est constituée par la description et la modélisation des effets de propagation qui affectent le signal, la description des différentes hypothèses physiques, de la topologie et de l'architecture de réseau et, enfin, du trafic utilisés pour obtenir les résultats sur les limites de transmission d'un signal présentés dans la dernière partie de ce chapitre.

4.1 Description des effets

Les dégradations affectant un signal pendant sa propagation à travers la fibre et à la traversée des nœuds peuvent être divisées en deux grandes familles : linéaires et non-linéaires [Joindot 1996], [Agrawal 1989].

Les dégradations linéaires sont indépendantes de la puissance du signal et agissent sur un canal indépendamment des autres. Les dégradations non-linéaires sont plus complexes : elles dépendent des puissances des canaux, agissent sur le canal considéré mais provoquent aussi des interactions entre les différents canaux se propageant ensemble.

Dans la suite nous examinons l'impact des phénomènes physiques corrompant le plus la transmission des signaux au débit considéré pour, ensuite, comprendre le fonctionnement 'physique' du réseau, identifier les paramètres pertinents et en déduire des règles d'ingénierie spécifiques.

4.1.1 Effets linéaires

Dans cette section nous effectuons un bref descriptif des principaux effets linéaires affectant le signal et nous mettons en évidence les effets et la manière selon laquelle ils seront pris en considération dans la suite de l'étude. Parmi les effets linéaires figurent :

- le bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE) ;
- la dispersion modale de polarisation (PMD) ;
- la dispersion chromatique (DC) ;
- les pertes dépendantes de la polarisation (PDL)
- la diaphotie ;
- l'effet de filtrage (en ce qui concerne l'impact de la réponse en amplitude).

Le bruit d'émission spontanée amplifiée et rapport signal à bruit

Considérons un lien optique, la fibre dans laquelle le signal se propage est caractérisée par un paramètre a (en dB/km) représentant l'atténuation de puissance optique pour chaque km parcouru. Pour éviter que la puissance du signal en réception soit en dessous de la sensibilité des récepteurs, des amplificateurs sont placés de façon régulière dans le lien, c.f. section 3.1.2.

Pendant la phase d'amplification, un amplificateur génère spontanément des photons décorrélés du signal constituant l'émission spontanée (aussi appelée bruit). Ce bruit est amplifié au fur et à mesure de la traversée des amplificateurs. Le bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE, Amplification Spontaneous Emissions) contribue à la dégradation du rapport signal à bruit optique (OSNR, Optical Signal to Noise Ratio).

L'OSNR est un paramètre important pour caractériser les performances d'un système : il exprime le rapport entre la puissance du signal utile et celle du bruit produit et amplifié par les différents amplificateurs (en émission ou en ligne), mesuré dans une certaine bande.

Pour qu'un signal optique soit correctement reçu, il doit arriver sur le récepteur avec un OSNR supérieur à une valeur limite. La valeur du seuil minimal dépend de facteurs comme le débit du signal, la technologie des transmetteurs/récepteurs, l'utilisation de FEC [Zyskind 2002] et les marges assignées aux autres dégradations, comme cela sera discuté dans la section 4.2.1.

Nous appelons pénalité en puissance (respectivement en OSNR), exprimée en dB, la quantité de puissance (resp. OSNR) supplémentaire nécessaire à l'obtention d'un taux d'erreur donné comparé au fonctionnement de référence et pour un niveau d'OSNR donné (resp. puissance). Les marges réservées à un phénomène physique donné correspondent aux pénalités qu'il provoque sur l'OSNR.

Dispersion modale de polarisation

La fibre n'est en général pas parfaitement cylindrique, et présente un degré de biréfringence variable le long de sa longueur. Pour la modéliser nous supposons qu'elle est composée par une concaténation de petites sections parfaitement biréfringentes, dont les axes de biréfringence varient d'une section à l'autre avec différentes conditions de couplage entre chaque section voisines. Pour chaque fréquence, il existe deux états de polarisation orthogonaux, états principaux de polarisation (PSP, Principal States of Polarization), qui vérifient la propriété suivante : lorsqu'un signal est injecté sur un de ces deux états, sa polarisation ne change pas, au premier ordre, lorsque la fréquence varie (premier ordre de PMD), [Kogelnik 2002]. Cette approximation est donc limitée à une certaine bande de fréquences.

Le signal entrant avec une polarisation quelconque se décompose et se projette sur les deux axes principaux de polarisation 4.1. L'effet de sa propagation sur ces deux composantes se traduit au premier ordre par un retard entre les deux projections. Après détection, compte tenu de l'orthogonalité des PSP, il en résulte deux impulsions électriques séparées par un certain retard appelé retard de groupe différentiel (DGD, Differential Group Delay) instantané.

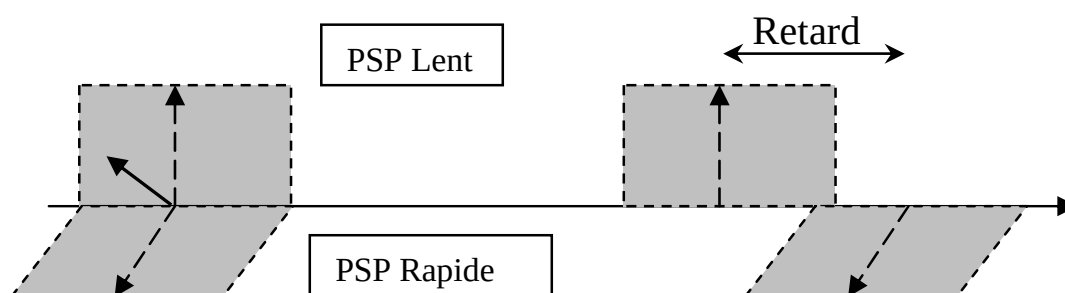


FIG. 4.1 – Décomposition d'un signal sur les deux PSP principaux.

La distorsion subie par le signal, au premier ordre, correspond donc à un dédoublement temporel des impulsions, générateur d'interférence entre symboles (IES ou ISI, Intersymbol Interference) qui dégrade la qualité du signal.

De plus, le retard a un comportement aléatoire qui dépend de la position des états de polarisation dans la fibre et du DGD, qui varient avec la fréquence et le temps [Kogelnik 2002]. Ce comportement est modélisé par une distribution Maxwellienne [Kogelnik 2002]. En fonction des positions des différents PSP (aléatoire et indépendant des états précédents), les retards élémentaires peuvent partiellement se compenser ou s'additionner.

D'un point de vue système, le retard de groupe différentiel moyen (c'est à dire la PMD) admis doit rester au dessous d'une fraction (a) du temps bit pour garantir des bonnes performances de transmission. La valeur du paramètre a dépend de trois facteurs principaux : 1) les marges dédiées à la PMD ; 2) la probabilité de panne visée (outage probability) ; et 3) la sensibilité du récepteur au DGD. Une valeur typique pour a est 10 % du temps bit [ITU 2003a].

Les variations de PMD en fonction de la fréquence sont appelées PMD de second ordre [Kogelnik 2002] ; cet effet ne sera pas considéré dans la modélisation de la PMD parce que, lorsque le retard de groupe est inférieur à une fraction égale à 10 - 15 % du temps bit, il est négligeable.

Dispersion Chromatique

La dispersion chromatique (DC) a pour origine la dépendance de l'indice de la fibre optique vis-à-vis de la longueur d'onde : elle traduit la dépendance de la vitesse de groupe à la longueur d'onde. La dispersion chromatique va donc déterminer la réponse impulsionnelle de la fibre, qui a un effet de filtrage sur le signal.

Le signal transmis dans la fibre étant modulé à un certain débit, il n'est pas purement monochromatique. Ainsi, la dispersion chromatique tendra à faire voyager les composantes spectrales de ce signal à des vitesses différentes, ce qui se traduit par un élargissement des impulsions lumineuses associées à chaque bit d'information. La valeur de dispersion chromatique en ps/(nm · km) traduit le déphasage (ou retard de groupe) entre deux longueurs d'onde espacées d'1 nm, par km de fibre parcourue.

La dispersion chromatique étant un phénomène linéaire, elle se cumule sur la longueur de fibre parcourue : dispersion cumulée (ps/nm). Ainsi, après la propagation sur une certaine distance, il y a un étalement temporel de l'impulsion appelé distorsion et qui peut éventuellement entraîner des interférences entre symboles (IES, ou ISI en anglais : Inter Symbol Interference).

Comme spécifié dans la section 3.1.4, pour compenser ce phénomène nous avons choisi ici d'utiliser des modules de compensation constitués par des fibres à dispersion négative (DCF) placées dans l'inter-étage des amplificateurs en ligne. L'utilisation des modules de compensation entraîne un affaiblissement du signal qu'il est nécessaire de compenser par le gain des amplificateurs. Cela implique une augmentation du bruit et ainsi une dégradation de l'OSNR.

La gestion de la dispersion représente le choix de compensation effectué sur les différents liens du réseau et comprend la compensation de dispersion en ligne et dans les nœuds (pre- et post-compensation, en fonction que la compensation est effectuée dans le nœud avant l'insertion des signaux dans la fibre ou après la traversée de la fibre avant l'entrée du nœud) de telle sorte qu'en réception le signal ait une valeur de dispersion finale dans l'intervalle d'acceptabilité toléré par le récepteur.

L'évolution de la dispersion chromatique du signal pendant la propagation de ce dernier dans la fibre est représentée par la carte de dispersion ; un exemple de carte de dispersion est donné en figure 4.2.

L'un des paramètres les plus simples pour caractériser la pertinence de la gestion de dispersion est la dispersion cumulée (ou dispersion résiduelle) qui se calcule comme la somme des différentes dispersions (positives et négatives) générées dans les éléments rencontrés au cours

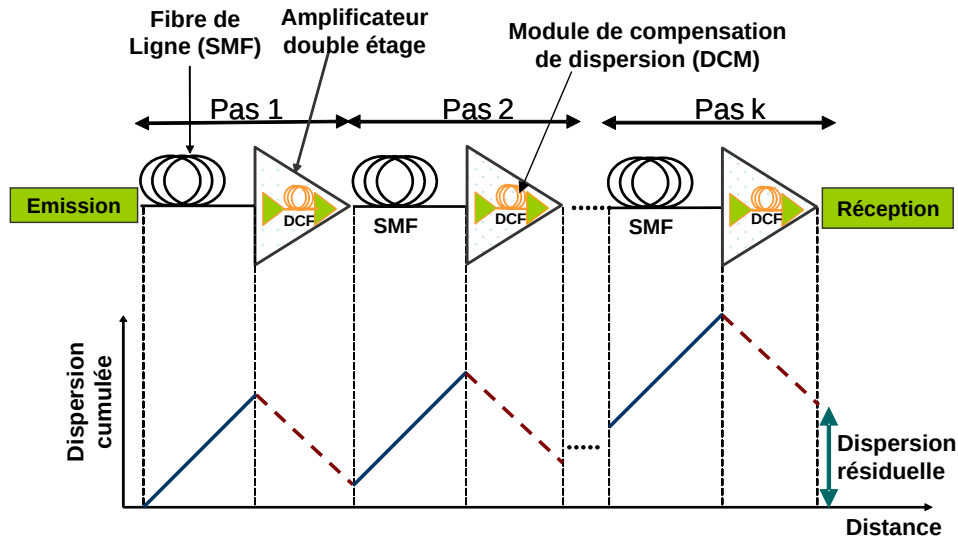


FIG. 4.2 – Evolution de la dispersion chromatique dans une liaison. Les traits continus représentent l'évolution de la dispersion en ligne et les traits pointillés l'évolution de la dispersion dans les modules de compensation.

de la transmission (équation 4.1).

$$D_{cum}(\lambda, connexion) = \sum_{i \in connexion} D_c(\lambda, i) \quad (4.1)$$

Les récepteurs tolèrent un certain niveau de dispersion qui dépend entre autre du débit du signal, mais aussi du format de modulation. D'un point de vue pratique, la sensibilité d'un récepteur à l'effet de la dispersion chromatique est caractérisée par des courbes de pénalités.

Les pertes dépendantes de la polarisation

Les pertes dépendantes de la polarisation (PDL, polarization dependent loss), [Zyskind 2002], sont engendrées dans certains dispositifs (filtres, isolateurs, amplificateurs optiques, ...). La PDL augmente en fonction du nombre de dispositifs traversés de manière statistique. Pour limiter l'évolution de ce phénomène les sous-systèmes employés doivent avoir des faibles valeurs de PDL (0,3 dB). L'accumulation des pénalités générées par ce phénomène est prise en compte en termes de marges et dépend du nombre maximum de dispositifs qu'on pourra traverser.

Diaphotie

Les effets de diaphotie (crosstalk en anglais) sont de type cohérent ou incohérent, en fonction du signal qui interagit avec le signal considéré [Joindot 1996].

La diaphotie in bande (crosstalk in band) est générée par un signal ayant la même longueur d'onde que le signal observé : il y a une superposition de puissance (parasite) qui altère la performance du signal considéré. La diaphotie hors de la bande (crosstalk out of band) est due à la superposition de puissances générées par des signaux à fréquences différentes de celle du signal étudié.

Ces phénomènes se produisent quand une opération de filtrage n'isole pas suffisamment les signaux de ceux présents dans la bande de transmission ou pendant les opérations d'insertion/extraction et de brassage [Shen 1999].

L'impact de ces phénomènes sur la transmission des signaux est pris en compte dans les marges sur l'OSNR définies par les règles d'ingénierie du système. Ce phénomène peut être réduit en choisissant les dispositifs à employer dans le réseau ; par exemple avec des dispositifs ayant des faibles valeurs de diaphotie (< -30 dB pour 1 dB de pénalité, [Goldstein 1994], et des filtres plus élaborés dans les récepteurs.

Effet du filtrage

L'opération de filtrage produit une transformation du spectre du signal en intensité en phase. La réponse cumulée en intensité provoque un rétrécissement de la bande optique du signal qui affecte davantage les longueurs d'ondes latérales et cause des oscillations de puissance dans la bande passante du signal. L'effet du filtrage est une dégradation irréversible du signal si on traverse un nombre trop élevé de filtres.

La réponse en phase induit des oscillations produisant au premier ordre une incertitude sur la dispersion chromatique sur la bande du signal et pour les ordres supérieurs des fluctuations locales de la dispersion chromatique vue par chaque composante du signal (Group Delay Ripple, GDR), [Rhee 2003].

Ces effets sont d'autant plus forts que la largeur du filtre est proche de la largeur spectrale du signal le traversant, ou si le filtre et le signal ne sont pas alignés.

Autres effets

Les autres effets, négligés dans l'étude parce qu'ils dépendent des systèmes employés et ayant des impacts sur le signal moins importants que ceux produits par les effets énoncés auparavant sont : le taux d'extinction des modulateurs, la réponse fréquentielle des récepteurs, la dérive en longueur d'onde des filtres, ...

4.1.2 Effets non-linéaires

Les effets non linéaires naissent des propriétés optiques des matériaux (indice de réfraction, pertes, etc.) qui dépendent des puissances optiques des signaux qui les traversent [Essiambre 2002]. Par conséquent cette dépendance modifie l'état des signaux le long de leur propagation et les fait interagir entre eux. Différents facteurs contribuent à leur renforcement : la puissance optique des signaux, les distances traversées, le type de fibre, la longueur d'onde, l'espacement inter canaux.

Les effets non linéaires peuvent être classés en deux catégories :

- générés par la dépendance de l'indice de réfraction à la puissance optique (appelée aussi effet Kerr) comme l'automodulation de phase (SPM, Self Phase Modulation), la modulation de phase croisée (Cross-Phase Modulation, XPM) et le mélange à quatre ondes (Four Waves Mixing, FWM) ;
- générés par les effets inélastiques (diffusion ou 'scattering' en anglais) entre le matériau et les longueurs d'onde, engendrant le SRS, (Stimulated Raman Scattering) et le SBS, (Stimulated Brillouin Scattering), [Agrawal 1997]. Ces deux effets génèrent des dégradations négligeables par rapport à la SPM, XPM et FWM, donc ne seront pas pris en considération. Ces effets peuvent aussi être classés en deux catégories : les effets simples et les effets croisés. Les premiers (SPM) sont liés à la propagation d'un seul canal, les seconds (XPM, FWM) ne se manifestent qu'en présence de plusieurs canaux. Les effets croisés sont d'autant plus faibles que l'espacement entre canaux est élevé.

Automodulation de phase

L'auto-modulation de phase est générée par la dépendance de l'indice de réfraction à la puissance du signal. Les fluctuations de puissance d'un signal provoquent un élargissement de son spectre qui couplé à la dispersion chromatique se manifeste par un élargissement de l'impulsion de façon comparable à la dispersion chromatique. Cet effet provoque de l'ISI proportionnelle au débit des signaux, [Bayvel 2002].

La SPM est l'effet non linéaire le plus important dans les transmissions WDM, à longue distance et à 10 Gbit/s quand l'espacement entre canaux est égal ou supérieur à 100 GHz.

Modulation de phase croisée

La modulation de phase croisée naît de la modification de l'indice de réfraction de la fibre à cause des puissances des signaux voisins. Les effets de la XPM sont d'autant plus importants que l'espace entre les canaux est de plus en plus petit. La XPM produit des effets plus importants que la SPM seulement si les canaux dans la bande optique sont très rapprochés (< 100 GHz) et pour des valeurs basses de dispersion chromatique dans la fibre de transmission. La XPM devient problématique pour des signaux espacés de moins de 50 GHz.

Mélange à quatre ondes

Dans une fibre la dépendance de l'indice de réfraction à la puissance des canaux peut aussi générer des nouveaux signaux à des nouvelles fréquences, par un transfert d'énergie quand la dispersion des canaux est proche de zéro. Cela se traduit par la création de fréquences parasites et de sources potentielles de diaphotie.

A différence de la SPM et XPM, ce phénomène ne dépend pas du débit des signaux, mais seulement de l'espacement entre les canaux (< 100 GHz), du format de modulation et de la dispersion des signaux.

4.1.3 Vieillessement

Pour estimer correctement le fonctionnement d'un réseau, il faut considérer que les performances des systèmes le constituant dépendent aussi de leur âge. Avec le temps, les systèmes peuvent présenter des variations de performances qui pourraient dégrader le signal, en provoquant des pénalités. Nous adoptons des pénalités sur l'OSNR à la réception du signal pour considérer cet effet.

Le tableau 4.1 résume les différents paramètres et effets pris en compte dans l'étude et la manière selon laquelle ils ont été considérés. Pour certains effets nous analysons la propagation en fonction de l'histoire du signal : modélisation ; pour d'autres, par contre, nous imposons des limites de transmission ou des pénalités supplémentaires sur la qualité du signal en réception sans corrélation avec l'histoire du signal. Nous parlons alors de marges.

4.2 Modélisation des effets considérés : accumulation et impact

Dans la section précédente nous avons sélectionné les phénomènes physiques ayant un impact sur la propagation des signaux à 10 Gbit/s. Dans la suite nous expliquerons la manière selon laquelle ils sont modélisés pour connaître leur impact sur la dégradation du signal.

Dans cette étude, nous voulons déterminer la qualité physique d'un signal en réception en connaissant les parcours associés ; pour atteindre cet objectif nous utilisons un modèle mathématique. Nous divisons le problème en deux parties : dans une première partie nous calculons la valeur de chaque dégradation du signal associée à chaque effet physique pour ensuite estimer la qualité du signal en réception. La modélisation choisie est représentée en figure 4.3.

En fonction des applications, un modèle peut être plus ou moins complet ; l'intérêt d'un modèle complet réside dans la fiabilité des résultats obtenus, mais souvent la complexité de calcul ne permet pas son intégration dans des outils de dimensionnement ou de routage. L'avantage d'un modèle simple réside dans les temps de calculs plus courts, qui donnent la possibilité de l'intégrer dans des algorithmes de routage sans trop les alourdir ou dans les logiciels du plan de commande des réseaux de la prochaine génération [Cugini 2005]. Nous avons choisi un modèle simple pour pouvoir intégrer les calculs effectués dans un algorithme

TAB. 4.1 – Résumé des effets physiques en étude pour la transmission d'un signal à 10 Gbit/s.

Effect		Origine	Nature	Impact	Prise en considération
OSNR		Amplificateur	Linéaire		Modélisation
DC		Fibre	Linéaire	ISI	Modélisation
PMD	1 ^{er} ordre	Fibre	Linéaire	ISI	Modélisation
	Ordres sup.	Fibre	Linéaire	ISI	Non
PDL		Succession de systèmes	Linéaire	Fluctuation OSNR	Marges OSNR
Filtrage		Succession de filtres	Linéaire	Fluctuation DC	Modélisation
			Linéaire	Rétrécissement Bande optique	Marge nombre de nœuds traversés
Diaphonie		Filtres/Miroirs	Linéaire	Diminution OSNR	Marges OSNR
Phase non linéaire		Fibre	Non-linéaire	ISI	Modélisation + Marges OSNR
SRS		Fibre	Non-linéaire		Non
SBS		Fibre	Non-linéaire		Non
Vieillissement				Fluctuation OSNR	Marge OSNR

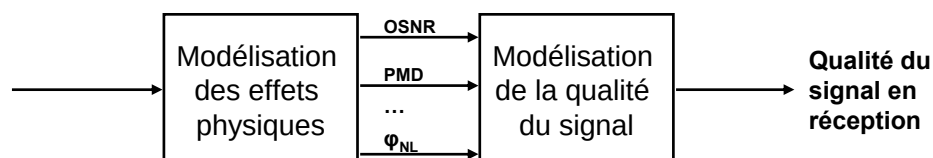


FIG. 4.3 – Modélisation de l'étude sur la qualité du signal transmis.

de routage, c.f. section 2.3.2. Pour plus d'information sur des modèles complets qui étudient exactement la propagation du signal, le lecteur pourra se référer à [Agrawal 1989].

4.2.1 Limite en transmission d'une connexion

Pour caractériser la qualité de transmission associée à un signal, différents critères sont généralement utilisés comme la pénalité sur l'ouverture de l'œil (EOP : Eye-Opening Penalty), le facteur de qualité de transmission (facteur Q) ou le taux d'erreur binaire (BER : Bit Error Rate), [Essiambre 2002].

D'une manière générale, l'EOP caractérise les pénalités induites par la propagation et il est surtout un critère comparatif entre le signal au début de transmission et en réception. Cette mesure ne sera pas utilisée ici car nous n'effectuons pas de comparaisons entre la forme du signal au

début et à la fin de la transmission.

Le facteur Q donne la qualité du train d'impulsions en fin de ligne indépendamment de son état initial ; il exprime le rapport entre la différence des valeurs de puissance moyenne (I_i) associée à chaque impulsion ('1' et '0') et leurs déviations standard (σ_i) :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4.2)$$

De nombreuses études modélisent les dégradations physiques par leur impact sur le facteur Q [Zami 2004], [Kulkarni 2005]. Le BER exprime la probabilité d'erreur sur l'identification d'un bit à la réception, c'est-à-dire la probabilité d'avoir détecté un '1' (ou un '0') quand un '0' (respectivement un '1') est émis. Si les '0' et les '1' sont équiprobables, alors le BER est exprimé par l'équation , [Agrawal 1997] :

$$BER = \frac{1}{2} [P(0, 1) + P(1, 0)] \quad (4.3)$$

En supposant que la distribution du bruit est de type Gaussien [Chang-Hasnain 2002], alors le facteur Q et le BER sont liés par la fonction d'erreur complémentaire :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{\sqrt{2\pi}Q} \quad (4.4)$$

Il existe une relation d'équivalence entre le facteur Q et l'OSNR [Huang 2005] :

$$Q = \sqrt{\frac{B_0}{B_e}} \cdot \frac{2OSNR}{1 + \sqrt{1 + 4OSNR}} \quad (4.5)$$

Où B_0 et B_e sont respectivement la bande optique et la bande électrique du récepteur.

La relation précédente suppose que l'OSNR est mesuré dans une bande égale à celle du filtre optique.

En général, un système de transmission est caractérisé par une valeur de BER typiquement comprise entre 10^{-12} et 10^{-15} . A partir de cette valeur et des formules 4.4 et 4.5 nous avons évalué les valeurs de OSNR et Q minimales nécessaires pour assurer une réception correcte du signal et nous les avons présentées dans le tableau 4.2 pour des systèmes avec et sans l'emploi de FEC [Zyskind 2002]. L'OSNR est mesuré sur une bande optique de 0,1 nm.

Un signal est supposé avoir une bonne qualité si en réception le BER (respectivement facteur Q ou OSNR) mesuré est inférieur (supérieur pour les deux autres critères) à un seuil imposé.

Dans cette étude, la qualité de transmission d'un signal est exprimée par l'OSNR. Pour considérer les diverses pénalités associées aux phénomènes physiques se manifestant au cours de

TAB. 4.2 – Relation entre le BER, facteur Q et OSNR pour un système avec et sans FEC.

BER	Sans FEC		Avec FEC	
	Facteur Q (dB)	OSNR (dB)	Facteur Q (dB)	OSNR (dB)
10^{-9}	6	16	3,7	8
$1,3 \cdot 10^{-12}$	7	18	3,9	8,5
10^{-15}	7,9	21	4	9

la propagation, l'OSNR de seuil intègre les pénalités définies par les règles d'ingénierie choisies, [Cardillo 2005] :

$$OSNR_{seuil} = OSNR_{min} + \sum Marge_i \quad (4.6)$$

Où $OSNR_{min}$ est la valeur minimale requise pour obtenir une transmission pour un taux d'erreur donné (c.f. tableau 4.2), $Marge_i$ sont les différentes marges imposées (c.f. tableau 4.3).

TAB. 4.3 – Liste des pénalités sur l'OSNR.

Effet physique	Marge sur OSNR (dB)
Effets non-linéaires	1,5
PDL	1,5
Filtrage	1
Diaphotie	0,5
Vieillessement	1,5
Marge totale sur OSNR (dB)	6

4.2.2 Modélisation de l'OSNR le long de la ligne de transmission

Comme énoncé au paragraphe 4.1.1, le rapport signal à bruit exprime la quantité de signal utile vis-à-vis du bruit produit au cours de la transmission. Au cours de la propagation, l'OSNR s'accumule selon une loi harmonique [Strand 2001], comme exprimé par l'équation 4.7. Son évolution est schématisée dans la figure 4.4.

$$\frac{1}{OSNR_{Sortie}} = \frac{1}{OSNR_{Entree}} + \frac{P_{Bruit}}{P_S} \quad (4.7)$$

Avec : $OSNR_{Entree/Sortie}$ la valeur de l'OSNR en entrée/sortie de l'amplificateur, P_{Bruit} la puissance de bruit engendrée par l'amplificateur, P_S la puissance du signal à la sortie de l'amplificateur. Cette équation correspond à l'accumulation linéaire du bruit dans l'élément de

réseau.

L'équation 4.8 exprime l'atténuation du signal dans la fibre au cours de sa propagation :

$$P_{S1} = P_{S2} \cdot \exp(-\alpha L) \quad (4.8)$$

Avec : $P_{S1/2}$ (W) la puissance du signal respectivement au début et à la fin du tronçon de la fibre entre deux amplificateurs, α (km^{-1} ¹) le coefficient d'atténuation de la fibre et L (km) la longueur du tronçon. La relation entre l'OSNR et le bruit ASE d'un amplificateur est donnée par l'équation 4.9, [Strand 2001], si la puissance en sortie des amplificateurs (P_S) reste constante ; un exemple d'évolution de l'OSNR pendant la propagation est donné en figure 4.4 quand nous supposons que le gain de chaque amplificateur compense exactement les pertes du pas.

$$OSNR = \frac{P_S}{P_{Bruit}} = \frac{P_S}{(2h\nu B_o) \cdot \sum_{k=1}^M [n_{sp}(k, \lambda) \cdot (G(k, \lambda) - 1)]} \quad (4.9)$$

Avec : P_S la puissance du signal optique, h la constante de Planck ($6,6310^{-34}$ J/Hz), ν la fréquence de la porteuse optique (Hz), B_o la bande passante optique, G le gain du k-ième amplificateur à la longueur d'onde λ , n_{sp} le facteur d'émission spontanée relatif à l'amplificateur.

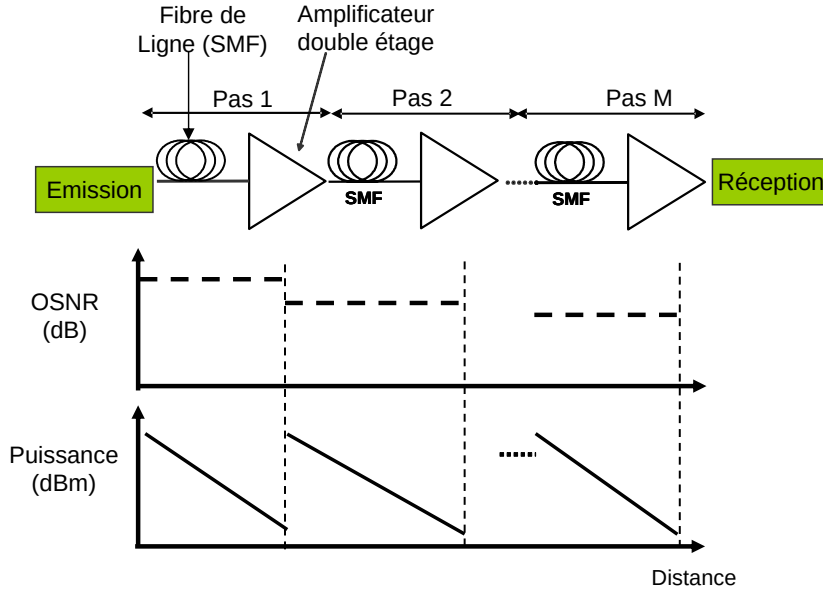


FIG. 4.4 – Evolution de l'OSNR pendant la propagation d'un signal.

Puisque le gain G doit pouvoir compenser les pertes affectant le signal pendant la transmission dans la fibre il est tel que :

$$G = \exp^{(-\alpha L)^{-1}} \quad (4.10)$$

¹Le paramètre α est un paramètre linéique, son correspondant en dB/km sera appelé a

Dans les réseaux cœur, un site d'amplification en ligne est constitué par un double étage d'amplificateurs entre lesquels une portion de fibre de compensation de dispersion est placée, comme le montre la figure 4.5.

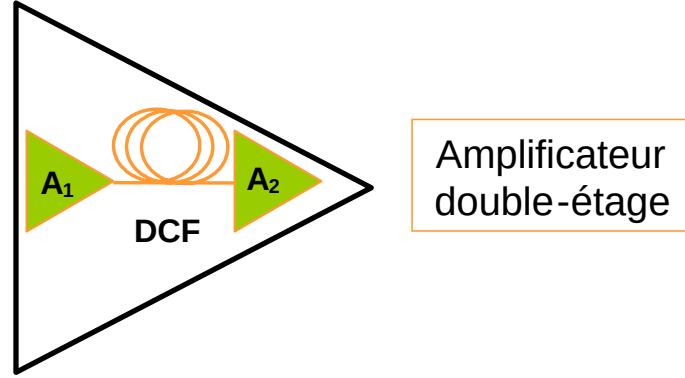


FIG. 4.5 – Composition d'un site d'amplification en ligne à double étage.

Cette solution à un double avantage : la dispersion est ramenée à des valeurs optimales d'une part et l'utilisation de deux amplificateurs permet de diminuer le bruit émis (bruit d'émission spontanée), d'autre part.

Le rapport signal à bruit en sortie d'un pas d'amplification (section de fibre de ligne et amplificateur double étage) se calcule avec l'équation 4.11 :

$$\frac{1}{OSNR_2|_k} = \frac{1}{OSNR_{Entree}} + \left(\frac{P_{Bruit,1}(k, \lambda)}{G_1(k, \lambda) \cdot A_f(\lambda) \cdot P} + \frac{P_{Bruit,2}(k, \lambda)}{G_1(k, \lambda) \cdot A_f(\lambda) \cdot G_2(k, \lambda) \cdot A_{fc}(\lambda) \cdot P} \right) \quad (4.11)$$

Avec : $OSNR_{Entree}$ le rapport signal à bruit à l'entrée du double étage de l'amplificateur, $P_{Bruit,i}$ la puissance de bruit à la sortie de l'amplificateur considéré ($i = 1, 2$), P la puissance du signal à l'entrée du pas, A_i les pertes des fibres de transmission ($i = f$) et de compensation chromatique ($i = fc$), G_i représente le gain de chaque amplificateur, calculé selon l'équation 4.10. Puisque les données constructeur donnent souvent le facteur de bruit global de l'amplificateur à double étage, nous appliquons pour les calculs l'équation 4.9.

Comme expliqué au paragraphe 3.1.2, les amplificateurs analysés sont supposés avoir un gain plat et compenser les différences d'atténuation des fibres. Pour cette raison, nous simplifions l'équation 4.9 et ne considérons pas la dépendance de la longueur d'onde (λ).

Pour simplifier, nous supposons que les amplificateurs sont tous du même type : amplificateurs avec le même gain (car nous supposons que les nœuds induisent des pertes du même ordre que la ligne de transmission, c.f. section 4.3), et à double étage, pour avoir des modules de compensation chromatique partout (compensation pre/post et ligne). Cette hypothèse simplifie l'équation 4.9

en enlevant la dépendance du type d'amplificateur (k) ; puisque les n_{sp} et les G des amplificateurs seront tous identiques entre eux, la somme des M facteurs se traduit dans le produit d'un seul facteur par M .

Dans la section 3.6 nous avons supposé avoir un DGE dans chaque nœud et après la traversée d'un nombre fixé (N) d'amplificateurs. Différents positionnements du DGE sont possibles en fonction de l'ingénierie du réseau et des fournisseurs. Nous avons choisi d'intégrer un DGE dans le N -ième site en ligne ; l'égaliseur est placé à la suite du double étage utilisé pour la compensation des pertes en ligne et suivi d'un amplificateur à simple étage.

L'amplificateur contenant le DGE est modélisé comme un seul amplificateur ayant un facteur de bruit équivalent obtenu par la cascade des deux amplificateurs. En figure 4.6 nous avons représenté le site d'amplification contenant le DGE.

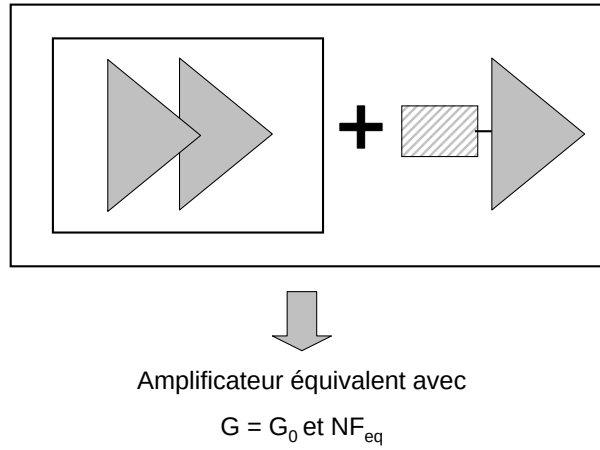


FIG. 4.6 – Schématisation de l'amplificateur en ligne avec le DGE.

Soient G_1 le gain de l'amplificateur à double étage, G_2 le gain de l'amplificateur à simple étage, le gain total des deux amplificateurs doit compenser les pertes en ligne et celles de l'égaliseur. Pour le calcul du facteur de bruit équivalent de l'amplificateur obtenu, nous calculons la puissance de bruit à la sortie du deuxième amplificateur et en déduisons le facteur de bruit équivalent.

Pour qu'un signal puisse être reçu "sans erreur" (c'est-à-dire avec un taux d'erreur inférieur au seuil fixé), l'OSNR doit satisfaire une inégalité du type [Cardillo 2005] :

$$OSNR_{signal} - \sum Pen > OSNR_{seuil} \quad (4.12)$$

soit

$$OSNR_{signal} - \sum Pen > OSNR_{min} + \sum Marges \quad (4.13)$$

Avec $OSNR_{signal}$ le rapport signal à bruit calculé par les formules précédentes et Pen les différentes pénalités introduites par les effets de transmission modélisés (tableau 4.1).

4.2.3 Modélisation de la PMD

Les éléments contribuant à la PMD sont les fibres (transmission et compensation), mais aussi les filtres, les amplificateurs à fibre dopée, les égaliseurs et les multiplexeurs.

Dans une fibre le DGD moyen est calculé à partir de la contribution à la PMD de chaque pas. A cause de son comportement aléatoire et de l'indépendance des pas (en supposant une PMD uniforme tout le long de la fibre), le DGD moyen est proportionnel à la racine carrée de la longueur de chaque fibre constituant la liaison [Strand 2001], comme montré par l'équation 4.14. Le terme D_{pmd} exprime le DGD linéique associé à une fibre.

$$\langle DGD \rangle = \sqrt{\sum_{k=1}^M D_{pmd}^2 \cdot L(k)} \quad (4.14)$$

Pour ce qui concerne les autres dispositifs, une valeur de PMD leur est associée. Les différentes contributions à la PMD s'ajoutent quadratiquement.

En admettant un retard de groupe différentiel au dessous de a temps bit, T , c.f. section 4.1.1 la PMD totale d'un signal s'accumule comme indiqué dans l'équation 4.15 et doit respecter la limite indiquée.

$$\langle DGD \rangle_{Tot} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \langle DGD \rangle_i^2} \leq aT \quad (4.15)$$

4.2.4 Modélisation de la dispersion chromatique

Dans un cas théorique, la dispersion chromatique accumulée par le signal le long de sa propagation est exactement compensée par les modules de DCF adéquats ; ainsi, la dispersion chromatique résiduelle est complètement nulle au niveau du récepteur et n'intervient jamais dans la dégradation du signal [Strand 2001].

Le retard de groupe introduit par la dispersion chromatique (DC) est directement lié à la longueur de fibre (L) traversée par le signal, comme indiqué par l'équation 4.16.

$$Ret_{DC} = DC \cdot L \quad (4.16)$$

La dispersion résiduelle, équation 4.17, est aussi obtenue par une formule linéaire qui prend en considération le trajet effectué par le signal dans la fibre de transmission (SMF) et dans le module de compensation (DCF).

$$DC_{res} = \sum_{i=1}^M (DC_{SMF} \cdot L_{iSMF} + DC_{DCF} \cdot L_{iDCF}) \quad (4.17)$$

Où SMF et DCF sont la fibre en ligne/de compensation, respectivement, L_i la longueur de chaque fibre en km, M est le nombre de pas traversés par le signal².

Le calcul de dispersion doit considérer aussi les aspects suivants :

- la dispersion chromatique varie en fonction de la longueur d’onde ;
- la dispersion est sensible aux variations de température ;
- la dispersion résiduelle est liée à la granularité des modules de compensation.

Un calcul précis de la dispersion permet de faire une étude complète pour estimer les limites relatives à un réseau transparent en fonction des systèmes utilisés.

Dépendance de la dispersion chromatique de la longueur d’onde

La dépendance en longueur d’onde de la DC est supposée linéaire en première approximation, [Tur 2002], [Kato 2000], [Willner 2002], comme indiqué par l’équation 4.18.

$$DC(\lambda) = S_i \cdot (\lambda - \lambda_{center}) + D_{\lambda_{center}} \quad (4.18)$$

Avec : λ une quelconque longueur d’onde (nm), λ_{center} la longueur au centre de la bande (nm), S_i la pente de dispersion pour la fibre i considérée (ps/(nm²·km)), D_{center} la dispersion chromatique (ps/(nm·km)) à λ_{center} .

La compensation de chaque longueur d’onde de la bande optique n’est possible que si les modules DCF arrivent aussi à corriger la pente de dispersion. Pour cette raison, un autre paramètre important pour spécifier les modules de compensation est le RDS (rapport dispersion/pente) indiquant sa capacité à neutraliser la dispersion sur toute la bande, [Grüner-Nielsen 1999a] et [Vorbeck 2003]. Une mauvaise compensation de la dispersion sur la longueur d’onde introduit une variation de dispersion par kilomètre égale à ΔDC_S et est calculée par l’équation 4.19.

$$\Delta DC_S(\lambda) = S_{SMF} \cdot (\lambda - \lambda_{center}) + D_{\lambda_{SMF}} + S_{DCF} \cdot (\lambda - \lambda_{center}) + D_{\lambda_{DCF}} \quad (4.19)$$

Dépendance de la température

La dispersion chromatique est une grandeur qui dépend de l’indice de la fibre et donc de la température de la fibre. La dépendance de la température est en général supposée de type linéaire [Kato 2000], [André 2003] et [Ji 2004], telle que dans l’équation 4.20.

$$\Delta DC = \chi_{fibre} \cdot \Delta T \quad (4.20)$$

²Nous rappelons rapidement que chaque pas est constitué par une fibre de transmission de longueur donnée et son module de compensation de DC situé dans les amplificateurs en ligne (figure 4.5)

Avec : χ_{fibre} le coefficient thermique relatif de la fibre, ΔT est la variation de température. La variation de dispersion résiduelle en fonction de la température doit considérer les variations de température sur la fibre de transmission mais aussi celles des DCF dans les sites d'amplification en ligne. Les incertitudes de dispersion induites par les variations de température sont indiquées par ΔDC_T leur valeur par kilomètre est donnée par l'équation 4.21.

$$\Delta DC_T = (\chi_{SMF} \cdot \Delta T_{SMF}) + (\chi_{DCF} \cdot \Delta T_{DCF}) \quad (4.21)$$

Avec : D_i la dispersion des fibres, χ_i le coefficient thermique et ΔT_i la variation de température, et i indiquant la fibre en ligne et de compensation.

Dépendance des modules de compensation

Les modules de compensation peuvent corriger exactement la dispersion accumulée sur une longueur de fibre en ligne qui est un multiple entier d'une unité de base donnée ; cette unité est appelée granularité des modules de compensation. Il en résulte que, s'il n'existe pas une vaste gamme de modules de granularité différentes, il est impossible de trouver un module de fibre DCF qui puisse exactement compenser la dispersion introduite par la fibre de transmission. Le choix d'une granularité relève des règles d'ingénierie et résulte d'un compromis entre le coût et les performances :

- plus la granularité d'un module est faible, plus le coût de la fibre DCF par km est élevé ; mais le système est plus performant, c'est-à-dire il couvre des portées plus élevées ;
- plus la granularité d'un module est grande, plus le coût de la fibre DCF par km est faible ; mais en même temps le système est moins performant et cela a un impact sur le nombre de régénérations nécessaires pour couvrir des longues portées.

Le comportement du prix d'un module est dicté par la disponibilité de celui-ci sur le marché (les granularités très fines sont plus rares) et par la difficulté de réalisation du module (granularités très fines, en général de l'ordre de 1 ou 2 km).

La dispersion résiduelle obtenue après compensation d'un module à x km est donnée par l'équation 4.17, où à la place de L_{DCF} il faut substituer $N \cdot DCF_x$, avec N le nombre total de modules à granularité x employés et DCF_x la longueur de tel module.

L'incertitude de dispersion provoquée par une mauvaise compensation de la dispersion en ligne sera indiquée par ΔDC_{Gran} , car nous supposons que les modules de compensation de dispersion en ligne dans le réseau ont tous la même granularité.

En conclusion, Si nous prenons en considération les incertitudes causées par la dépendance de la dispersion chromatique de la longueur d'onde et de la température, elles sont proportionnelle à la longueur de fibre parcourue, donc nous pouvons introduire un paramètre (A dans l'équation 4.22) qui exprime telle dépendance.

L'impact de la granularité sur les incertitudes de dispersion dépend de la longueur de chaque lien constituant le parcours (incertitude égale au modulo de la longueur du lien avec la granularité de la fibre de compensation considérée). Dans le pire cas sur chaque lien nous pouvons commettre une erreur égale à la moitié de la granularité du module de compensation. En supposant que pour

chaque lien une erreur du pire cas est commise, l'incertitude de dispersion chromatique introduite par la granularité est proportionnelle (paramètre B dans l'équation 4.22) au nombre de nœuds traversés ($N-1$) par le signal. Les équations 4.23 et 4.24 indiquent les valeurs des paramètres A et B .

$$\Delta DC_{res} = A \cdot km + B \cdot N \quad (4.22)$$

$$A = \Delta DC_S + \Delta DC_T \quad (4.23)$$

$$B = \Delta DC_{Gran} \quad (4.24)$$

Avec : N le nombre de nœuds de la connexion, km les kilomètres de fibre de ligne traversés, ΔDC_i les incertitudes en dispersion dues à la pente de dispersion ($i = S$), à la variation de température ($i = T$) et à la granularité du module DCF ($i = Gran$).

La pénalité de puissance causée par l'effet de la dispersion chromatique est calculée à partir de formules empiriques issues d'expérimentations en laboratoire, équation 4.25.

$$Penalit_{dB} = a \cdot DC_{res}^b \quad (4.25)$$

Avec : a un coefficient qui dépend du format de modulation et b qui dépend du débit et du format de modulation du signal.

4.2.5 Effets non-linéaires

Les différents effets non linéaires se manifestant dans une fibre au cours de la propagation du signal (c.f. section 4.1.2) peuvent être quantifiés par un décalage de phase appelé phase non-linéaire [Agrawal 1989] produit par l'effet Kerr. La phase non linéaire est un paramètre empirique qui arrive à bien décrire les effets non-linéaires [Frignac 2000], [Antona 2002] suivant des hypothèses adéquates.

La phase non-linéaire obéit à une loi additive qui dépend du parcours effectué, équation 4.26, [Antona 2002].

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{lien} \left(\frac{n_2 P}{A_{eff}} \right) (z) dz = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot N \left(\frac{n_2 P_{in} L_{eff}}{A_{eff}} \Big|_{SMF} + \frac{n_2 P_{in} L_{eff}}{A_{eff}} \Big|_{DCF} \right) \quad (4.26)$$

Avec : N le nombre total de pas présents sur les liens traversés, n_2 le coefficient non-linéaire propre des fibres considérées (SMF ou DCF), P_{in} la puissance en entrée de chaque fibre, A_{eff} l'aire effective des fibres et L_{eff} la longueur effective des fibres. La longueur effective des fibres s'obtient en fonction de la longueur totale L de la fibre traversée et du coefficient d'atténuation en ligne α , équation 4.27 ; cette longueur représente la longueur de fibre sur laquelle les effets non-linéaires les plus significatifs ont lieu, pour une puissance d'entrée dans la fibre donnée.

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (4.27)$$

Dans les systèmes de transmission, la limite en déphasage accepté (φ_{max}) dépend des récepteurs (sensibilité du récepteur aux déformations non-linéaires), du débit du signal [Essiambre 2002] et des choix d'ingénierie effectués (marges attribuées aux effets non-linéaires, carte de dispersion utilisée). Des valeurs typiques de phase non-linéaire limite associées à 1,5 dB de pénalité sont d'environ 1 rad.

Interaction dispersion chromatique et phase non-linéaire

Comme évoqué au paragraphe 4.1.2, la distorsion liée à la SPM est similaire à celle produite par la dispersion chromatique à valeurs négatives [Essiambre 2002]. Les deux phénomènes interagissent entre eux et l'effet de cette interaction provoque :

- une réduction de l'intervalle d'acceptabilité de la dispersion résiduelle de la part du récepteur ;
- un déplacement de cet intervalle d'acceptabilité vers des valeurs positives.

Le comportement décrit ci-dessus est illustré dans la figure 4.7. La ligne pointillée indique la valeur centrale de l'intervalle d'acceptabilité.

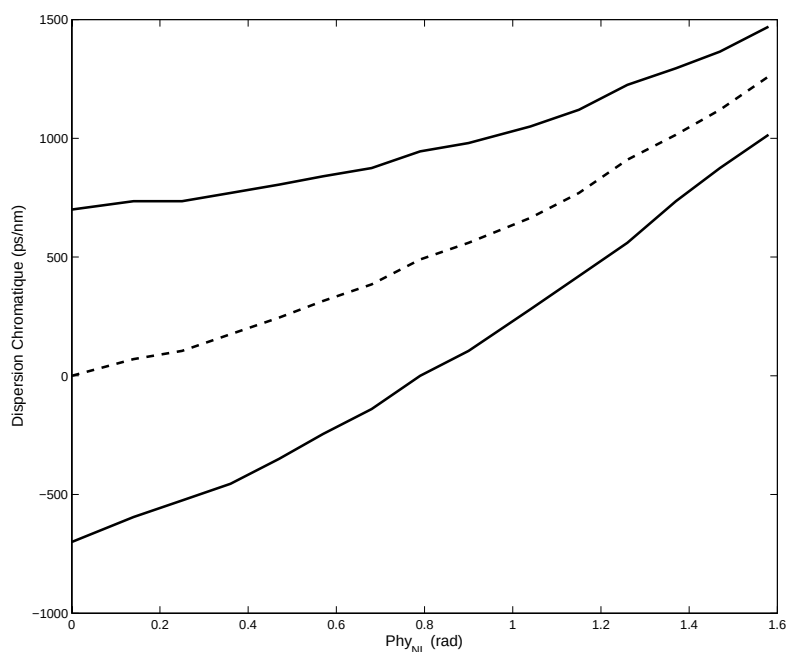


FIG. 4.7 – Exemple du comportement de migration et de rétrécissement de l'intervalle d'acceptabilité de la dispersion chromatique.

L'intervalle d'acceptabilité de la dispersion chromatique est l'intervalle ($ID = [D_{min} ; D_{max}]$) qu'un récepteur peut accepter en restant au dessous d'une pénalité en dB définie. En utilisant une formule empirique, donnant la qualité du signal liée aux différentes variations de dispersion chromatique et de phase non-linéaire (la formule de la QoT, [Zami 2004]), nous avons étudié les

variations de ID en faisant varier les valeurs de phase non-linéaire en fin de transmission pour une pénalité en dispersion chromatique fixée.

Ces études nous ont permis de déterminer que le rétrécissement de l' ID peut être approximé par la courbe de tendance indiquée par l'équation 4.28.

$$\Delta ID(\varphi_{NL}) = Id_1 \varphi_{NL} + Id_2 \quad (4.28)$$

Avec φ_{NL} la valeur de phase non-linéaire et Id_i les coefficients de la courbe de tendance de type linéaire.

Si DC_c est la valeur de dispersion au centre de cet intervalle, la figure 4.7 montre le déplacement de DC_c vers des valeurs positives en fonction de φ_{NL} cumulée. Ce déplacement peut être approximé par une autre courbe de tendance d'équation 4.29.

$$DC_c(\varphi_{NL}) = C_1 \varphi_{NL}^2 + C_2 \varphi_{NL} \quad (4.29)$$

Les équations 4.28 et 4.29 sont valides pour de faibles effets inter-canaux (tels que XPM, FWM), ce qui est équivalent à avoir des débits inférieurs à 10 Gbit/s et 40 canaux par fibre espacés de 100 GHz.

Si nous reprenons l'équation 4.22, il faut considérer maintenant l'introduction d'un facteur décrivant l'impact de la phase non linéaire (proportionnelle aux kilomètres parcourus) dans le calcul de la dispersion chromatique résiduelle en fin de transmission :

$$\Delta DC_{res} = A \cdot km + B \cdot N + C(km) \quad (4.30)$$

Où C intègre la contribution de la phase non linéaire donnée par l'équation 4.26 à la dispersion chromatique comme exprimé dans les équations 4.28 et 4.29 (migration et rétrécissement de l'intervalle d'acceptabilité de la dispersion chromatique).

Interaction phase non-linéaire, puissance du signal et dispersion chromatique

Dans la section 3.1.3 nous avons dit que les variations de signal au cours de la propagation dans la fibre ne sont pas prises en considération car nous disposons des DGE sur les liens pour remettre au niveau nominal les valeurs de puissances des signaux pendant leur propagation.

Le signal arrivant sur un DGE présente une déviation de sa puissance nominale qui dépend du nombre d'amplificateurs traversés. La déviation de puissance qui se vérifie sur chaque amplificateur dépend du type d'amplificateur choisi et de l'occupation de la fibre ; il n'est donc pas possible d'associer une fluctuation en puissance à une longueur d'onde en particulier.

En supposant pour chaque amplificateur une déviation maximale en puissance égale à ΔP_{max} pour toutes les longueurs d'onde et indépendamment du remplissage de la fibre, la déviation de puissance sur le DGE sera, au premier ordre, ΔP_{max} multiplié par le nombre d'amplificateurs traversés. Pour évaluer l'impact des fluctuations de puissance (ΔP) sur chaque canal nous

estimons les variations de la phase non-linéaire ($\Delta\varphi$) et donc de ID sur chaque nœud :

$$\Delta ID = (2 \cdot ID_{\varphi 1} \cdot \varphi + ID_{\varphi 0}) \cdot \Delta\varphi \quad (4.31)$$

Où $ID_{\varphi 1}$ et $ID_{\varphi 0}$ sont les coefficients qui expriment la relation quadratique entre les faibles variations de la phase non linéaire et le rétrécissement de l'intervalle d'acceptabilité de la dispersion chromatique.

Cette incertitude de ID doit être considérée dans le calcul des limites de transmission liées à la dispersion chromatique.

Critère d'optimisation des cartes de dispersion dans un réseau transparent

Dans un réseau transparent, les signaux ont des histoires différentes, donc des caractéristiques physiques différentes. Pour ce type de réseau nous avons trouvé un critère de conception de carte de dispersion optimale pour chaque signal indépendamment de son histoire.

Dans la littérature jusqu'à présent, divers critères pour obtenir des cartes de dispersion adaptées au cas des réseaux transparents ont été proposés [Vasilyev 2003], [Xie 2005], [Banerjee 2004] ; parmi eux, le critère le plus utilisé prévoit l'optimisation de la carte de dispersion pour le plus long chemin présent dans le réseau, [Penninckx 2003] : si ce pour ce chemin Pen_{DC} est inférieure de la valeur limite, alors les chemins plus courts, ayant cumulé moins de dispersion chromatique, auront des Pen_{DC} acceptables.

Cette méthode dépend des caractéristiques de réseau (topologie et trafic) ; si un nouveau parcours plus long est établi, la carte de dispersion n'est plus valide.

Nous proposons un critère d'optimisation partiel (sur chaque lien) permettant une optimisation globale (sur la longueur totale du chemin). La dispersion résiduelle sur chaque lien est choisie égale à DC_c , la valeur centrale de l'intervalle de dispersion (ID).

L'équation 4.26 montre que la phase non-linéaire s'accumule linéairement avec la distance et que la dispersion résiduelle minimisant Pen_{DC} dépend de la phase non-linéaire de manière quadratique, meilleur accord (best fit en anglais). L'équation 4.29 peut être approximée par une fonction linéaire :

$$DC_c = L_1\varphi + L_2 \quad (4.32)$$

Cette fonction est une approximation linéaire d'une fonction quadratique valable de 0,25 à 1,8 rad. En deçà de 0,25 rad les pénalités en dispersion chromatique sont si faibles que cette approximation n'affecte pas les performances du signal ; au-delà, soit environ au-delà de 2 500 km, la transmission n'est déjà plus possible.

Comme seules les valeurs de dispersion résiduelle ont un impact important dans notre étude, et comme notre étude est faite pour une transmission à 10 Gbit/s, dans la suite aucune hypothèse sur les cartes de dispersion n'est faite. Il existe par ailleurs de nombreuses études d'optimisation de ces cartes de dispersion dans la littérature, [Willner 2002], [Vasilyev 2003]. La seule considération liée aux cartes de dispersion est l'utilisation de modules de pre-/post-compensation optimisés en extrémités des liens pour assurer les meilleures performances de transmission.

4.2.6 Effet du filtrage

Rétrécissement de la bande du signal

Comme spécifié dans la section 3.1.7, les opérations de filtrage sont faites par des multiplexeurs/demultiplexeurs (nœuds basés sur la technologie MEMs) et à l'intérieur du WSS (nœuds basés sur des blocs WSS). L'impact de l'opération de filtrage dans les deux cas peut être supposé du même type.

Pour considérer cet effet, nous fixons un nombre maximal de filtres à traverser, pour lequel sont réservées des pénalités sur l'OSNR en fonction des choix d'ingénierie. [Tomkos 2001] donne un exemple de pénalités liées à un particulier type de filtre en fonction du nombre de nœuds traversés.

La cascade de filtres induit différentes distorsions : oscillations de pertes, oscillations de retard de groupe (GDR), incertitude sur la dispersion chromatique, diaphotie. Bien que la majorité de ces effets produise une pénalité proportionnelle au nombre de nœuds traversés, la diaphotie peut produire très brutalement une forte pénalité (pénalité négligeable jusqu'au nœud N et une pénalité supérieure à 2 dB au nœud $N + 1$, [Ho 1998]). C'est pourquoi l'impact de la cascade des nœuds n'est pas comptabilisé dans le budget de pénalités mais en fixant un nombre de nœuds traversés maximum.

Incertitude de DC introduite par les filtres

Les fluctuations de dispersion chromatique introduites par les filtres traversés sont aléatoires ; dans cette étude nous supposons une incertitude fixe en dispersion pour chaque filtre traversé, sa valeur dépendra du type de nœud employé, γ de l'équation 4.33. La valeur γ est choisie en considérant la plus grande fluctuation de dispersion observée à la sortie d'un filtre.

$$\Delta DC_{filtres} = \pm M\gamma \quad (4.33)$$

Cette incertitude est ajoutée par chaque filtre traversé. Donc en fin de transmission, si le nœud transparent est réalisé par une technologie MEMs, la traversée d'un nœud implique le passage dans deux filtres (Démux et Mux) ; par contre si le nœud est réalisé avec une technologie WSS, il y aura passage dans un seul filtre. Le nombre total de filtres sera : $M = 2N$ pour des nœuds MEMs et $M = N$ pour des nœuds WSS.

4.3 Impact de l'architecture

Dans la section 3.2 nous avons défini les architectures des nœuds et des liens nécessaires pour la transmission des signaux dans le réseau ; dans cette section nous analysons l'impact de l'architecture choisie sur les dégradations des signaux pendant leur transmission.

4.3.1 Architecture des noeuds

Comme indiqué dans la section 3.2, le cœur optique utilise trois technologies différentes. Le tableau 4.4 résume les dégradations physiques induites par les dispositifs présents dans les noeuds en fonction de l'architecture choisie ; ces valeurs sont issues de fiches techniques ([Avanex], [Calient], [Capella], [Corvis], [JDS], [Metconnex]). Les pertes pour les matrices OXC et pour les WSS intègrent les pertes dues au prélèvement de puissance pour le contrôle des signaux, à l'égalisation ainsi que les pertes des connecteurs de chaque dispositif.

TAB. 4.4 – Dégradations physiques introduites par les dispositifs des noeuds.

	Pertes (dB)	DC (ps/nm)	PMD (ps)
Mux/Demux	4,5	± 10 (incertitude)	0,3
OXC MEMs	9,5	$\pm 0,25$	0,1
Ports optiques	-	-	-
Bloc WSS	8	± 10 (incertitude)	0,3
Bloc WB	10	± 10 (incertitude)	0,3
Coupleur (1xn)	$10\log_{10}(n)$	-	-

Noeud hybride réalisé par un cœur à MEMs

Pour assurer les fonctions d'agrégation et désagrégation des signaux, un couple de multiplexeurs/démultiplexeurs pour chaque fibre bidirectionnelle est placé en amont et en aval de la matrice optique, comme montré en figure 4.8. Un signal traversant le noeud subit des

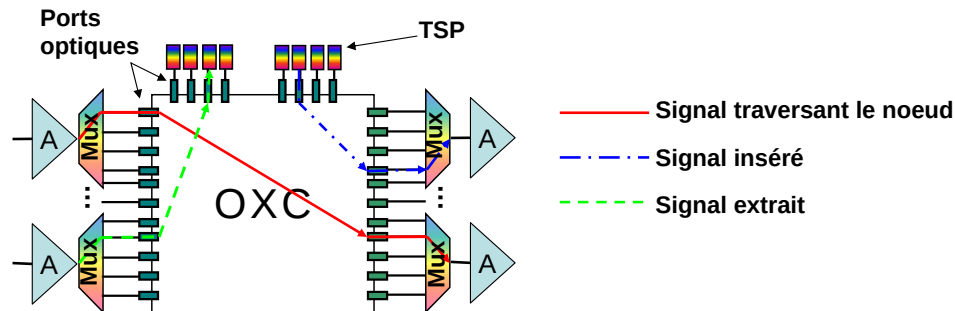


FIG. 4.8 – Structure d'un noeud en technologie MEMs et opérations possibles par un signal.

dégradations dues à la traversée d'un démultiplexeur, de la matrice à MEMs et du multiplexeur, avant d'entrer dans l'amplificateur associé au noeud.

Un signal inséré dans le réseau est injecté dans la matrice MEMs et traverse le multiplexeur pour après être amplifié en sortie du noeud. La puissance en sortie du transpondeur pour les signaux insérés est réglée de manière à ce qu'à la sortie du noeud ils aient la même puissance que les signaux traversant le noeud de manière transparente.

Un signal extrait du réseau traverse le démultiplexeur et la matrice MEMs avant d'être envoyé

sur le récepteur. Avec cette représentation, un signal régénéré se décompose en signal extrait et re-inséré après avoir subi la régénération OEO.

Le tableau 4.5 montre les différentes dégradations subies par le signal dans les trois cas analysés en fonction des dispositifs traversés (tableau 4.5).

TAB. 4.5 – Dégradations physiques d'un signal dans une matrice MEMs.

	Pertes (dB)	DC (ps/nm)	PMD (ps)
Transit	18	$\pm 20,25$	0,43
Insertion/Extraction	14	$\pm 10,25$	0,3

Nœud hybride constitué par des blocs WSS (OXC)

Les signaux en transit de manière transparente traversent un bloc WSS et un coupleur ; les signaux insérés dans le réseau traversent un multiplexeur et un coupleur ; les signaux extraits traversent le WSS et le démultiplexeur, figure 4.9.

A cause de la présence de coupleurs à la sortie du nœud, les dégradations du signal pour les opérations d'insertion/extraction et transit sont liées au degré de connectivité du nœud. Dans le tableau 4.6 les dégradations sont calculées pour un nœud de degré 3.

La figure 4.10 montre les pertes d'un nœud basé sur une structure WSS en fonction du degré de connectivité. Si nous supposons utiliser des amplificateurs adaptés aux pertes des nœuds, pour des nœuds avec connectivité inférieure à 4 nous pourrions adopter des amplificateurs ayant un gain de 16 dB ou pour des connectivités supérieures des amplificateurs à 21 dB de gain.

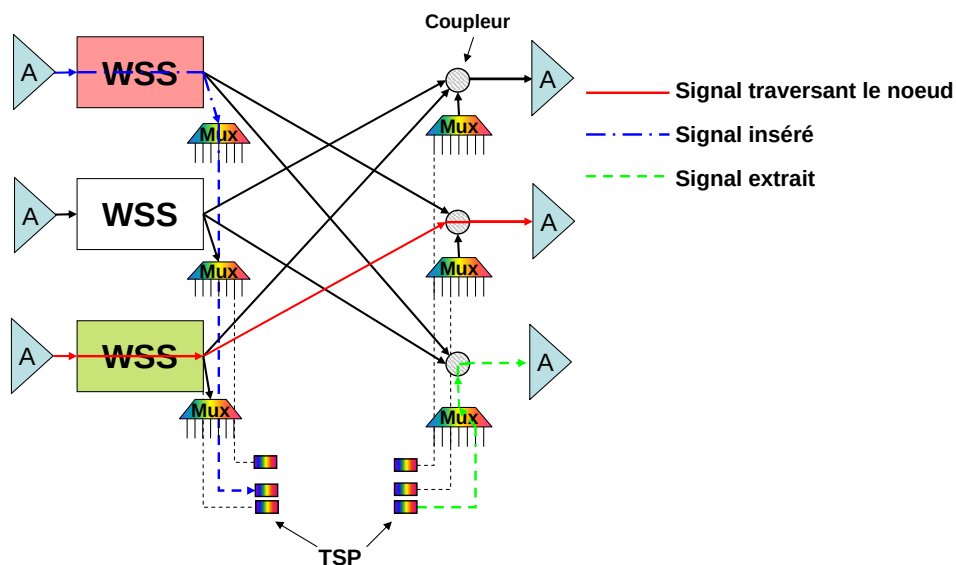


FIG. 4.9 – Structure d'un nœud en technologie WSS et opérations possibles par un signal.

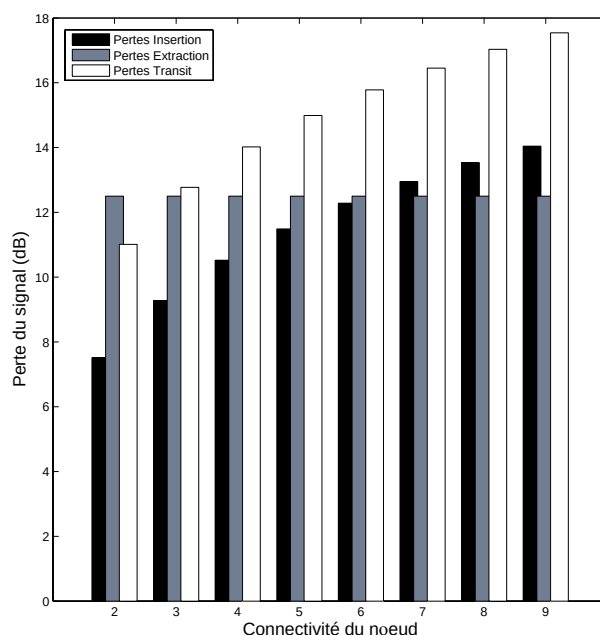


FIG. 4.10 – Pertes dans un nœuds en technologie WSS en fonction du degré de connectivité et en fonction des opérations effectuées sur le signal.

TAB. 4.6 – Dégradations physiques d'un signal dans un nœud de connectivité 3 réalisé avec WSS.

	Pertes (dB)	DC (ps/nm)	PMD (ps)
Transit	12,8	± 10	0,4
Insertion	9,3	± 10	0,4
Extraction	12,5	± 20	0,4

Nœud hybride constitué par des blocs WB (R-OADM)

Les R-OADM sont souvent réalisés avec des bloqueurs de longueur d'onde. Par rapport à un WSS, cette structure est plus simple. La figure 4.11 montre l'architecture du nœud R-OADM choisie. Les signaux traversant le nœud de manière transparente voient des dégradations dues à deux coupleurs et à la fonction de filtrage interne au WB ; les signaux insérés et extraits voient les dégradations dues au coupleur et multiplexeurs/démultiplexeurs. Le tableau 4.7 montre les valeurs associées aux dégradations en fonction des opérations effectuées.

4.3.2 Architecture des liens

Au paragraphe 3.6 nous avons décrit les dispositifs présents dans les liens ; nous fixons la longueur moyenne des pas entre deux amplificateurs à 80 km. En supposant que les pertes en ligne ont des valeurs autour de 0,23 dB/km (qui correspond à la valeur de la recommandation

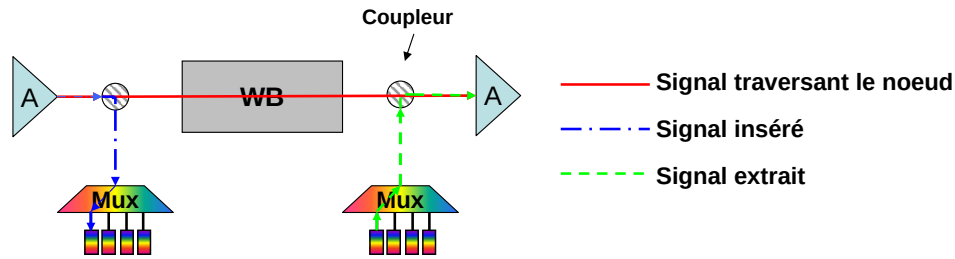


FIG. 4.11 – Structure d'un nœud R-OADM en technologie WB et opérations possibles par un signal.

TAB. 4.7 – Dégradations physiques d'un signal dans un R-OADM réalisé avec WB.

	Pertes (dB)	DC (ps/nm)	PMD (ps)
Transit	16	± 10	0,3
Insertion	9,3	± 10	0,3
Extraction	19,3	± 10	0,3

[ITU 2005]), les pertes relatives à chaque pas seront de l'ordre de 18,5 dB. A cette valeur il faudra ajouter environ 2 dB pour considérer les pertes ajoutées par les connecteurs.

En comparant les atténuations entre deux amplificateurs en ligne et celles des nœuds, nous observons qu'elles ont le même ordre de grandeur pour les MEMs et les R-OADM mais plus faibles pour les WSS.

Puisque les amplificateurs disposent de gammes de gain limitées, nous avons choisi dans les nœuds et dans les sites en ligne le même type d'amplificateur.

Ce choix est aussi lié au besoin d'un opérateur de ne pas multiplier les types d'amplificateurs sur le réseau, car d'un point de vue de manutention cela permet d'éviter de multiplier des stocks de différents dispositifs pour être prêt à remplacer un amplificateur défaillant dans les temps définis par les SLA (Service Level Agreements).

4.4 Estimation de la qualité d'un signal

Estimer la qualité de transmission d'un signal durant sa propagation est une thématique de plus en plus d'actualité ; différentes méthodes de résolution sont disponibles dans la littérature, [Kulkarni 2005], [Cardillo 2006], [Yang 2005b], [Huang 2005], [Politi 2006] ; ces méthodes concernent la modélisation simple pour estimer la qualité de transmission liée à un signal.

Nous groupons ces méthodes en quatre familles distinctes : 1) méthode de la limite de transmission ; 2) méthode du pire cas ; 3) méthode empirique ; 4) méthode des échanges des marges. Chacune d'elles est analysée pour justifier le choix effectué pour l'évaluation de la qualité d'un signal.

4.4.1 Méthode de la limite de transmission

Une manière simple de considérer la dégradation d'un signal pendant sa propagation utilise une *limite de transmission* qui peut être exprimée en termes de nombre de kilomètres maximum qu'on peut parcourir et/ou de nombre maximum de systèmes qu'on peut traverser. Ces concepts se résument par la portée de l'objet (ou des objets) de référence ; par exemple une portée maximale de 1 000 km et/ou de 5 nœuds signifie que la réception d'un signal est estimée correcte quand il a parcouru une distance inférieure ou égale à 1 000 km et traversé au maximum 5 nœuds.

Parmi les avantages de cette méthode nous identifions sa simplicité qui permet une implémentation dans les algorithmes de routage. En même temps, cette simplification ne permet pas d'estimer l'impact d'un élément du réseau (en fonction de ses caractéristiques) ou d'un effet physique sur la qualité du signal. La distance est un différentiateur trop grossier : les effets physiques ne sont pas toujours proportionnels à la distance ou au nombre de bonds, ainsi de nombreuses liaisons "physiquement" possibles sont rejetées car mal estimées.

4.4.2 Méthode du pire cas

La méthode du pire cas considère la dégradation d'un signal au cours de sa propagation en fonction des effets que nous estimons avoir un impact le plus la qualité de transmission.

Pour chaque effet, des valeurs limites lui sont associées ; ces limites ne doivent pas être dépassées au moment de la réception, indépendamment de l'accumulation des autres dégradations.

Une telle méthode est appelée du *pire cas* parce qu'on suppose que dès qu'un effet physique dépasse sa valeur limite le critère de qualité n'est plus satisfait.

Cette méthode peut se rapprocher de la précédente : si tous les systèmes ont les mêmes caractéristiques (cas idéal), nous pouvons estimer quel est le nombre maximal de dispositifs à traverser en fonction de la limite de transmission. Dans un cas réaliste, une telle approximation ne pourra pas être effectuée car les éléments de réseau n'ont pas forcément les mêmes caractéristiques.

Par rapport à la méthode de la limite de transmission, celle du pire cas apparaît plus complète parce qu'elle permet de comprendre pour chaque réseau quel est le phénomène limitant la transmission et l'impact des systèmes employés ; des études de sensibilité sur les variations des propriétés physiques du réseau ou des systèmes installés ou à installer peuvent être ainsi conduites avec cette méthode.

4.4.3 Méthode empirique

Le but d'une *méthode empirique* est de déduire la dépendance entre la qualité d'un signal et le nombre de dispositifs traversés en faisant des mesures expérimentales sur la qualité du signal en fonction de différents effets physiques mesurés.

Les évaluations sur la qualité du signal faites en simulation correspondent au cas réel si : 1) les hypothèses d'ingénierie réseau sont les mêmes que dans l'expérimentation et 2) les valeurs calculées rentrent dans un domaine de validité de la fonction d'interpolation.

Changer une hypothèse sur l'ingénierie du réseau correspond à une nouvelle fonction d'interpo-

lation ; donc il n'est pas possible faire des études de sensibilité vis-à-vis des différentes ingénieries ou des caractéristiques des systèmes/signaux s'ils n'ont pas été considérés dans l'expérimentation.

4.4.4 Méthode des échanges des marges

Dans le cas de la méthode du *pire cas* une liaison est acceptée seulement si chaque effet reste inférieur à une limite. Dans un cas réel, il s'avère souvent qu'un effet se manifeste avant les autres et sous certaines conditions le récepteur peut encore détecter correctement le signal même quand un ou plusieurs effets dépassent leur seuil.

La méthode des échanges des marges propose la considération simultanée des différents effets pour déterminer la qualité de transmission d'une liaison et pour bénéficier d'une approche de compromis entre les différents effets (ou *échange des seuils/marges*), [Yang 2005a]. En fonction du nombre de marges à échanger, le calcul de la qualité du signal est plus précis que le calcul effectué avec la méthode du *pire cas*.

Cette méthode modélise facilement la qualité de transmission d'un signal en fonction des choix d'ingénierie ; sa formulation permet des études de sensibilité sur la qualité de transmission en respectant les compromis entre les effets.

Par rapport à la *méthode empirique*, l'estimation de la qualité du signal n'est pas validée par des mesures expérimentales.

4.4.5 Méthode choisie pour les études d'évaluation de la qualité de transmission d'un signal

A partir des considérations précédentes et avec l'expertise de l'unité de travail dans laquelle cette étude s'est déroulée, nous avons choisi la méthode de l'échange des marges.

Les échanges de marges sont effectués entre l'OSNR, la dispersion chromatique et la PMD. Puisque il est supposé que le récepteur a une tolérance globale à la distorsion temporelle (en dB), alors le budget en dispersion ne considérera plus les effets de dispersion chromatique et de PMD séparément mais ensembles.

Aucune hypothèse d'échange n'a été supposée avec les effets non-linéaires, parce nous n'avons pas à disposition une loi de la pénalité des effets cumulés par la dispersion chromatique, la PMD, l'effet de filtrage et la phase non-linéaire.

Pour fixer les limites sur les autres effets, nous avons fixé un budget en pénalités à ne pas dépasser qui correspond à une valeur maximale du nombre de systèmes à traverser ou d'accumulation d'un effet physique.

En considérant les limites en OSNR, nous avons fixé un OSNR minimal correspondant aux performances requises au signal en réception (équation 4.12). A la valeur d'OSNR en fin de la transmission nous enlevons les pénalités dues aux distorsions temporelles pour obtenir un OSNR équivalent ($OSNR_{eq}$). Enfin, cette valeur d' $OSNR_{eq}$ sera comparée au seuil d'OSNR fixé par la qualité de transmission.

La figure 4.12 montre un organigramme de la méthode.

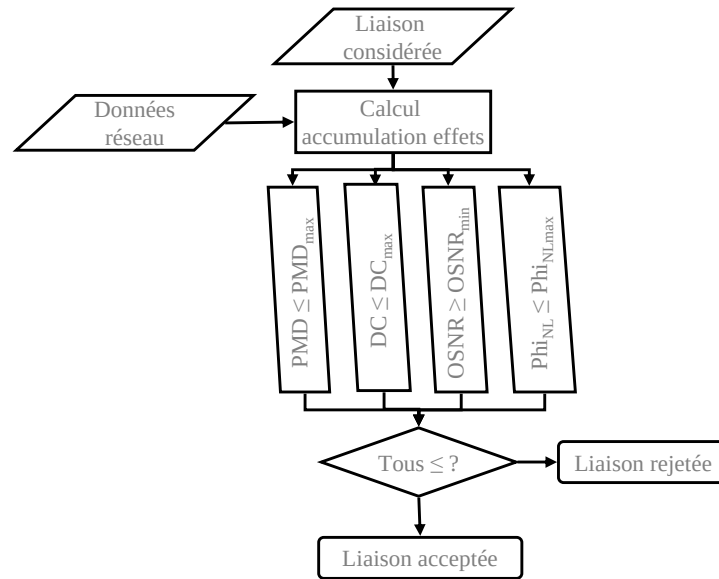


FIG. 4.12 – Organigramme de la méthode utilisée pour calculer la qualité du signal.

4.5 Hypothèses

4.5.1 Hypothèses physiques

Les valeurs d'entrée de l'outil de calcul sur la qualité du signal sont relatives à une partie générale concernant les caractéristiques du réseau et du trafic à considérer (tableau 4.8) et aux calculs des divers phénomènes physiques (tableaux 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13). Les valeurs de la fibre en ligne sont relatives à la SMF, puisque c'est la fibre que nous utilisons dans cette étude, c.f. section 3.1.1.

TAB. 4.8 – Caractéristiques réseau/trafic.

Entrées générales de l'algorithme	Valeur	Unité de mesure
Débit du signal	10,7	Gbit/s
Borne inférieure de la bande C	1527	nm
Borne supérieure de la bande C	1565	nm
Valeur λ_{00}	1550	nm
Nombre de canaux par fibre	40	–
Format de modulation	NRZ	–
Bande optique	40	GHz
Bande électrique	7	GHz
Constante de Planck	$6,63 \cdot 10^{-34}$	J/Hz
Longueur moyenne des pas	80	km
Variation de température	± 10	°C
Puissance d'un canal optique inséré dans la fibre de ligne	1	dBm
Puissance du canal optique inséré dans la DCF	-6	dBm
Nombre de filtres maximal	12	–

TAB. 4.9 – Données relatives au calcul de l'OSNR.

Entrées générales de l'algorithme	Valeur	Unité de mesure
Pertes SMF	0,23	dB/km
Pertes DCF	0,6	dB/km
Pertes nœuds (max)	Fonction des nœuds	dB
Facteur de bruit des amplificateurs	5,5	dB
Gain des amplificateurs	21	dB
OSNR émission	36	dB @12,5 GHz
OSNR _{Seuil}	14	dB @12,5 GHz

TAB. 4.10 – Données relatives au calcul de la PMD.

Entrées générales de l'algorithme	Valeur	Unité de mesure
PMD linéique SMF	0,1	ps/km ^{1/2}
PMD linéique DCF	0,19	ps/km ^{1/2}
PMD amplificateurs (Double étage)	0,4	ps
PMD Mux/Demux	0,3	ps
PMD WSS	0,3	ps
PMD WB	0,3	ps
Pénalité acceptée	1	dB

TAB. 4.11 – Données relatives au calcul de la DC.

Entrées générales de l'algorithme		Valeur	Unité de mesure
Fibre en ligne	Dispersion chromatique	17,1	ps/(nm·km)
	Pente de dispersion	0,055	ps/(nm ² ·km)
	Coefficient thermique	-0,002	ps/(nm·km· °C)
Fibre de compensation	Dispersion chromatique	-92	ps/(nm·km)
	Pente de dispersion	-0,304	ps/(nm ² ·km)
	Coefficient thermique	0,01	ps/(nm·km· °C)
Incertitude des filtres (γ), équation 4.33		20	ps/nm
Paramètre a , équation 4.25		$0,72 \cdot 10^{-3}$	dB/(ps/km)
Paramètre b , équation 4.25		1	–
Précision de mesure		1	%
Pénalité en acceptée		2	dB

TAB. 4.12 – Données relatives au calcul de φ_{NL} .

Entrées générales de l'algorithme	Valeur	Unité de mesure
Indice de nonlinéarité SMF (n_2)	$2,6 \cdot (10^{-20})$	m ² /W
Indice de nonlinéarité DCF (n_2)	$3 \cdot (10^{-20})$	m ² /W
Aire effective (SMF)	80	μ m ²
Aire effective (DCF)	20	m ²
φ_{max}	1	rad
Fluctuation en puissance (par pas)	0,12	dBm

TAB. 4.13 – Données relatives au calcul de l'interaction DC - φ_{NL} .

Entrées générales de l'algorithme	Valeur	Unité de mesure
Coefficient de rétrécissement Id_1	-40	rad ⁻¹
Coefficient de rétrécissement Id_2	100	–
Coefficient de déplacement DC_c, Cd_1	380	rad ⁻²
Coefficient de déplacement DC_c, Cd_2	530	rad ⁻¹
Coefficient de déplacement linéaire, L_1	1152	ps/nm/rad
Coefficient de déplacement constant, L_2	-164	ps/nm

Précision sur les calculs des phénomènes physiques

La plupart des valeurs présentées dans les tableaux 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 sont issues de mesures et donc sont affectées d'erreurs fonction de la précision de mesure. Pour certaines de ces mesures l'erreur associée est connue.

En annexe B nous avons calculé l'impact des erreurs de mesure sur les différents effets physiques étudiés. Avec les hypothèses choisies, les principaux paramètres affectés sont l'OSNR, la phase non linéaire et la dispersion chromatique.

Bien que l'incertitude de mesure de la PMD soit relativement élevée, l'erreur faite est négligeable et n'a pas vraiment d'impact sur l'estimation de la qualité du signal. Les incertitudes sur l'OSNR et la phase non-linéaire sont considérées en ajoutant l'incertitude obtenue à la valeur de chaque paramètre calculé en fin de transmission et en comparant les résultats ainsi obtenus avec le seuil, équation 4.6.

Concernant la dispersion chromatique, les erreurs de mesure ne sont pas à négliger au cours de la transmission, car l'erreur s'accumule sur chaque pas et en fin de transmission est du même ordre que la dispersion chromatique résiduelle calculée. Ainsi, il faut ajouter une étape supplémentaire au calcul de la dispersion chromatique due à la précision de mesure.

L'incertitude sur la dispersion chromatique est due à l'erreur de mesure de la fibre de transmission comme des modules DCF.

Si l'erreur est supposée systématique, c'est-à-dire qu'elle se cumule de la même manière sur tous les pas, l'incertitude de dispersion est exprimée par l'équation 4.34.

$$\Delta DC = err \cdot 2N \quad (4.34)$$

Avec err l'erreur de mesure de dispersion sur les fibres, N le nombre de pas traversés.

Dans un cas réel, les erreurs ne sont pas systématiques, et la distribution de l'erreur peut être raisonnablement supposée gaussienne autour de la valeur estimée. Dans ce cas, pour considérer le comportement aléatoire, il suffit de considérer la racine carrée du nombre de fois où l'erreur est commise ($2N$), comme indique l'équation 4.35.

$$\Delta DC = err \cdot \sqrt{2N} \quad (4.35)$$

Les équations 4.34 ou 4.35 sont à intégrer à l'équation 4.30. L'utilisation d'une accumulation de l'erreur de mesure par rapport à l'autre dépend des choix de l'opérateur pour garantir un service. Avec une accumulation systématique, il est sûr qu'il n'y aura aucune situation pour laquelle l'erreur puisse dépasser sa valeur estimée, par contre avec une accumulation statistique cette situation ne peut pas être garantie et il est possible qu'un signal soit estimé correct en réception alors qu'il ne l'est pas.

4.5.2 Définition des réseaux simulés

Pour étudier l'impact des effets physiques pendant la propagation d'un signal, nous étudions des réseaux ayant des caractéristiques différentes (connectivité des nœuds, nombre de nœuds

présents, longueur des liens). Nous avons extrait tous les sous-réseaux présents d'un réseau pan-européen (EBN, composé par 57 nœuds et 85 liens, [Zahr 2005]) de la manière suivante : les nœuds appartenant à chaque sous-réseau sont adjacents dans le réseau de départ et le réseau obtenu est connecté ; en suite, nous avons sélectionné ceux qui sont les plus diversifiés ; les réseaux sélectionnés sont groupés en fonction de leur nombre total de nœuds.

Etudier des réseaux de tailles différentes permet l'obtention de conclusions plus génériques et aussi de connaître l'influence de la taille d'un réseau sur la transparence (nombre de nœuds ou longueur des liens).

4.5.3 Définition du trafic utilisé pour effectuer les études

Pour chaque réseau nous créons une matrice homogène, c'est-à-dire que de chaque nœud du réseau part une demande pour chacun des autres nœuds et toutes les demandes ont le même volume (un canal 10 Gbit/s). Pour un réseau composé de N nœuds, le nombre total de demandes sera donc de $N \cdot (N - 1)/2$.

Les demandes sont acheminées en utilisant l'algorithme du plus court chemin, Dijkstra [Dijkstra 1959].

4.6 Présentation des résultats : mise en forme

Les résultats sont donnés sous trois formes différentes :

- un abaque qui présente les limites en transmission relatives à chaque effet physique pour montrer les effets contraignants. L'abaque représentera en abscisse le nombre de kilomètres et en ordonnée le nombre de nœuds que le signal peut traverser de manière transparente (sans conversions OEO). La zone comprise entre les axes et la ligne relative à un scénario indique la zone de transparence.
- le nombre de régénérateurs par demande nécessaires à la transmission correcte des signaux dans les réseaux. Une demande a besoin d'être régénérée quand elle arrive dans un nœud sans satisfaire les contraintes sur la qualité de transmission (Tableau 4.2). Les systèmes dédiés à la régénération (c.f. section 3.1.6) sont placés dans le dernier nœud où le signal possède encore une qualité de transmission valable.
- le pourcentage de sous-réseaux extraits pouvant supporter une transmission totalement transparente des signaux.

Pour tracer l'abaque nous avons adopté les simplifications suivantes : ignorer l'échange de marge entre l'OSNR et les effets de dispersion, car les pénalités de dispersion chromatique dépendent des longueurs des liens traversés (c.f. section 4.2.4), et de la précision de compensation d'un module par rapport à la longueur d'un lien. Ces simplifications permettent à l'abaque de garder une certaine indépendance vis à vis de la topologie du réseau en étude. En même temps, les résultats montrés sur l'abaque représentent le plus petit domaine de transmission lié à une catégorie de module DCF, car nous supposons des erreurs systématiques : à chaque nœud l'accumulation de l'erreur de compensation de dispersion chromatique correspond à la moitié de la granularité considérée (sauf pour des modules avec précision de 1 km, qui compensent précisément les fibres en ligne).

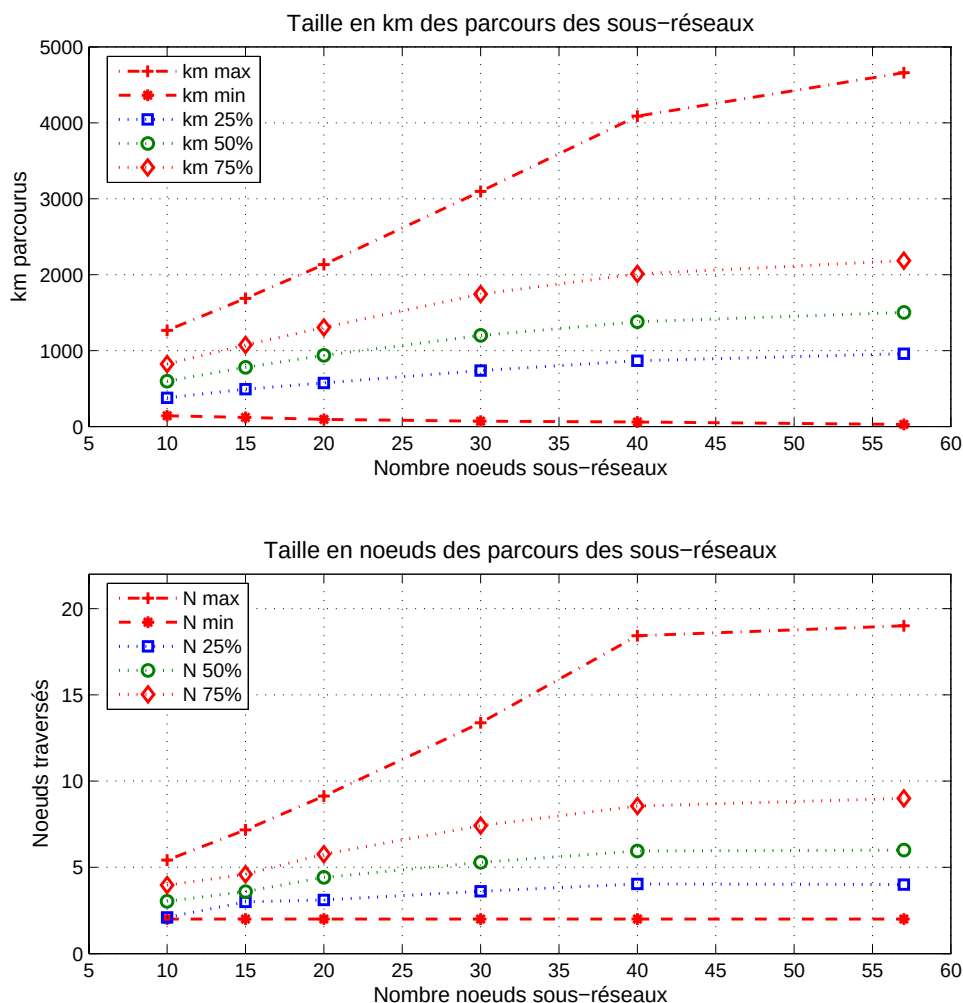
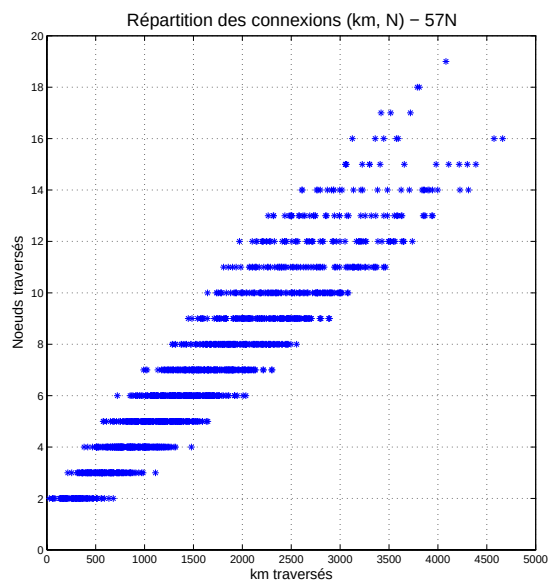


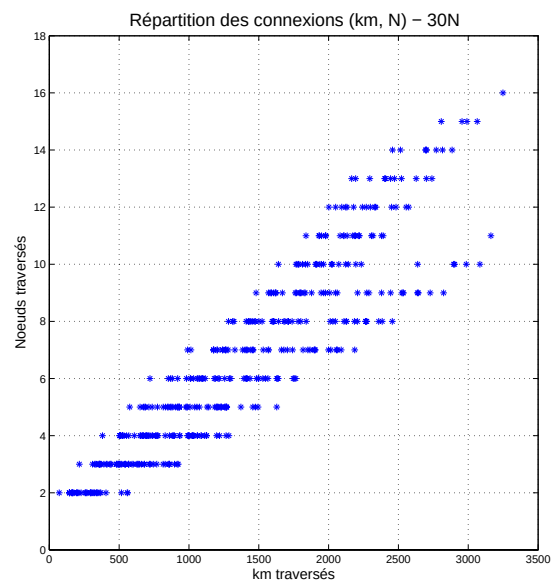
FIG. 4.13 – Schématisation d'architecture d'un réseau transport optique (cœur, métro et accès).

Si l'abaque est indépendant du réseau, le nombre de régénérateurs est donné pour chaque classe de sous-réseaux considérée et dépend des distances parcourues et des nœuds traversés par les signaux. Le nombre de régénérateurs affiché est moyenné sur la totalité des sous-réseaux contenus dans chaque groupe.

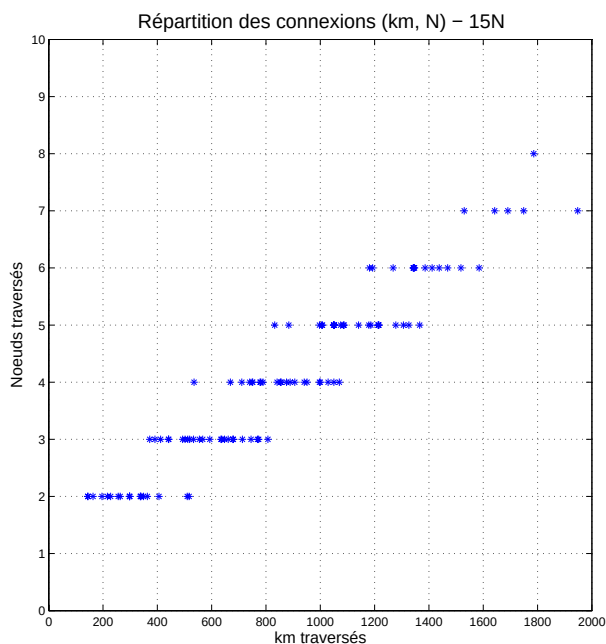
Pour avoir une estimation des longueurs des parcours dans les sous-réseaux, la figure 4.13 trace les distributions des kilomètres parcourus et du nombre de nœuds traversés pour 25, 50 et 75% des parcours présents dans chaque réseau (ces valeurs sont moyennées sur l'ensemble des distributions de parcours présentes dans les sous-réseaux ayant le même nombre de nœuds); les courbes indiquées par le symbole plus et étoile indiquent les valeurs minimales et maximales associées aux parcours dans chaque sous-réseau. Les figures 4.14.a, 4.14.b, 4.14.c montrent la répartition des kilomètres parcourus et du nombre de nœuds traversés pour tous les parcours présents dans des réseaux à 15, 30 et 57 nœuds.



(a) Pour un réseau à 57 noeuds.



(b) Pour un réseau à 30 noeuds.



(c) Pour un réseau à 15 noeuds.

FIG. 4.14 – Portée optimale en fonction de la taille du réseau et de la distribution des demandes.

Une répartition de ce type conjointement à l'abaque permet d'avoir une idée sur la transparence d'un réseau en fonction de la matrice de trafic qui lui est associée : en superposant l'abaque de transmission avec la distribution des parcours nous connaissons les besoins en régénération dans le pire cas.

4.7 Faisabilité physique des réseaux translucides

Dans cette partie nous exploitons les modèles précédents pour discuter la faisabilité des réseaux translucides du point de vue physique à travers plusieurs cas d'étude.

L'effet physique dû à la dispersion chromatique est celui le plus traité ici, car si souvent il est supposé négligeable dans un réseau opaque, il ne nous paraît pas l'être du tout dans un réseau transparent.

Les résultats suivants montrent l'impact de la méthode utilisée. L'accumulation de l'erreur est de type systématique.

4.7.1 DC cas idéal

Dans cette étude la dispersion chromatique des modules et de la fibre en ligne est considérée idéale : il n'y a ni erreur de mesure, ni dépendance en longueur d'onde ou en température.

Ainsi seules la granularité des modules de compensation et l'incertitude introduite par les filtres contribuent à l'accumulation de l'incertitude de DC. Sous cette hypothèse, nous traçons les limites en transmission et marquons le nombre de régénérateurs nécessaires à une transmission correcte.

La figure 4.15 représente les limites relatives aux autres effets de transmission. Pour les caractéristiques des systèmes employés et les choix d'ingénierie, les effets limitants sont : φ_{NL} pour les kilomètres parcourus et le rétrécissement de la bande du signal pour le nombre de nœuds traversés ; la région où il n'est pas possible de transmettre est grisée.

Les limites en transmission dues à la granularité des DCF concernent uniquement le nombre de nœuds (équation 4.37) à traverser et sont représentées dans le tableau 4.14. Le nombre de nœuds maximal est donné par l'incertitude de dispersion chromatique maximale accumulée après

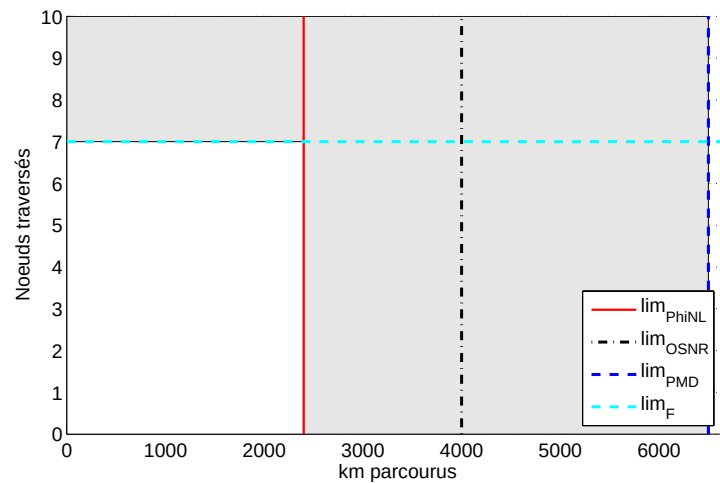


FIG. 4.15 – Limites de transmission déterminées par l'OSNR, la φ_{NL} , la PMD et le filtrage.

le passage de N nœuds, comme indiqué par les équations 4.36 et 4.37.

$$\Delta DC = \frac{\Delta Gran_{km}}{2} + \gamma \quad (4.36)$$

$$DC_{max} \geq N \Delta DC \Rightarrow N_{max} = \left\lfloor \frac{DC_{max}}{\Delta DC} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{2DC_{max}}{Gran_{km} + 2\gamma} \right\rfloor \quad (4.37)$$

TAB. 4.14 – Limites en nombre de nœuds à traverser dues à la granularité et au filtrage.

Granularité module DCF	Limite de nœuds traversés sans incertitudes des filtres	Limite de nœuds traversés avec incertitudes des filtres
1 km	Pas de limites	48
2 km	45	26
5 km	22	16
10 km	11	10
20 km	6	6

Augmenter la granularité des modules réduit la précision de compensation donc la transparence d'un réseau augmente proportionnellement avec la qualité des modules, c.f. tableau 4.14.

Les effets de filtrage augmentent l'imprécision de la compensation de la dispersion chromatique et sont d'autant plus remarquable que les modules ont une granularité fine. En effet, l'incertitude de filtrage induit une dispersion chromatique qui est supérieure à celle des modules

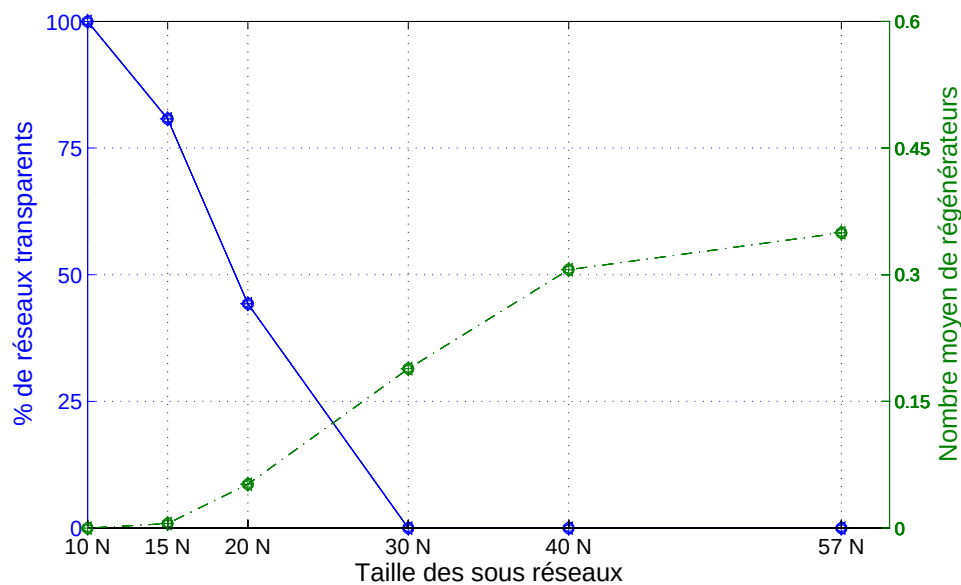


FIG. 4.16 – Degré de transparence et nombre moyen de régénérateur dans le cas idéal.

DCF à granularité inférieure à 2 km (± 20 ps pour le filtre contre ± 17 ps pour un module ayant une granularité de 2 km) et est négligeable pour des granularités supérieures ou égales à 10 km (± 85 ps pour une granularité de 10 km). Contrairement aux simplifications utilisées pour tracer les abaques, l'estimation du nombre de régénérateurs requiert de considérer la taille réelle des liens. Ainsi l'erreur due à la granularité s'accumule mais n'est plus systématiquement la moitié de la granularité considérée. Il en découle que les résultats obtenus donnent des limites sur le nombre de nœuds à traverser plus élevées que celles du tableau 4.14.

La figure 4.16 présente le pourcentage de transparence des sous-réseaux et le nombre moyen de régénérateurs par connexion nécessaires indépendamment du type de module de DCF utilisé, car la limite sur le nombre de nœuds à traverser imposée par le filtrage agit avant la limite due à la dispersion chromatique.

4.7.2 DC cas non idéal mais indépendant de la φ_{NL}

Dans cette étude nous supposons que la dispersion chromatique des modules et de la fibre en ligne dépend de la longueur d'onde, des variations de température et sa mesure peut être affectée d'erreur.

L'interaction avec la phase non linéaire est négligée.

Dans la figure 4.17, nous observons qu'une prise en compte plus ponctuelle des phénomènes liés à la dispersion chromatique implique une réduction de la région de transmission à la fois en termes de kilomètres et de nœuds traversés. Cette diminution est autant plus forte que la granularité des modules de compensation est grossière. En utilisant des modules de compensation de granularité 20 km, la transmission sur un seul lien aura une longueur maximale de 1 350 km, contre 1 600 km dans le cas d'une granularité de 5 km. Nous remarquons aussi que ces effets introduisent des réductions supplémentaires sur le nombre de nœuds traversables : l'effet de filtrage n'est pas toujours prédominant cela dépend des kilomètres parcourus et des granularités considérées. Pour les modules de granularité de 20 km, le filtrage n'est jamais limitant.

En comparant la figure 4.15 avec la figure 4.17, nous remarquons que la limite en kilomètres due à la dispersion chromatique se manifeste avant les autres effets. Il est impératif de considérer la dispersion chromatique sous tous ces aspects pour éviter une surestimation des performances physiques du réseau. La figure 4.18 montre le pourcentage de sous-réseaux transparents et le nombre de régénérateurs par demande pour différents granularités et sous les hypothèses précédentes.

Dans des petits réseaux, la différence du besoin en régénérateurs par demande en fonction de la granularité est très faible et ne justifie pas l'introduction de modules de compensation très coûteux.

Indépendamment de la taille du réseau, les modules à 2 km nécessitent presque le même nombre de régénérateurs que les modules à 1 km.

Si les modules à 20 km ne semblent pas être adéquats dans un réseau translucide (trop d'écart en besoin de régénérateurs par rapport aux autres modules), des évaluations économiques sur le coût associé aux modules et au nombre de régénérateurs requis doivent être conduites pour montrer l'avantage d'un module vis-à-vis d'un autre.

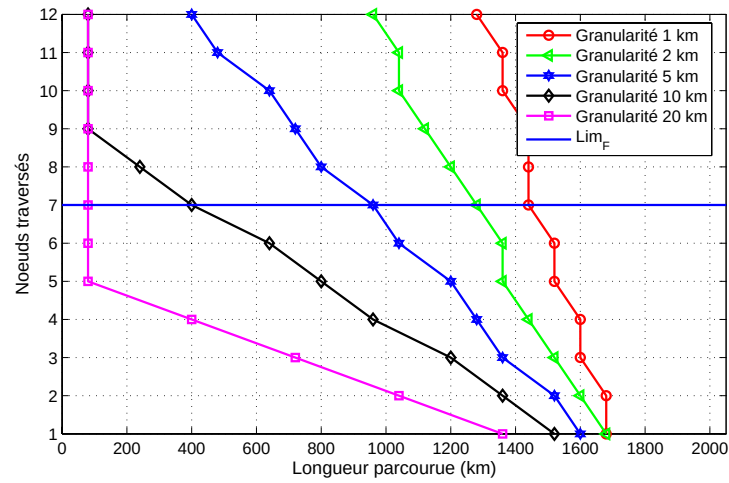


FIG. 4.17 – Limites de transmission déterminées par la DC sans considérer l'interaction avec φ_{NL} .

Pour ce qui concerne la transparence de réseaux, des îlots complètement transparents peuvent être construits jusqu'à dix nœuds en employant des modules de granularité 5 km. Cette étude a montré l'impact de la granularité sur la performance d'un réseau. En comparant les figures 4.16 et 4.18 nous constatons l'importance de considérer précisément la dispersion chromatique dans les réseaux translucides. Pour affiner encore l'étude de l'impact de la DC sur les réseaux translucides, étudions à présent l'impact de son interaction avec l'auto-modulation de phase.

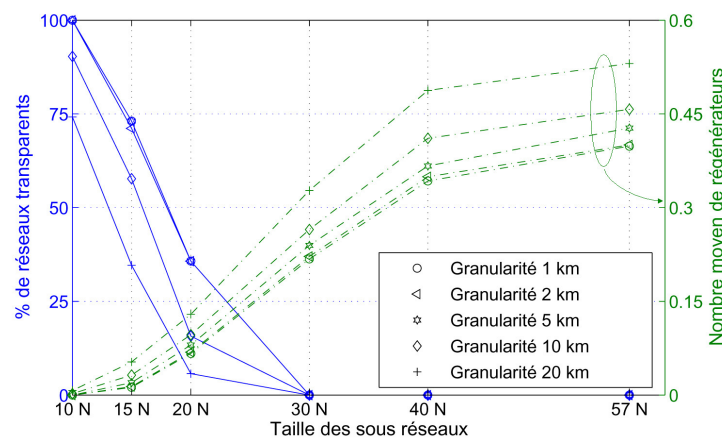


FIG. 4.18 – Degré de transparence et nombre moyen de régénérateurs pour tous les paramètres de la DC sauf l'interaction avec φ_{NL} .

4.7.3 DC cas non idéal et dépendance de la φ_{NL}

Dans cette étude la dispersion chromatique des modules et de la fibre en ligne dépend de la longueur d'onde et des variations de température, sa mesure peut être affectée d'erreur et l'interaction avec la phase non linéaire est considérée. La carte de dispersion appliquée aux liens impose un retour de la dispersion résiduelle arbitraire en fin de lien.

Si nous considérons l'interaction entre la dispersion chromatique et les effets de la φ_{NL} en ligne, figure 4.19, nous remarquons une réduction supplémentaire des limites sur la taille des parcours qui peuvent être routés de manière transparente.

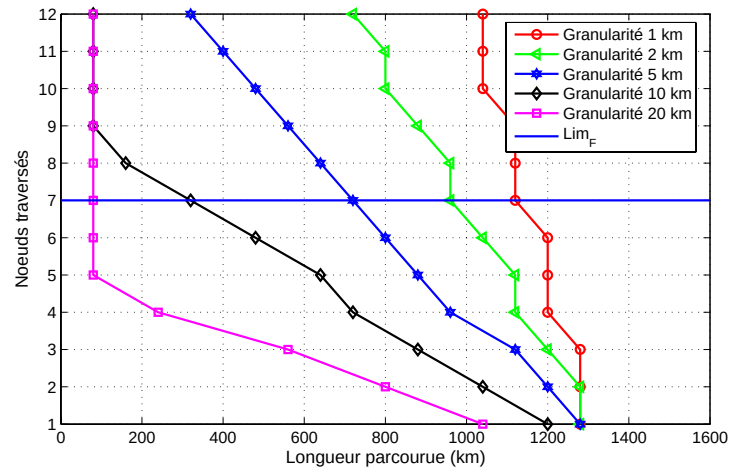


FIG. 4.19 – Limites de transmission déterminées par la DC avec considérer l'interaction avec φ_{NL} .

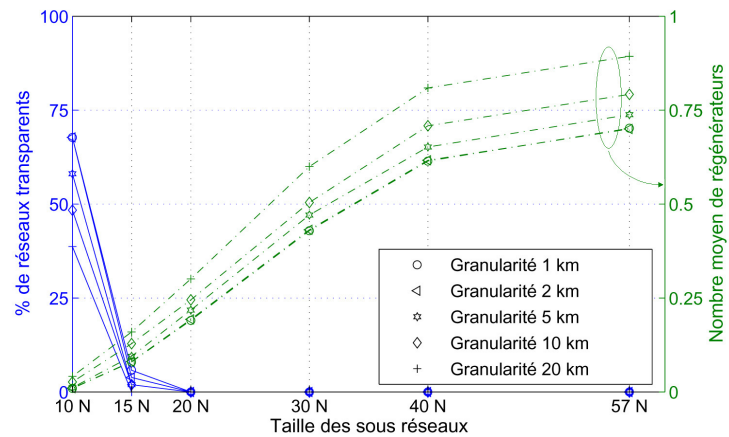


FIG. 4.20 – Degré de transparence et nombre moyen de régénérateur pour tous les paramètres de la DC avec l'interaction avec φ_{NL} .

La figure 4.20 traduit la figure 4.19 en termes de transparence et de nombre de régénérateurs

nécessaires à la transmission des signaux dans les réseaux en fonction des granularités des modules de compensation.

En comparant alors la figure 4.18 à la figure 4.20, nous constatons que la réduction de la région de transmission correcte a un fort impact sur la transparence et sur les besoins en régénérateurs. Par rapport à l'exemple précédent, le nombre total de régénérateurs augmente, mais l'impact de la granularité reste du même ordre. Seulement pour les granularités plus fines, le nombre de régénérateurs nécessaires tend à se rapprocher (coïncidence des courbes pour 1 et 2 km).

4.7.4 DC cas non idéal et dépendance de la φ_{NL} avec l'introduction de la carte de dispersion adaptée à la longueur des liens

Dans cette étude la dispersion chromatique des modules et de la fibre en ligne dépend de la longueur d'onde, des variations de température, sa mesure peut être affectée d'erreur et l'interaction avec la phase non linéaire est considérée. La carte de dispersion appliquée aux liens est adaptée pour chacun d'eux. Ainsi la dispersion résiduelle sur chaque lien est imposée.

Nous ne présentons pas l'abaque des limites de transmission. En effet, faire varier la dispersion résiduelle des liens requiert de considérer un réseau précis (longueur des liens entre chaque nœud), ce qui n'est pas possible avec les simplifications nécessaires pour obtenir les abaques.

La figure 4.21 montre le pourcentage de transparence des sous-réseaux et le nombre de régénérateurs nécessaires à la transmission des signaux ; d'une part nous observons une légère augmentation du pourcentage de réseaux transparents à 10 nœuds. D'autre part, étant donné que la bande d'acceptabilité en dispersion chromatique résiduelle est adaptée pour chaque lien, le nombre de régénérateurs est légèrement réduit (d'environ 0,01 en moyenne par demande). Bien que cela ne soit pas vraiment une réduction importante (pour un réseau à 57 nœuds et trafic homogène cela représente environ 16 régénérateurs), il faut noter que cette réduction sera d'autant plus importante que le nombre de connexions très longues sera grand.

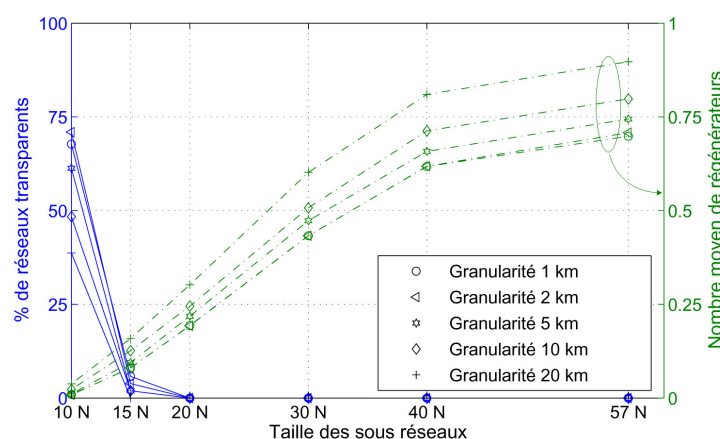


FIG. 4.21 – Degré de transparence et nombre moyen de régénérateurs avec la nouvelle carte de dispersion.

Ainsi à travers ces 4 études, nous avons montré l'importance dans un réseau transparent de la modélisation de la dispersion chromatique : le nombre de régénérateurs requis est sous estimé

d'un facteur 2 quand la modélisation de la dispersion chromatique est idéalisée par rapport à un modèle plus réaliste.

4.7.5 Impact de la granularité des modules de compensation et de la pente des fibres de compensation

Dans cette étude la dispersion chromatique des modules et de la fibre en ligne dépend de la longueur d'onde, des variations de température, sa mesure peut être affectée d'erreur, l'interaction avec la phase non linéaire est considérée et la carte de dispersion appliquée aux liens est adaptée pour chaque lien.

Le paramètre RDS est le rapport entre la pente de dispersion chromatique et la valeur de dispersion chromatique à la longueur d'onde de référence pour chaque fibre considérée (S/D). Les fibres de compensation doivent avoir un RDS qui soit le plus proche possible de celui des fibres de transmission pour bien compenser la dispersion chromatique sur toute la bande de transmission. Jusqu'ici nous avons considéré des fibres de compensation de nouvelle génération, avec un RDS proche de celui des fibres de ligne.

Le tableau 4.15 compare les différents RDS de la fibre de transmission et de deux fibres de compensation (DCF1 et DCF2 sont des fibres de nouvelle et d'ancienne génération, [Grüner-Nielsen 1999b]).

TAB. 4.15 – Comparaison RDS des fibres.

Type de fibre	RDS (km^{-1})
SMF	0,00321
DCF ₁	0,00338
DCF ₂	0,00210

Les figures 4.22 et 4.23 présentent la limite de transmission et le nombre de régénérateurs quand une ancienne fibre de compensation est utilisée.

Nous remarquons que, comparé aux courbes précédentes, le rétrécissement du domaine de validité de transmission (ou aussi portée des systèmes) est plus fort pour des granularités fines et la différence sur l'extension des régions de validité entre les petites granularités est réduite. En effet, l'utilisation d'une fibre de compensation mal adaptée à la fibre en ligne revient, pour les longueurs d'onde de bord de bande, à utiliser des modules de très grande granularité. Si nous considérons la longueur d'onde la plus éloignée de la longueur d'onde centrale, l'incertitude de dispersion introduite après chaque compensation est, en valeur absolue, égale à 11 ps/nm. Les sous-réseaux analysés ont une longueur moyenne des liens égale à 300 km, incluant donc en moyenne 5 modules de compensation. Il en résulte un total de 55 ps/nm de dispersion résiduelle (contre 3,5 ps/nm si la fibre de nouvelle génération est utilisée). Cette dispersion est comparable à celle d'un module de 10 km sur un lien (85 ps/nm dans le pire cas). Donc il est inutile utiliser des bonnes granularités si les fibres de compensation n'ont pas un bon RDS.

En figure 4.23 nous indiquons le pourcentage de transparence et le nombre de régénérateurs par demande pour garantir la transmission correcte d'un signal pour chaque réseau considéré

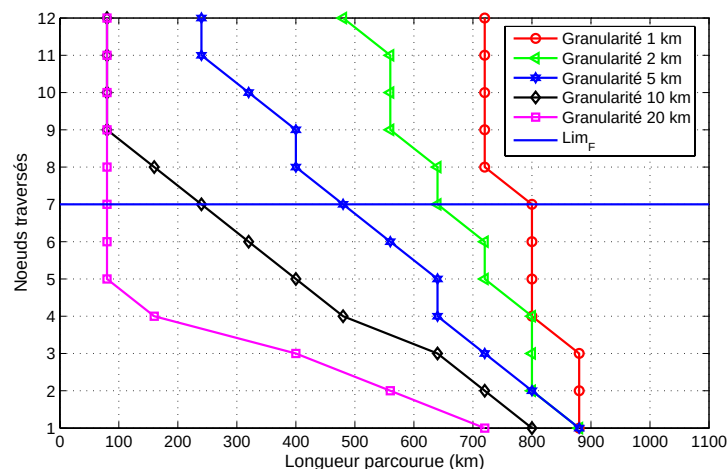


FIG. 4.22 – Limites de transmission déterminées par l'utilisation de modules à mauvais RDS.

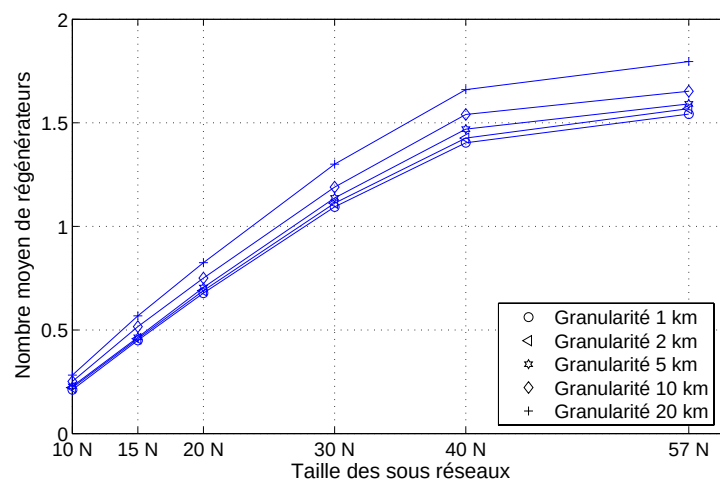


FIG. 4.23 – Degré de transparence et nombre moyen de régénérateur avec l'utilisation de modules à mauvais RDS.

(le pourcentage de transparence n'est pas indiqué car aucun réseau transparent n'est possible). Compte tenu des valeurs élevées du nombre moyen de régénérateurs, nous concluons qu'il n'est pas judicieux de faire une migration du réseau opaque vers le réseau purement transparent ou hybride avec des anciens modules de compensation dans le réseau.

4.7.6 Etude statistique de l'erreur de mesure

En figure 4.24 nous traçons l'abaque des limites de transmission pour les erreurs de mesure cumulées suivant une loi statistique (courbe continue) et une loi systématique (courbe pointillée). En comparant les limites obtenues selon ces lois, nous observons que la région de transmission

associée à l'erreur statistique est plus étalée. En ce qui concerne les modules des DCF, les régions de transparence associées aux modules à 1 et 2 km sont plus grandes que celles délimitées par les effets de filtrage et de phase non-linéaire.

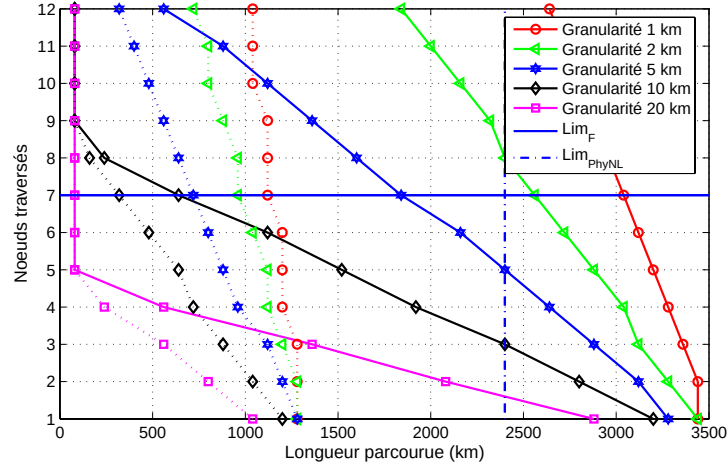


FIG. 4.24 – Limites de transmission déterminées par l'erreur de mesure statistique et systématique.

La figure 4.25 montre le nombre moyen de régénérateurs nécessaire pour assurer la transmission. La différence du nombre de régénérateurs requis pour des modules de granularité 1, 2 et 5 km est presque négligeable ; de plus le petit surplus de régénérateurs nécessaire pour des modules à granularité de 10 km peut justifier l'utilisation de modules à cette granularité.

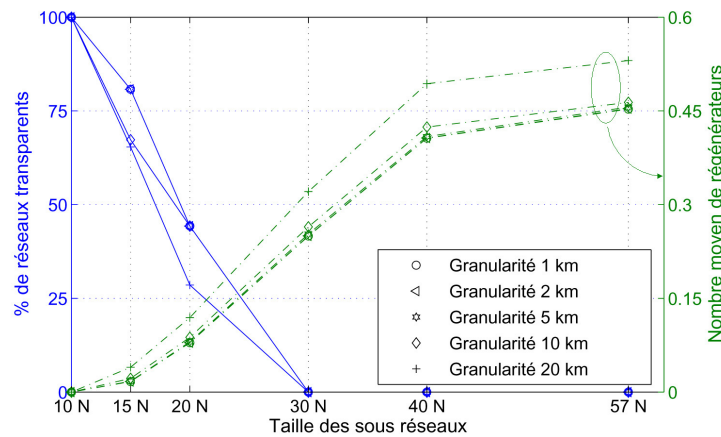


FIG. 4.25 – Limites de transmission déterminées par l'erreur de mesure statistique et systématique.

Pour évaluer le meilleur compromis entre la granularité d'un module DCF et le nombre de

régénérateurs requis, nous prenons comme référence les modules de granularité 10 km (car à partir des résultats obtenus précédemment, ils semblent être un bon compromis entre performance et prix). Ensuite, nous comparons au coût de cette référence le coût pour différentes granularités. Varient alors le prix des modules et le nombre de transpondeurs.

On considère deux hypothèses quant au choix des modules de compensation :

- les modules de compensation installés dans le réseau sont tous du même type ;
- les modules de compensation installés dans le réseau sont tous grossiers sauf un, en général, celui dédié à la post-compensation (car déterminant pour la dispersion résiduelle à la fin du lien).

Dans le tableau 4.16 nous avons reporté le nombre moyen de modules nécessaires dans chaque réseau pour les deux critères cités.

TAB. 4.16 – Nombre moyen de modules DCF dans les réseaux.

Taille des réseaux (en nœuds)	Nombre moyen de modules DCF post-compensation	Nombre moyen de modules DCF totaux
10 nœuds	14,20	163,50
15 nœuds	21,00	350,35
20 nœuds	28,60	525,20
30 nœuds	42,20	1 082,00
40 nœuds	56,20	1 840,00
57 nœuds	85,00	3 620,00

Nous avons calculé le nombre total de régénérateurs nécessaires pour tous les sous réseaux employant les différents modules de fibres de compensation. L'emploi d'un module se justifie dès que le surcoût lié aux modules de compensation est inférieur au coût lié aux régénérations supplémentaires. Ainsi, un module de x km est économiquement plus avantageux qu'un module à 10 km si les inégalités 4.38– 4.41 sont satisfaites ('#' indique le nombre d'éléments). Nous définissons $Cout_{Tot_DCU_x}$ le coût total relatif à l'ensemble de modules de compensation à granularité x , $Cout_{Tot_Reg_x}$ le coût total relatif aux régénérateurs qu'il faut employer quand des modules à granularité x sont employés, $Cout_{Reg}$ est le coût d'un seul régénérateur et Reg_x est le nombre de régénérateurs nécessaires pour l'utilisation d'un tel module.

$$Cout_{Tot_DCU_{10}} + Cout_{Reg_{10}} \geq Cout_{Tot_DCU_x} + Cout_{Reg_x} \quad (4.38)$$

$$Cout_{Tot_DCU_x} - Cout_{Tot_DCU_{10}} \leq Cout_{Tot_Reg_{10}} - Cout_{Tot_Reg_x} \quad (4.39)$$

$$\#Mod_{DCF} \cdot (Cout_{DCU_x} - Cout_{DCU_{10}}) \leq (\#Reg_{10} - \#Reg_x) \cdot Cout_{Reg} \quad (4.40)$$

$$(Cout_{DCU_x} - Cout_{DCU_{10}})/Cout_{Reg} \leq (\#Reg_{10} - \#Reg_x)/\#Mod_{DCF} \quad (4.41)$$

La valeur limite du surcoût d'un module x vis-à-vis du module à granularité 10 km est indiquée dans le tableau 4.17 pour les différentes tailles de réseaux et pour quatre cas d'analyse :

- erreur sur la mesure de dispersion chromatique systématique et tous les modules ayant la même granularité ;
- erreur sur la mesure dispersion chromatique statistique et tous les modules ayant la même granularité ;
- erreur sur la mesure de dispersion chromatique systématique et tous les modules ayant la même granularité sauf celui employé pour la post-compensation ;
- erreur sur la mesure dispersion chromatique statistique et tous les modules ayant la même granularité sauf celui employé pour la post-compensation.

Les valeurs représentées indiquent que le module x est intéressant si la différence de prix entre ce module et celui de 10 km (normalisée par rapport au prix des régénérateurs) est inférieure à la valeur indiquée dans le tableau. Si la valeur est négative, alors le module doit être moins cher que le module à 10 km d’au moins la valeur indiquée, sinon le module doit être plus cher au maximum de cette valeur.

Les résultats montrent que l'emploi d'un module plutôt qu'un autre dépend du choix de leur utilisation, de la taille du réseau et des hypothèses d'ingénierie (propagation de l'erreur sur la mesure de la dispersion chromatique systématique ou statistique).

Utiliser des modules de granularité fine uniquement en post-compensation ne se justifie que pour les réseaux de grandes tailles. Le point d'équilibre est atteint si le surcoût lié à la granularité vaut deux régénérations (erreur systématique) ; ou une régénération (erreur statistique).

Pour les réseaux de tailles plus petites, le point d'équilibre est atteint pour un surcoût de l'ordre d'une fraction du coût d'une régénération.

Quant aux modules à 20 km, ils ne semblent pas avantageux puisqu'ils ne se justifient que si la réduction de coût induite dépasse deux régénérations.

Utiliser la même granularité fine sur tout le réseau n'est pas envisageable.

Nous avons comparé le prix des régénérateurs sur les demandes que nous avons générées supposant un trafic de type uniforme. Si la distribution du trafic change, le nombre de régénérateurs varie : pour des longueurs de connexions plus courtes le nombre de régénérateurs diminue, c'est l'inverse si la longueur augmente. Intuitivement, donc, pour des réseaux dans lesquels des connexions sont courtes l'utilisation de modules grossiers est justifiée.

Le type de propagation de l'erreur de mesure sur les modules et les choix d'installation des modules dans les liens contribuent au choix du module. Si d'un point de vue économique les modules à granularité grossière sont avantageux, leur utilisation implique la présence d'un grand nombre de régénérateurs et le réseau perd les avantages introduits par la transparence, comme la flexibilité et l'évolutivité. En même temps, ce résultat montre que pour commencer à introduire la transparence dans le réseau (donc sur des petites portions de réseau) il ne faut pas introduire tout de suite des modules de compensation de très bonne qualité à moins qu'ils n'aient un surcoût vraiment négligeable.

4.7.7 Validité des résultats obtenus dans les études avec la prise en considération des erreurs de mesure sur l'OSNR et la phase non linéaire

L'intégration des erreurs de mesure sur l'évolution des dégradations du signal introduites par l'OSNR et la phase-non linéaire est considérée en ajoutant à chaque pas traversé une erreur égale à celle calculée comme dans l'annexe B. L'erreur prise en considération est de type systématique (pour tous les effets étudiés), pour que le plus fort impact sur l'incertitude des résultats obtenus puisse être évalué. Cette étude nous permet de valider les résultats obtenus sur l'estimation du nombre de régénérateurs nécessaires dans un réseau. Les résultats obtenus sans considérer les erreurs de mesure sont supposés intéressants si la différence de régénérateurs calculés dans les deux études reste inférieure à 10% de la prévision totale.

Intégrer les erreurs de mesure implique que la limite en transmission liée à la phase non-linéaire passe de 2 400 à environ 2 100 km et la limite liée à l'OSNR de 4 000 à 3 000 km. Réduire la limite sur l'OSNR implique une réduction sur les échanges de marge possibles entre la dispersion chromatique et la PMD.

En figure 4.26 nous avons tracé la différence entre le nombre de régénérateurs prévus quand l'erreur de mesure est ou n'est pas prise en compte.

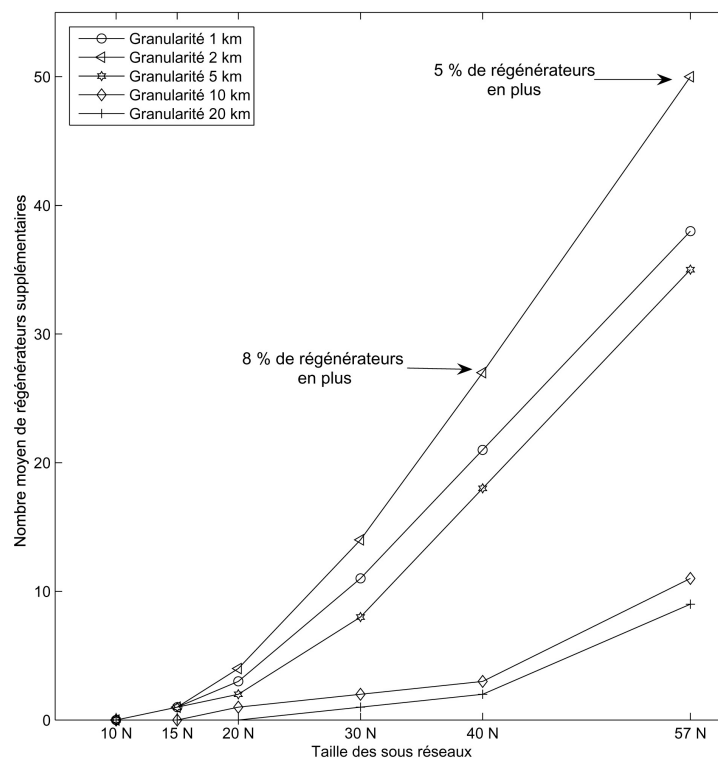


FIG. 4.26 – Régénérateurs en plus en cas d'erreur de mesure sur les paramètres de DC, PMD, OSNR et φ_{NL} .

Pour des réseaux de petite taille (comportant 20 nœuds) le besoin de régénérateurs supplémentaires est négligeable par rapport à l'ensemble du réseau (inférieur à 5 régénérations pour des réseaux de taille inférieure à 20 N). Une différence plus conséquente est observée pour des réseaux comportant plus de 40 nœuds ; mais en rapportant cette valeur à la totalité des besoins en régénérateurs dans le réseau nous pouvons affirmer qu'elle est insignifiante (inférieur à 8%).

L'erreur d'estimation est plus grande pour des réseaux utilisant des modules de compensation avec des granularités plus fines : car les régions de transmissibilité relatives à la dispersion chromatique sont plus étendues que celles relatives à la nouvelle région définie par la phase non-linéaire. En ce qui concerne l'utilisation de modules moins précis, la pénalité maximale associée à la dispersion chromatique sera atteinte avant la limite la phase non-linéaire ; la réduction de l'OSNR acceptable réduit l'échange de marge possible et explique la faible différence de régénérateurs requis dans les deux cas d'étude.

L'erreur sur le nombre de régénérateurs requis pour les modules à 1 km est inférieure à celle des modules à 2 km car pour les modules à 1 km la dispersion résiduelle est moins importante que celle obtenue avec des modules à 2 km (les modules à 1 km n'introduisent pas d'incertitude due à la granularité).

Les résultats précédents supposent l'accumulation systématique des erreurs (*pire cas*) ; dans la réalité les erreurs se cumulent de manière statistique et sont donc moins pénalisantes. La variation sur le nombre de régénérateurs serait alors inférieure à celle calculée dans cette section, ce qui justifie encore une fois de négliger ces erreurs dans les calculs menés dans cette section.

4.7.8 Validations du modèle de l'échange de marge vis à vis autres modèles présents dans la littérature

Un réseau réel est constitué par différents types de fibre puisqu'il est construit à différents moments et, parfois, avec différents équipementiers. De plus les caractéristiques de deux fibres de la même génération et issues du même fabriquant peuvent être différentes à cause de leur diversité intrinsèque (perturbations au moment de la fabrication). Il en résulte que faire des études sur la transparence du réseau en supposant que toutes les fibres sont identiques (et ne prendre en considération que l'erreur de mesure des différents paramètres physiques) peut s'avérer insuffisant.

[ITU 2005] montre les paramètres physiques associés à deux générations différentes de fibre SMF ; il est possible vérifier que :

- le coefficient non linéaire est resté le même entre les deux générations ;
- les valeurs de dispersion chromatique sont un peu différentes, mais cette différence peut être négligée puisque les DCM peuvent les compenser ;
- les variations sur le coefficient d'atténuation sont compensées par l'utilisation d'amplificateurs adaptés à la perte totale de la fibre, mais le facteur de bruit et le gain associés à chaque amplificateur ont des conséquences sur la valeur totale d'OSNR.
- les valeurs de PMD linéique associées aux deux types de fibre sont très différentes. La PMD liée aux générations anciennes a un fort impact sur la performance du réseau, de plus il n'y a pas encore de compensateurs tout-optiques de PMD qui puissent être employés dans le réseau pour faire face à ce problème.

Pour évaluer l'impact de la diversité des fibres sur la transparence et donc le besoin de régénérateurs, dans cette section nous étudions un réseau constitué par des fibres hétérogènes pour les paramètres d'atténuation et de PMD.

Les valeurs associées au coefficient d'atténuation de la fibre sont obtenues par une distribution uniforme sur un intervalle allant de 0,19 à 0,31 dB/km (valeurs disponibles à France Télécom résultant de mesures de fibres de différentes générations). Puisque il n'est pas possible de disposer d'une gamme illimitée d'amplificateurs, nous en avons choisi de trois types pour compenser les différentes atténuations comme indiqué dans le tableau 4.18. Nous rappelons que les variations sur le coefficient d'atténuation impliquent aussi des modifications sur les valeurs de la phase non linéaire, équation 4.27.

TAB. 4.18 – Caractéristiques des amplificateurs pour différents types de fibres (chaque pas est de 80 km).

Caractéristiques des amplificateurs		Affaiblissement des fibres (dB/km)
Gain (dB)	Facteur de bruit (dB)	
21	5,5	$0,19 \leq a < 0,25$
24,5	5,5	$0,25 \leq a < 0,28$
27,5	6	$0,28 \leq a < 0,31$

Les valeurs associées à la PMD linéique sont obtenues à partir de la distribution présentée dans [Leppla 2003]. Pour chaque tronçon constituant la fibre nous avons tiré une valeur de PMD et de coefficient d'atténuation. La valeur de PMD linéique totale de chaque fibre est déterminée comme la moyenne quadratique de la PMD cumulée sur chaque tronçon.

Chaque câble est supposé disposer de trois couples de fibres disponibles (nous rappelons qu'un câble contient plusieurs fibres, mais qu'il reste environ 3 à 5 paires disponibles pour le réseau de transport). Le couple de fibres choisi sur chaque tronçon est celui pour lequel la valeur maximale de PMD du couple est la plus faible.

Comme le trafic est bidirectionnel, nous avons pris pour chaque lien les valeurs maximales de PMD et d'atténuation présentes dans chaque couple de fibres sélectionnées.

Les résultats en figure 4.27 représentent le nombre total de régénérateurs nécessaires dans un réseau pour permettre le routage de toutes les demandes (lignes continues). Nous remarquons avant tout l'augmentation en termes de nombre de régénérateurs par rapport un cas d'une étude sur un réseau employant des fibres identiques.

L'effet le plus limitant (qui explique le plus grand besoin en régénérateurs dans le réseau) est la PMD. En effet, si la PMD est négligeable quand ses valeurs sont autour de $0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$, pour des valeurs de $0,5 \text{ ps/km}^{1/2}$ il n'est pas possible de transmettre sur plus de 400 km. Cette distance maximale de transmission est limitante si nous supposons que pour un réseau européen et nord-américain la longueur moyenne des connexions est respectivement autour de 1 000 et 3 000 km, [Saleh 2003].

Les résultats montrent que migrer vers un réseau translucide avec des fibres ayant des valeurs très élevées de PMD ne permet pas une diminution conséquente du nombre de régénérateurs nécessaires, par rapport au cas opaque.

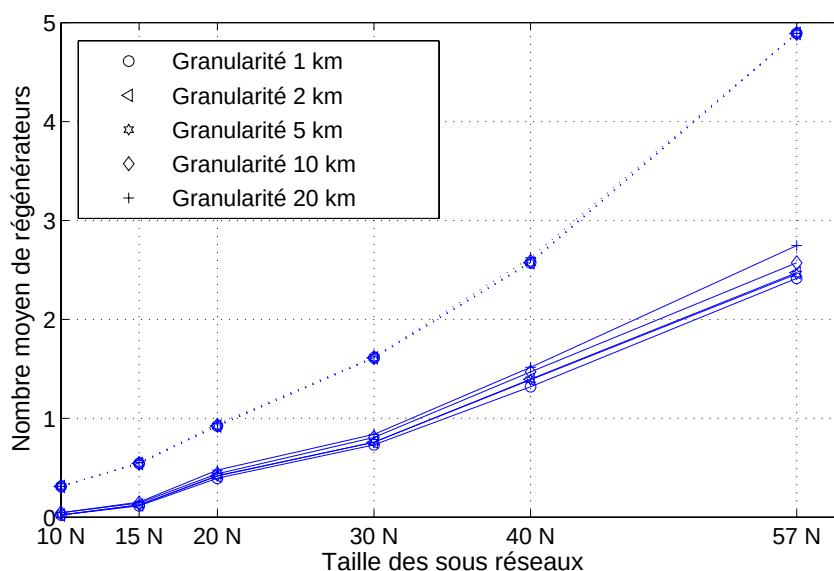


FIG. 4.27 – Régénérateurs nécessaires dans un réseau non-homogène si l'algorithme de calcul de la qualité du signal est celui proposé ou du *pire cas*.

En figure 4.27 nous montrons aussi le nombre de régénérations requis quand la méthode de calcul de performance physique utilisée est la méthode du pire cas (lignes pointillées). Ne pas

appliquer un échange de marge signifie ne pas exploiter les capacités des systèmes, ce qui double le nombre de régénérateurs estimés nécessaires.

4.8 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons montré que pour les études de propagation d'un signal dans un réseau transparent, il faut bien modéliser toutes les sources contribuant au budget de la dispersion chromatique pour connaître précisément les limites de transmission.

L'impact du type de modèle utilisé pour déterminer si un signal peut ou non se propager de manière transparente a été montré ; le critère proposé de l'échange de marges permet de connaître au plus près les performances d'un réseau et donc de mieux l'exploiter.

Nous avons montré qu'avec les systèmes de transmission disponibles aujourd'hui sur le marché (ou à court terme) il est possible de propager un signal de manière transparente sur des distances de l'ordre de 1 200 km ou 2 000 km en fonction des choix de transmission effectués : cas de propagation systématique ou statistique de l'erreur.

La mise en place d'un réseau translucide est possible si les fibres installées (en ligne et de compensation) sont de bonne qualité, c'est-à-dire avec faibles valeurs de PMD et, pour les fibres de compensation, un RDS le plus proche de celui des fibres de transmission.

Chapitre 5

Modèle de coût et intérêt économique des réseaux optiques translucides

Dans ce chapitre nous faisons des comparaisons économiques entre les réseaux translucides et les réseaux opaques et transparents pour déterminer sous quelles conditions les premiers sont économiquement avantageux dans les réseaux de transport.

Pour effectuer ces comparaisons, nous proposons un modèle de coût et nous l'appliquons aux différentes architectures de réseaux possibles qui ont été présentées dans les sections précédentes. Le modèle de coût est ensuite modifié dans un premier temps au hasard (études de sensibilité) puis en fonction des évolutions probables du marché ou de l'introduction de dispositifs qui peuvent influencer différemment le coût d'un réseau opaque vis-à-vis de celui du réseau translucide. Grâce à ce type de variations sur le modèle de coût nous pouvons déduire les conditions qui rendent le réseau translucide économiquement plus intéressant que celui opaque (conditions aussi appelées points de levier).

Ce chapitre se divise en trois parties : description d'un modèle de coût, comparaison économique entre un réseau translucide et un réseau opaque pour différents scénarios (scénarios actuels et scénarios d'évolutions du réseau) puis conclusions où nous présentons des considérations générales sur les coûts opérationnels liés au réseau de transport appuyées par une étude sur la disponibilité liée aux réseaux opaque et translucide.

5.1 Coûts associés à un réseau

Le coût total d'un réseau se décompose en deux parties :

- CAPEX (CAPital EXpanditure) : dépense d'investissement nécessaires pour déployer ou faire évoluer un réseau ; les coûts associés sont ceux des différents équipements en intégrant le coût d'achat des logiciels de gestion.
 - OPEX (OPerational EXpanditure) : coûts opérationnels associés au réseau ; ces coûts comprennent les dépenses liées aux bâtiments où les systèmes sont installés (location, charge
-

en électricité, ...), à la maintenance du réseau, au personnel assurant la mise en place, la manutention (et quelque fois aussi la maintenance) et les études d'évolution et services du réseau, [Machuca 2006].

Les évaluations technico-économiques effectuées pour faire les comparaisons entre les différents réseaux concernent uniquement le CAPEX et sont la base des résultats fournis dans ce chapitre.

Les comparaisons sur les coûts OPEX ne sont prises en considération que pour une conclusion finale pour les raisons suivantes :

- il est difficile connaître *a priori* les coûts opérationnels relatifs à un réseau qui n'est pas installé ;
- une partie des coûts opérationnels est proportionnelle au CAPEX (la taxe professionnelle et les lots de maintenance, par exemple), donc nous pouvons estimer que toute économie sur le CAPEX induit une économie sur l'OPEX.

5.2 Définition du modèle de coût

L'évaluation économique d'un réseau n'est pas un exercice simple ni une science exacte. Ceci est dû au fait que les prix des équipements utilisés dans ce type d'étude reflètent d'un côté le coût de production du produit et d'un autre côté la politique commerciale des vendeurs. Par politique commerciale nous entendons les prix associés aux différentes parties composant un dispositif : généralement un dispositif est composé par une partie fixe que nous appelons 'site' (tel que le châssis, le cœur d'une matrice de brassage, ...) et une partie modulaire ou fonctionnelle que nous appelons 'carte' (ou ports, modules, ...) comme les cartes amplificateurs, les transpondeurs, ... Durant le processus d'appel d'offre, RFP (Request For Proposal), les équipementiers présentent leurs produits pour répondre aux besoins et critères exprimés par les opérateurs et proposent des prix. Les valeurs économiques associées aux dispositifs réseau sont souvent négociées entre les équipementiers et les opérateurs.

Nous avons constaté à travers l'ensemble des données auxquelles nous avons eu accès que les prix des systèmes dépendent de plusieurs facteurs qui ne sont pas rigides et les valeurs données ne peuvent pas être considérées comme absolues. Pour ces raisons nous ne pouvons pas parler d'un modèle de coût précis. Donc, dans cette section, nous basons les études sur différents modèles issus des tendances d'évolutions des coûts des systèmes et nous avons établi des modèles pour les systèmes du futur.

Nous résumons dans le tableau 5.1 les considérations à retenir au moment de la conception d'un modèle de coûts. En ce qui concerne la fourchette des prix associés aux différents fournisseurs et leur évolution temporelle, nous avons observé des variations de prix différentes en fonction de la maturité des équipements (comme les transpondeurs, les amplificateurs) ou de leur nouveauté sur le marché. Nous avons résumé ce comportement dans le tableau 5.2. Les coûts des dispositifs sont pour la plupart confidentiels et pour éviter de dévoiler leur montant nous présentons des valeurs normalisées par rapport à la valeur unitaire d'un transpondeur longue portée (LH, Long Haul) qui est le dispositif de base utilisé dans les réseaux opaques de type européen. Dans cette étude nous ne considérons pas l'impact des évolutions du trafic dans le dimensionnement du réseau, le dimensionnement est effectué sur la base des prévisions de trafic données en interne.

TAB. 5.1 – Caractéristiques d'un modèle de coût.

Aspect considéré	Caractéristiques du modèle
Compétition entre les équipementiers	Alignement des prix des différents constructeurs
Evolution temporelle des prix	Diminution des prix dans le temps
Production de masse	Le prix d'un dispositif dépend de la quantité de production
Dépendance à la complexité	Faible disponibilité du produit
Difficulté de réalisation	Prix dépendant de la capacité et de la portée du système

TAB. 5.2 – Variation des prix des systèmes.

Maturité	Fourchette	Evolution temporelle (5 ans)
Technologie stable Exploitation sur le terrain	10%	-10%
Technologie en évolution Exploitation sur le terrain	25%	-30%
Expérimental (laboratoires) Choix technologiques non stabilisés	40%	-50%
Expérimental (recherche) Aucune technologie privilégiée	60%	-80%

5.3 Les modèles de coût choisis

La qualité d'un système a un impact direct sur sa portée. Si un signal parcourt des distances supérieures à la portée du système, il est trop dégradé pour être reçu correctement et un régénérateur sera requis pour continuer à transmettre au-delà de cette distance maximale.

La portée peut être exprimée en termes de kilomètres parcourus et de nombre de nœuds traversés.

Les coûts des systèmes sont donnés pour trois portées kilométriques de référence : longue portée (LH) correspondant à environ 600 km, plus longue portée (ELH, Extended Long Haul) d'environ 1 400 km et ultra longue portée (ULH, Ultra Long Haul) 2 000 km.

Les prix des systèmes pour les portées intermédiaires et jusqu'à 3 000 km sont extrapolés avec une loi quadratique ; le choix d'une loi quadratique se justifie par la difficulté de réalisation croissante liée à l'augmentation de la portée. La croissance des prix est supposée quadratique plutôt que linéaire parce que nous supposons que la difficulté technologique augmente de manière non-linéaire avec l'incrément de la portée (c.f. section 3.1).

Aucune information n'est donnée sur le nombre de nœuds traversés car dans un réseau de type opaque ce concept n'existe pas. Par contre dans la littérature nous observons, [Tomkos 2001] que lors d'une transmission transparente, la traversée de certains dispositifs présents dans les nœuds

a un impact sur la qualité du signal et qu'augmenter le nombre de nœuds traversés nécessite des dispositifs performants et ajoute de la complexité dans la réalisation de ces derniers. Nous avons choisi de prendre comme référence trois portées en nœuds traversés : 3, 5 et 7. De façon pratique les règles de comptage du nombre de nœuds traversés sont les suivantes :

- une opération de passage transparent compte pour un seul traversée ;
- une opération d'insertion/extraction compte pour une moitié de nœud ;
- une opération de régénération compte également pour une moitié de nœud (le régénérateur remet le nombre de nœuds traversés à zéro).

Nous proposons d'étudier deux modèles de coût, selon que les coûts des systèmes sont supposés **indépendants**, [Morea 2004a], ou **dépendants** de la portée, [Morea 2005].

La première hypothèse est justifiée par la loi des prix associés aux systèmes expliquée précédemment ; les prix ne sont pas directement proportionnels à la faisabilité technologique et sont plutôt déterminés par la compétition du marché.

La deuxième est justifiée par la complexité de réalisation liée aux équipements en fonction des performances associées [Tkach 2001]. En analysant les prix des systèmes nous avons observé que même pour une application opaque, ces prix sont différenciés selon les prestations associées (capacité, portée, ...), donc nous avons supposé que cette règle peut s'appliquer de manière générale. Les critères de différenciation sélectionnés sont la portée en termes de distance en km et la portée en termes de nœuds traversés.

Certains systèmes présentent des caractéristiques différentes en fonction de la portée tandis que d'autres ont des caractéristiques qui dépendent de la portée en kilomètres et du nombre de nœuds séparément ou conjointement. Nous considérons une distance supplémentaire équivalente aux pertes des nœuds pour tenir compte des nœuds traversés dans le critère des portées.

Les éléments dont le prix dépend de la portée en kilomètres sont :

- les amplificateurs (en ligne et dans les sites terminaux, ST) ;
- les modules de compensation de dispersion chromatique (prix au kilomètre de DCF) ;
- les transpondeurs ; et
- les OPM des nœuds (car constitués par des transpondeurs) .

Les éléments dont le prix dépend de la portée en termes de nœuds sont :

- les égaliseurs des nœuds ; et
- les multiplexeurs/démultiplexeurs (inclus dans les sites terminaux).

Pour finir, les éléments indépendants de la portée sont :

- les brasseurs ;
- les DGE ;
- les OPM en ligne ; et
- les ports des brasseurs.

On note ainsi qu'un site terminal a un prix qui dépend à la fois du nombre de nœuds et de la portée en km puisqu'il inclut, entre autre, des multiplexeurs/démultiplexeurs et des amplificateurs. Dans les tableaux 5.3, 5.4 et 5.5 nous représentons respectivement le coût des systèmes en fonction de la portée en kilomètres, en nœuds et indépendant de la portée.

TAB. 5.3 – Modèle de coût pour les dispositifs dépendant de la portée en kilomètres.

Dispositif	Type	Coût @600 km	Coût @1400 km	Coût @2000 km	Fourchette
Transpondeur	Carte	1	1,17	1,57	±10%
Amplificateur (double étage)	Site	2,56	2,9	3,57	±10%
DCM (@km)	Carte	0,0074	0,0078	0,0083	±30%
OPM_Nœud	Carte	2,5	2,93	3,91	±13%
Site Terminal	Site	7,39	7,57	7,91	±10%

TAB. 5.4 – Modèle de coût pour les dispositifs dépendant de la portée en nœuds.

Dispositif	Type	Coût @3 nœuds traversés	Coût @5 nœuds traversés	Coût @7 nœuds traversés	Fourchette
Site terminal	Site	0	0,09	0,17	±30%
Egaliseur	Carte	0,35	0,52	0,61	±10%

TAB. 5.5 – Modèle de coût pour les dispositifs indépendants de la portée.

Dispositif	Type	Coût	Fourchette
DGE	Site	1,09	±8%
OPM-DGE	Carte	0,70	±8%
EXC 16x16	Site	0,87	±10%
EXC 32x32	Site	1,13	±10%
EXC 64x64	Site	2,26	±10%
EXC 128x128	Site	4,78	±10%
OXC 16x16	Site	1,22	±20%
OXC 32x32	Site	2,78	±20%
OXC 64x64	Site	4,52	±20%
OXC 128x128	Site	8,43	±20%
OXC 256x256	Site	15	±20%
EXC port	Carte	0,7	±10%
OXC port	Carte	0,26	±10%
Bloc WSS	Site	10	±10%
ROADM_16	Site	10,91	±15%
ROADM_24	Site	12,39	±15%
ROADM_40	Site	15,22	±15%

5.4 Comportement d'un réseau translucide en fonction du modèle de coûts

Pour comprendre les variations de prix associées aux réseaux opaques et translucides, nous analysons d'abord le nombre de ressources associées aux deux types de réseaux. De cette manière nous comprenons quel est l'impact de la transparence sur le besoin de chaque dispositif et sur le coût total du réseau, ainsi l'influence du modèle de coût adopté. Dans un second temps, nous considérons aussi l'impact de la distribution du trafic (en termes de nœuds et de kilomètres traversés) sur la réduction de ressources induite par la transparence.

Pour simplifier nous prenons en considération un seul réseau, mais la méthode d'analyse menée est indépendante du réseau et du trafic à examiner.

Dans cette section nous comparons les différents scénarios utilisant les deux modèles de coûts proposés, appliqués à un réseau constitué par 38 nœuds et 63 liens ; la matrice de trafic utilisée pour le dimensionnement, 'M1', est constituée par 230 demandes à 10 Gbit/s basées sur une prévision de trafic 2006 sans protection. Nous avons choisi des brasseurs transparents avec un cœur de commutation à base de MEMs, car les premiers produits sont déjà disponibles sur le marché.

L'introduction de la transparence dans le réseau permet de réduire le nombre d'opérations OEO requises et donc de réduire les besoins des dispositifs associés et la taille des matrices de brassage électroniques. Pour évaluer l'influence de la portée des systèmes sur la réduction de dispositifs liés aux opérations OEO, nous avons tracé le nombre total de dispositifs nécessaires pour effectuer le routage dans la figure 5.1. Les dispositifs affichés sur figure 5.1 sont : les multiplexeurs/démultiplexeurs, les amplificateurs, les kilomètres de fibre compensatrice (en milliers de kilomètres), les égaliseurs et les OPMs (uniquement présents dans les scénarios caractérisés par la transparence), les transpondeurs (en nombre égal au nombre de ports opaques) et les ports optiques. Une partie de ces dispositifs sont indépendants du scénario et leur nombre ne change pas en fonction de la portée, une autre partie dépend de la présence de transparence dans le réseau voire de la portée totale des systèmes.

Ainsi, l'introduction de la transparence sans changer la portée des systèmes induit une réduction sur le nombre total de transpondeurs égale à 14%, mais le fonctionnement du réseau translucide nécessite de nouveaux dispositifs, comme par exemple les ports optiques. Augmenter la portée des systèmes permet une réduction supplémentaire du nombre de transpondeurs par rapport au cas opaque de 46% pour une portée de 1 400 km et 55% pour un réseau complètement transparent. Et la diminution du besoin en régénérateurs induit également une réduction du nombre de ports optiques dans la matrice OXC. Par rapport à un réseau utilisant des systèmes avec une portée de 600 km la diminution est de 17% pour une portée de 1 400 km, et de 22% si le réseau est complètement transparent.

En figure 5.2.a nous avons représenté le pourcentage de brasseurs électroniques de taille donnée employés dans le réseau en fonction de la portée en kilomètres des systèmes par rapport au nombre total de EXC dans le scénario opaque. La portée en nombre de nœuds étant fixée à 5 (4 nœuds traversés et deux demi-nœuds pour l'insertion/extraction) dans les scénarios translucides et 11 dans le scénario transparent. Les besoins en taille d'EXC sont reliés aux scénarios, opaques, translucides avec les portées de 600, 1 400, et 2 000 km, et complètement transparents (3 600 km

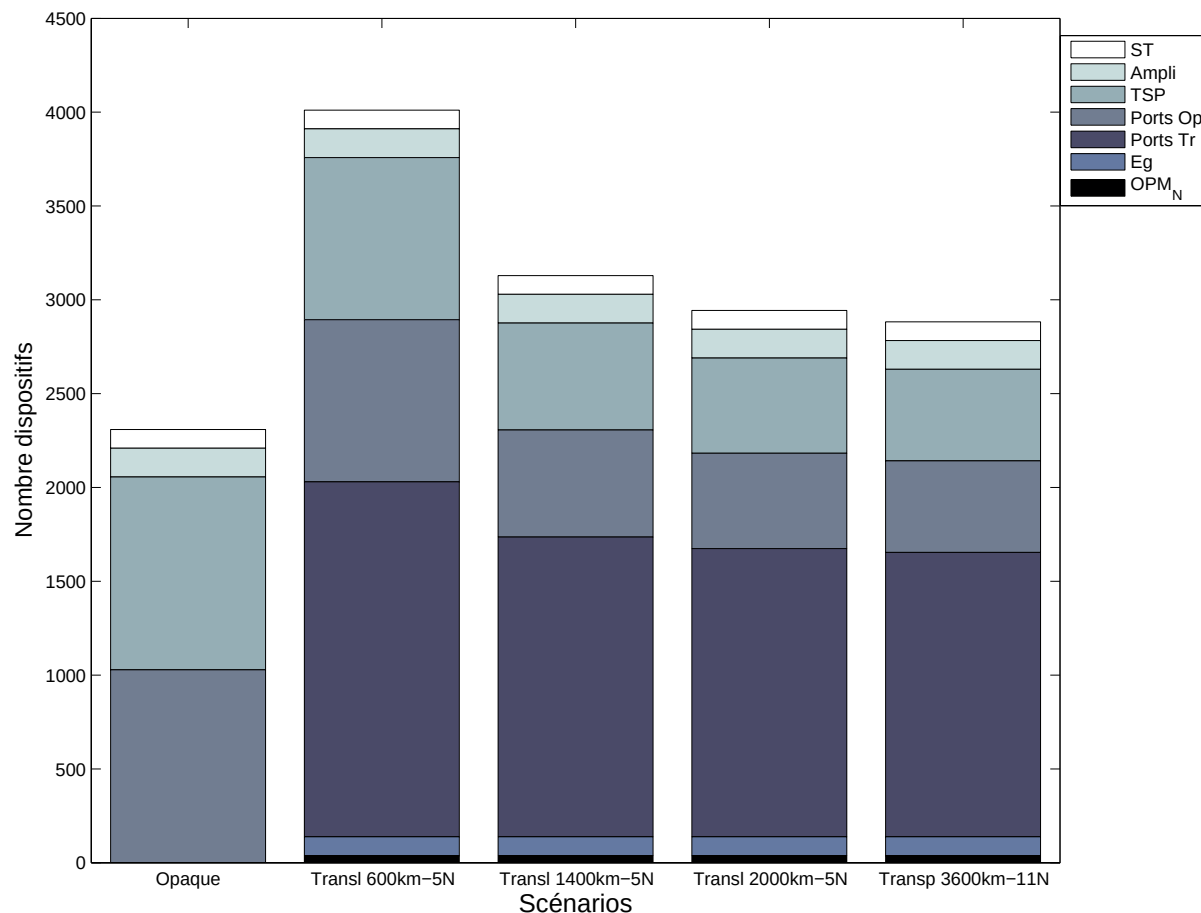


FIG. 5.1 – Nombre de dispositifs nécessaires dans les différents scénarios appliqués au réseau choisi. Les scénarios étudiés sont : opaque, translucide (pour les portées en kilomètres de 600, 1 400 et 2 000 km et la portée en nœuds de 5) et transparent (portée en kilomètres de 3 600 km et en nœuds de 11).

et 11 nœuds traversés). La figure 5.2.b représente de manière analogue les besoins sur la taille des brasseurs OXC par rapport au nombre total de brasseurs OXC.

Il est important en lisant la figure 5.2.a de se rappeler que le nombre d'EXC de taille donnée dans chaque scénario est normalisé par rapport au nombre total d'EXC nécessaires dans le scénario opaque. Par exemple, dans le cas transparent le 60% d'EXC_{16x16} signifie que le nombre d'EXC de ce type est égal à 60% du nombre total d'EXC dans le scénario opaque. Ceci explique que la somme des pourcentages de chaque scénario est inférieure à 100%.

Cette approche nous permet de mettre en évidence la réduction du nombre d'EXC nécessaires par rapport au cas opaque. Dans le cas opaque nous avons un nombre de brasseurs électroniques supérieur parce qu'ils peuvent être cascades quand les besoins en ports électroniques dépassent la capacité du brasseur, c.f. section 3.6.

Nous pouvons observer que le réseau opaque nécessite des brasseurs EXC de taille plus grande en moyenne que le réseau translucide (le scénario opaque n'utilise pas de brasseurs OXC). Lorsque la portée en kilomètres augmente, la taille des matrices E/OXC du réseau translucide se réduit.

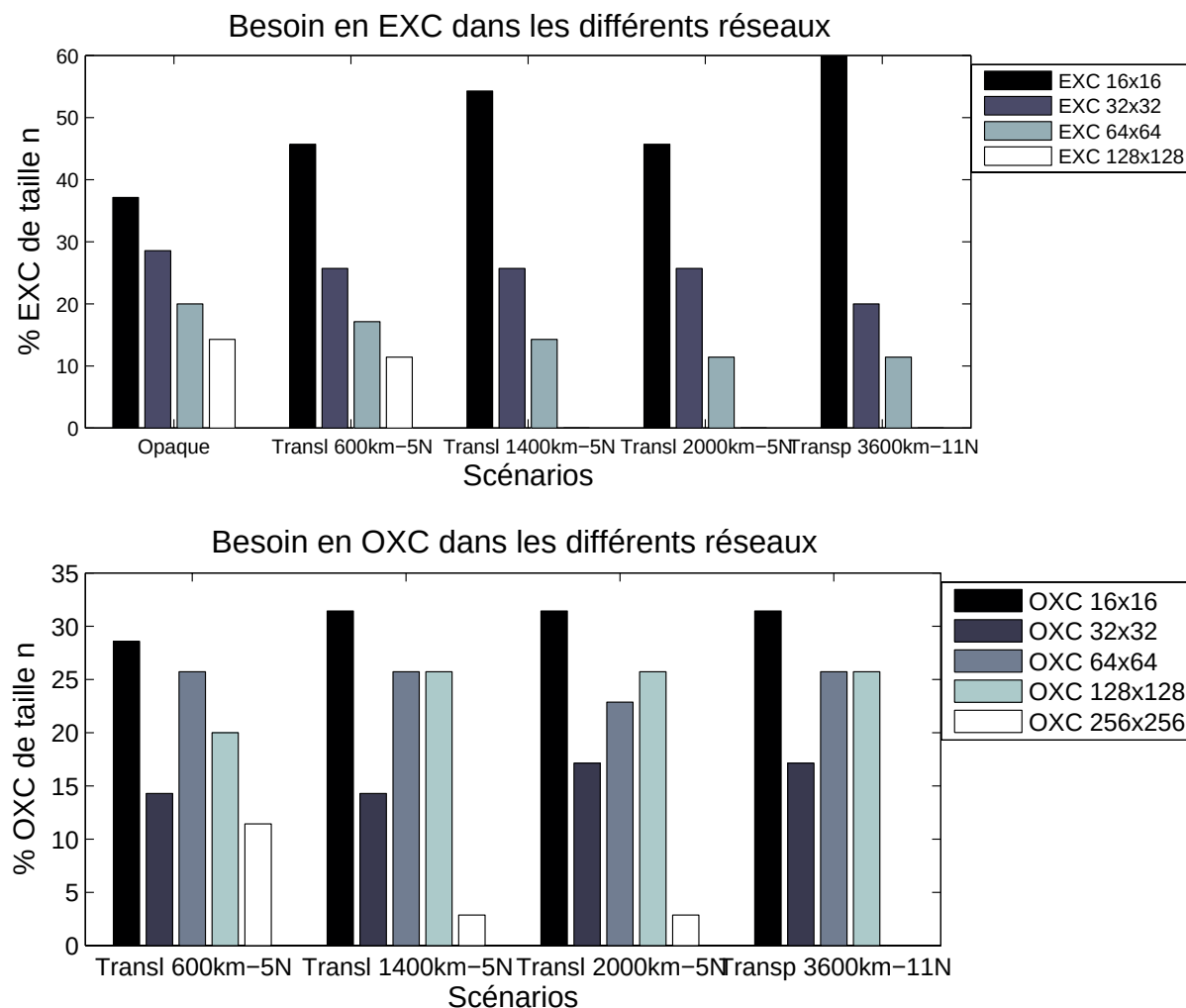
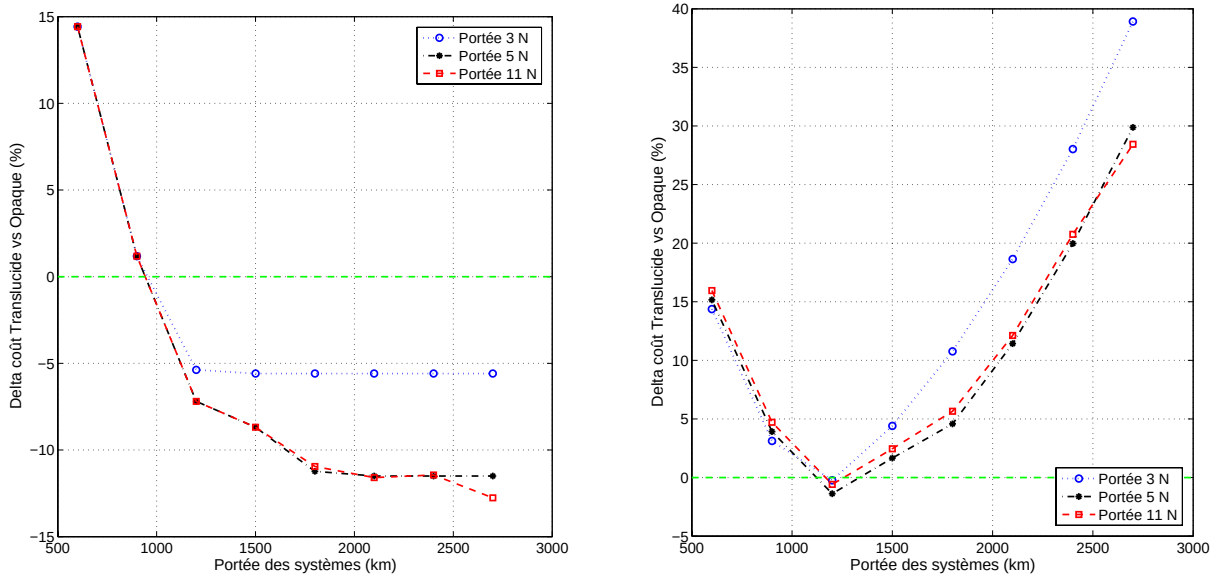


FIG. 5.2 – Nombre de brasseurs électroniques et optiques (en pourcentage) en fonction de leur taille et du scénario. Les scénarios étudiés sont : opaque, translucide (pour les portées en kilomètres de 600, 1 400 et 2 000 km et la portée en nœuds de 5) et transparent (portée en kilomètres de 3 600 km et en nœuds de 11).

Les réseaux translucides qui ont un besoin réduit en nombre de régénérations permettent une forte diminution sur les besoins en matrices EXC de grosse taille. De plus comme certains nœuds ne présentent pas de trafic inséré/extrait, ils n'ont parfois pas de besoin en brasseur EXC : pour les systèmes avec une portée de 1 400 km nous avons 5% en moins de brasseurs EXC et pour les systèmes avec portée de 2 000 km et complètement transparent, la réduction est de 10%. Il est important d'observer que la taille d'une matrice électronique ne donne pas d'indication sur les besoins des matrices optiques, car ces dernières dépendent aussi du pourcentage de trafic transparent. Ainsi sur cet exemple, nous constatons que la transparence permet de réduire le nombre de ports opaques et transparents, le nombre de transpondeurs et la taille des matrices associées, mais nécessite l'emploi de dispositifs absents dans le cas opaque (OPM ou brasseurs transparents). À partir de ce résultat, nous pouvons en déduire qu'il existe un compromis entre opacité et transparence qui dépend du modèle de coût choisi.

5.4.1 Impact des modèles de coûts

L'évolution de l'écart en pourcentage du prix du réseau translucide par rapport au prix du réseau opaque est illustré en figure 5.3.a pour le modèle de coûts invariants avec la portée (nous avons appliqué les prix des systèmes employés dans le scénario opaque avec portée de 600 km et 2 nœuds) et en figure 5.3.b pour le modèle de coûts dépendant de la portée. Les prix sont affichés pour toutes les variations de portée en kilomètres et pour les portées en nœuds égales à 3, 5 et 11 (cette dernière correspond au cas totalement transparent). Un ratio égal à 0 correspond à une parfaite équivalence entre le réseau translucide et opaque, tandis qu'un ratio inférieur indique que le scénario translucide est plus avantageux. Pour les deux modèles, l'introduction de la



(a) Modèle de coût indépendant de la portée.

(b) Modèle de coût dépendant de la portée.

FIG. 5.3 – Evolution du prix d'un réseau translucide vis-à-vis de celui du réseau opaque.

transparence en utilisant les mêmes systèmes que dans le réseau opaque cause une augmentation des coûts totaux du réseau, car l'introduction de la transparence implique l'ajout de nouveaux dispositifs qui ont eux aussi un prix non négligeable (l'introduction des matrices optiques par exemple). L'équivalence entre les deux types de réseaux est donnée pour des portées égales à 900 km dans le modèle considérant tous les prix fixés indépendamment de la portée et 1 100 km dans le deuxième cas. Cette différence est causée par l'augmentation des prix en fonction de la portée dans le deuxième modèle : pour avoir une économie sur les coûts totaux du réseau il faut en plus que la réduction du nombre de transpondeurs compense l'augmentation de leur prix. Ainsi, dans le premier modèle le coût total du réseau translucide baisse lorsque la portée des systèmes augmente (coût proportionnel au nombre de dispositifs employés) alors que dans le second modèle, le coût total baisse jusqu'à une portée déterminée (portée optimale, ici égale à 1 200 km) pour augmenter ensuite de manière quadratique. Le minimum obtenu avec le deuxième modèle est dû à une forte diminution du nombre des dispositifs, mais lorsque la portée augmente encore, le nombre de dispositifs ne diminue quasiment plus alors que leur coût augmente.

Dans l'exemple considéré, les "petites" portées en nœuds permettent un peu plus d'économie avec le second modèle quand des systèmes à courte portée en kilomètres sont employés. En effet, pour ce réseau, il n'y a pas beaucoup de demandes de longueur inférieure à 1 200 km traversant plus de 3 nœuds et donc les systèmes à 5 ou 11 nœuds sont surdimensionnés par rapport aux besoins. Par contre, en augmentant la portée en kilomètres, les systèmes limités à 3 nœuds sont sous dimensionnés et ceux à 11 nœuds surdimensionnés ; dans un cas le dimensionnement avec une portée limitée à 3 nœuds requiert un coût lié à la régénération plus élevé que l'augmentation du prix lié à la technologie du système, c'est l'inverse pour les systèmes avec une très grande portée en nœuds (sauf pour la portée de 2 700 km). Les avantages introduits par la portée de 11 nœuds restent cependant du même ordre que ceux dus à la portée à 5 nœuds.

Sur la figure 5.4 nous montrons la distribution en kilomètres et en nombre de nœuds traversés des parcours issus de la matrice de trafic considérée. Pour le calcul des distances (km) nous avons considéré la distance équivalente à un nœud, c'est à dire la longueur d'une fibre de transmission qui introduit les mêmes pertes qu'un nœud.

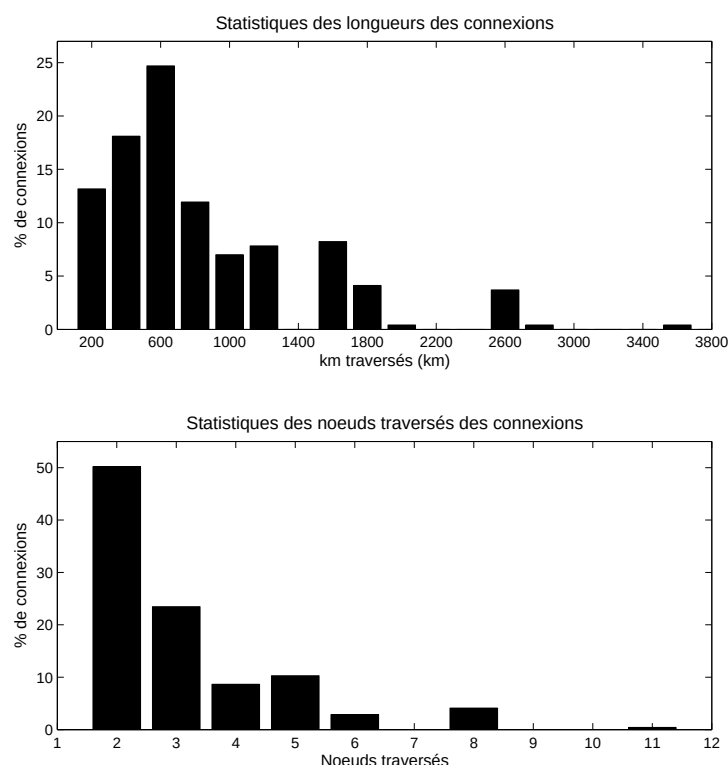


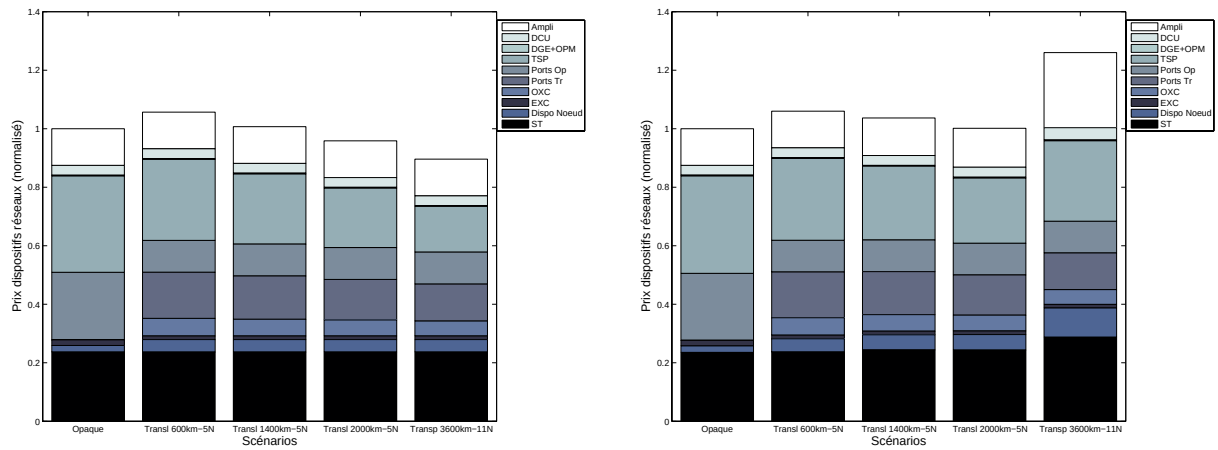
FIG. 5.4 – Distribution des parcours en fonction de la longueur équivalente des connexions et du nombre de nœuds par connexion.

La moitié des parcours ont une longueur inférieure à 700 km et sont constitués par deux nœuds (connexions sans nœuds intermédiaires) et 75% sont inférieurs à 1 200 km et sont constitués par trois nœuds (un nœud intermédiaire) ; le parcours le plus long traverse 3 550 km et 11 nœuds. Puisque 50% des parcours est constitué de deux nœuds, il n'y a pas de différences en nombre de transpondeurs entre le réseau opaque et translucide pour ces demandes, il y a seulement un surcoût dû à la transparence. La distribution des nœuds nous permet aussi d'expliquer

le faible avantage procuré par une augmentation de la portée en termes de nœuds de 5 à 11 (qui ne concerne que 8% des demandes). Le point de minimum du rapport entre les coûts des deux réseaux est obtenu pour une portée de 1 200 km correspondant à la portée satisfaisant 75% des parcours routés et pour une portée en nœuds de 5, correspondant à 92% des demandes.

Ce point de minimum correspond également à un point où les deux types de réseaux sont équivalents en coût (une économie de 2% est négligeable), cela signifie que dans notre exemple, le surcoût de la transparence est complètement compensé par les économies en nombre de dispositifs. Le fait que l'exemple choisi donne une équivalence des deux catégories de réseau à la portée optimale est une coïncidence. En effet, une autre distribution de trafic ou un autre modèle de coût auraient aussi bien pu donner un ratio minimum inférieur ou supérieur à 0¹. Des résultats similaires, mais pour un réseau Nord-Américain sont donnés dans [Simmons 2005].

En figures 5.5.a et 5.5.b le détail de la variation des prix associés aux dispositifs est indiquée en fonction de la portée. La figure 5.5.a montre le coût cumulé par chaque catégorie de dispositifs pour le premier modèle de coût et pour une portée en nœuds égale à 5. Comme prévu, le prix total du réseau diminue proportionnellement au nombre de ressources employées.



(a) Modèle de coût indépendant de la portée.

(b) Modèle de coût dépendant de la portée.

FIG. 5.5 – Prix cumulé des dispositifs en fonction de la portée en kilomètres (portée en nœuds égale à 5).

Dans la figure 5.5.b nous avons représenté le coût cumulé pour le deuxième modèle de coût : nous notons bien la diminution dans un premier temps du prix associé aux transpondeurs (la réduction de leur nombre est plus forte que l'augmentation du prix avec la portée) suivie d'une augmentation (la réduction du nombre des systèmes est plus faible que l'augmentation de leur prix). Alors que le nombre de transpondeurs diminue avec la portée en km, le nombre d'amplificateurs reste inchangé (5.1), mais leur coût augmente.

Dans la suite des études nous considérerons uniquement le deuxième modèle de coût (coût

¹Dans [Morea 2005] nous avons montré des rapports de prix plus avantageux pour des portées plus courtes dans les deux modèles de prix, car les prix de la partie opaque du réseau étaient plus élevés que ceux considérés ici ; la montée des prix avec la portée était plus importante car les valeurs des systèmes ELH et ULH étaient plus élevées. Les données de coût utilisées ici ont été actualisées.

lié à la portée, c.f. section 5.3, car il est le plus proche de la réalité à court et moyen terme. En effet si nous avons constaté une différence de prix entre les systèmes à courte et longue portée au moment de la définition du modèle, cette situation subsistera probablement dans les prochaines années et sera certainement visible aussi pour les systèmes à plus longue portée.

Le coût total d'un réseau dépend du nombre de ressources installées et de leur poids économique. Dans [Morea 2004b], [Morea 2004a], [Staessens 2005] et [Giles 2004] les avantages du réseau translucide dépendent uniquement de la réduction des transpondeurs. Nous avons montré qu'un réseau translucide nécessite un certain nombre de dispositifs supplémentaires pour garantir les mêmes fonctionnalités qu'un réseau opaque et que le prix de certains systèmes dépend de la portée associée.

Le réseau translucide introduit des économies sur l'opaque si le surcoût lié à la transparence (utilisation de dispositifs plus performants et nouveaux par rapport au cas opaque) est inférieur aux économies introduites par la réduction de besoins de dispositifs OEO. La réduction du nombre de dispositifs OEO dépend du trafic écoulé et des systèmes installés.

5.4.2 Etude de la fourchette de prix

Les coûts utilisés dans l'étude précédente représentent des prix moyennés sur les valeurs disponibles au sein de France Télécom. En figure 5.6 nous illustrons les variations sur le rapport entre le coût total d'un réseau translucide et le coût d'un réseau opaque en considérant les fourchettes indiquées dans les tableaux 5.3, 5.4 et 5.5.

Le rapport des prix est obtenu entre le scénario translucide et celui opaque pour une portée en nœuds fixée à 5, la portée en kilomètres restant variable.

Nous pouvons faire plusieurs remarques :

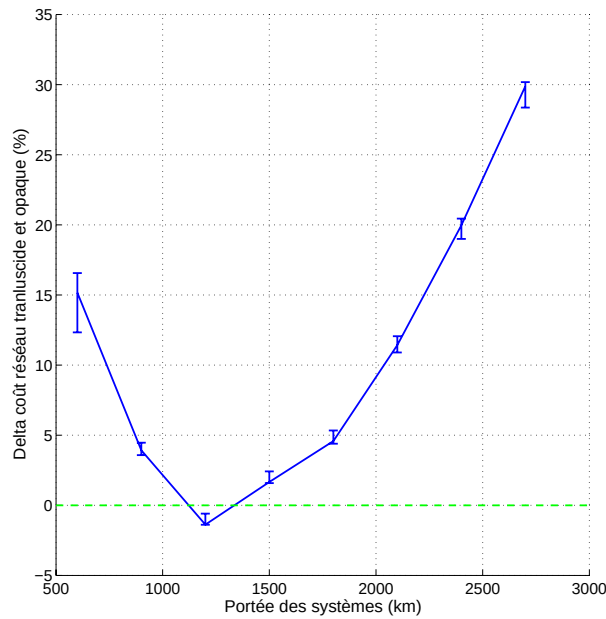


FIG. 5.6 – Variation du rapport des coûts pour les prix associés aux fourchettes du modèle de coût (portée 5 nœuds).

- les variations du rapport entre les deux types de réseaux considérant les fourchettes des coûts vont d'un minimum de 0,3% à un maximum de 3% ;
- les fluctuations des erreurs sur le rapport de prix montrées dans la figure 5.6 ne sont pas constantes : en effet comme le volume de coût des transpondeurs, ports opaques et amplificateurs varie avec la portée (figure 5.5.b) lorsque leur contribution est minimum sur le coût total du réseau, elle est aussi minimum sur leurs fluctuations ;
- l'asymétrie des zones déterminées par les fourchettes est un effet du rapport entre les deux coûts des réseaux, en effet si nous considérons leur coût absolu, la variation est symétrique autour du coût de référence.

Enfin, notons que ces variations sont très petites que nous proposons de les négliger dans le reste du document.

5.4.3 Impact de l'évolution dans le temps des prix des systèmes

Nous avons déjà indiqué que le ratio hybride sur opaque est très dépendant du modèle de coût. Nous souhaitons évaluer ici dans quelle mesure les résultats établis pour une période donnée évoluent avec l'évolution prévisible des prix des systèmes.

Le tableau 5.2 (c.f. section 5.2) résume les évolutions possibles des prix des systèmes dans le temps. Ces variations ne sont pas les mêmes sur tous les systèmes et nous avons appliqué une différenciation des variations des prix des systèmes en fonction du dispositif et de sa portée. Pour les systèmes de longue portée, ces dispositifs n'étant pas complètement matures, nous appliquons des réductions de prix en moyenne de 15% et 20%, pour les systèmes ELH et ULH respectivement. La baisse de prix est plus importante pour les très longues distances car les technologies utilisées sont moins stables et parce que ces systèmes commencent à apparaître dans le marché, donc leurs prix sont plus sujets aux variations. Les systèmes propres à la transparence, tels que les OXC et les ports optiques voient leurs prix baisser de 50% car la plupart entre eux sont des dispositifs préindustriels et non encore exploités sur le terrain. Les variations de prix des EXC sont supposées de l'ordre de 20% car les brasseurs commencent depuis quelques années à être intégrés dans les réseaux et leurs technologies ne sont pas encore totalement stabilisées. Les dispositifs que nous avons supposés d'être matures sont les transpondeurs LH, les DGE avec les OPM en ligne et les modules de compensation de dispersion chromatique ; pour ces dispositifs nous avons appliqué une réduction de prix de l'ordre de 10%. Pour la variation des prix décrite, le rapport de prix entre le réseau translucide et l'opaque est illustré dans la figure 5.7.

En comparant le rapport de prix entre ces deux types de réseaux avec celui obtenu avec les coûts actuels (figure 5.3.b), nous notons une légère baisse du rapport lorsque les mêmes systèmes que dans le réseau opaque sont utilisés (l'avantage du réseau opaque passe de 15% à 6% en moyenne). Cette baisse s'explique par la diminution plus forte des prix des systèmes propres à la transparence qui font diminuer l'impact économique des nœuds hybrides sur le coût total des réseaux translucides.

A la portée optimale, le réseau hybride devient plus intéressant que l'opaque d'un peu plus de 10% alors qu'il était tout juste équivalent avec les prix actuels ; la portée optimale est la même

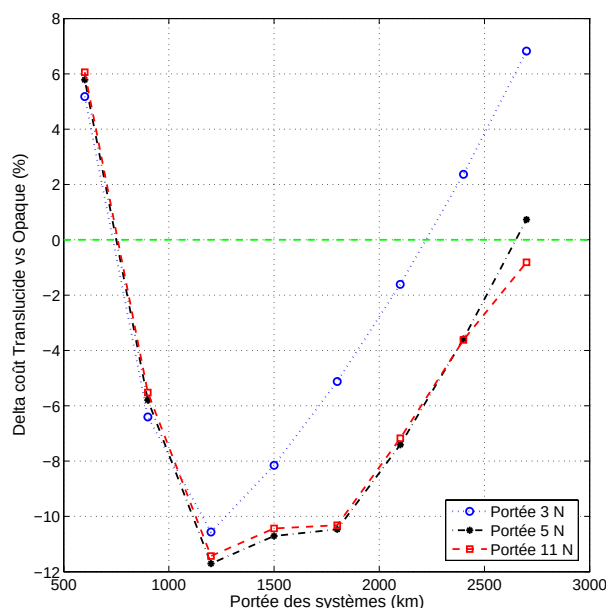


FIG. 5.7 – Rapport des coûts du réseau translucide sur le réseau opaque avec une prévision des prix à 5 ans.

que pour le modèle utilisant les prix actuels. Le gain de la transparence sur l'opacité est causé par un surcoût des systèmes ELH plus faible que le coût des transpondeurs en excès dans le cas opaque.

Incrémenter légèrement la portée en km permet de rester autour du point de minimum uniquement si la portée des nœuds est elle-même incrémentée (à des connexions plus longues correspondent plus de nœuds traversés).

Cette stabilisation est plus évidente qu'avec un modèle utilisant les prix actuels car les systèmes ULH voient incrémenter leur prix plus doucement.

Pour des systèmes avec des portées supérieures à 2 000 km, le rapport de prix tend de plus en plus vers l'unité : les systèmes de transmission deviennent trop chers par rapport aux besoins des connexions.

Finalement, l'érosion des prix sur les dispositifs photoniques et ULH rend le réseau translucide économiquement plus intéressant que l'opaque. A ce niveau de la discussion il est nécessaire d'évaluer la sensibilité du résultat vis-à-vis de chaque élément du réseau.

5.4.4 Etude de sensibilité

Une étude de sensibilité est destinée à comprendre quels sont les dispositifs ayant le plus d'impact sur le coût total du réseau. De cette manière il est plus facile d'identifier les dispositifs dont les évolutions de prix peuvent être avantageuses pour un scénario plutôt que pour un autre et donc en fonction des tendances du marché, réussir à définir lequel est favorisé.

Dans la suite nous supposons une variation des prix de chaque élément égale à plus ou moins

20% et 50% des prix affichés dans les tableaux 5.3, 5.4 et 5.5. Pour tous ces systèmes nous avons affiché le rapport de coût entre les deux réseaux.

Les études de sensibilité sont faites sur les dispositifs suivants : DCF, DGE, sites terminaux, amplificateurs, ports optiques et opaques, matrices de brassage opaques et transparentes et, enfin, transpondeurs.

La comparaison entre les deux réseaux est montrée pour une portée en nœuds fixée à 5 (identifiée ici comme le meilleur compromis entre performance et coût) et une portée en kilomètres variable. Le rapport de coût entre les deux réseaux n'est pas modifié par les variations de prix sur les modules de DCM ni sur les systèmes d'égalisation en ligne. Ceci est justifié par la présence de ces dispositifs de la même manière dans les deux types de réseaux et à leur faible dépendance en fonction de la portée.

Les variations de coûts appliquées sur les Sites Terminaux (ST) comme sur les matrices de brassage électroniques donnent également des variations très faibles (inférieures à 2%). En effet, les prix associés aux ST varient avec la portée, mais cette variation est négligeable vis-à-vis du prix total du réseau. Comme nous l'avons vu précédemment, les variations de portée en km des systèmes modifient surtout la distribution en taille des brasseurs EXC : plus la portée augmente plus le nombre de "grosses" matrices diminue (figure 5.2). En augmentant la portée, l'écart de prix dû à la fourchette commence à augmenter (inférieur à 1% d'écart maximal), mais puisque le nombre de matrices EXC et leur coût total restent comparables, (figure 5.5) l'écart se maintient faible (1%).

La figure 5.8 montre la sensibilité des réseaux opaque et translucide vis-à-vis des variations de prix appliqués aux amplificateurs. Nous observons deux comportements : pour les courtes portées la variation du ratio des prix relatifs aux deux réseaux est imperceptible. En effet, la différence de prix entre les dispositifs employés dans le cas opaque et dans le cas translucide est faible à cause du modèle de coût choisi. Incrémenter la portée des systèmes implique une augmentation de la variation du ratio jusqu'à $\pm 4\%$ (pour des variations de prix de $\pm 50\%$). La variation de prix sur les systèmes ULH est plus importante comparée à celle des systèmes LH.

La diminution des prix des amplificateurs est plus avantageuse pour les réseaux translucides, car les réductions sur les systèmes de très longue portée sont plus importantes.

Les figures 5.9.a et 5.9.b montrent les études de sensibilité effectuées sur les dispositifs ajoutés par l'introduction de la transparence (OXC et ports optiques). Les excursions maximales sur le rapport de prix entre les deux réseaux sont de $\pm 5\%$ et 8% , respectivement pour des variations de $\pm 50\%$ sur le prix des OXC et des ports transparents. Les excursions de prix diminuent légèrement avec la portée dans le cas des OXC, car leur nombre ne varie pas avec le degré de transparence du réseau, mais leur taille diminue (c.f. figure 5.2). Concernant les excursions liées aux ports transparents, nous observons initialement un écart maximal qui décroît avec l'incrémentation de la portée : le nombre de ces dispositifs est proportionnel au nombre de régénérateurs.

La forte excursion du rapport de prix observée est justifiée par la présence des OXC et des ports transparents uniquement dans le réseau translucide : plus leur prix est élevé, plus le surcoût des nœuds hybrides est important et difficile à compenser par la réduction du nombre de transpondeurs.

Seule la baisse de leur prix rend le réseau translucide plus intéressant par rapport à l'opaque.

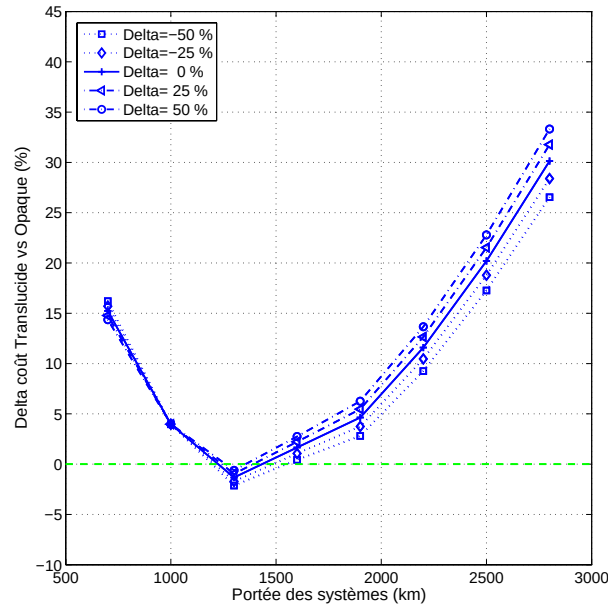
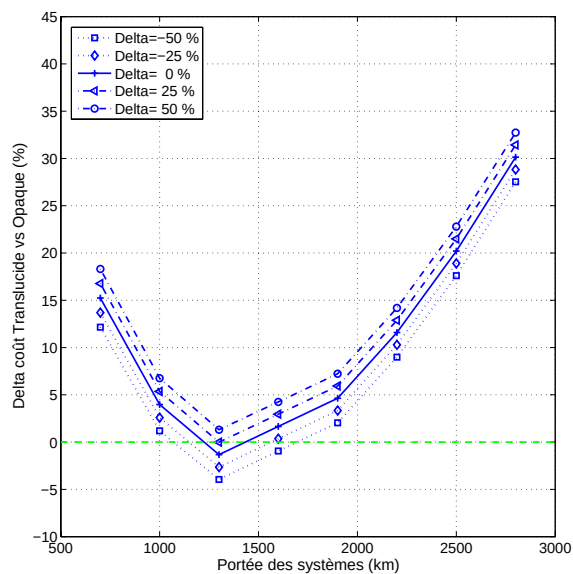


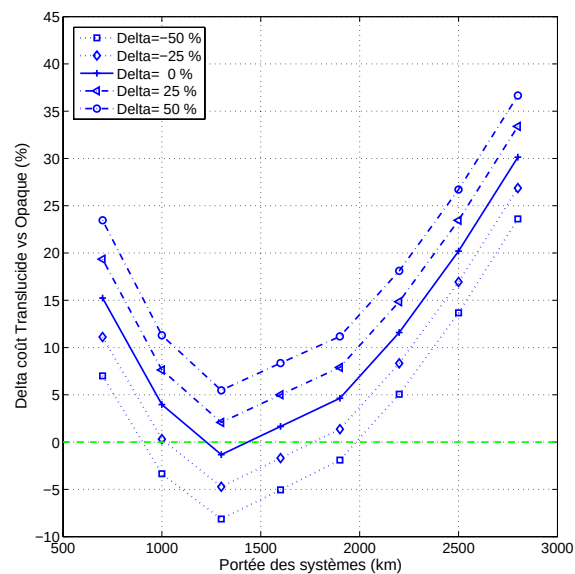
FIG. 5.8 – Etude de sensibilité sur les prix des amplificateurs.

Les figures 5.10.a et 5.10.b montrent les variations de prix sur les transpondeurs et les ports opaques, dispositifs caractérisant l'opacité. Des variations de prix sur les transpondeurs provoquent dans un premier temps une augmentation de l'excursion du ratio entre les deux réseaux, jusqu'à un maximum de $\pm 5\%$ pour une portée de 1 200 km. Sachant que l'augmentation du prix des transpondeurs est avantageuse pour les réseaux translucides, pour les très grandes portées, la forte incrémentation des prix réduit cet avantage et donc réduit la variation du ratio ($\pm 3\%$ pour 2 700 km). En ce qui concerne les ports opaques, une augmentation de leur prix est également avantageuse pour le cas translucide, et le fait que leur nombre diminue avec la portée accentue cet avantage, si bien que la variation sur le rapport de coûts augmente toujours (jusqu'à $\pm 10\%$). Les variations positives des prix de ces deux dispositifs sont avantageuses pour le réseau translucide car l'augmentation du prix des opérations OEO est davantage pénalisante pour le réseau opaque.

Pour conclure, nous comprenons maintenant quels sont les dispositifs qui permettent au réseau translucide d'être plus avantageux que le réseau opaque, jusqu'à 12% plus avantageux pour une portée de 1 200 km dans la section 5.4.3. En effet nous avons supposé que les systèmes transparents subiront une baisse de 50% sur leurs prix, ce qui rend le réseau translucide plus avantageux que l'opaque de 14%; et en même temps nous avons supposé une baisse des prix des transpondeurs et des ports opaques d'environ 10%, cette baisse provoque une augmentation relative du coût total du réseau translucide d'environ 3%. Avec ces deux seules hypothèses nous justifions facilement que le réseau translucide soit plus avantageux que le réseau opaque de 11%. Les évolutions sur les prix des autres dispositifs n'ont finalement que peu d'impact et participent à 1% environ sur la valeur calculée.

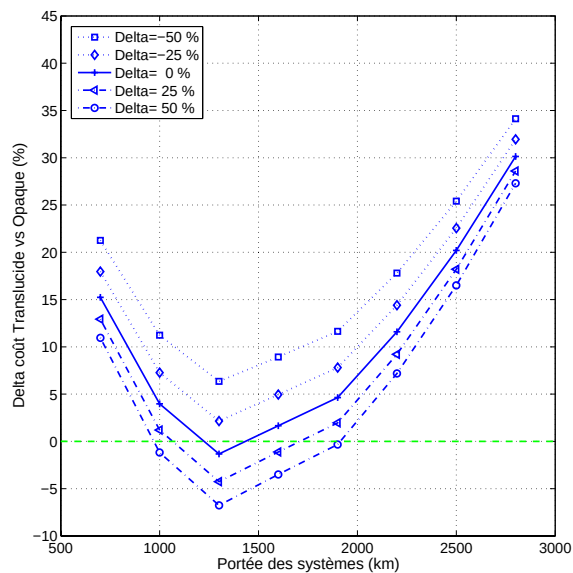


(a) Sur les prix des OXC.

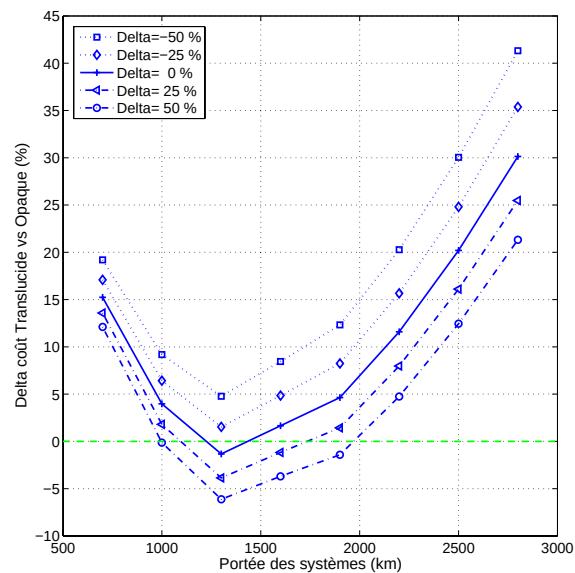


(b) Sur les prix des ports transparents.

FIG. 5.9 – Etude de sensibilité par rapport aux dispositifs optiques.



(a) Sur les prix des transpondeurs.



(b) Sur les prix des ports opaques.

FIG. 5.10 – Etude de sensibilité par rapport aux dispositifs opaques.

5.5 Impact des évolutions technologiques des différents systèmes

Dans cette section nous cherchons à identifier l'impact de technologies en rupture qui pourraient modifier considérablement le modèle de coût actuel. Nous avons identifié pour cela deux technologies qui à notre sens sont les plus prometteuses : introduction de systèmes de transmission plus robustes, développement de dispositifs pour les nœuds transparents moins chers, ainsi qu'une modification de la tendance sur les prix ULH en fonction de la portée. Cette section complète la précédente, avec l'introduction des variations sur le modèle de coûts qui peuvent reproduire le comportement des prix des systèmes en fonction des tendances de production de dispositifs, de la recherche ou d'autres raisons qui peuvent favoriser la production d'un dispositif par rapport à un autre, par exemple la situation économique du marché. Il faut penser aux années 2 000, quand la recherche présentait un grand nombre d'équipements tout-optiques et à la crise des télécommunications qui a suivi peu après. Beaucoup d'entreprises produisant des produits tout-optiques ont fait faillite, bloquant le développement de ces systèmes ; par contre la production et le développement des dispositifs propres au réseau opaque ont continué, même si la progression a été plus lente que prévu.

5.5.1 Transpondeurs robustes

Ce nouveau type de transpondeur est capable de supporter des signaux plus dégradés [Schinabeck 2006] et permet donc de relâcher certaines des contraintes d'ingénierie des liens. Nous avons choisi d'évaluer ces dispositifs en les utilisant dans le réseau opaque et dans le réseau translucide, avec un prix indépendant de la portée ; nous supposons également que ce type de transpondeur est employé pour la réalisation des OPM des nœuds.

Puisque ce type de transpondeur n'est pas encore disponible sur le marché, il est difficile de chiffrer son coût. Nous avons pris comme hypothèse un surcoût du prix des transpondeurs allant de 0 à 100% et nous présentons en figures 5.11 l'évolution du coût total du réseau translucide comparé à celui du réseau opaque.

Pour le résultat des figures 5.11, la portée en nœuds des systèmes est fixée à 5, celle en km varie de 600 à 2 700 km.

Nous prenons comme référence la comparaison entre les réseaux avec des transpondeurs classiques. Si les transpondeurs robustes sont intégrés dans les deux réseaux (figure 5.11.a) nous montrons que cette substitution est avantageuse pour le réseau translucide, car le surcoût sur les transpondeurs est pénalisant pour le réseau opaque.

Augmenter la portée induit une réduction majeure du ratio translucide versus opaque (indiqué par une décroissance du ratio translucide/opaque plus forte par rapport à la courbe de référence), car le nombre de transpondeurs est dans ce cas indépendant de la portée et la réduction du nombre de régénérateurs compense plus facilement le surcoût lié à la transparence (complexité des nœuds hybrides et systèmes dont le coût dépend de la portée, tableaux 5.3 et 5.4). Au-delà de la portée optimale, la croissance du ratio translucide/opaque est plus faible par rapport à la courbe de référence parce que dans le cas hybride il ne faut plus considérer le surcoût dû à la portée des transpondeurs.

Sur cette figure nous observons également que plus le surcoût lié au transpondeurs robustes est grand, plus le réseau translucide devient avantageux par rapport au réseau opaque : d'un

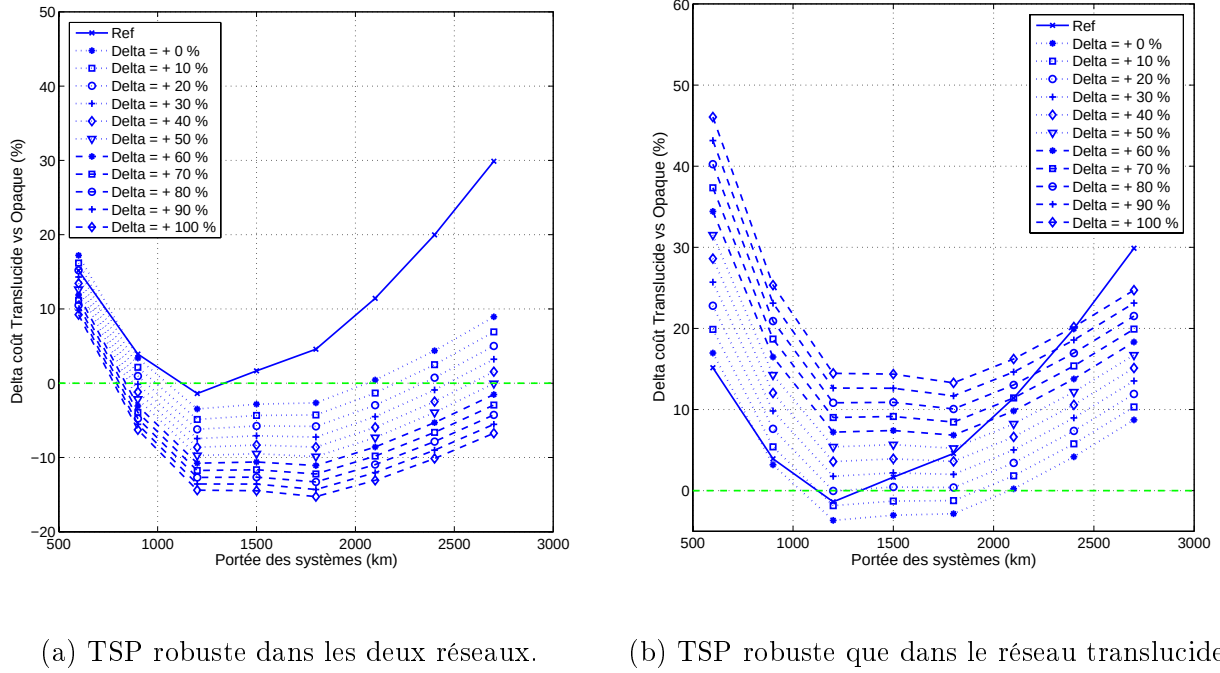


FIG. 5.11 – Comparaison du coût du réseau translucide versus opaque avec l'introduction des TSP robustes avec un surcoût compris entre 0 et 100% par rapport aux TSP LH.

minimum de 3% à un maximum de 15% plus économique toujours pour la même portée optimale de 1 200 km. En effet, vu le nombre élevé d'opérations de régénération dans le réseau opaque, l'augmentation du tarif des transpondeurs fait augmenter le coût du réseau opaque dans une proportion plus élevée que dans le réseau translucide.

Si les transpondeurs robustes sont utilisés uniquement dans le réseau translucide et si le réseau opaque emploie des transpondeurs classiques, le rapport de coût entre les deux réseaux est montré en figure 5.11.b. Pour les courtes portées, l'introduction des transpondeurs robustes désavantage le réseau translucide (sauf si leur prix est le même qu'un transpondeur classique). Avec l'incrémentation de la portée, dans un premier temps la pente du ratio est plus forte que dans le cas de référence ; autour d'un point d'optimum le ratio reste presque constant ; après, la courbe croît avec une pente moins forte que dans le cas de référence. La différence de la pente du ratio de la portée entre le cas de référence et le cas examiné est justifiée par l'indépendance du coût des transpondeurs en fonction de la portée. Par rapport au cas précédent, augmenter le surcoût des transpondeurs robustes implique un déplacement du point de minimum vers la droite : plus le prix associé à une régénération est élevé, plus la réduction du nombre de dispositifs OEO induit des économies et le surcoût lié aux plus longues portées doit dépasser des valeurs plus élevées pour causer la remontée du ratio.

L'introduction des transpondeurs robustes permet au cas translucide de s'imposer sur le cas opaque, uniquement si ces dispositifs sont utilisés dans les deux cas. Dans la situation contraire, les transpondeurs robustes n'introduisent des avantages que pour des portées autour de la portée optimale et aucun surcoût par rapport à des transpondeurs classiques (gain de 4%).

5.5.2 OPM économiques

En figure 5.5.b le prix des dispositifs dédiés aux nœuds est plus élevé dans le réseau translucide par rapport au cas opaque et augmente avec la portée. La moitié du coût de ces dispositifs est causée par les OPM_Nœuds. Nous voulons rechercher dans cette section l'impact de ces dispositifs si l'OPM utilise une technologie différente. Différents systèmes tout optiques pour la surveillance de la performance des signaux sont disponibles à l'heure actuelle ; ils ne sont pas capables de fournir autant d'informations que les systèmes opaques, mais une sélection de certaines informations estimées suffisantes pour permettre un fonctionnement correct du réseau, [Meflah 2005]. Compte tenu de la moindre complexité de ces dispositifs il est probable que leur coût soit moins cher que la solution choisie initialement (transpondeur). Dans cette section l'OPM employé dans les nœuds hybrides est du même type que celui utilisé dans les DGE², c.f. section 3.1.3. L'évolution des coûts est présentée en figure 5.12. Un comportement similaire à celui en figure 5.3.b est observé, avec des valeurs légèrement plus faibles, surtout pour des portées les plus élevées car l'OPM choisi dans le modèle initial a un prix qui augmente de façon quadratique avec la distance contre un prix constant dans cette section. Le point de minimum est du même ordre que celui obtenu utilisant l'hypothèse sur le modèle de coût précédent (d'un gain de 2% pour une portée de 5 nœuds traversés à 4%).

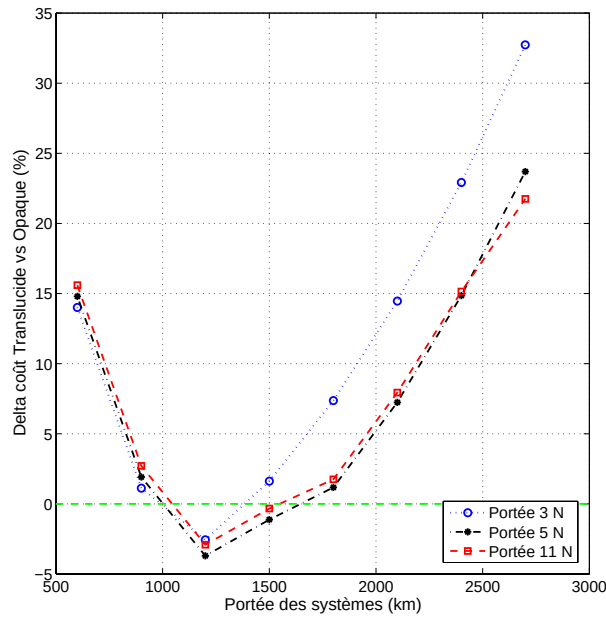


FIG. 5.12 – Comparaison du coût du réseau translucide versus opaque avec l'utilisation de OPM dans les nœuds du même type que celui présent dans les DGE.

La technologie liée aux OPM n'affecte pas beaucoup le prix total du réseau translucide pour les hypothèses de prix considérées.

²Ce type d'OPM a été baptisé par les gens qui ont participé aux discussions sur les besoins particuliers relatifs à un réseau transparent 'OPM Charbonnier', en l'honneur de Benoît Charbonnier qui a proposé et justifié l'utilisation des dispositifs de surveillance tout-optique sans recourir aux conversions OEO.

5.5.3 Baisse de la pente des prix pour les systèmes de très longue portée

Dans les courbes des sections précédentes, nous observons la forte croissance des prix en fonction des portées des systèmes. Nous explorons ici plusieurs modèles de coûts pour les systèmes qui ont une croissance moins élevée. Nous avons représenté en figures 5.13.a, 5.13.b, 5.13.c, 5.13.d les situations suivantes :

1. l'évolution du ratio du prix du réseau translucide comparé au réseau opaque quand le surcoût des systèmes ULH par rapport aux ELH est le même que le surcoût de ces derniers par rapport aux systèmes LH, c'est-à-dire que les systèmes dépendants de la portée en kilomètres suivent un modèle linéaire ;
2. l'évolution du ratio quand la portée en nœuds n'a pas d'incidence sur le prix des systèmes ;
3. l'évolution du ratio pour les deux hypothèses précédentes simultanément ;
4. l'évolution du ratio lorsque les systèmes ULH ont une évolution comme dans 1) et les systèmes des nœuds ont une complexité réduite (OPM_nœuds économiques et systèmes dédiés aux nœuds transparents plus économiques).

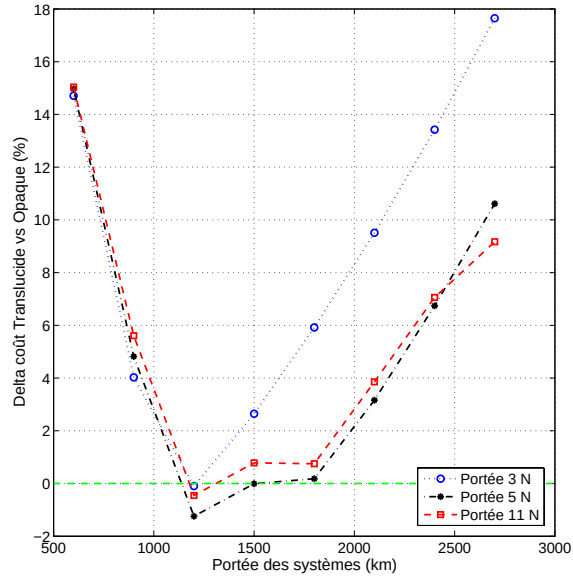
Nous remarquons que par rapport à la courbe de référence (figure 5.3.b), nous avons dans le premier cas une croissance des prix plus douce pour les très longues portées mais qui ne change pas le ratio optimum. En effet, dans l'exemple sélectionné, la portée optimale est de type ELH. Une baisse des tarifs ULH ne peut donc pas modifier ni le ratio optimum ni la portée optimum. Cependant elle permet d'avoir une zone de minimum plus ouverte.

Dans le deuxième cas les systèmes à 5 et 11 nœuds ont des performances quasiment identiques et meilleures que les systèmes à 3 nœuds. Cela provient de la distribution des connexions en termes de portée en km et de nombre de nœuds. En dessous de 700 km toutes les connexions ont moins de 3 nœuds : les 3 catégories de systèmes donnent un résultat identique. Jusqu'à 2 100 km, toutes les connexions ont moins de 5 nœuds, donc les systèmes à 5 nœuds et à 11 nœuds donnent un ratio identique, alors que les systèmes à 3 nœuds imposent d'avoir un nombre de régénérateurs plus élevé. Au-delà de 2 100 km, il existe des connexions à plus de 5 nœuds, d'où le meilleur ratio donné par les systèmes à 11 nœuds. Notons dans ce cas particulier que cette hypothèse ne change pas non plus la portée optimale, ni le ratio minimum.

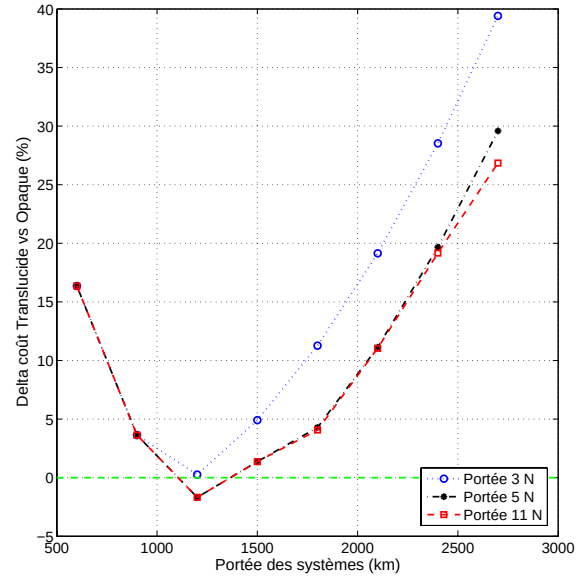
Dans le cas c), les systèmes réduisent leurs prix en fonction des deux portées en nœuds et en km. Le résultat total est donné par une combinaison des courbes 5.13.a et 5.13.b.

Ces trois résultats montrent que pour le réseau et le trafic donnés les systèmes de très longue portée n'introduisent aucun avantage et que pour avoir un impact, il faudrait une réduction du rapport de prix entre les systèmes LH et ELH, comme le montrait aussi de l'étude sur l'évolution des prix dans le temps.

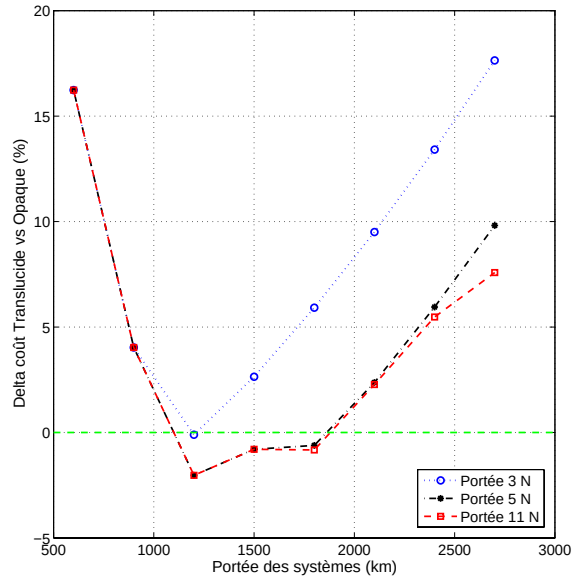
Si la complexité des nœuds est réduite et les coûts des systèmes de très longue portée diminuent aussi (5.13.d), le réseau translucide, qui doit son surcoût à ces deux facteurs conjointement, devient plus avantageux que le réseau opaque de 5%. La réduction de la complexité des nœuds réduit considérablement la différence de prix entre les deux réseaux pour les courtes portées.



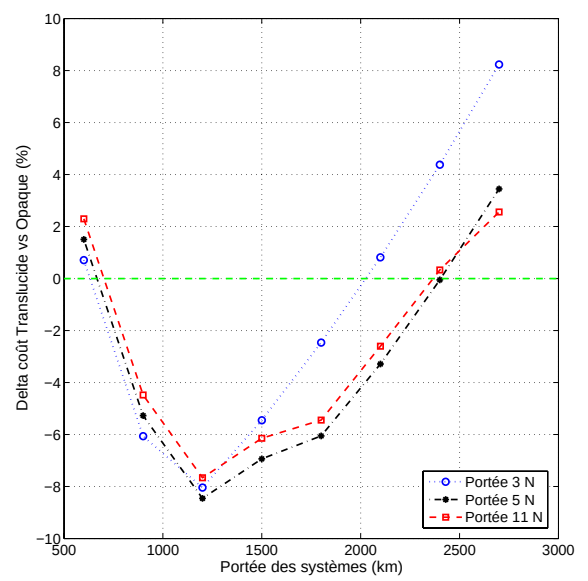
(a) ULH moins chers.



(b) Prix indépendants de la portée en nœuds.



(c) Les deux hypothèses précédentes.



(d) ULH et de nœuds moins chers.

FIG. 5.13 – Comparaison prix réseau translucide et opaque pour différentes caractéristiques de systèmes.

5.6 Evolution des architectures des nœuds opaques

Nous avons dit au paragraphe 3.2 que la partie opaque d'un nœud peut être réalisée de la manière suivante :

- les transpondeurs et les ports opaques sont remplacés par les cartes colorées ; et
- un signal traversant un nœud peut être régénéré par un couple de transpondeurs contrapositionnés (ou éventuellement de cartes colorées) sans passer par la matrice électronique. Ce qui

supprime la possibilité de brassage.

Dans la suite nous évaluons la comparaison entre les deux réseaux hybrides et opaques pour ces deux architectures de nœuds.

5.6.1 Emploi de cartes colorées

Nous traçons en figure 5.14 l'évolution du rapport des prix quand des cartes colorées sont introduites ; la comparaison entre les réseaux est représentée pour différents coûts associés à la carte colorée. Pour simplifier la représentation nous traçons les courbes pour une portée en nœuds égale à 5.

Puisqu'à l'heure actuelle les cartes colorées ne sont pas disponibles commercialement, nous exprimons leur coût en faisant référence au coût des transpondeurs actuels auquel un surcoût x est ajouté ; nous varions x de 0 à 100% avec un pas de 10%.

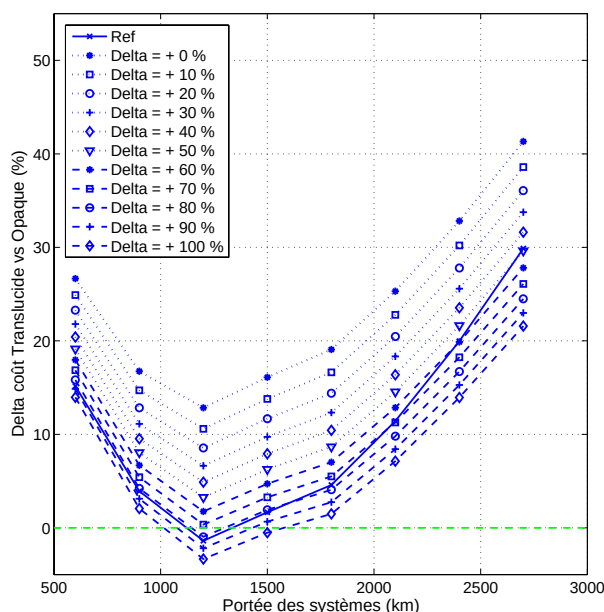


FIG. 5.14 – Evolution des prix des deux types de réseaux pour l'introduction de cartes colorées à la place de transpondeurs et ports opaques.

Nous remarquons que l'utilisation de cartes colorées à la place des transpondeurs et des ports opaques est avantageuse pour le réseau de type opaque par rapport à l'opaque de référence pour un surcoût de la carte inférieur à 70% du prix des transpondeurs. Et comme nous l'avons vu dans la section sensibilité, cela favorise les réseaux opaques par rapport aux réseaux translucides, grâce à la réduction du prix des opérations associées à l'insertion/extraction d'un signal de la matrice électronique. Ainsi une opération optoélectronique effectuée avec des cartes colorées est plus avantageuse économiquement qu'une opération effectuée avec un couple transpondeur plus un port opaque quand le surcoût des cartes colorées est inférieur à 70% du prix d'un transpondeur.

Cette condition équivaut à l'inégalité 5.1.

$$Cout_{cc} < Cout_{TSP_{LH}} + Cout_{PO} \rightarrow (1+x)cu < (1+0,7)cu \quad (5.1)$$

Avec cu le coût unitaire de référence (TSP_{LH}), x le surcoût de la carte colorée sur le transpondeur LH.

La pente liée à la courbe du ratio change avec l'augmentation du surcoût des cartes. Pour des faibles surcoûts, une régénération avec des cartes colorées est moins chère que celle effectuée avec des transpondeurs et des ports opaques, donc la réduction de leur nombre induit des économies moins importantes. Pour cette raison la pente du rapport de prix est plus faible que celle de la courbe de référence.

Si le prix des cartes colorées augmente, baisser le nombre de régénérateurs apporte plus d'économies pour le réseau translucide par rapport au réseau opaque pour des courtes portées. Donc nous avons une pente plus forte et pour un surcoût des cartes colorées supérieur à 70%, la pente du ratio de coût est plus grande que celle de la courbe de référence. Si la portée est supérieure à l'optimale, la pente de la courbe de référence est plus grande ; en effet, le prix d'une opération optoélectronique ULH, normalisée sur le prix correspondant LH, est plus important quand un transpondeur plus un port opaque est utilisé que celui d'une carte colorée normalisée sur le coût d'une carte colorée LH. Il en résulte qu'en augmentant la portée, le rapport entre les deux réseaux a une pente plus douce quand des cartes colorées sont employées et l'équivalence entre ces deux scénarios (cartes colorées et transpondeurs plus ports opaques) est obtenue pour des valeurs de surcoût plus réduites lorsque la portée augmente : d'un surcoût de 70% pour une portée de 600 km à un surcoût de 50% pour une portée de 2 700 km.

L'introduction de cartes colorées dans le réseau défavorise le réseau translucide puisque cela rend les opérations optoélectroniques moins coûteuses (sauf pour un surcoût de la carte par rapport au transpondeur classique supérieur à 70%).

5.6.2 Absence de matrice de brassage

Dans la section 3.2.4 nous évoquons un nœud ne possédant pas la fonction de brassage ; nous comparons les réseaux opaques et translucides ne possédant pas cette fonction : l'utilisation des matrices électroniques est cantonnée à l'insertion et extraction des signaux.

Enlever cette fonctionnalité apporte des avantages plus importantes pour le réseau translucide car un des surcoûts de ce scénario est lié à la matrice OXC ajoutée dans chaque nœud et aux ports optiques. L'introduction de la transparence (portée 600 km) rend le réseau translucide plus économique vis-à-vis du réseau opaque de 2%, contre une augmentation de 15% si le brassage photonique est employé, figure 5.15.

Dans un réseau opaque, l'absence de brassage des canaux en transit se traduit par l'utilisation de matrices électroniques de taille plus petite et l'absence de ports opaques associés aux opérations de régénérations des signaux en transit dans les nœuds. Par construction, les matrices EXC et ces ports opaques sont présents de la même manière (quantité et taille) dans les deux réseaux étudiés. Si nous comparons le nombre de ressources qui ne sont plus utilisées, à cause de l'absence du brassage, et leur prix associés, nous remarquons que les économies effectuées dans le réseau opaque sont moins importantes que celles réalisées dans le cas translucide, comme montre la figure 5.15 avec la comparaison entre les prix totaux du réseau. Le point de minimum est obtenu

pour une portée plus faible par rapport au cas de référence (avec brassage) parce qu'ayant moins de surcoûts à compenser (diminution de la complexité du nœud hybride), une réduction plus faible sur le nombre de transpondeurs est requise pour compenser le surcoût lié à la transparence et le gain total passe de 1% (cas de référence) à 8%.

Le comportement du réseau avec l'augmentation de la portée est le même que dans le cas de base. La transparence avec des nœuds ainsi conçus, permet des économies par rapport à un réseau opaque si la portée des systèmes est inférieure à 1 700 km.

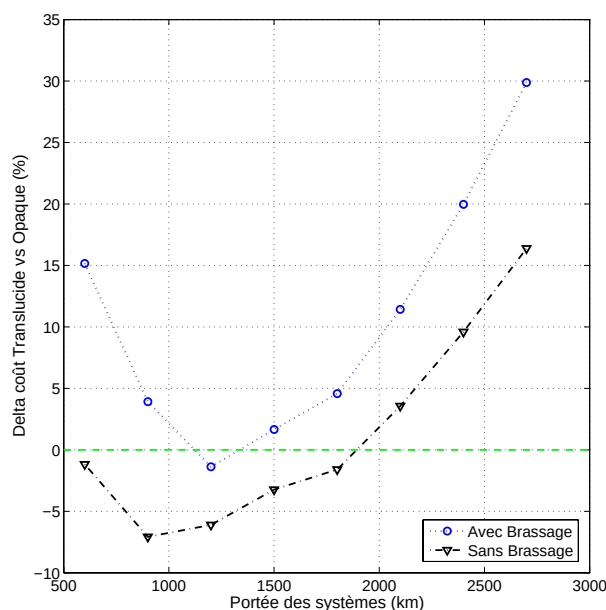


FIG. 5.15 – Comparaison du rapport de prix entre réseaux translucide et opaque pour un nœud avec et sans matrice de brassage.

5.7 Evolution des architectures des nœuds hybrides

Un nœud hybride peut se réaliser avec diverses architectures de matrice de brassage (c.f. section 3.2) et/ou la réalisation des régénérations optoélectroniques. Dans cette section nous effectuons les comparaisons suivantes :

- le nœud hybride réalisé avec une matrice optique et une matrice électronique pour les opérations d'insertion/extraction et une batterie de régénérateurs utilisés pour la régénération des signaux. Les régénérateurs peuvent être réalisés avec deux transpondeurs ou deux cartes colorées contraposées, ou bien avec des dispositifs dédiés (c.f. section 3.1.6).
- le brassage peut être réalisé ou avec une matrice à technologie MEMs, dispositifs déjà présents sur le marché, ou de façon intégrée où les fonctions de démultiplexage, brassage et multiplexage sont effectuées en même temps (réalisation avec des technologies WSS). Les nœuds réalisés avec une technologie intégrée peuvent être des (R-)OADM si le degré de connectivité du nœud est égal à 2 ou des brasseurs à WSS, pour tout degré du nœud. Les

comparaisons présentées sont effectuées avec un réseau complètement opaque et un réseau translucide employant les deux types de nœuds.

Le dimensionnement est fait avec une portée en nœuds égale à 5 et en faisant varier la portée en kilomètres.

5.7.1 Etude d'une architecture de nœud hybride avec une batterie de régénérateurs

Nous présentons en figure 5.16 la comparaison entre le cas de base pour lequel le réseau translucide avec un nœud hybride utilise pour la régénération la matrice électronique et trois cas de réseaux translucides utilisant une batterie de dispositifs OEO. Le réseau opaque est le même pour le cas de base et celui étudié ici (sans batterie de régénérateurs). Les dispositifs OEO peuvent être réalisés par deux transpondeurs (TSP B2B) ou des cartes colorées dos-à-dos (CC B2B), ou par un dispositif dédié. Le prix associé à la carte colorée est fixé à 1,15 fois le prix d'un transpondeur de base ([Bodamer 2006]); le prix d'un régénérateur dédié (c.f. section 3.1.6) est supposé être 1,5 fois le prix du transpondeur de base, de façon arbitraire. L'utilisation de transpondeurs dos-à-dos rend le réseau translucide légèrement plus avantageux

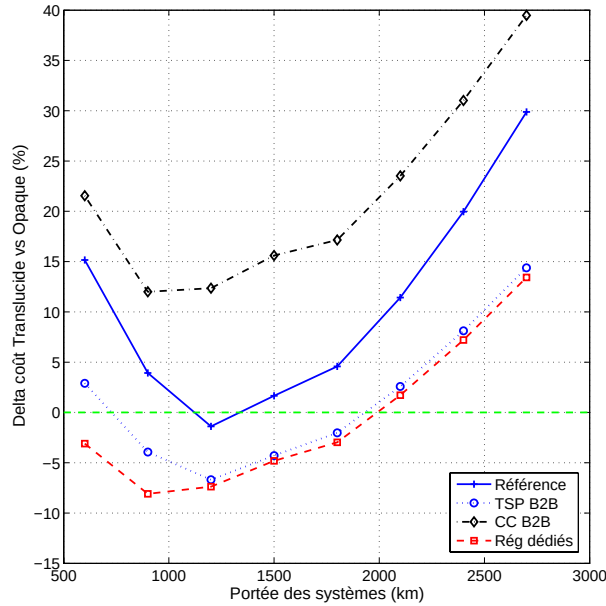


FIG. 5.16 – Introduction de dispositifs de régénération dédiés.

par rapport à l'étude de base (c.f. figure 5.3.b), la portée optimale est plus petite car le prix lié à une régénération est plus faible dans le cas du réseau translucide et les matrices EXC utilisées sont plus petites. Dans le cas d'un régénérateur réalisé par un couple de cartes colorées la baisse du coût du réseau translucide est bien plus faible que la baisse du coût du réseau opaque, si bien que le rapport translucide sur opaque augmente de façon importante par rapport au coût de base. Dans ce cas, l'économie provenant de la diminution de la taille des matrices EXC par rapport au cas de la section (carte colorée) a un impact sur le rapport de coût des deux réseaux davantage

visible pour les longues portées. L'utilisation de dispositifs dédiés induit, elle, une baisse des coûts du transluide qui est légèrement supérieure à l'emploi des transpondeurs dos-à-dos ; cette baisse est plus visible pour les courtes portées pour les quelles le réseau requiert plus de régénérations. De la figure 5.16 nous déduisons aussi que si le coût des dispositifs dédiés à la régénération est deux fois celui des transpondeurs, alors les deux courbes coïncident ; si leur prix est le même que celui des transpondeurs il suffit de doubler l'écart entre les deux courbes. Il est ainsi possible d'estimer les économies obtenues avec l'introduction de dispositifs dédiés à la régénération en fonction de leur surcoût par rapport aux transpondeurs.

Réduire la taille des matrices EXC avec l'emploi de batteries de régénérateurs rend le réseau transluide légèrement plus avantageux par rapport au cas de référence (sauf pour l'emploi de cartes colorée). L'utilisation de dispositifs dédiés à la régénération introduit des avantages par rapport à l'utilisation de deux transpondeurs dos-à-dos seulement si le nombre de régénérations pour une portée donnée est élevé.

Pour l'étude menée, réduire la flexibilité des ports dédiés à l'insertion/extraction et à la régénération n'introduit pas des avantages qui puissent justifier ce choix d'architecture. Ce résultat est lié au trafic étudié où 50% des demandes est entre des nœuds adjacents et pour le 25% de demandes il y a la réduction d'une seule régénération par rapport au cas opaque, c.f. figure 5.4.

5.7.2 Etude d'une architecture de nœuds présentant des OADM et des WSS

Jusqu'à présent nous avons utilisé pour la réalisation d'un nœud transparent la technologie MEMs. Nous faisons maintenant les études suivantes :

- substitution de R-OADM à des nœuds avec MEMs quand le degré de connectivité est égal à deux ;
- substitution de la technologie WSS à la technologie MEMs pour tous les nœuds indépendamment de leur degré de connectivité.

Les OADM sont utilisés dans les nœuds de degré deux qui constituent 25% des nœuds dans le réseau considéré. La catégorie d'OADM utilisée comprend les fonctions suivantes : opération de sélection des longueurs d'onde à extraire/insérer du réseau, amplification des canaux (en transit et extraits), multiplexage et démultiplexage des canaux destinés aux interfaces opaques, système de contrôle de la qualité du signal et égaliseur de gain. Un nœud réalisé par un R-OADM est en moyenne 50% (en fonction du nombre de sorties du R-OADM) moins cher que celui obtenu par une matrice MEMs. En comparant le coût total du réseau obtenu avec les deux architectures de nœuds, utiliser des R-OADM permet des économies qui atteignent 10% avec des transpondeurs classiques et un peu plus de 2% avec des cartes colorées (figure 5.17).

La technologie simple des R-OADM rend un nœud hybride de degré de connectivité deux moins cher que celui réalisé avec une technologie MEMs, son emploi dans le réseau est avantageux pour les réseaux translucides.

L'introduction de la technologie WSS pour la réalisation d'un brasseur transparent peut permettre un avantage économique en fonction de la charge du nœud. Plus précisément, le rapport de coût entre un nœud réalisé par des modules WSS et un réalisé avec une matrice MEMs dépend de deux facteurs :

1. le degré de connectivité du nœud (le prix du nœud à WSS est proportionnel au nombre de liens joignant le nœud).

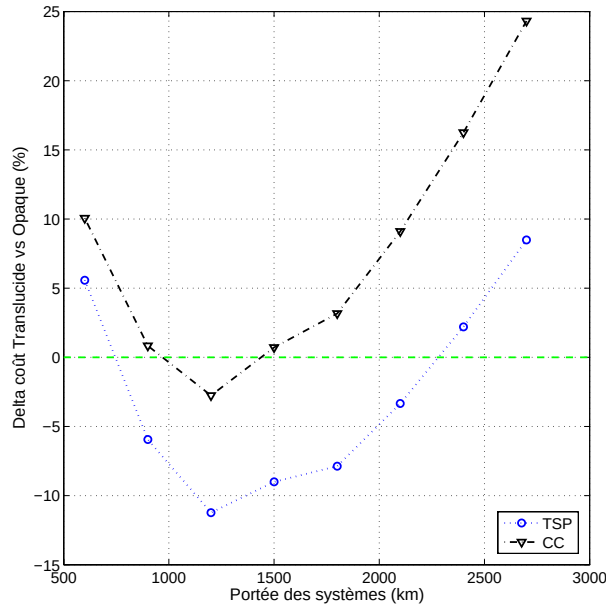


FIG. 5.17 – Rapport de prix entre les deux réseaux pour l'emploi d'OADM dans les nœuds de degré 2 avec l'hypothèse classique et avec des cartes colorées.

2. le nombre de canaux arrivant sur le nœud (le prix d'une matrice MEMs dépend du transit, alors qu'il ne dépend pas du transit pour un brasseur à WSS).

En figure 5.18 nous comparons les prix des deux types de nœuds en fonction de ces deux paramètres ; si le remplissage des fibres est inférieur à 10 longueurs d'onde par fibre, un nœud réalisé avec des MEMs est plus avantageux que celui réalisé avec des WSS pour un nœud ayant un degré de connectivité inférieur à 4. Si le taux d'occupation des fibres augmente, l'avantage d'un nœud WSS devient de plus en plus évident. Cette inversion de tendance est liée à l'indépendance du prix d'un WSS vis-à-vis de la charge de la fibre, condition non vérifiée pour un nœud réalisé avec la technologie MEMs (besoin de matrices plus grandes et d'un nombre plus grand de ports optiques).

La moyenne de remplissage des fibres pour ce scénario est de 13 canaux par fibre ; comme le prix d'un nœud à base de MEMs est une fonction linéaire de sa charge, pour cette valeur, un nœud réalisé avec des WSS est plus avantageux que celui réalisé avec des MEMs.

Ainsi, sur cet exemple, l'utilisation de nœuds réalisés avec des brasseurs sélectifs en longueur d'onde donne des résultats bien plus avantageux par rapport à l'utilisation d'une matrice MEMs, figure 5.19. Même pour des faibles portées (600 km), le cas translucide présente des gains de presque 10% sur le réseau opaque avec des transpondeurs classiques. L'emploi de cartes colorées donne des résultats similaires à ceux des transpondeurs pour des portées courtes, pour après réduire les économies par rapport au cas opaque quand la portée des systèmes augmente. Un nœud réalisé avec des WSS étant plus économique qu'un nœud à MEMs, leur surcoût est plus aisément compensé. Vu le faible remplissage moyen des fibres, et compte tenu des considérations précédentes, il est probable qu'incrémenter le trafic dans le réseau augmente encore la différence de coût entre les architectures précédentes en faveur du cas translucide.

Avec le modèle de coût choisi, un nœud de degré deux réalisé avec un ROADM n'est plus économique que si il est réalisé avec la technologie WSS (en considérant les données du tableau 5.5,

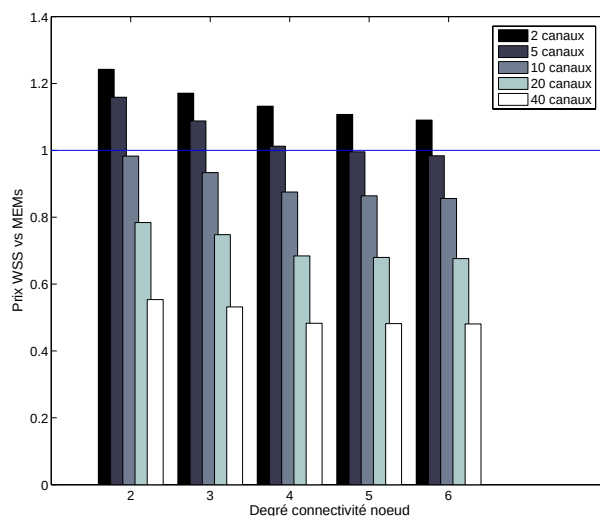


FIG. 5.18 – Comparaison des prix d'un noeud réalisé en technologie WSS vis-à-vis de celui réalisé en technologie MEMS.

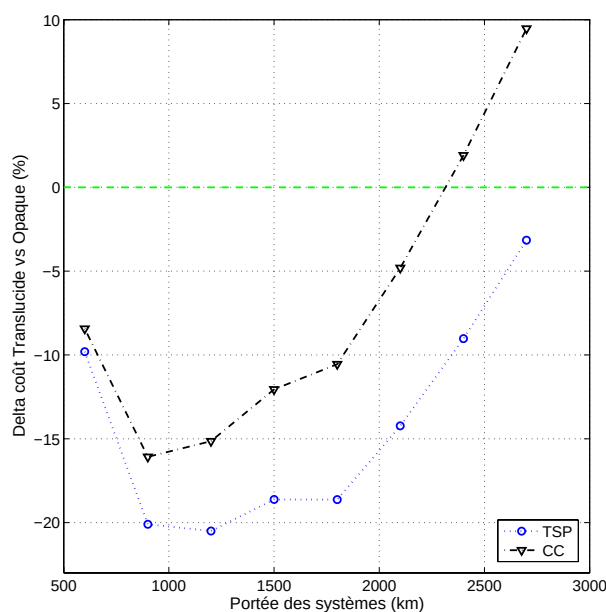


FIG. 5.19 – Rapport de prix entre les deux réseaux pour l'emploi de WSS dans tous les nœuds avec des transpondeurs classique ou des cartes colorées.

par nœuds nous avons une différence de 25 à 50% en fonction de la charge dans le nœud). Donc si le nombre de nœuds de degré deux augmente, la substitution de ces nœuds par des R-OADM sera encore plus intéressante économiquement. Sachant que les brasseurs à WSS ne sont pas encore un produit disponible, d'un point de vue des constructeurs, ce serait aussi un argument pour faire en sorte de caler le prix des R-OADM à base de WSS sur celui des ROADM actuels. A partir de ces considérations, le meilleur scénario vis-à-vis de la transparence prévoit l'utilisation de R-OADM dans un nœud de degré 2 et de WSS dans les autres.

5.8 Impact de la protection

Les demandes écoulees dans un réseau peuvent être non protégées (hypothèse menée jusqu'ici) ou protégées (c.f. section 2.2.5). Le trafic total, en général, est composé par ces deux types de demandes (en fonction de la qualité de service demandée).

Sans une connaissance *a priori* du pourcentage de demandes nécessitant la protection, ni des demandes pour lesquelles elle est requise, nous étudions la protection sur toutes les demandes. De cette manière nous connaissons l'avantage d'un réseau vis-à-vis de l'autre pour deux situations extrêmes. Le comportement réel se trouvera dans la fourchette ainsi obtenue.

Pour le type de protection considéré (1+1) le réseau doit être dimensionné pour satisfaire un nombre de demandes deux fois plus grand que celui de la matrice de départ. La distribution des demandes sera différente par rapport à celle de départ car les parcours de protection doivent être disjoints par rapport aux parcours principaux et parce que la recherche des parcours est faite suivant le plus court cycle. La distribution des parcours en termes de kilomètres et de nœuds parcourus est affichée en figure 5.20 ; cette distribution est comparée avec celle dans le cas sans protection.

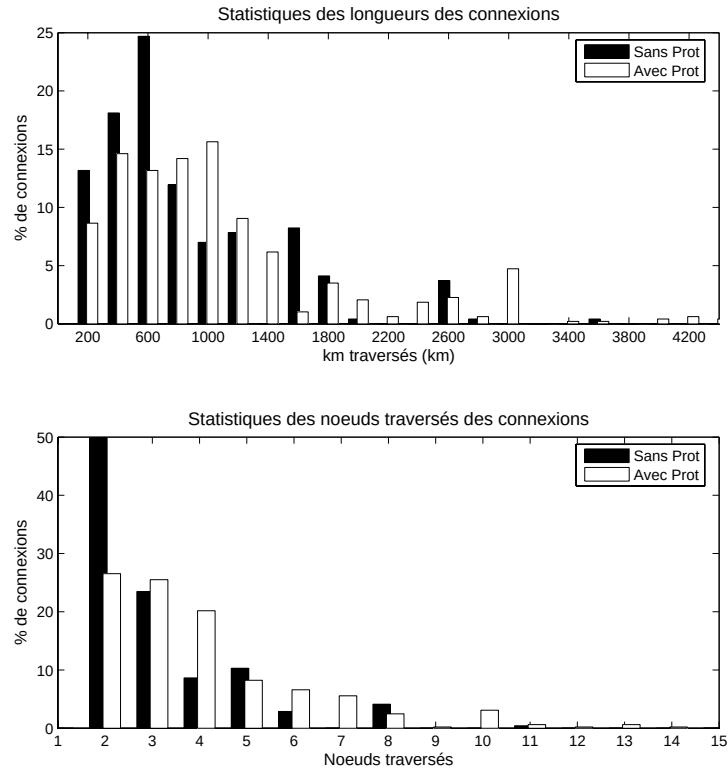


FIG. 5.20 – Distribution des parcours en kilomètres et nœuds traversés pour un trafic sans et avec protection.

Par rapport au cas non protégé, il est possible de noter que le nombre de parcours à deux nœuds est divisé de moitié, donc l'économie en transpondeurs du scénario hybride sur le scénario opaque est plus importante dans ce cas par rapport au cas non protégé. La figure 5.21 montre

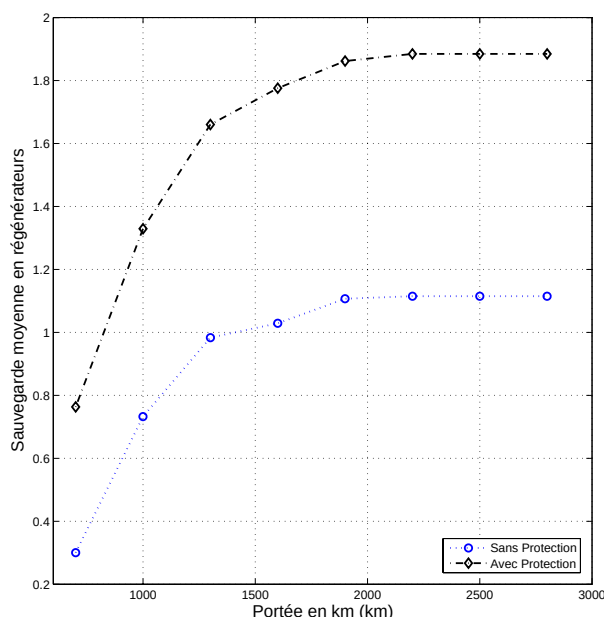


FIG. 5.21 – Rapport de transparence obtenu pour le dimensionnement de la matrice de trafic sans et avec protection.

une comparaison sur la réduction du nombre total de transpondeurs requis dans les deux cas, en fonction du nombre moyen de régénérateurs économisés dans une liaison. Ce nombre est obtenu par le rapport de la différence entre le nombre total de transpondeurs requis dans le cas opaque et dans le cas translucide sur le nombre total d'insertion/extraction des demandes. Le résultat donne le nombre moyen de régénérateurs économisés par parcours (ou de paires de transpondeurs). Si ce rapport est égal à zéro, alors le réseau est opaque. Nous observons qu'augmenter la portée apporte plus d'économies sur le nombre de régénérateurs pour le cas avec protection dès les plus courtes portées. De la figure 5.20 nous comprenons que cette réduction est strictement liée à la distribution des parcours. Le nombre de régénérateurs économisé pour 2 700 km est de 1,2 dans le cas sans protection et un peu plus de 2 dans le cas avec protection.

La comparaison de coût entre le réseau opaque et translucide est montrée en figure 5.22.a. Le réseau translucide est pour la plupart du temps (sauf pour de très courtes portées en kilomètres, $LH < 800$ km, et portée en nœuds égale à 3 avec des dispositifs ULH) plus économique que l'opaque ; cette économie atteint 13% pour une portée de 1 800 km. L'augmentation de la valeur de la portée optimale des systèmes à employer dans le réseau translucide est expliquée par l'étalement de la distribution des parcours : ayant plus de parcours dépassant 1 000 km le compromis entre la réduction du nombre de transpondeurs nécessaires et le surcoût des systèmes ULH est obtenu pour des portées plus longues.

La figure 5.22.b montre l'évolution du rapport de coût entre les deux réseaux quand les prix appliqués aux dispositifs sont ceux prévus dans les 5 ans à venir (c.f. section 5.4.3). L'avantage des réseaux translucides est encore plus évident dans cette situation parce que si avec le modèle actuel le surcoût introduit par la transparence est compensé par la réduction de transpondeurs dès une portée de 800 km, réduire le surcoût des nœuds transparents plus que les autres systèmes

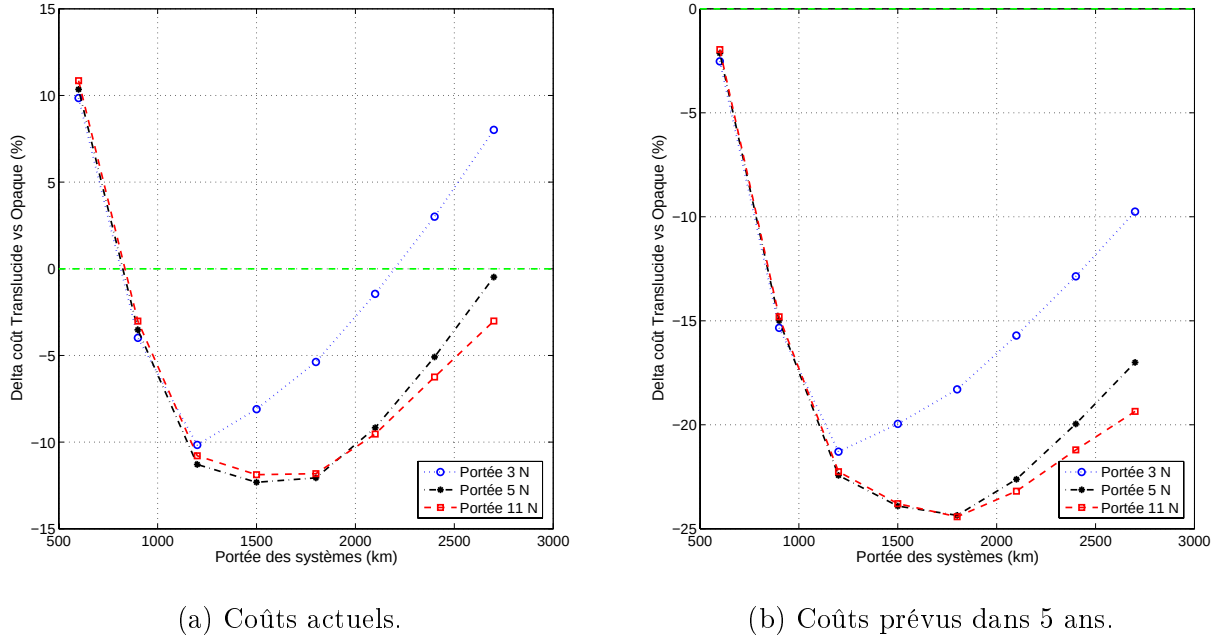


FIG. 5.22 – Comparaison de coûts entre le réseau pour un trafic avec protection.

(hypothèse d'évolution dans le temps) ne peut qu'augmenter les avantages introduits par la transparence.

Les avantages introduits par la protection sont dus aussi à un meilleur partage des dispositifs transparents, appartenant aux nœuds et aux liens quand le trafic augmente [Morea 2004a]. Les études sur les évolutions des prix des systèmes effectuées pour le cas non protégé donnent des résultats similaires quand la protection des demandes est effectuée. Le point de minimum est accentué sur des portées plus élevées, car les systèmes ULH subissent des réductions des prix plus importantes que les systèmes (E)LH, (tableau 5.3).

5.9 Impact de la matrice de trafic

5.9.1 Impact de la distribution du trafic

Pour justifier les affirmations précédentes expliquant la raison de la variation du rapport de prix entre le réseau translucide et opaque (distribution des connexions et partage des ressources transparentes), nous considérons les matrices de trafic suivantes :

- de type uniforme (comme celle utilisée pour les études sur la faisabilité physique des parcours dans le chapitre 4) ;
- de type aléatoire, obtenue en supposant que toutes les demandes possibles dans le réseau sont équiprobables et le volume de la matrice est le même que celui du cas uniforme ; et
- la matrice de trafic de base multipliée par un facteur (égal à 4, ici) tel que la matrice en résultant ait un volume proche à celui des matrices précédentes.

Les résultats de la comparaison sont montrés en figure 5.23.a et montrent le rapport de prix pour la portée en kilomètres variable et la portée fixée à 5 nœuds. Comme attendu, l'augmentation

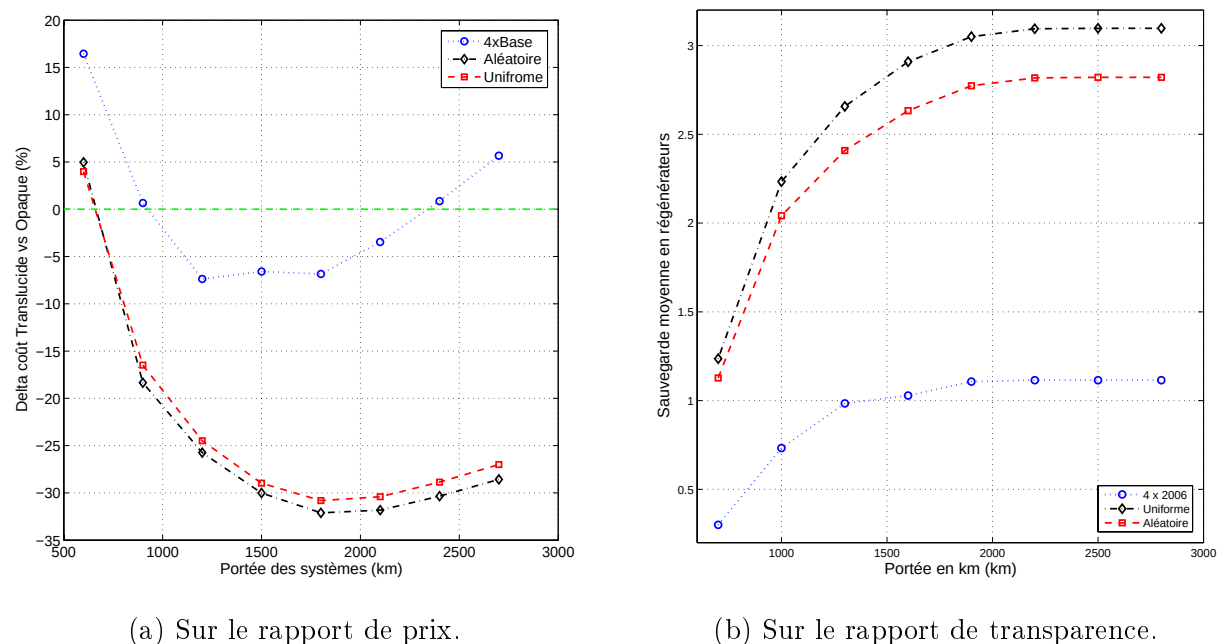


FIG. 5.23 – Impact de la distribution du trafic.

du volume de trafic pour le cas de base a permis une baisse de prix légèrement plus forte grâce au partage des ressources installées dans le réseau. Le point de minimum est obtenu pour la même portée en kilomètres car la distribution des parcours n'a pas changé. Les gains d'investissement liés à un réseau translucide passent finalement de 2 à 6%.

Le dimensionnement obtenu avec des matrices de trafic de type uniforme et aléatoire donne des résultats tout à fait avantageux pour le cas translucide : les économies sont supérieures à 10% sur presque toutes les portées. Le point de minimum est donné pour des systèmes ELH à 1 500 km.

La distribution des parcours montre qu'à la portée de 1 500 km correspondent 75% des connexions, la figure 5.24 montre la distribution des connexions pour les trois types de trafic. Aussi pour ce cas de figure nous avons tracé le nombre moyen de régénérateurs économisés pour les trois trafics, figure 5.23.b. Encore une fois, nous remarquons que les économies liée à un réseau dépendent de la capacité d'économiser le nombre de transpondeurs et cette capacité est liée au nombre de nœuds traversés par les connexions.

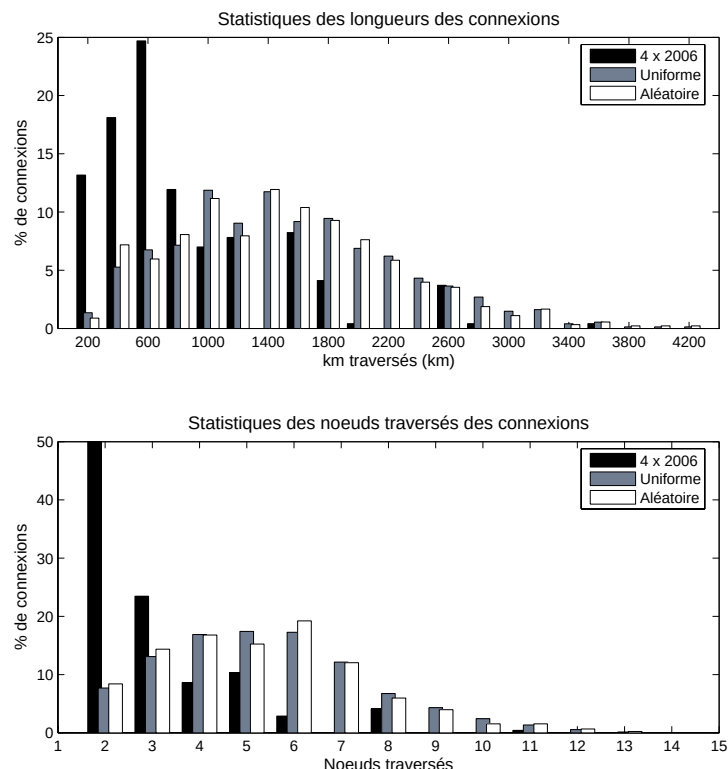


FIG. 5.24 – Rapport de transparence obtenu pour le dimensionnement de la matrice de trafic sans et avec protection.

5.9.2 Etude générique

A ce point de l'étude nous nous posons les questions suivantes :

1. Existe-t-il une loi sur la portée optimale des systèmes à employer dans un réseau translucide ?
2. Et pour cette portée est-il plus avantageux que le réseau opaque ?

Pour y répondre nous avons considéré différents réseaux ayant comme caractéristiques :

- degré de connectivité moyen égal à 3 (typique de la plupart des réseaux maillés, [Morea 2004a], [Verbrugge 2005]) ;
- longueur moyenne des liens du réseau égale à : 200 (R1), 300 (R2) et 600 km (R3).
- nombre de nœuds variable entre 10 à 40 avec un pas de deux.

Pour chaque réseau considéré nous avons calculé les parcours entre tous les nœuds en utilisant l'algorithme de Dijkstra, [Dijkstra 1959]. La longueur de chaque parcours se situe entre une valeur minimale L_{min} et une valeur maximale L_{max} . Puis, nous avons défini trois classes de distances en partageant en trois l'intervalle $[L_{min}; L_{max}]$. Après nous avons défini des scénarios de répartition de trafic en fonction des longueurs en associant à chaque classe la probabilité qu'une demande de la matrice de trafic à créer tombe dans cette classe. Les valeurs *a priori* sont : 0, 0,25, 0,33 ou 0,50.

Le nombre total de demandes dans chaque matrice de trafic est donné par le nombre de nœuds qui composent le réseau multiplié par 10.

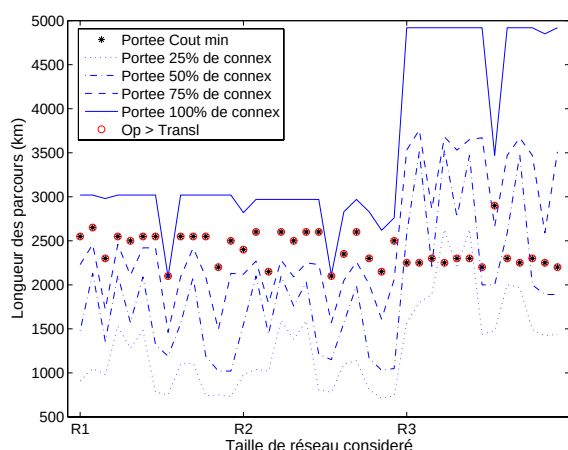
Les matrices de trafic associées à chaque réseau sont définies en associant aux trois classes les diverses combinaisons de probabilités telles que leur somme donne '1'. Les demandes appartenant à chaque classe sont extraites par une fonction aléatoire en affectant à chaque demande une probabilité uniforme.

Avec ce critère nous générons pour un réseau les situations suivantes : une matrice de trafic avec la distribution uniforme des longueurs des parcours (cas de toutes les probabilités des classes égale à 0,33) ou non uniforme (distributions plus concentrées vers les courts ou bien les longs parcours).

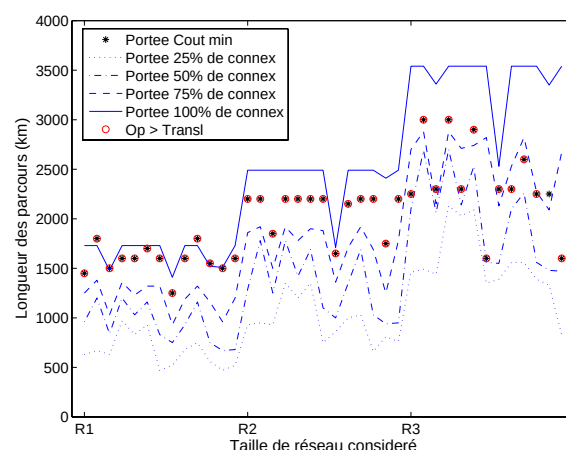
Pour chaque matrice de trafic nous estimons la portée pour laquelle le coût total du réseau est le plus faible ; ce coût est comparé avec le coût obtenu dans un cas opaque.

Les figures 5.25.a, 5.25.b et 5.25.c montrent, comme exemple, les résultats obtenus pour trois tailles de réseaux : 40, 20 et 12 nœuds. Avec R1, R2 et R3, nous indiquons le début des résultats relatifs à un réseau avec longueur moyenne de liens fixée.

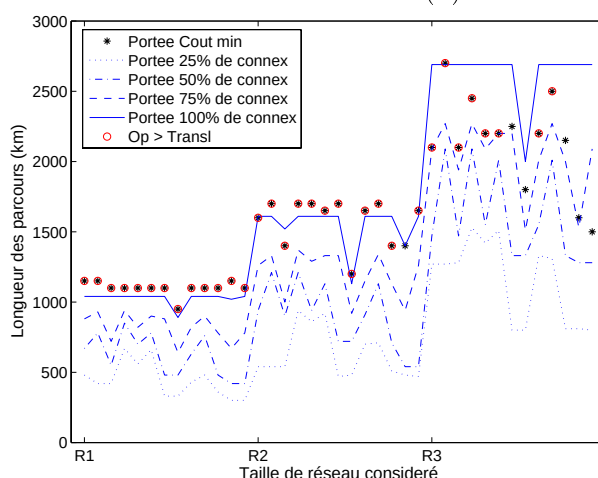
Dans les figures nous indiquons la distribution de la longueur des connexions associée à chaque



(a) Pour un réseau à 40 noeuds.



(b) Pour un réseau à 20 noeuds.



(c) Pour un réseau à 12 noeuds.

FIG. 5.25 – Portée optimale en fonction de la taille du réseau et de la distribution des demandes.

matrice de trafic. Avec des étoiles nous indiquons la portée optimale et si les étoiles sont entourées par des ronds, alors le réseau translucide est plus économique que le réseau opaque.

Des résultats obtenus, nous déduisons que pour un réseau de taille comparable à celui étudié (40 nœuds) et avec la même longueur moyenne des liens (200 et 300 km), la portée optimale a une longueur supérieure à celle de 75% des connexions pour la plupart des matrices de trafic. Pour des réseaux dont la longueur moyenne des liens est plus élevée, comme le compromis entre le surcoût des systèmes et le nombre des transpondeurs (ou degré d'opacité du réseau) est le même alors que les parcours sont de taille plus grande, la portée optimale correspond dans ce cas à une portion plus petite des connexions, entre 25% et 50% des connexions.

Pour un réseau de 20 nœuds, le comportement de la portée optimale en fonction de la topologie et du trafic est le même que pour le cas précédent pour les réseaux R1 et R2, pour des liens plus longs la portée optimale est pour des portées de l'ordre de la longueur relative à 50 ou 80% des connexions. Lorsque la taille du réseau est encore réduite (12 nœuds), la longueur des connexions se réduit également, si bien que la majorité des connexions peut être établie sans besoin de régénération. Si aucune des demandes ne dépasse pas 2 000 km, alors un réseau complètement transparent semble être envisageable. Augmenter la longueur des liens, donc la longueur totale des connexions, signifie choisir une portée optimale qui est autour du 80% des connexions.

Cette étude générique nous donne des résultats valables uniquement pour le modèle de coût utilisé. Si les systèmes ULH baissent leur prix, alors le point de minimum tend à bouger vers les portées de plus en plus longues : le cas limite correspond à un prix identique pour tous les systèmes. et la portée optimale sera celle relative à la transparence totale du réseau.

5.10 Considérations sur l'OPEX

5.10.1 Définition de l'OPEX

Comme dit en introduction de ce chapitre, le coût total d'un réseau est composé en partie par les coûts d'investissement (ou CAPEX), liés à l'achat et à l'installation des dispositifs constituant le réseau, et par les coûts liés au fonctionnement du réseau (OPEX).

Il n'est pas possible d'établir avec exactitude la deuxième partie de ces coûts si le réseau n'est pas installé, car il n'est pas possible de connaître les coûts associés à la consommation électrique ou à la manutention³. Nous ne pouvons pas non plus prévoir les études d'exploitation et de développement qui dépendent des caractéristiques du réseau (naissance de nouveaux services, par exemple). Notre objectif dans cette section est de prédire dans les grandes lignes l'OPEX d'un réseau translucide en supposant que les coûts opérationnels mis en jeu se décomposent de la même manière que dans réseau opaque.

Pour faire ce type d'évaluation nous avons décomposé l'OPEX en sous-catégories :

1. une **taxe professionnelle** est payée par l'opérateur chaque année une fois qu'un produit a été acheté ; cette taxe dépend du coût des systèmes installés dans le réseau, partie directement proportionnelle au CAPEX ;

³La manutention dans un réseau comprend les interventions sur site et l'assistance technique qu'elles soient effectuées par des unités internes ou externes.

2. la **maintenance** du réseau, c'est-à-dire à la réparation du réseau quand une panne survient ou aux interventions préventives qui permettent d'éviter les défaillances du réseau, comportent des coûts pour l'opérateur. La maintenance est importante car elle assure le fonctionnement du réseau ;
3. l'**exploitation** du réseau, comprenant la mise à jour des logiciels propres aux systèmes, la modification de la configuration et la gestion du réseau ;
4. la **production**, comprenant la mise en service d'un nouvel équipement, du déploiement de nouveaux services qui sont liés aux caractéristiques du réseau, les éventuelles reconfigurations du réseau liées au déploiement des nouveaux services ;
5. les études de **planification**, programmation et pilotage, englobant tout le personnel chargé des études sur les nouveaux services et les évolutions des réseaux effectué par la branche R&D de l'opérateur ;
6. la **formation**, comprenant les coûts liés à la formation du personnel pour qu'il puisse connaître le fonctionnement propre des équipements du réseau. Chaque fois qu'un nouvel élément est inséré dans le réseau, une formation est nécessaire.

A partir de cette subdivision nous avons donné un poids à chaque sous-catégorie. En ce qui concerne l'OPEX induit, nous avons supposé que dans le cas d'un réseau transluide la proportionnalité avec le CAPEX est du même ordre que dans le cas d'un réseau opaque. Pour ce qui est des études d'évolution et de planification, nous supposons que les comparaisons entre les deux types de réseaux sont faites non dans la phase de migration mais dans un régime stabilisé. Ce choix est dû au fait que pendant la période de migration, le réseau transluide sera forcément plus cher que l'opaque à cause des formations du personnel sur les nouveaux équipements installés et sur le nouveau fonctionnement du réseau.

Mais après stabilisation, il n'y a aucune raison *a priori* de supposer que les coûts associés aux études de planification et d'évolution, à l'exploitation et production du réseau comme la formation du personnel soient différents pour les deux réseaux.

En résumé, si des avantages économiques entre les deux réseaux sont obtenus sur le CAPEX, par reflet il en aura aussi sur l'OPEX.

L'unique différence de coûts peut être supposée sur la manutention du réseau ; mais en même temps, ces coûts représentent environ le 10% du coût total de l'OPEX, donc l'avantage d'un réseau transluide vis-à-vis du réseau opaque ne dépend pas de ceux-ci. Les coûts de manutention sont généralement liés à l'indisponibilité et à la fiabilité du réseau.

5.10.2 Etude de fiabilité

La disponibilité mesure la capacité d'un opérateur à garantir un service à son client sans qu'il ait de coupures du service demandé (il est commun aussi de parler de son complément : l'*indisponibilité*). Différents facteurs sont déterminants pour estimer la disponibilité d'un réseau, comme la fiabilité des systèmes, la logistique de maintenance et la topologie du réseau, [Tornatore 2005].

Les systèmes ont une probabilité de défaillance propre, dépendant des conditions d'emploi et d'environnement, qui est fournie par la fiabilité [Titchmarsh 1994]. La fiabilité est exprimée par le taux de défaillance λ , dont l'unité la plus communément utilisée est le FIT (Failure in Time).

X FIT correspond à X pannes en moyenne pour 10^9 heures de fonctionnement.

Le temps moyen entre deux défaillances consécutives (MTBF, Mean Time Between Failure) est égal au temps moyen jusqu'à défaillance (MTTF, Mean Time To Failure), inverse du taux de défaillance, plus le temps moyen nécessaire à la remise en service d'un système (MTTR, Mean Time To Repair).

Le MTTR dépend de plusieurs facteurs tels que le temps de détection de la panne, les temps de déplacement du technicien d'intervention, la localisation des pièces de rechange sur le site où a eu lieu la panne ou sur un site plus éloigné, les temps de changement de la carte et de remise en service du signal.

La disponibilité A d'une carte ou d'un système est le rapport entre le MTBF et le MTTF, son complément est l'indisponibilité (U), [Tornatore 2005].

La disponibilité totale d'un service est acquise dans un premier temps en considérant tous les éléments (systèmes, infrastructures, serveurs, répartiteurs, ...) de la chaîne de liaison susceptibles de tomber en panne et générer ainsi de l'indisponibilité. Dans un second temps, ces différents éléments sont agencés souvent afin de tenir compte de la topologie du réseau. La méthodologie est la même pour déterminer la disponibilité d'un système, un schéma de fiabilité est ainsi construit : toutes les cartes susceptibles de générer de l'indisponibilité sont prises en compte et sont agencées en structure série (carte non protégée) et parallèle (carte protégée).

Un autre indicateur important est le nombre moyen de pannes par an d'un système (YRR, Yearly Return Rate), obtenu en sommant tout simplement les taux de défaillances de tous les blocs fonctionnels du système [Morea 2006b]. Cet indicateur est particulièrement intéressant quand les cartes sont redondées car il permet de constater leur impact ce qui n'est pas le cas de l'indisponibilité où la contribution des cartes redondées peut être considérée comme négligeable. La méthode des diagrammes à bloc de fiabilité (RDB, Reliability Block Diagram) [Mello 2005] est utilisée pour le calcul de la disponibilité d'un réseau, elle s'avère particulièrement utile quand les technologies considérées dans les systèmes ne sont pas matures ou si le réseau n'est pas encore installé.

[Morea 2006b] et [Morea 2006a] ont étudié la disponibilité associée à la transparence d'un réseau. La différence entre un réseau opaque et un réseau translucide se base sur la conception des nœuds hybrides expliquée dans la section 3.2. L'architecture de nœud hybride choisie est réalisée avec la matrice de brassage optique sur laquelle une matrice opaque est greffée si des opérations OEO sont requises. La matrice opaque est constituée par deux cartes redondantes dédiées à la fonction de brassage pour garantir le fonctionnement du réseau si une des cartes est défaillante. Notons qu'il est commun que les matrices soient redondées.

Les brasseurs transparents étudiés sont réalisés avec des technologies MEMs, [Morea 2006b], et WSS, [Morea 2006a]. Les premiers assurent la redondance de la carte brasseur ; les deuxièmes ne nécessitent qu'une carte WSS supplémentaire dans chaque nœud pour garantir la protection du nœud. [Morea 2006b] et [Morea 2006a] présentent les schémas de fiabilité relatifs à chaque bloc système étudié et à partir des valeurs de fiabilité associées aux systèmes ils ont montré qu'à fonctionnalité équivalente un réseau translucide est plus avantageux qu'un réseau opaque en termes de disponibilité. Un réseau translucide, égal à celui analysé dans ce chapitre, est en moyenne 16% plus disponible qu'un réseau opaque indépendamment de la technologie utilisée pour la partie transparente du nœud et pour un trafic non protégé. Introduire la protection double les avantages du réseau translucide.

De plus, pour le nombre moyen de pannes (YRR), la transparence introduit des avantages du même ordre de grandeur : ainsi, pour une matrice de brassage transparente réalisée avec des MEMs le nombre prévisionnel de pannes se réduit de 17%.

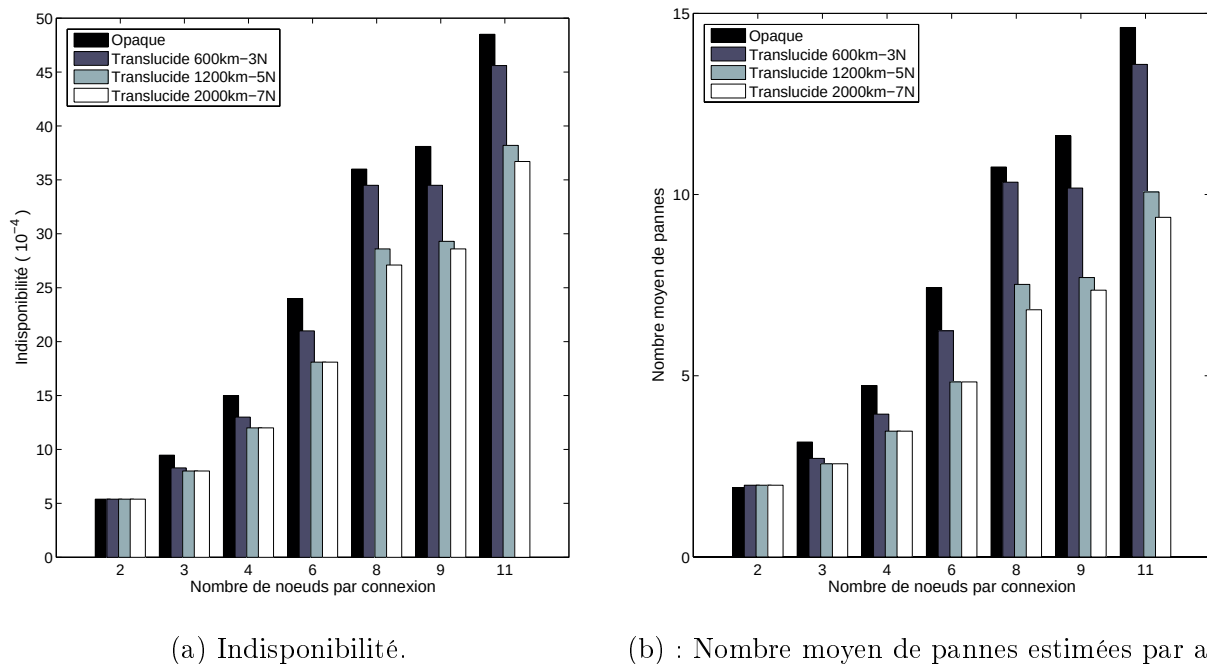


FIG. 5.26 – Comparaisons sur la fiabilité entre le réseau trans lucide et opaque.

Les figures 5.26.a et 5.26.b montrent les résultats d'indisponibilité et d'YRR pour le réseau étudié dans cette section ayant la matrice de trafic de référence. Nous observons que pour une connexion avec un nombre de nœud égal à deux, l'indisponibilité est la même pour les deux réseaux et que le nombre de pannes est légèrement supérieur dans le cas d'un réseau trans lucide ; l'impact de la matrice de brassage optique est observé.

Plus le nombre de nœuds par connexion augmente, plus la différence sur l'indisponibilité et l'YRR entre les deux réseaux augmente en faveur du réseau trans lucide. En effet la transparence permet d'économiser sur le nombre de transpondeurs utilisés par une connexion, de plus ces dispositifs présentent les valeurs de fiabilité les plus hautes. Ainsi l'emploi de systèmes à longue portée dans un réseau trans lucide augmente la disponibilité du réseau et diminue le nombre de pannes. Mais compte tenu des considérations faites au long de cette section, d'un point de vue purement économique, l'utilisation de systèmes à très longues portées n'est pas envisageable. Pour le réseau considéré nous observons qu'un bon compromis entre le coût total du réseau et sa disponibilité est obtenu par l'utilisation de systèmes à 1 200 km et 5 nœuds.

Nous avons montré dans cette section que l'introduction de la transparence induit une réduction du nombre de pannes dans un réseau. Cette réduction est autant plus élevée que le réseau est transparent. Réduire le nombre de pannes provoque une réduction des coûts d'OPEX liés à la manutention qui correspond à la réduction du nombre de pannes. Des résultats présentés au long de ce chapitre, il ressort que, pour le réseau étudié, un bon compromis entre le coût total du réseau trans lucide et le nombre de pannes est donné pour une portée de 1 200 km et 5 nœuds.

5.11 Conclusions

L'objectif de ce chapitre a été de comprendre les scénarios pour lesquels le réseau translucide pouvait être plus économique que le réseau opaque.

Nous avons montré qu'une réponse ne peut pas être donnée de manière absolue : l'avantage d'un réseau translucide dépend du modèle de coût, des caractéristiques du trafic et de la technologie utilisée pour la réalisation des nœuds.

En particulier nous avons constaté que le réseau translucide s'impose sur le réseau opaque quand le prix associé aux systèmes propres à la transparence (brasseurs optiques, systèmes ULH) baisse et quand le trafic dans le réseau augmente.

Ces deux contraintes correspondent aux tendances observées aujourd'hui. Ainsi, même si aujourd'hui le réseau translucide n'apparaît pas avantageux, dans le futur proche le réseau de transport gagnera à devenir de plus en plus transparent, à moins que les systèmes opaques (en particulier les transpondeurs) ne baissent vertigineusement leurs prix par rapport aux systèmes optiques.

Chapitre 6

Comparaison technico-économique de l'introduction de la transparence dans différents types de réseaux

Ce chapitre conclut et illustre l'étude menée sur l'intérêt des scénarios translucides vis-à-vis des scénarios opaques à travers l'étude d'une série de réseaux différents.

Pour effectuer le dimensionnement de ces réseaux nous avons considéré l'algorithme de dimensionnement présenté en annexe B : cet algorithme considère les différentes contraintes liées au type de scénario considéré, comme par exemple l'interdiction de conversion de longueur d'onde ou la faisabilité physique d'une connexion. Puisque dans un réseau translucide il y a davantage de contraintes que dans un réseau opaque et qu'en même temps nous voulons minimiser le nombre de fibres à ajouter au réseau initial, il en résulte que les parcours obtenus avec un routage translucide peuvent différer de ceux obtenus avec un routage opaque : en général les parcours dans un réseau translucide peuvent être plus longs que ceux obtenus dans un réseau opaque.

Le calcul sur la qualité du signal est effectué en intégrant la modélisation des effets physiques et la méthode d'échange de marge présentée dans le chapitre 4 (section 4.4).

Les calculs sur la qualité du signal (c.f. chapitre 4) indiquent que la portée des systèmes ainsi modélisés est de 1 300 km et 6 nœuds traversés. A partir du dimensionnement basé sur cette portée, nous avons calculé les coûts des différents réseaux et nous en avons déduit les prix des systèmes pour que le scénario translucide soit avantageux (de façon similaire au chapitre 5).

Tout le long du chapitre 5 nous avons montré que les avantages introduits par les réseaux translucides dépendent : de la taille du réseau, de la matrice de trafic à écouler, de la portée et donc des prix des systèmes. Le surcoût des réseaux translucides provient à la fois des systèmes (fonction de la portée) et des nœuds hybrides. Si les parcours sont plutôt courts, le surcoût est majoritairement dû aux nœuds, si les parcours sont très longs il est majoritairement dû aux systèmes de transmission.

Pour que le scénario translucide soit avantageux, il faut que ce surcoût soit contre-balancé par la réduction du nombre de régénérations. Pour que cette condition soit satisfaite, il faut que

l'occupation des ressources soit suffisante pour assurer un bon taux de partage des dispositifs transparents. Et il faut aussi trouver un compromis entre la portée des systèmes et le besoin en régénérateurs.

Le but de ce chapitre est de valider les résultats présentés précédemment sur différents types de réseaux.

6.1 Hypothèses des études globales

Les quatre réseaux sélectionnés pour cette étude de dimensionnement ont une taille en nœuds comparable mais présentent des caractéristiques différentes en termes de la longueur moyenne des liens, et degré de connectivité des nœuds.

Les réseaux sélectionnés sont : le réseau italien (TI, [Ali 2001]), avec une connectivité des nœuds très élevée et une longueur moyenne des liens faible ; le réseau allemand (DT, [Verbrugge 2005]), avec une connectivité des nœuds moins élevée et des faibles longueurs des liens ; le réseau paneuropéen (EBN2, donnée interne), avec une faible connectivité des nœuds et des longueurs de liens plus importantes ; et, pour finir, le réseau nord-américain (NSFNET, [Zahr 2005]), avec de très longs liens et une faible connectivité des nœuds.

Pour chacun des réseaux choisis nous avons créé des matrices de trafic selon les méthodes suivantes :

- le nombre de demandes dans chaque matrice est égal au nombre de nœuds dans le réseau multiplié par un facteur 5 ou 10. Ce facteur multiplicatif permet d'obtenir un réseau plus ou moins chargé ;
- dans le chapitre 5 nous avons montré que la distribution du trafic a un impact sur le coût total du réseau et peut déterminer l'intérêt d'un scénario sur un autre. Pour avoir des résultats de comparaisons qui ne soient pas liés à une seule distribution du trafic nous avons extrait trois distributions. Ces distributions sont obtenues en utilisant la méthode expliquée dans la section 5.9.2 et les combinaisons de probabilité choisies sont :
 - $D1=[50; 25; 25]$ pour une matrice de trafic caractérisée par des connexions courtes
 - $D2=[33; 34; 33]$ pour une matrice de trafic ayant une distribution uniforme des longueurs des parcours, et
 - $D3=[25; 50; 25]$ pour une matrice avec plus de connexions moyennes
- chaque matrice de trafic obtenue est routée avec et sans protection ;
- pour être sûrs que les résultats montrés ne soient pas des singularités nous avons extrait pour chaque volume et chaque type de distribution du trafic cinq matrices de trafic, de manière à déterminer le comportement global du réseau et pouvoir calculer un écart moyen (qui sera représenté sur les figures par une courbe).

6.2 Résultats du dimensionnement

Les résultats de cette étude de comparaison sont discutés pour chacun des réseaux sélectionnés. Pour chaque réseau nous présentons les caractéristiques propres du réseau et le rapport de prix entre le routage opaque et translucide pour les trois distributions de trafic considérées.

La distribution moyenne des parcours pour chaque groupe de trafic est montrée dans un tableau pour le routage avec et sans protection en annexe C.

6.2.1 Dimensionnement du réseau TI

Les caractéristiques du réseau italien sont résumées dans le tableau 6.1.

TAB. 6.1 – Caractéristiques du réseau italien.

Paramètre	Valeur	Unité de mesure
Nombre de nœuds	21	–
Nombre de liens	35	–
Degré moyen de connectivité	3,3	–
Longueur moyenne des liens	164	km
Longueur max lien	400	km
Longueur max parcours sans et avec protection	1870	km
	2340	km

En figure 6.1 nous représentons les résultats obtenus pour le dimensionnement avec les matrices de trafic données. Si nous considérons le trafic non protégé, pour les deux volumes de trafic considérés le réseau opaque est plus avantageux que le translucide. Ceci est dû au fait que, quand le nombre de demandes est faible, les économies introduites par la réduction du nombre de régénérateurs ne sont pas suffisantes pour contre-balancer le surcoût introduit par la transparence. Pour avantager le scénario translucide, il faudrait augmenter le partage des ressources et pour cela augmenter le volume de trafic. Mais quand le volume de trafic augmente, pour éviter les conflits de longueurs d’onde et pour éviter l’utilisation de nouvelles fibres, les parcours translucides sont plus longs que ceux obtenus dans le cas opaque. Finalement le partage des ressources est majeur, mais pas suffisant, et le nombre de régénérations croît. La diversité des parcours trouvés lorsque le conflit de longueur d’onde augmente provient du maillage du réseau : avec la topologie du réseau italien il est facile à l’algorithme de trouver des parcours alternatifs pour éviter le blocage. Avec un algorithme amélioré il serait possible de mieux optimiser le taux d’occupation des ressources en fonction du trafic total.

Par rapport au premier cas, où le volume de trafic est plus faible, nous observons que la différence de prix entre les deux scénarios est plus faible. En effet, avec plus de demandes, le surcoût de la transparence est quand même mieux amorti. Ainsi, avec les critères de routage choisis, le scénario translucide est plus cher que l’opaque.

Si maintenant nous considérons le routage avec la protection des demandes, nous remarquons une équivalence entre les deux réseaux quand la matrice de trafic a un volume faible (fluctuations du rapport des prix de $\pm 5\%$). Quand ce volume augmente, la différence de prix entre les deux réseaux ne change pas par rapport au cas sans protection. En effet, pour minimiser le nombre de fibres à ajouter dans le réseau et le nombre de conversions de longueur d’onde la distribution des demandes est plus étalée. Il en résulte que la portée des dispositifs choisie est mal adaptée à la

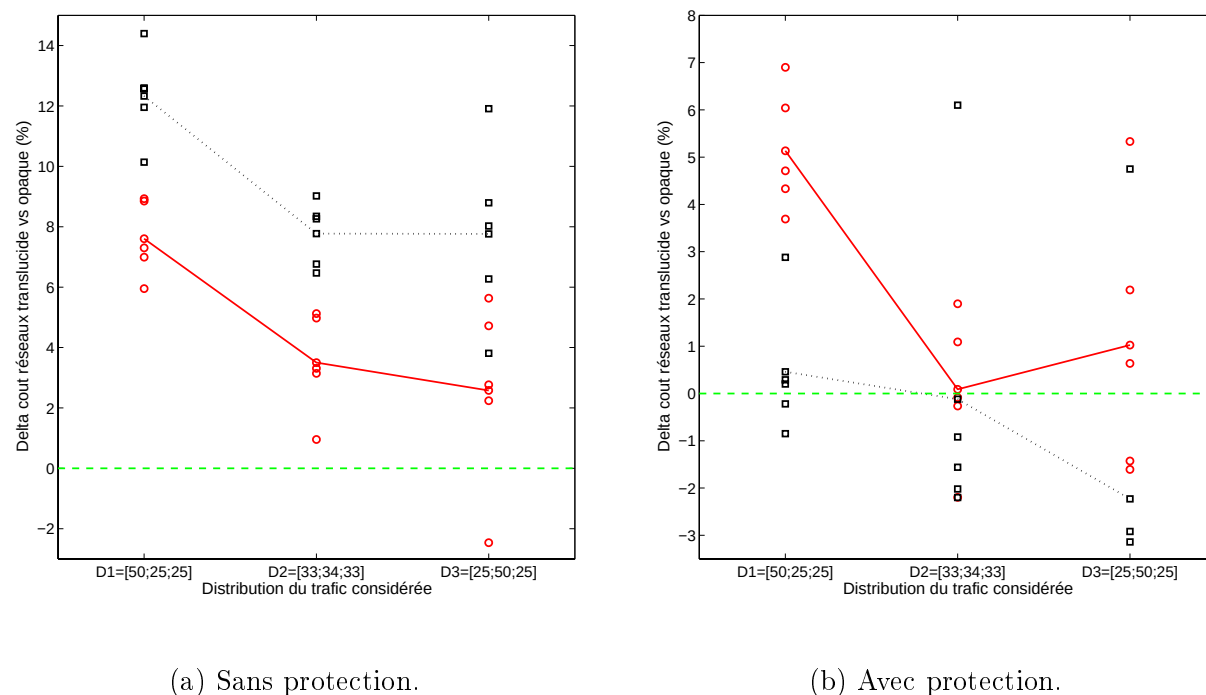


FIG. 6.1 – Comparaison entre les scénarios opaque et translucide appliqués au réseau italien ; les carrés représentent le trafic $5 \times N$, les cercles indiquent le trafic $10 \times N$; les courbes représentent la moyenne de chaque distribution.

distribution des demandes et l'économie sur le nombre de régénérations n'est pas suffisamment importante pour justifier l'introduction de la transparence dans le réseau.

Les résultats discutés sont représentés en figure 6.1. Nous observons qu'en augmentant la longueur des parcours le taux de partage des dispositifs s'améliore, donc une baisse des coûts pour les distributions D2 et D3 par rapport à D1 est visible.

Finalement, dans cet exemple la portée des systèmes (1 300 km et 6 nœuds) n'est pas la portée optimale (en kilomètres de l'ordre de 1 500 km pour le cas sans protection et 1 900 km pour le cas avec protection), et donc même en augmentant le taux de partage, le scénario translucide n'est pas avantageux.

6.2.2 Dimensionnement du réseau DT

Les caractéristiques liées au réseau allemand sont résumées dans le tableau 6.2.

Les résultats de la comparaisons sont montrés en figure 6.2. Les résultats de dimensionnement obtenus sans considérer la protection montrent que si le volume de trafic n'est pas suffisamment élevé, le réseau translucide n'est pas avantageux vis-à-vis de l'opaque (dans certains cas il est possible observer un léger avantage inférieur à 3%). Si l'occupation du réseau augmente (cas d'une matrice de trafic plus dense ou du routage avec protection) le scénario translucide devient moins cher que l'opaque. Ceci est dû à un meilleur partage des ressources et au fait que les

TAB. 6.2 – Caractéristiques du réseau allemand.

Paramètre	Valeur	Unité de mesure
Nombre de nœuds	17	–
Nombre de liens	23	–
Degré de connectivité	3	–
Longueur moyenne des liens	170	km
Longueur max lien	353	km
Longueur max parcours sans avec protection	1450	km
	1510	km

parcours obtenus ont des longueurs qui restent du même ordre que la portée des systèmes. Ce résultat confirme les résultats de l'étude générique conduite dans la section 5.9.2. en effet, le réseau DT a une taille en nœuds et en liens comparable à celle du réseau 'R1' indiqué en figure 5.25.b. Pour ce réseau la portée optimale pour laquelle le scénario translucide est plus avantageux que l'opaque correspondait à la portée des systèmes employés ici. (Par comparaison le réseau italien correspond au réseau 'R2' de la même figure, pour lequel la portée optimale est de 2 000 km environ)

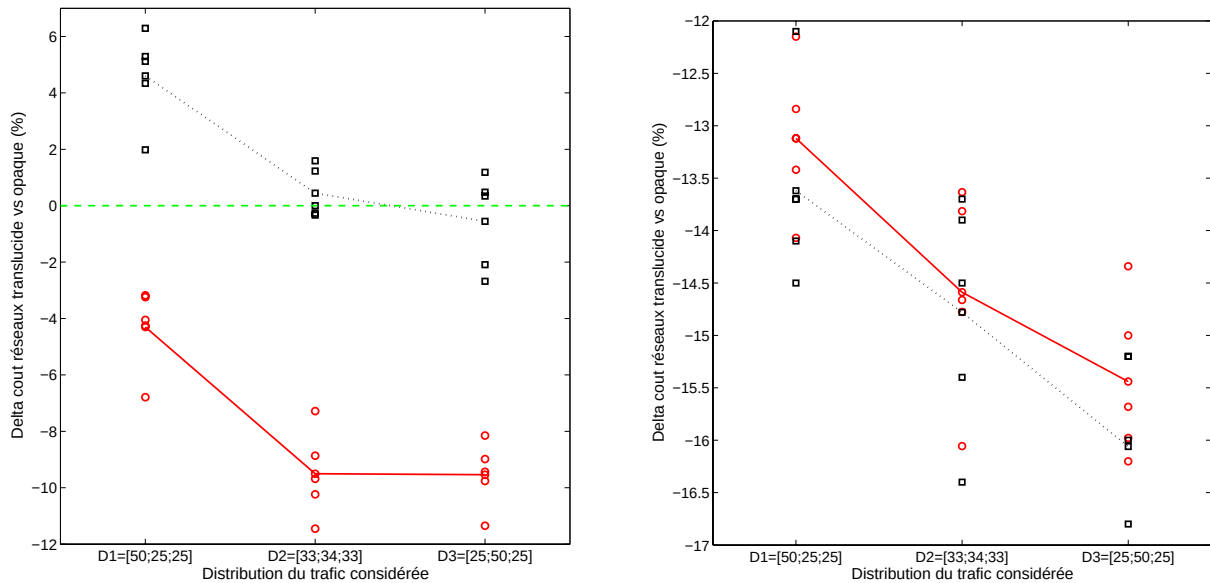


FIG. 6.2 – Comparaison entre les scénarios opaque et translucide appliqués au réseau allemand ; les carrés représentent le trafic $5 \times N$, les cercles indiquent le trafic $10 \times N$; les courbes représentent la moyenne de chaque distribution.

Dans le cas étudié ici, la portée des systèmes est proche de la portée optimale et le taux de partage des ressources est suffisant pour avantager le scénario translucide.

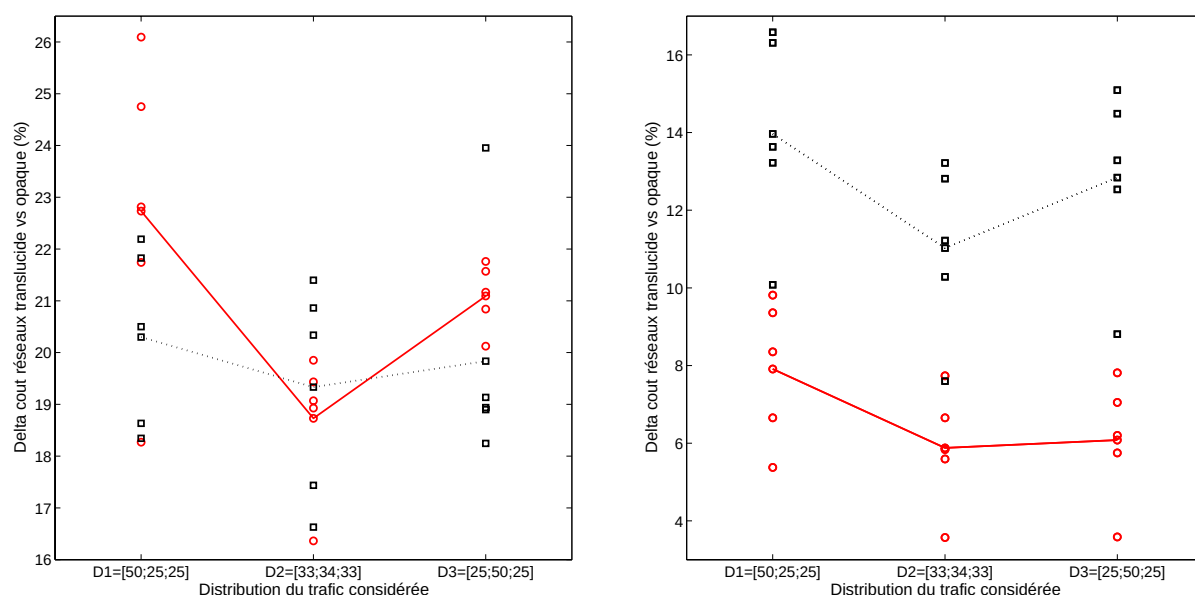
6.2.3 Dimensionnement du réseau EBN

Le tableau 6.3 montre les caractéristiques du réseau EBN dimensionné dans cette section.

TAB. 6.3 – Caractéristiques du réseau paneuropéen.

Paramètre	Valeur	Unité de mesure
Nombre de nœuds	26	–
Nombre de liens	40	–
Degré de connectivité	3	–
Moyenne des liens	330	km
Longueur max lien	664	km
Longueur max parcours sans avec protection	4090 4910	km

Ce réseau EBN est plus grand que les deux réseaux analysés précédemment. La moyenne des longueurs des connexions est de l'ordre de la portée des systèmes considérés ici si le trafic n'est pas protégé, ou largement plus grande dans le cas où la protection est envisagée. Or, nous avons vu que pour un réseau similaire à 'R3' de la figure 5.25.a la portée optimale est bien supérieure à la portée des systèmes employés ici. La portée des systèmes est donc sous-dimensionnée.



(a) Sans protection.

(b) Avec protection.

FIG. 6.3 – Comparaison entre les scénarios opaque et translucide appliqués au réseau paneuropéen ; les carrés représentent le trafic $5 \times N$, les cercles indiquent le trafic $10 \times N$; les courbes représentent la moyenne de chaque distribution.

De ce fait le réseau transluide est désavantagé par rapport au réseau opaque, comme nous pouvons l'observer sur la figure 6.2.3. Ce désavantage est moins flagrant quand les demandes sont protégées à cause du meilleur partage des ressources.

Ces résultats sont représentés en figure 6.2.3. Sur cette figure nous observons encore qu'augmenter la longueur des connexions avantage un peu le scénario transluide parce que cela augmente le partage des ressources. Mais avoir des parcours très longs implique le choix de parcours alternatifs encore plus longs (du fait du faible maillage et de l'étendue du réseau) pour éviter le blocage de longueur d'onde. C'est pour cela que la distribution 'D3' est moins favorable au scénario transluide.

Les parcours obtenus avec cet algorithme ne permettent d'optimiser le partage des ressources et la portée est trop loin de la portée optimale pour que le scénario hybride soit avantageux.

6.2.4 Dimensionnement du réseau NSFNET

Pour conclure cette comparaison de dimensionnement de différents réseaux, nous présentons le cas du réseau nord-américain, donc les caractéristiques sont résumées dans le tableau 6.4.

TAB. 6.4 – Caractéristiques du réseau américain.

Paramètre	Valeur	Unité de mesure
Nombre de nœuds	18	–
Nombre de liens	29	–
Degré de connectivité	3,2	–
Longueur moyenne des liens	980	km
Longueur max lien	2 400	km
Longueur max parcours sans	7980	km
avec protection	9830	km

Puisque nous avons supposé des systèmes de transmission avec une portée maximale de 1 300 km, sur les liens du réseau qui dépassent cette longueur (6 en total) nous avons inséré un site de régénération constitué par : deux couples de démultiplexeur et multiplexeur (pour séparer et remettre ensemble les signaux) et des régénérateurs OEO à mi parcours.

Vu la taille des liens, le réseau opaque dispose de systèmes LH sur les liens de longueur inférieure ou égale à 600 km et ELH sur les autres liens.

Le nombre total de régénérateurs dans le réseau hybride ne se différencie pas beaucoup de celui calculé dans le réseau opaque. Cette faible diminution du nombre de régénérateurs est liée à la longueur des liens : seulement 15% des parcours peuvent être réalisés de façon transparente.

En analysant la distribution des parcours (en termes de kilomètres), nous observons que dans le cas sans protection seulement 25% des parcours ont une longueur inférieure à 1 500 km et le parcours le plus long est de l'ordre de 6 500 km.

Si le routage prévoit la protection des demandes, alors la distribution des connexions s'étale encore : 25% des demandes ont une longueur inférieure à 2 000 km et les connexions les plus

longues ont une longueur de 9 000 km.

Ces considérations sur la portée des systèmes montrent que le réseau hybride pourrait être justifié si la portée des systèmes augmentait jusqu'à doubler (pour qu'elle soit suffisante pour couvrir entre 25% et 50% des connexions, figure 5.25.a) pour réduire les besoins de régénération afin de justifier l'introduction d'un double étage (photonique et électronique) dans les nœuds. Mais avec le modèle de prix choisi (quadratique), le surcoût des systèmes de portée supérieure à 2 500 km supprime toutes les économies provenant de la réduction du nombre de régénérations.

Nous en concluons qu'un réseau comme le réseau nord-américain n'a pas d'intérêt économique à être translucide à moins que le prix des systèmes à très longue portée se réduise drastiquement. Dans la figure 6.4 on observe qu'augmenter le volume de trafic a un impact plutôt négatif sur le scénario translucide. En effet tous les systèmes sont ELH dans le scénario hybride alors qu'ils sont adaptés à la portée des liens dans le scénario opaque. En doublant le volume de demandes on augmente le nombre de fibres et on augmente encore plus le nombre de systèmes surdimensionnés. Sans protection, les parcours opaques et translucides sont quasiment identiques. Avec protection les parcours translucides sont plus longs, il y a un meilleur partage, ce qui justifie en partie les résultats de la figure 6.4.

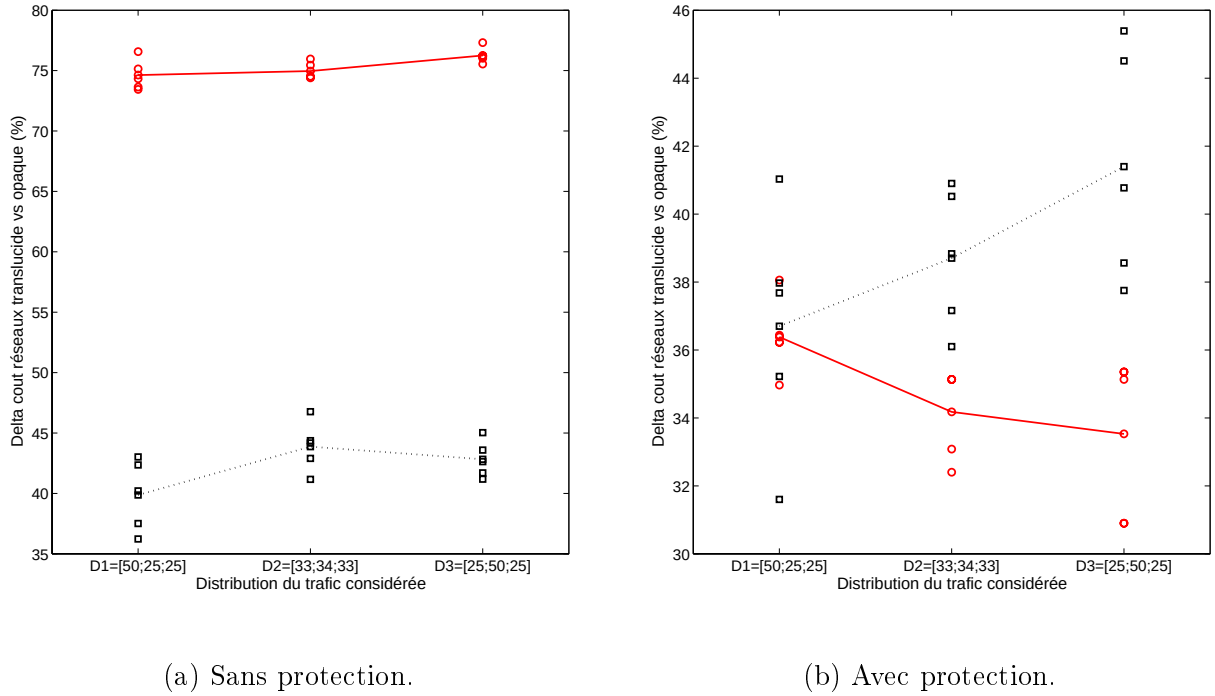


FIG. 6.4 – Comparaison entre les scénarios opaque et translucide appliqués au réseau américain ; Les carrés représentent le trafic $5 \times N$, les cercles indiquent le trafic $10 \times N$; les courbes représentent la moyenne de chaque distribution.

6.3 Conclusions

Avec l'algorithme de dimensionnement présenté dans la section B et le modèle physique présenté au chapitre 4, nous avons présenté quatre cas d'étude basés sur des réseaux existants

avec des caractéristiques différentes et pour plusieurs matrices de trafic.

Les résultats de ces études confirment les résultats obtenus dans le chapitre 5 : les économies introduites par un réseau translucide dépendent des parcours.

Quand la portée des systèmes n'est pas optimale par rapport à la distribution des routes (cas du réseau italien, paneuropéen et américain), le réseau translucide est économiquement moins avantageux que le cas opaque. Pour que le réseau translucide soit plus économique que l'opaque, la portée des systèmes doit être adaptée à la distribution des connexions, de façon à équilibrer les surcoûts introduits par la transparence.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Cette étude avait comme objet d'étudier la faisabilité technique et de l'intérêt économique d'un réseau transluide (ou hybride). Nos travaux ont notamment visé à estimer les scénarios possibles d'évolution des réseaux de transport en termes d'architecture et de technologie.

Pour cela, il nous a fallu :

- déterminer les exigences du nouveau réseau et les technologies pouvant répondre à de telles exigences ;
- mettre en évidence les objectifs en termes de fonctionnalités et de services des futurs réseaux de transport ;
- étudier les architectures possibles pour qu'il puisse fonctionner correctement ;

Pour cela, nous avons été amenés à :

- déterminer et modéliser l'impact de l'architecture adoptée sur la qualité et la supervision des signaux transportés ;
- concevoir des outils de calcul qui soient adaptés à ces nouvelles exigences.

De nombreux travaux de recherches sur la transparence sont en cours et dans la littérature. Ils traitent notamment des algorithmes de dimensionnement prenant en compte l'absence de conversions optoélectroniques comme contrainte sur la continuité de longueur d'onde.

La communauté commence à introduire une modélisation des dégradations physiques dans ces algorithmes pour que les vraies performances du réseau transparent puissent être évaluées ; les équipementiers, eux aussi, sont très sensibles aux bénéfices engendrés par la transparence et proposent des systèmes qui réduisent les besoins en régénération.

Dans ce travail nous nous sommes placés du point de vue d'un opérateur. Nous avons décrit les besoins auxquels le réseau transluide doit répondre pour justifier son intérêt technico-économique.

A partir des dispositifs disponibles actuellement dans le commerce et de ceux proposés pour intégrer la transparence, nous avons défini des architectures de nœuds et de liens qui peuvent s'insérer dans une vision à court et moyen terme du réseau de transport.

A partir de l'architecture définie, nous avons modélisé les dégradations du signal au fil de la propagation. Ce travail a proposé en particulier une modélisation de toutes les sources contribuant au budget de la dispersion chromatique afin de connaître précisément les limites en qualité de transmission. Les résultats numériques ont démontré qu'une modélisation classique de la

dispersion chromatique au moyen de fibres de compensation, assurant une compensation parfaite de la dispersion, donne une mauvaise estimation des limites liées au système (trop optimiste en général). Nous avons aussi proposé une méthode d'optimisation des cartes de dispersion à utiliser dans les réseaux translucides. La dispersion résiduelle à la fin de chaque lien est fixée à une valeur proportionnelle à la longueur du lien. Grâce à cette optimisation il est possible de minimiser les dégradations provoquées par l'interaction entre les effets non-linéaires et la dispersion chromatique.

Un modèle basé sur l'échange de marge des pénalités relatives aux effets de l'OSNR, de la PMD et de la dispersion chromatique pour déterminer la qualité du signal a été présenté. Ce modèle s'applique bien dans les études où les caractéristiques des liens ne sont pas les mêmes (réseaux non homogènes), ce qui dans une certaine mesure permet de faire des études physiques fines sur les dispositifs employés dans le réseau. Nous avons comparé la qualité d'un signal calculée avec la méthode proposée et une méthode présentée dans la littérature (méthode appelée dans ce document du 'pire cas'). Nous avons montré que la méthode facilitait une meilleure estimation de la capacité des systèmes de transmission et donc ne pas sous-évaluer leur portée en transparence. Cela se traduit par la faisabilité de réseaux transparents de tailles plus grandes ou par la réduction du nombre de régénérateurs requis dans un réseau translucide.

Les résultats principaux obtenus par l'étude de faisabilité sont les suivants :

- avec les dispositifs présents sur le marché il est déjà possible de mettre en place un réseau transparent ;
- pour que le réseau puisse fonctionner il faut, par contre, que les fibres de ligne ne soient pas très contraignantes au niveau de la PMD et que les modules de compensation soient performants, pour mieux compenser les effets introduits par la dispersion chromatique.

Après avoir montré la faisabilité d'un réseau translucide, nous avons évalué si un tel réseau était économiquement plus avantageux qu'un réseau opaque.

Pour pouvoir mener cette comparaison, nous avons défini un modèle de coût où chaque système se voit affecter un prix dépendant de sa performance/portée (dépendance que nous avons supposée quadratique).

Les hypothèses de coût des systèmes sont issues de valeurs propres à France Telecom pour des portées spécifiées.

Les conditions pour lesquelles un réseau translucide est avantageux ont été déterminées en analysant le degré de transparence du réseau et les caractéristiques de la matrice de trafic. Entre autres, nous avons montré qu'avant de remplacer un nœud opaque par un nœud hybride, il fallait analyser dans le détail le type d'opérations effectuées dans ce nœud. Si la majorité du trafic est inséré et extrait, un nœud opaque s'avère plus adéquat qu'un nœud translucide. En effet, la faible réduction du nombre de transpondeurs ne suffit pas dans ce cas à combler le surcoût du brassage optique.

Les comparaisons économiques sur les coûts d'investissement ont été faites en considérant les dispositifs présents actuellement sur le marché et les évolutions technologiques possibles liées aux systèmes ou aux architectures des nœuds.

Des considérations sur les coûts opérationnels, en particulier les coûts de manutention, ont complété cette étude économique.

Nous avons conclu que le réseau translucide s'impose sur le réseau opaque lorsque :

- le prix associé aux systèmes propres à la transparence diminue ;
- le trafic augmente en volume et les connexions ont une portée géographique supérieure à la longueur des liens.

Dans une étude finale nous avons montré que l'intérêt du scénario translucide dépend aussi des caractéristiques du réseau. Donc il n'est pas possible dire a priori que le scénario translucide est toujours plus économique que celui opaque.

A équivalence de coût d'investissement, un réseau translucide présente moins de coûts de maintenance notamment parce que les dispositifs les plus défaillants dans un réseau sont les transpondeurs.

Perspectives

Les résultats présentés ouvrent de nouvelles perspectives.

- Le passage d'un réseau opaque à un réseau transparent (totalement ou partiellement) n'advient pas d'un seul coup. L'introduction des brasseurs optiques sera certainement graduelle. Cette migration touchera d'abord les nœuds de faible degré de connectivité (2 et 3), pour ensuite s'étendre aux autres par ordre de transparence de nœud (rapport du trafic en transit sur le trafic total). Il est probable qu'il existera un point où augmenter le nombre de nœuds hybrides augmentera la complexité du réseau sans apporter d'économies supplémentaires significatives. Un défi du côté opérateur sera de déterminer quels sont les nœuds à transformer et le niveau de transparence optimum pour le réseau.
- Nous avons montré qu'il est indispensable de maintenir une veille technologique sur les dispositifs à moyen terme : les avantages d'un réseau d'une catégorie ou d'une autre sont étroitement liés aux évolutions technologiques. Ainsi, les évolutions sur les brasseurs optiques et les systèmes ULH poussent vers la transparence et les évolutions des transpondeurs peuvent favoriser le réseau opaque mais cela toujours en fonction des caractéristiques du trafic. Parmi les évolutions des transpondeurs nous signalons l'apparition de transpondeurs à prédistorsion : ils permettent des économies importantes sur la partie transmission pour un léger surcoût par rapport à des transpondeurs classiques, [Winzer 2005], [O'Sullivan 2005], [Killey 2005]. Le retour vers des systèmes de transmission numérique (au sens strict du terme, avec régénérateurs OEO tout intégrés à la place des amplificateurs optique), [Infinera], pourrait également renverser la tendance actuelle qui pousse vers la transparence.
- Des nouveaux services et usages peuvent modifier les caractéristiques du trafic écoulé dans les réseaux. Sachant qu'elles sont déterminantes dans ce type d'étude, il est impératif de prévoir leur évolution pour connaître leur impact sur le réseau.
- Un des arguments pour la transparence est la flexibilité (au débit, au format de transmission, . . .) ; la flexibilité est un besoin lié à la reconfigurabilité. Le réseau cœur étudié suppose un trafic statique, mais certaines évolutions du réseau, comme l'IP sur WDM [Ghani 2000], ou des nouveaux besoins, comme la restauration dynamique ou l'automatisation du réseau ou l'apparition de nouveaux services (vidéo à la demande), exigent de ce dernier de la dynamique.

Un réseau optique hybride peut-il répondre à ces besoins ? Toutes les questions relatives à la gestion et à l'interopérabilité des systèmes n'ont pas encore été résolues et font encore

l'objet de nombreuses études, [[Cavazzoni 2005](#)], [[Shukla 2006](#)].

Et jusqu'à quelle vitesse peut-il être reconfiguré ? Le réseau cœur est destiné à transporter majoritairement du trafic IP qui est extrêmement dynamique. Il faut trouver, alors, un compromis entre la vitesse de commutation et l'efficacité de transport des paquets IP qui puisse s'adapter aux technologies en place.

Annexe A

Déscription de l'outil de dimensionnement employé pour les études du chapitre 6

L'outil de routage utilisé pour les études finales de ce travail est le résultat de l'amélioration d'un travail déjà réalisé pour l'évaluation technico-économique des réseaux translucides, [Morea 2003]. Les modifications apportées concernent : l'intégration des nouvelles règles d'ingénierie pour le calcul des contraintes physiques liées au transport des signaux et l'adaptation de l'outil pour l'étude du dimensionnement dans un cas purement opaque ou transparent. L'outil permet de prendre en compte les spécificités du routage propres au scénario à évaluer en alliant les aspects 'architecture' et 'ingénierie'. Les intérêts de cet outil sont multiples, le principal est sa flexibilité. Il est possible, ainsi, d'étudier l'influence de nombreux facteurs sur le dimensionnement du réseau en changeant les données en entrée. Le processus de dimensionnement s'appuie sur les données d'entrée suivantes :

- la matrice de trafic du scénario envisagé ;
- la topologie du réseau considéré ;
- les données technico-économiques : les caractéristiques techniques du réseau et les coûts économiques des éléments constituant le réseau ;
- les "poids" associés aux éléments pour optimiser l'emploi des ressources dans le réseau ;
- les options de routage.

A partir de ces entrées l'outil produit les sorties suivantes :

- les caractéristiques des connexions établies : des chemins primaires et les chemins de protection (si requis) associés à ces connexions (parcours physique, longueurs d'onde utilisées, qualité du signal) ;
 - l'état des liens, fibre par fibre, après l'établissement des connexions (pour permettre de visualiser la répartition du trafic) ;
 - le coût total du réseau et le nombre d'éléments utilisés.
-

A.1 Description des poids administratifs

Dans [Morea 2003], le poids administratif est défini comme une valeur associée à chaque élément constituant un parcours dont le nombre total a un impact sur le coût total du réseau. A chaque parcours présélectionné nous associons un poids administratif relatif aux dispositifs utilisés pour que la connexion soit établie correctement. En fonction des choix de routage que nous voulons effectuer, il est possible de favoriser l'emploi d'un dispositif par rapport à un autre en faisant varier son poids administratif. De façon générale, les poids administratifs contribuent aux performances de l'algorithme de routage (blocage) et permettent d'améliorer le dimensionnement du réseau. Les poids administratifs sont associés aux éléments suivants, (par rapport à [Morea 2003] il y a eu l'ajout de nouveaux poids (amplificateurs et ports)) :

- convertisseurs de longueur d'onde ;
- régénérateurs ;
- amplificateurs ;
- lien logique avec disponibilité de longueur d'onde ;
- lien logique avec saturation de longueur d'onde (une valeur $< \text{inf}$ indique la possibilité d'ajouter des nouvelles fibres, sinon l'indisponibilité du lien).
- ports optiques et opaque (une valeur $< \text{inf}$ indique la disponibilité de ports électronique/optiques dans un nœud).

La matrice des poids administratifs générée par l'algorithme est de la même taille que la matrice représentant la topologie simple du réseau ou de la matrice représentant le réseau en couche. Le dimensionnement des réseaux opaques utilise une topologie simple, car la contrainte de continuité en longueur d'onde n'y est pas considérée. L'ajout d'une fibre supplémentaire est déclenché dès que tous les canaux disponibles dans le réseau sont occupés. Dans ce cas la matrice des poids administratifs comporte uniquement les poids associés aux amplificateurs et aux liens logiques. Le dimensionnement des réseaux transparents et translucides utilise une topologie en couche pour effectuer le routage RWA. Si le réseau est transparent les poids administratifs empêchent la communication entre les différentes couches. Si le réseau est translucide, des poids de conversion et de régénération sont associés aux transitions entre les couches au niveau des nœuds.

Les figures A.1 montrent un exemple de relation entre la matrice de connexion en couches et la matrice des poids administratifs dans un cas de dimensionnement de réseau transparent et translucide. Les poids administratifs liés à une liaison logique valent 10 et sont les mêmes et pour le cas d'un réseau transparent et d'un réseau translucide, pour le réseau translucide les poids relatifs à une régénération valent 20 et pour une conversion en longueur d'onde 50 ; la régénération et la conversion de longueur d'onde sont possibles dans les nœuds avec des dispositifs optoélectroniques. Nous pouvons remarquer la présence de liaisons entre les nœuds fictifs de la couche optique ; les poids relatifs à ces liaisons sont fixés à 1 (poids le plus petit possible) car elles sont obligatoires pour insérer le trafic dans le réseau. Ils n'ont aucun impact sur le routage.

Les scénarios analysés considèrent la possibilité d'ajouter de nouvelles ressources. Les ressources qui sont limitées en général, sont le nombre de fibres installées dans un réseau et la taille des brasseurs utilisés, taille exprimée par le nombre de ports associés. L'impossibilité d'ajouter de nouvelles ressources se traduit par un poids administratif infini sur un lien logique du parcours et donc par un coût administratif associé au parcours présélectionné égal à 8. Si tous les parcours présélectionnés ont un coût administratif égal à 8, la route est bloquée par manque de ressources.

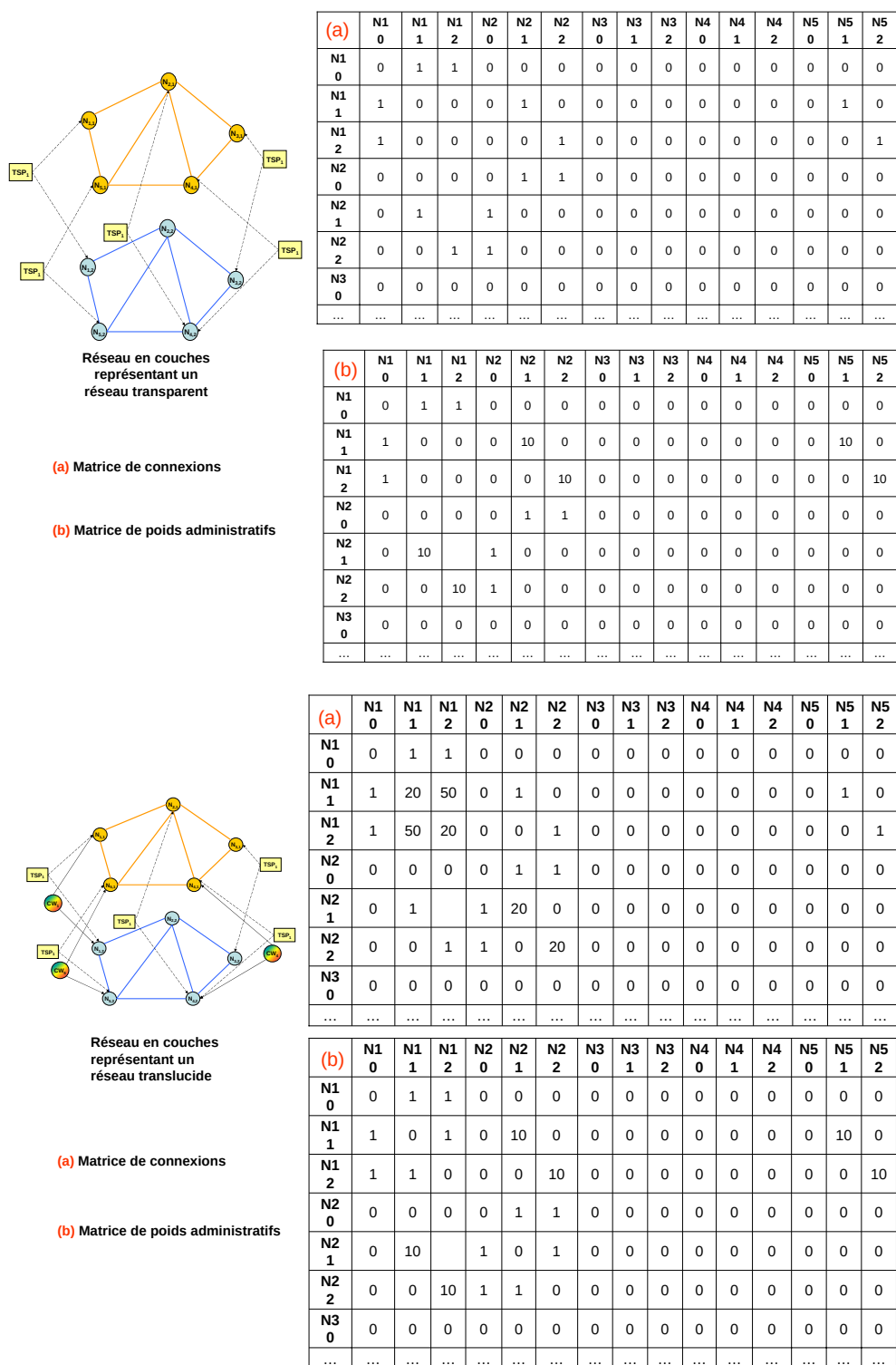


FIG. A.1 – Relation entre un réseau en couches transparent/translucide, sa matrice de connexion et de poids administratifs.

A.2 Description des options de routage

Le routage d'une matrice de trafic peut être effectué en utilisant différentes options, qui vont déterminer les caractéristiques finales des connexions associées à chaque demande, la possibilité de blocage et le coût total du réseau. Parmi les options de routage nous avons :

1. limiter les ressources dans le réseau ;
2. fixer le nombre de fibres disponibles par lien (sans coût supplémentaire) ;
3. choisir la sélection des routes en fonction des paramètres suivants :
 - (a) nombre de saut du parcours ;
 - (b) kilomètres parcourus ;
 - (c) poids administratif associé au lien ;
 - (d) qualité en réception.
4. calculer les chemins de secours pour la protection des demandes.
5. forcer les parcours principal et de secours à être disjoints. Par disjoints nous entendons ni liens ni nœuds en commun (choix de nœuds disjoints) ; si c'est impossible, les parcours principal et de secours peuvent doivent avoir uniquement des nœuds en commun (choix de liens disjoints).
6. la sélection des routes principales et de protection suivent deux méthodes :
 - (a) plus court chemin : le parcours principal est associé à la route la plus courte en fonction du critère adopté et le parcours de secours adopte la route disjointe la plus courte (en termes de nœuds ou en termes de liens, selon le choix effectué) ;
 - (b) plus court cycle : le parcours principal et de secours sont recherchés ensemble comme un cycle disjoints (selon le choix effectué). Le cycle le plus court est sélectionné. Ce choix attribue des chemins au parcours principal qui peuvent être plus long que le plus court chemin, par contre la longueur des parcours secondaires est souvent nettement plus courte.

A.3 Description de l'outil

L'outil est implémenté en langage C++ ; il est constitué d'une partie principale (corps de l'algorithme) qui gère toutes les phases d'évaluation des parcours possibles associés à une demande et à l'établissement des connexions. Cette partie est (en grandes lignes), commune à la résolution des trois types de réseaux possibles, les différences de résolution en fonction du cas étudié concernent la manière avec laquelle la sélection d'un parcours est effectuée. Le corps de l'outil est structuré en 6 parties principales :

1. insertion des données initiales (création du réseau à étudier) ;
 2. constitution des matrices de connexions associées au réseau topologique simple et en couches (c.f. section 2.3.1) ;
 3. création de la matrice des poids administratifs ;
 4. pour toutes les demandes présentes dans la matrice de trafic :
 - (a) présélection d'un ensemble de chemins pour chaque demande (dans le réseau simple) ;
-

- (b) si le réseau est de type transparent ou translucide
 - i. vérification de la validité physique du chemin ;
 - ii. affectation de régénérateurs et/ou convertisseurs de longueur d'onde ;
 - (c) attribution des longueurs d'onde aux parcours présélectionnés ;
 - (d) sélection du chemin primaire parmi les parcours obtenus au point 4-a en fonction du poids administratif qui leur est associé ;
 - (e) si aucune route n'a un poids administratif inférieur à 8 ou une qualité de transmission acceptable la demande est bloquée et on passe à la demande suivante ; sinon on passe au point suivant.
 - (f) si une demande doit être protégée, répéter les points de 'a' à 'e' ;
5. calcul du coût total du réseau ;
 6. sauvegarde des résultats.

Dans la suite nous faisons un organigramme pour les trois types de réseau à dimensionner.

A.4 Cas opaque

Dans un réseau de type opaque, le problème de routage est réduit à la recherche du parcours le plus court en fonction du critère adopté. La matrice des poids administratifs a la même taille que la matrice de la topologie du réseau, puisque dans un réseau opaque une régénération est faite à chaque nœud avec la possibilité de conversion de longueur d'onde. Le blocage d'une route dépend uniquement du nombre de dispositifs installés dans le réseau. La longueur d'onde pour chaque connexion est associée en fonction de la disponibilité dans les fibres, sans contrainte de continuité de longueur d'onde. La figure A.2 exprime le fonctionnement de l'algorithme pour le cas opaque.

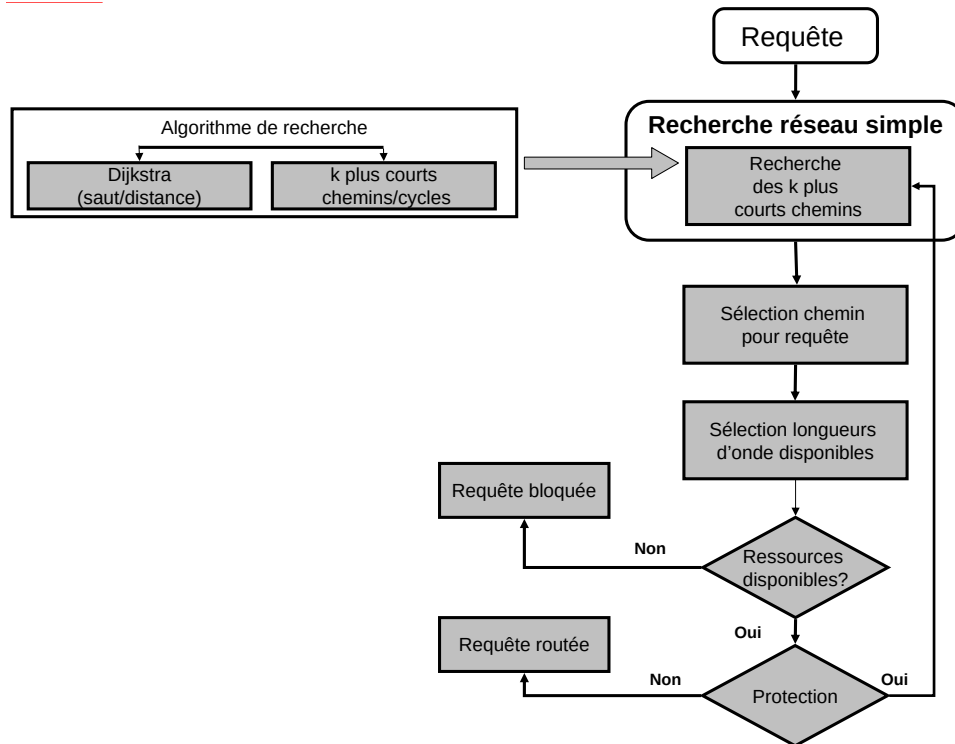


FIG. A.2 – Organigramme de l'algorithme de routage pour le scénario opaque.

A.5 Cas transparent

Dans un réseau transparent, après avoir présélectionné une route dans la matrice de réseau simple, un parcours dans le réseau en couches (avec l'association d'une longueur d'onde) est sélectionné avec la contrainte de continuité de longueur d'onde. Puis la validation de la qualité physique est effectuée. La sélection d'un parcours est effectuée en considérant le coût administratif le plus petit et la satisfaction des contraintes physiques. Ainsi une demande peut être bloquée si la qualité du signal n'est pas suffisante ou les ressources réseau ne sont pas suffisantes pour garantir l'établissement des connexions. Le diagramme de fonctionnement de l'outil dans un cas transparent est représenté en figure A.3.

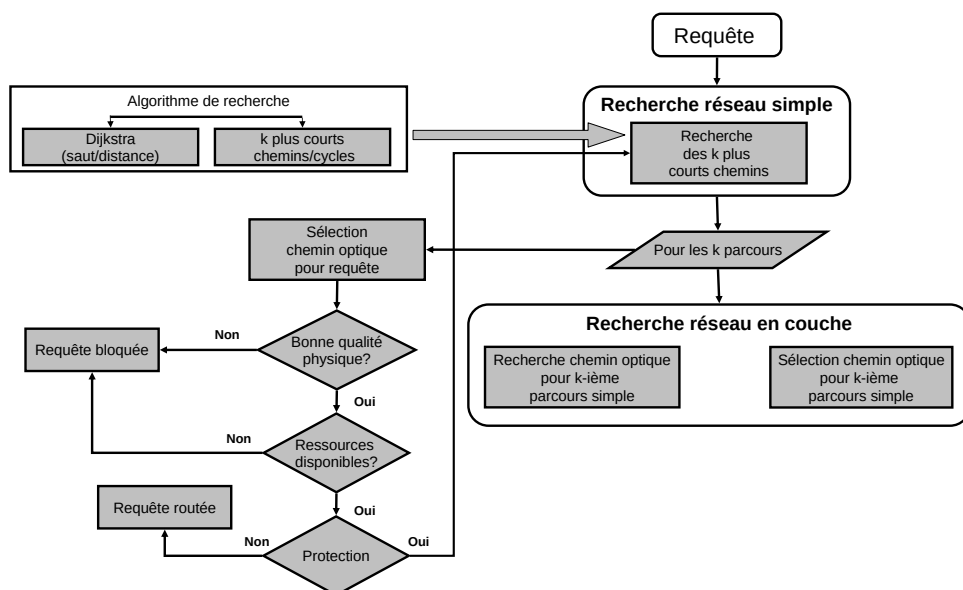


FIG. A.3 – Organigramme de l'algorithme de routage pour le scénario transparent.

A.6 Cas translucide

La sélection d'un parcours dans la couche physique est effectuée en même temps que la validation de la qualité physique d'un parcours, la recherche de(s) longueur(s) d'onde à associer à un parcours est faite dans la matrice des poids administratifs ayant la même taille que la matrice en couche qui intègre les opérations de conversion et régénération. Si la contrainte de longueur d'onde ou la qualité du signal ne peuvent pas être garanties, une opération optoélectronique est introduite dans le parcours. La sélection d'un parcours est effectuée en considérant uniquement le poids administratif associé à un parcours. Le blocage sera dû uniquement au manque de ressources (puisque le blocage sur la qualité du signal correspond à l'indisponibilité d'un régénérateur ou d'un convertisseur). La figure A.4 montre l'organigramme associé à la résolution du problème translucide.

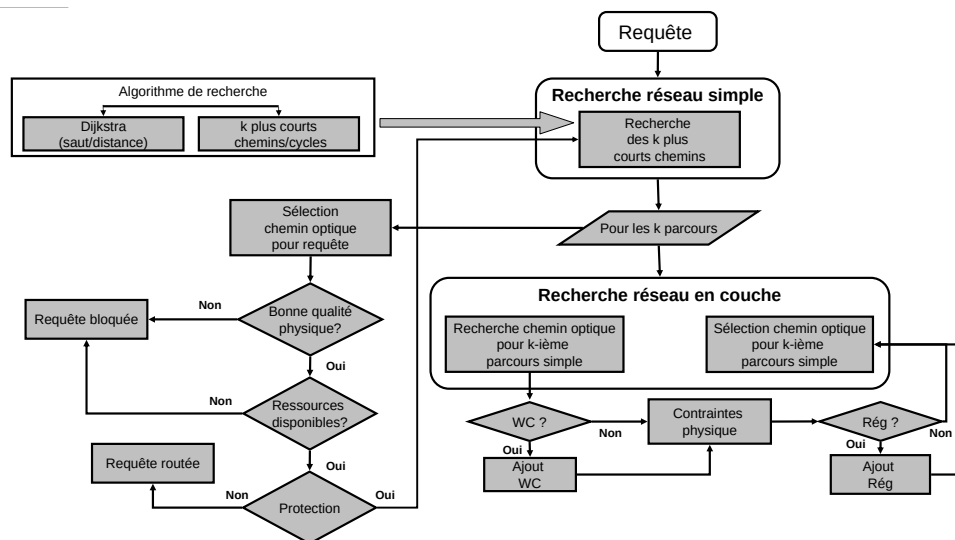


FIG. A.4 – Organigramme de l'algorithme de routage pour le scénario translucide.

Annexe B

Etude de propagation de l'erreur de mesure

Les études de dimensionnement d'un réseau avant son installation sont faites généralement en s'appuyant sur une base de données. Les valeurs utilisées pour les calculs sont tirées de mesures et donc affectées d'erreur. Le but d'un dimensionnement est d'estimer l'ordre de grandeur du nombre des dispositifs nécessaires pour pouvoir écouler tout le trafic. Au moment de la mise en service du réseau ou de la connexion un opérateur veut être sûr de ne pas avoir trop sous- ou sur-estimé le nombre de ressources nécessaires. Dans le premier cas parce que le fonctionnement correct du réseau n'est pas garanti et il faudrait installer plus de dispositifs, dans le deuxième cas parce que l'opérateur dépense (en CAPEX et OPEX) plus que ce dont il a besoin. Les études sur l'incertitude de mesure servent à évaluer l'erreur sur le dimensionnement.

Toute mesure comporte une part d'erreur. Les causes d'erreur peuvent être : une résolution insuffisante, une hystérésis, des parasites, l'influence du milieu sur le capteur, ... La valeur d'erreur considérée représente en général la plus grande variation entre la valeur moyenne de mesure (ou valeur nominale) et toutes les autres mesures effectuées.

Nous voulons calculer l'erreur maximale que nous pouvons commettre entre l'utilisation des valeurs nominales des différents paramètres physiques et le cas avec la prise en compte des erreurs de mesure. Pour une telle étude deux approches sont possibles : considérer une propagation de l'erreur statistique et une propagation de l'erreur dans le pire cas. Dans la première approche, nous supposons que l'erreur n'est pas commise toujours de la même manière, donc nous pouvons avoir des successions d'erreurs positives et négatives ; en général ces erreurs tendent à se compenser. L'erreur totale indiquera que nous avons une probabilité de $x\%$ d'avoir une erreur inférieure à celle trouvée par les calculs (la valeur de x dépend des choix sur la distribution de l'erreur de mesure, par exemple gaussienne). En utilisant la deuxième approche, nous supposons que toutes les erreurs se propagent systématiquement dans la même direction (propagation du pire cas). Avec cette approche nous sommes sûrs que la valeur d'erreur calculée est une borne supérieure de l'erreur qui sera en réalité faite.

Cette deuxième approche implique un surdimensionnement du système de transmission : pour assurer à tout moment le fonctionnement du réseau il faut considérer la possibilité d'une éventuelle estimation défavorable des mesures des systèmes. Puisqu'un opérateur doit toujours assurer le

fonctionnement du réseau, nous avons choisi de considérer la propagation de l'erreur avec l'approche du pire cas.

Il y a deux notions d'erreur : erreur absolue et erreur relative. L'erreur absolue est l'écart entre la valeur mesurée (Q^*) et celle nominale (Q) : $E = |Q - Q^*|$. L'erreur relative est l'erreur absolue divisé par la valeur nominale et indique l'impact de l'erreur absolue sur cette valeur $Er = E/|Q|$. Souvent les erreurs sont mesurées en dB. Les équations suivantes montrent les relations entre les erreurs en dB et linéaires, où nous avons indiqué avec x la valeur de mesure non affectée d'erreur et x_1 celle affectée d'erreur :

$$err_{dB} = 10\log_{10}x_1 - 10\log_{10}x = 10\log_{10}\left(\frac{x_1}{x}\right) \quad (\text{B.1})$$

$$err = 10^{err_{10}/10} = \frac{x_1}{x} \longrightarrow \frac{x_1 - x}{x} = err - 1 \quad (\text{B.2})$$

Une approche théorique de la propagation de l'erreur suppose que si les erreurs sur les différents paramètres sont indépendantes, alors nous pouvons estimer l'erreur totale sur une fonction f en la dérivant par rapport au paramètre affecté d'erreur, x , et la dérivée calculée pour la valeur nominale du paramètre considéré, x_0 , donne la propagation de l'erreur du paramètre sur la fonction f . L'équation B.3 montre la loi de propagation d'erreur pour une fonction dépendante de plusieurs paramètres :

$$\Delta z = \Delta f(x, y, w, \dots) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_0, y_0, w_0, \dots} \Delta x + \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{x_0, y_0, w_0, \dots} \Delta y + \left. \frac{\partial f}{\partial w} \right|_{x_0, y_0, w_0, \dots} \Delta w + \dots \quad (\text{B.3})$$

Une autre approche estime l'erreur Δz en calculant la différence des valeurs obtenues par la fonction quand les paramètres en entrée sont ou non affectés d'erreur.

Le tableau B.1 montre les erreurs de mesure considérées dans cette étude.

TAB. B.1 – Erreurs de mesure sur les paramètres de calcul des effets physiques.

Phénomène physique	Paramètre	Incertitude associée
Dispersion chromatique	Précision de la mesure	Entre $\pm 1\%$ et $\pm 1,5\%$
OSNR	Mesure de l'affaiblissement	$\Delta\alpha_{km} = 0,005$ dB/km
	Facteur de bruit des amplificateurs	$\Delta NF = 0,5$ dB
	Gain des amplificateurs	$\Delta G = 0,5$ dB
	Fluctuation de puissance	$\Delta P = 0,6$ dB
Phase non linéaire	Indice non linéaire	$\pm 3\%$
	Diamètre de mode	$\pm 0,1 \mu m$ à λ_0
	Fluctuation de puissance	$\Delta P = \pm 0,6$ dB
PMD	Mesure directe de la PMD	10%

B.1 Impact des erreurs de mesure sur l'estimation des effets physiques

B.1.1 Erreur de mesure sur l'OSNR

Le rapport signal à bruit est obtenu, comme indiqué au paragraphe 4.2.2, par la formule simplifiée :

$$OSNR = \frac{P_S}{2n_{sp}h\nu B_o N(G-1)} \quad (\text{B.4})$$

Dans l'équation précédente, certaines valeurs sont affectées par des erreurs de mesure : P_{in} , G et de manière indirecte par le facteur d'atténuation des fibres, α , qui a un impact sur cette formule, c.f. équation 4.10.

Pour évaluer l'impact des erreurs de mesure, nous considérerons dans cette section l'équation non simplifiée de l'OSNR (équation B.5) qui permet d'étudier le comportement non idéal de l'évolution des signaux ; nous rappelons que les pertes en ligne ($A = 10^{\alpha L}$, α le coefficient d'atténuation de la fibre et L la longueur moyenne des pas) dans un cas idéal sont compensées par le gain, G , des amplificateurs.

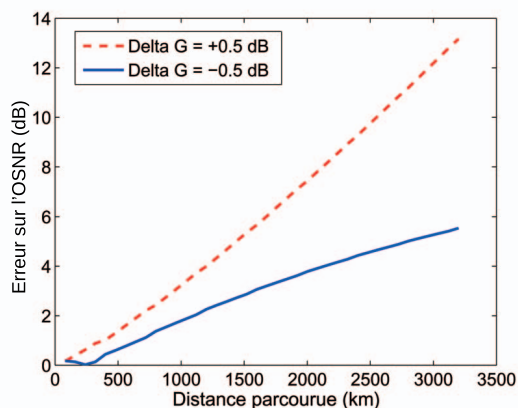
$$OSNR = \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{P_S(AG)^N}{2n_{sp}h\nu B_o(G-1)AG} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (\text{B.5})$$

Puisque la dépendance de l'OSNR vis-à-vis de AG est fortement non linéaire, la méthode de la dérivée ne donne pas de bonnes estimations de l'erreur. Pour cette raison, dans la suite pour l'évolution des différentes erreurs sur l'OSNR nous avons utilisé l'équation B.5 avec les différents paramètres affectés d'erreur. L'erreur est estimée numériquement en traçant la différence entre la valeur dans le point de fonctionnement (G_0, α_0, NF_0, P_0) et les points d'écart maximal pour chaque variable considérée.

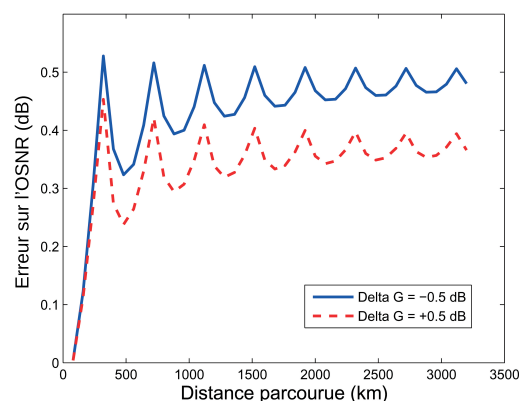
B.1.2 Impact de l'erreur de mesure sur le gain des amplificateurs

Nous rappelons que le système considéré comprend un égaliseur après chaque 5 pas (c.f. section 3.1.3). Un égaliseur implique la remise à niveau de la puissance en ligne à la sortie de ce pas, par contre il n'a aucun impact sur la propagation de la puissance de bruit.

Dans la figure B.1.a et B.1.b nous avons tracé, respectivement, l'évolution de l'erreur sur l'OSNR avec et sans égaliseur pour un $\Delta G = \pm 0,5$ dB. Nous remarquons que la présence de DGE après 5 amplificateurs permet de réduire les erreurs sur le gain, cette erreur diverge si la présence d'un DGE n'est pas prévue dans le réseau. En présence du DGE, les erreurs sont plus fortes pour



(a) Sans DGE.



(b) En présence de DGE.

FIG. B.1 – Evolution de l'erreur sur l'OSNR à cause de l'écart de gain des amplificateurs.

un faible nombre d'amplificateurs traversés et se stabilisent après ; l'erreur maximale se stabilise autour de 0,5 dB.

B.1.3 Impact de l'erreur de mesure de l'atténuation des pas

Comme dans le cas précédent, la même remarque relative à la non linéarité de la fonction B.5 peut être faite. Il n'est donc pas possible d'utiliser la méthode de la dérivée, donc nous avons utilisé les simulations pour estimer les erreurs sur l'OSNR. L'évolution de l'erreur sur l'OSNR pour des écarts sur le facteur d'atténuation des fibres égaux à 0,005 dB/km est montrée en figure B.2 ; seulement le cas avec les DGE a été représenté.

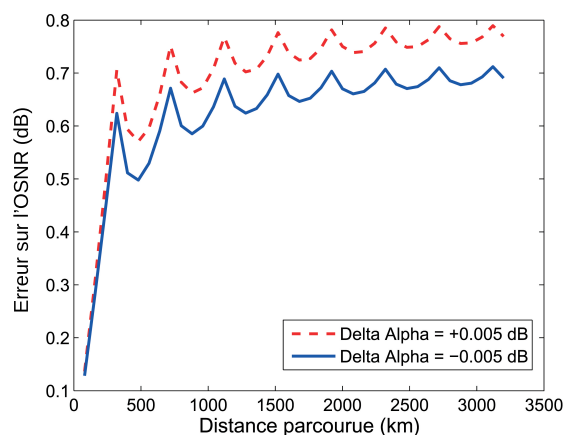


FIG. B.2 – Evolution de l'erreur sur l'OSNR à cause de la mesure sur l'atténuation des fibres en présence de DGE.

B.1.4 Erreur due à l'incertitude de puissance

L'incertitude de puissance est due aux effets Raman dans les fibres et aux courbes d'atténuation et de gain qui ne se compensent pas exactement. Cette erreur n'est pas étudiée parce qu'elle est normalement prise en compte au moment de la conception par les pénalités sur l'OSNR introduites par la phase-non linéaire et des autres effets, c.f. tableau 4.3.

B.1.5 Erreur due à l'incertitude sur le facteur de bruit

L'incertitude de la mesure du facteur de bruit est de $\pm 0,5$ dB. Cependant nous supposons que les valeurs fournies par les fabricants intègrent déjà cette erreur parmi les spécifications les fiches techniques (valeur max).

Pour résumer, l'erreur totale sur l'estimation de l'OSNR obtenue par l'accumulation des différentes erreurs de mesure, supposées mutuellement indépendantes et en prenant le pire cas systématiquement, est égale à la somme des erreurs trouvées précédemment. Nous avons observé que ces erreurs tendent à se stabiliser et sur des distances de l'ordre de 3 000 km cette erreur est de 1,3 dB.

B.2 Erreur de mesure sur la PMD

Pour estimer l'erreur totale commise sur l'évaluation de la PMD, nous considérons l'incertitude sur la mesure de la PMD des différents systèmes (fibres, amplificateurs, ...). De [Hamel 2006] nous savons qu'on peut obtenir une erreur de mesure sur la PMD de l'ordre de 10% sur chaque élément. Pour simplifier les calculs nous allons considérer uniquement l'impact des incertitudes sur la mesure des valeurs de PMD relatives aux fibres (en ligne et de compensation), partie qui affecte le plus la valeur total de PMD d'un signal. L'équation exprime l'erreur total sur la PMD d'un lien :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \text{PMD}_{Tot}}{\partial (\text{PMD}_{SMF}, \text{PMD}_{DCF})} &= \frac{\partial \sqrt{\text{PMD}_{SMF}^2 + \text{PMD}_{DCF}^2}}{\partial (\text{PMD}_{SMF}, \text{PMD}_{DCF})} \\
 &= \frac{2(\text{PMD}_{SMF} + \text{PMD}_{DCF})}{2\sqrt{\text{PMD}_{SMF}^2 + \text{PMD}_{DCF}^2}} \Delta \text{PMD} \\
 &= (\text{PMD}_{SMF} + \text{PMD}_{DCF}) \frac{\Delta \text{PMD}}{\text{PMD}} \quad (\text{B.6})
 \end{aligned}$$

Avec PMD_i , la PMD accumulée dans les fibres de ligne ($i = \text{SMF}$) et de compensation ($i = \text{DCF}$), proportionnelle au nombre à la racine carrée des kilomètres traversés.

En figure B.3 nous avons tracé l'évolution de la PMD en fonction des kilomètres parcourus (ligne continue) et les erreurs calculées avec la méthode de la dérivée (courbes avec les cercles

et les étoiles) et la méthode numérique (courbes avec les triangles), décrite précédemment. La différence entre les deux méthodes de calcul des erreurs n'est pas grande parce que la PMD est approximativement linéaire autour d'un point donné.

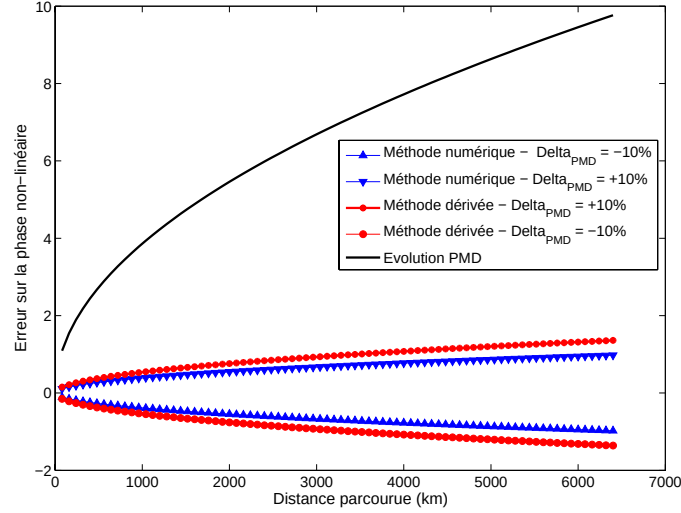


FIG. B.3 – Impact de l'erreur de mesure sur le calcul de la PMD.

L'erreur relative totale sur la PMD est de l'ordre de 15% et diminue avec les kilomètres parcourus (les courbes des erreurs ont une pente plus faible que celle de la PMD).

B.3 Incertitude sur la phase non-linéaire

Comme dans le cas de la propagation de l'erreur sur l'OSNR, dans le calcul de la propagation des erreurs sur la phase non linéaire il y a certaines erreurs (sur l'atténuation, le gain des amplificateurs) qui ont une croissance convergente autour d'une valeur à cause de la présence de DGE.

A cause de la présence d'un DGE la formule théorique de la propagation de l'erreur ne peut pas s'appliquer (modification de la valeur de la phase non linéaire non continue) et pour obtenir les résultats nous appliquons la méthode numérique.

Les erreurs de mesure affectant l'estimation de la phase non-linéaire sont celles effectuées sur : le coefficient d'atténuation de la fibre, le gain des amplificateurs, l'indice de non-linéarité des fibres et sa valeur de l'aire effective.

L'accumulation de ces erreurs avec la distance est croissante avec la distance parcourue. Les erreurs sur la phase non linéaire causées par l'incertitude sur l'indice de non-linéarité et de l'aire effective de la fibre provoquent des variations sur la phase non linéaire inférieures à 0,1 rad après 3 000 km. Les erreurs les plus importantes sont provoquées par les fluctuations du gain des amplificateurs et l'atténuation des fibres. En figure B.4 nous traçons l'évolution de l'erreur sur la phase non-linéaire en fonction de la distance parcourue, en considérant la propagation dans la fibre en ligne et dans la fibre de compensation. En figure B.4 nous avons affiché l'écart maximal (en valeur absolue) pour les deux cas cités.

Dans cette figure nous remarquons l'effet des DGE qui diminuent la croissance de l'erreur car ils réduisent les divergences sur la puissance introduite par une mauvaise réamplification du signal.

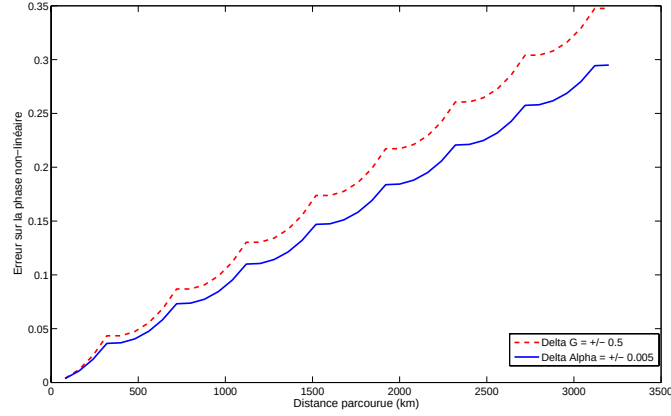


FIG. B.4 – Impact de l'erreur de mesure sur le calcul de la phase non-linéaire.

Pour connaître la nouvelle pénalité introduite par la phase non linéaire, il faut ajouter l'erreur totale obtenue pour une distance donnée (à partir de la figure 4) à la valeur nominale calculée.

B.4 Erreur de mesure sur la dispersion chromatique

Pour le calcul de la propagation d'erreur de mesure sur la dispersion chromatique, il faut considérer la propagation de l'erreur entre deux amplificateurs, puisque dans chaque amplificateur nous supposons avoir des modules de compensation. La dispersion cumulée sur un tronçon de longueur L est égale à $DCF = L\Delta DC$. Si nous avons une parfaite compensation de la dispersion en ligne par le module de compensation, alors $DC_{DCF} = -DCF$. L'erreur de mesure de la dispersion est supposée être la même pour les modules en ligne et de compensation. En dérivant la formule de dispersion nous obtenons :

$$\frac{\delta DCF}{\delta DC} = L \quad (\text{B.7})$$

Ce qui correspond à une erreur relative de DC égale à :

$$\Delta DCF = L\Delta DC = DCF \frac{\Delta DC}{DC} \longrightarrow \frac{\Delta DCF}{DCF} = \frac{\Delta DC}{DC} \quad (\text{B.8})$$

L'erreur sur l'estimation de la dispersion sur chaque pas est proportionnelle à l'erreur de mesure sur la dispersion chromatique et le facteur de proportionnalité est la longueur L du pas. Pour L égal à 80 km, l'erreur relative sur la dispersion de la fibre est de 0,01%, soit une erreur absolue de 13,7 ps/nm. L'erreur la plus grande associée à chaque pas est obtenue par

l'accumulation dans le même sens de l'erreur sur la fibre en ligne et sur le module de DCF ; ce qui correspond à avoir à chaque pas la propagation de deux fois l'erreur de mesure, comme exprimé dans l'équation.

$$Err_{1span} = 2\Delta DC_F \quad (B.9)$$

En considérant la formule 4.17, le retard total de dispersion chromatique est égal à la somme des retards sur chaque pas constituant les liens, donc l'erreur de mesure sur la dispersion chromatique se propage proportionnellement au nombre de pas traversés $Err_{tot} = \sum Err_{1span}$. Sur une liaison de 300 km, l'erreur sur la dispersion effectuée est de ± 100 ps/nm ; sur une connexion de 1 000 devient de ± 340 ps/nm. Nous observons qu'une telle erreur introduit des incertitudes trop importantes sur la valeur totale de dispersion et qui sont du même ordre que la fenêtre d'acceptabilité de dispersion propre au récepteur. Pour cette raison, les incertitudes sur la dispersion chromatique causées par l'erreur de mesure sont intégrées dans les modèles du chapitre 4 et on ajoutera une étape supplémentaire dans l'outil de calcul.

B.5 Conclusions

A l'exception de l'erreur introduite par la dispersion chromatique, les autres erreurs peuvent être prises en considération en réduisant les limites de transmission relatives à chaque effet. Le tableau B.2 résume comment les erreurs de mesure sont prises en considération dans les études de transparence d'une connexion.

TAB. B.2 – Prise en considération des erreurs de mesure dans les calculs sur la dégradation de la qualité du signal.

Type d'erreur	Type d'étude	
	Transparence connexion	Impact des erreurs sur la transparence des connexions
Erreurs sur l'OSNR	Négligée	Marge sur OSNR final
Erreurs sur la PMD	Négligée	Négligée
Erreurs sur φ_{NL}	Négligée	Marge sur φ_{NL} final
Erreurs sur la DC	Intégrée dans l'estimation de la DC	Intégrée dans l'estimation de la DC

Annexe C

Caractéristiques des parcours utilisés dans les études de dimensionnement du chapitre 6

Dans le chapitre 6 nous avons dimensionné quatre réseaux différents avec diverses matrices de trafic. Dans cette section nous résumons les caractéristiques des parcours moyens obtenus du routage effectué pour les réseaux étudiés.

Les valeurs affichées dans les tableaux indiquent les longueurs délimitant 25%, 50%, 75% ou la totalité des parcours pour chaque réseau dimensionné et pour chaque distribution de trafic considérée. Ces valeurs sont différentes en fonction que le scénario envisagé est opaque ou transparent, car un dimensionnement adapté est appliqué.

C.1 Réseau italien

C.1.1 Routage sans protection

TAB. C.1 – Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau italien, sans protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	230	420	710	1480
	Translucide	240	620	850	1700
'D2'	Opaque	320	540	770	1480
	Translucide	310	620	880	1800
'D3'	Opaque	390	530	690	1410
	Translucide	366	600	840	1780

TAB. C.2 – Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau italien, sans protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	220	400	690	1200
	Translucide	270	520	810	1830
'D2'	Opaque	310	520	760	1370
	Translucide	450	650	900	1940
'D3'	Opaque	390	520	690	1520
	Translucide	400	600	830	1870

C.1.2 Routage avec protection

TAB. C.3 – Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau italien, avec protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	300	520	850	1650
	Translucide	320	610	1000	2290
'D2'	Opaque	390	660	920	1600
	Translucide	420	770	1090	2290
'D3'	Opaque	420	620	860	1580
	Translucide	470	740	1050	2190

TAB. C.4 – Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau italien, avec protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	290	510	810	1540
	Translucide	320	620	950	2280
'D2'	Opaque	390	650	910	1780
	Translucide	440	761	1080	2430
'D3'	Opaque	430	620	880	1590
	Translucide	480	730	1040	2340

C.2 Réseau allemand

C.2.1 Routage sans protection

TAB. C.5 – Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau allemand, sans protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	330	570	800	1240
	Translucide	330	700	940	1470
'D2'	Opaque	440	670	880	1230
	Translucide	460	700	940	1470
'D3'	Opaque	460	660	820	1240
	Translucide	460	700	890	1510

TAB. C.6 – Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau allemand, sans protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	250	390	680	1160
	Translucide	250	440	730	1550
'D2'	Opaque	300	520	740	1130
	Translucide	300	560	780	1320
'D3'	Opaque	370	520	700	1130
	Translucide	370	570	760	1450

C.2.2 Routage avec protection

TAB. C.7 – Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau allemand, avec protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	330	570	800	1240
	Translucide	330	700	940	1470
'D2'	Opaque	440	670	880	1230
	Translucide	460	700	940	1470
'D3'	Opaque	460	660	820	1240
	Translucide	460	700	890	1510

TAB. C.8 – Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau allemand, avec protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	250	390	680	1160
	Translucide	250	440	730	1550
'D2'	Opaque	300	520	740	1130
	Translucide	300	560	780	1320
'D3'	Opaque	370	520	700	1130
	Translucide	370	570	760	1450

C.3 Réseau paneuropéen

C.3.1 Routage sans protection

TAB. C.9 – Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau paneuropéen, sans protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	690	1140	1980	2940
	Translucide	730	1270	2140	3990
'D2'	Opaque	900	1390	2130	2990
	Translucide	950	1690	2430	3760
'D3'	Opaque	1070	1390	2130	1990
	Translucide	1080	1690	2430	2260

TAB. C.10 – Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau paneuropéen, sans protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	680	1070	1980	2960
	Translucide	720	1310	2190	3820
'D2'	Opaque	860	1350	2090	2960
	Translucide	950	1690	2390	4150
'D3'	Opaque	1050	1340	1980	2960
	Translucide	1110	1600	2310	4090

C.3.2 Routage avec protection

TAB. C.11 – Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau paneuropéen, avec protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	850	1410	2380	4170
	Translucide	880	1680	2510	4740
'D2'	Opaque	1110	1780	2640	4187
	Translucide	1180	1990	2820	4650
'D2'	Opaque	1210	1710	2550	4140
	Translucide	1330	2000	2710	4570

TAB. C.12 – Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau paneuropéen, avec protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	850	1400	2390	4180
	Translucide	910	1630	2540	5060
'D2'	Opaque	1120	1760	2680	4190
	Translucide	1200	2050	2880	4960
'D2'	Opaque	1200	1700	2480	4190
	Translucide	1300	1960	2670	4910

C.4 Réseau américain

C.4.1 Routage sans protection

TAB. C.13 – Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau américain, sans protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	1600	2600	4400	6440
	Translucide	1600	2600	4580	6880
'D2'	Opaque	1900	3040	4660	6490
	Translucide	2140	3240	4660	6490
'D2'	Opaque	2350	3320	4520	6450
	Translucide	2350	3700	5080	6810

TAB. C.14 – Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau américain, sans protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	1650	2600	4430	6470
	Translucide	1680	2740	4740	7410
'D2'	Opaque	2180	3480	4800	6470
	Translucide	2170	3920	5360	8340
'D2'	Opaque	2600	3300	4620	6450
	Translucide	2460	3810	5170	7980

C.4.2 Routage avec protection

TAB. C.15 – Distribution parcours routage matrice $5 \times N$, réseau américain, avec protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	2030	3230	4900	7800
	Translucide	2280	3700	5600	9310
'D2'	Opaque	2450	3900	5260	7810
	Translucide	2620	4520	5990	9840
'D2'	Opaque	2840	4090	5360	8080
	Translucide	3180	4700	6000	9670

TAB. C.16 – Distribution parcours routage matrice $10 \times N$, réseau américain, avec protection.

Distribution de la matrice de trafic	Scénario	Distribution des connexions (km)			
		25%	50%	75%	100%
'D1'	Opaque	2100	3400	4960	8280
	Translucide	2280	3920	5570	9580
'D2'	Opaque	2600	4120	5400	7800
	Translucide	2780	4720	6110	9500
'D2'	Opaque	2800	4010	5260	7800
	Translucide	3090	4570	6040	9830

Bibliographie

- [ITU 2001a] ITU-T Recommendation G.694.1, "Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid", 2001. [3.1.5](#)
- [ITU 2001b] ITU-T Recommendation G.872, "Architecture of optical transport networks", 2001. [1.1](#)
- [ITU 2003a] ITU-T Recommendation G.691, "Optical interface for single channel STM and other SDH systems with optical amplifiers.", 2003. [3.3.2](#), [4.1.1](#)
- [ITU 2003b] ITU-T Recommendation G.709, "Interfaces of the Optical Transport Network (OTN)", 2003. [3.1.5](#)
- [ITU 2005] ITU-T Recommendation G.652, "Characteristics of a single-mode optical fiber and cable", 2005. [3.1.1](#), [4.3.2](#), [4.7.8](#)
- [Agrawal 1989] Agrawal G. P., "*Nonlinear Fiber Optics*", volume 1, Academic Press, 2 edition, 1989. [4.1](#), [4.2](#), [4.2.5](#)
- [Agrawal 1997] Agrawal G. P., "*Fiber-Optic Communication Systems*", volume 1, Academic Press, 2 edition, 1997. [4.1.2](#), [4.2.1](#)
- [Alcatel] Alcatel, 2006, URL www.alcatel.com. [3.1.2](#), [3.1.3](#)
- [Ali 2001] Ali M., Elie-Dit-Cosaque D. et Tancevski L., "Network Optimization with Transmission Impairments-Base Routing", dans *Proceedings of the IEEE ECOC01*, Amsterdam, 2001. [6.1](#)
- [Anderson 2000] Anderson W. T., "the monet project – a final report", dans *Proceedings of the IEEE OFC*, 2000. [1.3](#)
- [André 2003] André P. S. et Pinto A. N., "Implication of temperature in the chromatic dispersion : consequences on high speed optical networks performance", dans *Proceedings of the IEEE LEOS03*, 2003. [4.2.4](#)
- [Antona 2002] Antona J.-C., Bigo S. et Faure J.-P., "Nonlinear cumulated phase as a criterion to assess performance of terrestrial WDM systems", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC02*, Anaheim, 2002. [4.2.5](#)
- [Antoniades 2001] Antoniadis N., Lee M., Rhee J.-K., Sharma M. et Boskovic A., "Extending the reach of WDM networks by combating high channel resolution power divergence using dynamic power equalization", dans *Proceedings of the IEEE LEOS2001*, 2001. [3.1.3](#)
- [Avanex] Avanex, 2006, URL www.avanex.com. [3.1.2](#), [3.1.2](#), [3.1.3](#), [4.3.1](#)
- [Banerjee 2004] Banerjee S., Agarwal A., Grosz D. F., Maywar D. N. et Küng A. P., "Doubly Periodic Dispersion Maps for DWDM Transmission at 10 Gbit/s and 40 Gbit/s", dans *Proceedings of the IEEE ECOC04*, Stockholm, 2004. [4.2.5](#)
-

-
- [Baworntummarat 2000] Baworntummarat C. et Wuttisittikulkij L., "On the comparison of optical WDM mesh network protection strategies", dans *Proceedings of the IEEE MILCOM2000*, 2000. 1.6
- [Bayvel 2002] Bayvel P. et Killey R., "Optical Fiber Telecommunications", volume IVB, chapitre 9, pages 611–641, Elsevier Science Imprint, 2002. 4.1.2
- [Berthelon 1998] Berthelon L., Eilenberger G., Chambon O., Dembeck L., Garnot M. et Drion C., "Network element and network level parameters for the management of optical networks", dans *Proceedings of the IEEE ECOC98*, Madrid, 1998. 3.4.2
- [Birman 1995] Birman A. et Kershenbaum A., "Routing and wavelength assignment methods in single-hop all-optical networks with blocking", dans *Proceedings of IEEE INFOCOM95*, 1995. 1
- [Bischoff 1996] Bischoff M., Huber M. N., Jahreis O. et Derr F., "Operations and Maintenance for an All-Optical Transport Network", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 34(No. 11) :136–142, 1996. 3.3.1
- [Bodamer 2006] Bodamer S. et Fürst C., "Benefits of Transparent Optical Networks in the Presence of Transponder Price Erosion", dans *Proceedings of the Photonische Netze 2006*, Leipzig, 2006. 1.2, 5.7.1
- [Calient] Calient, 2006, URL www.calient.net. 4.3.1
- [Capella] Capella, 2006, URL www.capellaphotonics.com. 4.3.1
- [Cardillo 2005] Cardillo R., Curri V. et Mellia M., "Considering Transmission Impairments in Wavelength Routed Networks", dans *IEEE Proceedings of the ONDM*, Milano, 2005. 2.3.1, 4.2.1, 4.2.2
- [Cardillo 2006] Cardillo R., V C. et Mellia M., "Considering transmission impairments in configuring wavelength routed optical networks", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC06*, Anaheim, 2006. 4.4
- [Cavazzoni 2005] Cavazzoni C., Giglio A. D., Edwall G., Eilenberger G., Ferraris G., Haunstein H., Herbst S., Jaeger M., Lehmann G., Lobo J. F., Manzalini A., Santoni S. et Schiano M., "Achievements of the European NOBEL Project", dans *Proceedings of the IEEE ECOC05*, Glasgow, 2005. 6.3
- [Cavendish 2004] Cavendish D., Kolarov A. et Sengupta B., Routing and wavelength assignment in wdm mesh networks, dans *Proceedings of the IEEE Globecom2004*, 2004. 1.6, 2
- [Chang-Hasnain 2002] Chang-Hasnain C. J., "Optical Fiber Telecommunications", volume IVA, chapitre 13, pages 666–698, Elsevier Science Imprint, 2002. 4.2.1
- [Chen 1996] Chen C. et Banerjee S., "A new model for optimal routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexed optical networks", dans *Proceedings of the IEEE INFOCOM96*, 1996. 2.3
- [Chraplyvy 1993] Chraplyvy A. R. et Tkach R. W., "What is the Actual Capacity of Single-Mode Fibers in Amplified Lightwave Systems?", *IEEE Photonics Technologies Letters*, Vol. 5(No. 6) :666–668, 1993. 1.2
- [Ciaramella 2005] Ciaramella E., Presi M., Giorgi L., D'Errico A., Herbst S. et Elbers J.-P., "A Simple Scheme to Suppress Transient-Induced Degradations in Transparent Optical Networks", dans *Proceedings of the ECOC05*, Glasgow, 2005. 3.5.1
- [Cisco] Cisco, 2006, URL www.cisco.com. 3.1.2, 3.1.3
-

-
- [Coffman 2002] Coffman K. G. et Odlyzko A. M., "*Optical Fiber Telecommunications*", volume IV B, chapitre 2, pages 57–153, Elsevier Science Imprint, 2002. [2.2.1](#)
- [Corvis] Corvis, 2006, URL www.corvisequipment.com. [4.3.1](#)
- [Cugini 2005] Cugini F., Andriolli N., Valcarengi L. et Castoldi P., "Physical Impairment Aware Signalling for Dinamic Lightpath Set Up", dans *IEEE Proceedings of the ECOC05*, Glasgow, 2005. [4.2](#)
- [Dijkstra 1959] Dijkstra E. W., "A note on two problems in connection with graphs", *Numerische Mathematik*, Vol. 1 :269–271, 1959. [2.3.2](#), [4.5.3](#), [5.9.2](#)
- [Doerr 2006] Doerr C. R., "Degree-4 node using a single wavelength-selective switch", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC06*, 2006. [3.2](#)
- [Düser 2005] Düser M., "Investigation of the impact of traffic growth and vareability on future network architecture", dans *Proceedings of the IEEE ECOC05*, Glasgow, 2005. [2.2.1](#)
- [Essiambre 2002] Essiambre R., Raybon G. et Mikkelsen B., "*Optical Fiber Telecommunications*", volume IVB, chapitre 15, pages 725–861, Elsevier Science Imprint, 2002. [4.1.2](#), [4.2.1](#), [4.2.5](#), [4.2.5](#)
- [Filho 2003a] Filho A. L. S. et Waldman H., "Strategies for Designing Translucent Wide-Area Networks", dans *Proceedings of IEEE IMOC03*, Foz do Iguacu, 2003. [1.4](#), [1.6](#)
- [Filho 2003b] Filho A. L. S. et Waldman H., "Strategies for Designing Translucent Wide-Area Networks", dans *Proceedings of IEEE ECOC03*, 2003. [1.4](#), [1.6](#)
- [Frignac 2000] Frignac Y. et Bigo S., "Numerical optimization of residual dispersion in dispersion-managed systems at 40 Gbit/s", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC00*, 2000. [4.2.5](#)
- [Garnot 1999] Garnot M., "*Réseaux optiques de telecommunications multiplexées en longueur d'onde : architectures et stratégies d'allocation de la longueur d'onde*", Thèse de doctorat, University of Nebraska, 1999. [1.6](#)
- [Gerstel 2000] Gerstel O. et Ramaswami R., "Optical Layer Survivability : a Services Persepctive", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 38(No. 3) :104–113, 2000. [2.2.2](#), [2.2.5](#)
- [Ghani 2000] Ghani N., Dixit S. et Wang T., "On IP-over-WDM Integration", *IEEE Communication Magazine*, Vol. 38(No. 3) :72–84, 2000. [6.3](#)
- [Giles 2002] Giles R., Kumaran K., Mitra D., Nuzman C. et Saniee I., "Selective transparency in resilient optical networks", dans *Proceedings of the IEEE MILCOM02*, 2002. [1.3.2](#), [1.4](#), [1.6](#)
- [Giles 2004] Giles R., Kumaran K., Mitra D., Nuzman C. et Saniee I., "Selective transparency in optical networks", dans *Proceedings of the IEEE ECOC04*, Copenhagen, 2004. [5.4.1](#)
- [Goldstein 1994] Goldstein E. L., Eskildsen L. et Elrefaie A. F., "Performance Implications of Component Crosstalk in Transparent Lightwave Networks", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 6(No. 5) :657–660, 1994. [4.1.1](#)
- [Grüner-Nielsen 1999a] Grüner-Nielsen L., Knudsen S. N., Veng T., Edvold B. et Larsen C. C., "Design and manufacture of dispersion compensating fibre for simultaneous compensation of dispersion and dispersion slope", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC02*, Anaheim, 1999. [4.2.4](#)
- [Grüner-Nielsen 1999b] Grüner-Nielsen L., Knudsen S. N., Veng T., Edvold B. et Larsen C. C., "Design and manufacture of dispersion fibre for simultaneous compensation of dispersion and dispersion slope", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC/IOOC99*, 1999. [3.1.4](#), [4.7.5](#)
-

-
- [Hamel 2006] Hamel A., Gavignet P., Salun S. et Poirrier J., "Design trade-off for high PMD routes in installed transmission systems", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC06*, 2006. [B.2](#)
- [He 2006] He J. et Brandt-Pearce M., "Using Wavelength Ordering for Crosstalk Limited Networks", dans *Proceedings of IEEE/OSA OFC06*, 2006. [2.3.1](#)
- [Ho 1998] Ho K. P., Chan C. K., Tong F. et Chen K., "Exact Analysis of Homodyne Crosstalk Induced Penalty in WDM Networks", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10(No. 3) :457–458, 1998. [4.2.6](#)
- [Huang 2005] Huang Y. G., Heritage J. P. et Mukherjee B., "Connection Provisioning with Transmission Impairment Consideration in Optical WDM Networks with High-Speed Channels", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23(No. 3) :982–993, 2005. [2.3.1](#), [4.2.1](#), [4.4](#)
- [Ilyas 2003] Ilyas M. et Mouftah H. T., éditeurs, *"The handbook of Optical Communication Networks"*, CRC Press, 2003. [1](#), [2.2.2](#)
- [Infinera] Infinera, 2006, URL www.infinera.com. [6.3](#)
- [Jaumard 2004] Jaumard B., Meyer C., Thiongane B. et Yu X., "ILP Formulations and Optimal Solution for the RWA Problem", dans *Proceedings of the IEEE CGlobecom 2004*, 2004. [2.3.1](#)
- [JDS] JDS, 2006, URL www.jdsu.com. [3.1.3](#), [4.3.1](#)
- [Ji 2004] Ji H. C., Lee J. H. et Chung Y. C., "Evaluation on system outage probability due to temperature variation and statistically distributed chromatic dispersion of optical fiber", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 22(No. 8) :1893–1898, 2004. [4.2.4](#)
- [Joindot 1996] Joindot M. et Joindot I., *"Les télécommunications par fibres optiques"*, Dunod, 1^{ère} édition, 1996. [4.1](#), [4.1.1](#)
- [Karlsson 2004] Karlsson M., Sunnerud H. et Olsson B.-E., "PMD Compensation using 2R and 3R regenerators", dans *Proceedings of IEEE ECOC04*, 2004. [2](#)
- [Kato 2000] Kato T., Koyano Y. et Nishimura M., "Temperature Dependence of Chromatic Dispersion in various types of optical fiber", *IEEE Optics Letters*, Vol. 25(No. 16) :1156–1158, 2000. [4.2.4](#), [4.2.4](#)
- [Keyworth 2006] Keyworth B. P., Garrett K. et Mand G., "Wavelength Selective Switch Technologies", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC06*, 2006. [3.2](#)
- [Killey 2005] Killey R. I., Watts P. M., Glick M. et Bayvel P., "Electronic precompensation techniques to combat dispersion and nonlinearities in optical transmission", dans *Proceedings of the ECOC05*, Glasgow, 2005. [6.3](#)
- [Kilper 2004] Kilper D. C., Bach R., Blumenthal D. J., Einstein D., Landolsi T., Ostar L., Preiss M. et Willner A. E., "Optical Performance Monitoring", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 22(No. 1) :294–304, 2004. [3.5](#), [3.5.2](#)
- [Kogelnik 2002] Kogelnik H. et Jopson R. M., *"Optical Fiber Telecommunications"*, volume IVB, chapitre 15, pages 725–861, Elsevier Science Imprint, 2002. [4.1.1](#), [4.1.1](#)
- [Kulkarni 2005] Kulkarni P., Tzanakaki A., Machuca C. M. et Tomkos I., "Benefits of Q-Factor based Routing in WDM Metro Networks", dans *Proceedings of the IEEE ECOC05*, Glasgow, 2005. [2.3.1](#), [4.2.1](#), [4.4](#)
- [Lalk 1994] Lalk G. R., Habiby S. F., Vodhanel R. S., Bala K. et Bonenfant P., "Network Operations and Wavelength Division Multiplexing", dans *Proceedings of the IEEE LEOS94*, 1994. [3.3.3](#)
-

-
- [Lao 2004] Lao R. N., Friskney R. et Killey R. I., "Effect of sparse wavelength-conversion on Network Tolerance to Inaccuracy in Traffic Load Forecast", dans *Proceedings of the IEEE ECOC04*, Stockholm, 2004. 1.6, 2.3.1
- [Lee 1999] Lee J. T., "*Efficient Placement of Wavelength converters in an Optical Fiber Network*", Thèse de doctorat, University of Nebraska, 1999. 1.6, 2.3.1
- [Leppla 2003] Leppla R. et Weiershausen W., "Networking aspects of link PMD and its compensation", dans *Proceedings of the IEEE LEOS03*, 2003. 4.7.8
- [Li 2003] Li B. et Chu X., "Routing and Wavelength Assignment vs. Wavelength Converter Placement in All-Optical Networks", *IEEE Optical Communication*, Vol. 41(No. 8) :S22–S28, 2003. 2.3.1
- [LightConnect] LightConnect, 2006, URL www.lightconnect.com. 3.1.3
- [Livas 2005] Livas J., "Optical Transmission Evolution : from Digital to Analog to ? Network Tradeoffs between Optical Transparency and Reduced Regeneration Cost", *IEEE Journal of Lighthwave Technologies*, Vol. 23(No. 1) :220–224, 2005. 1.3.2, 1.3.2
- [Machuca 2006] Machuca C. M., "Expenditures study for network operators", dans *Proceedings of the IEEE ICTON06*, Nottingham, 2006. 5.1
- [Machuca 2003] Machuca C. M. et Tomkos I., "Failure Detection for Secure Optical Networks", dans *Proceedings of the IEEE ICTON03*, 2003. 3.4.1, 3.4.2, 3.5
- [Maeda 1998] Maeda M. W., "Management and Control of Transparent Optical Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 16(No. 7) :1008–10023, 1998. 3.3.2, 3.5
- [Maier 2005] Maier G., Giglio A. D., Ferraris G., Quagliotti M., Patre S. D. et Savastano L., "An Approach for Dynamic Optical Transport Network Planning and Analysis", dans *Proceedings of the IEEE DRCN05*, Ischia, 2005. 2.3.1
- [Marom 2005] Marom D. M., Neilson D. T., Greywall D. S., Pai C.-S., Basavanhally N. R., Aksyuk V. A., Lopez D. O., Pardo F., Simon M. E., Low Y., Kolodner P. et Bolle C. A., "Wavelength-Selective 1 x K Switches Using Free-Space Optics and MEMs Micromirrors : Theory, Design, and Implementation", *IEEE Journal of Lighthwave Technology*, Vol. 23(No. 4) :1620–1630, 2005. 1.3, 3.2, 3.2.2
- [Mas 2005] Mas C., Tomkos I. et Tonguz O. K., "Failure Location Algorithm for Transparent Optical Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 23(No. 8) :1508–1519, 2005. 3.4.1
- [Masetti 2005] Masetti F., "Service Delivery Architecture for Premium IPTV and Triple Play", dans *Proceedings of the IEEE DRCN05*, Ischia, 2005. 2.2.1
- [Mechels 2003] Mechels S., Muller L., Morley G. D. et Tillett D., "1D MEMs-Based Wavelength Switching Subsystem", *IEEE Communication Magazine*, Vol. 41(No. 3) :88–94, 2003. 1.3, 3.2
- [Meflah 2005] Meflah L., Thomsen B., Mitchell J., Bayvel P., Lehmann G., Santoni S. et Bollezn B., "Advanced Optical Performance Monitoring for Dynamically Reconfigurable Networks", dans *Proceedings of the NOC05*, London, 2005. 3.5, 5.5.2
- [Mello 2005] Mello D. A. A., Schupke D. A., Scheffel M. et Waldman H., "Availability maps for connections in WDM optical networks", dans *Proceedings of the IEEE DRCN05*, Ischia, 2005. 5.10.2
- [Metconnex] Metconnex, 2006, URL www.metconnex.com. 4.3.1
-

-
- [Morea 2003] Morea A., Etude et modélisation de réseaux transparents/translucides, Rapport de stage de fin d'études, 2003. [2.3.2](#), [A](#), [A.1](#)
- [Morea 2006a] Morea A. et Boyer-Heard I., "Availability comparison on opaque and translucent networks", dans *IEEE Proceedings of the Networks2006*, à publier, New Dehli, 2006. [5.10.2](#)
- [Morea 2006b] Morea A. et Boyer-Heard I., "Availability of translucent networks based on WSS nodes, comparison with opaque networks", dans *IEEE Proceedings of the ICTON06*, Nottingham, 2006. [5.10.2](#)
- [Morea 2004a] Morea A., Nakagima H., Chacon L., Louedec Y. L. et Sebillé J.-P., "Impact of the reach distance of the WDM systems on the cost of translucent optical transport networks", dans *Proceedings of the IEEE Networks2004*, Wien, 2004. [2.2.2](#), [5.3](#), [5.4.1](#), [5.8](#), [5.9.2](#)
- [Morea 2004b] Morea A., Nakajima H., Chacon L., Rouzic E. L., Decocq B. et Sebillé J.-P., "Impact of the reach of WDM systems and traffic volume on the network resources and cost of translucent optical transport networks", dans *Proceedings of the IEEE ICTON04*, Wroclaw, 2004. [5.4.1](#)
- [Morea 2005] Morea A. et Poirrier J., "A Critical Analysis of the Possible Cost Savings of Translucent Networks", dans *Proceedings of the IEEE DRCN05*, Ischia, 2005. [5.3](#), [1](#)
- [O'Sullivan 2005] O'Sullivan M. S., Roberts K. et Bontu C., "Electronic Dispersion Compensation Techniques for Optical Communication Systems", dans *Proceedings of the ECOC05*, Glasgow, 2005. [6.3](#)
- [Penninckx 2003] Penninckx D., Cherlet G., Antona J.-C. et Noirie L., "Simple engineering rules for a transparent waveband-based optical backbone network", *OSA Journal of Optical Networking*, Vol. 2(No. 2) :38–45, 2003. [4.2.5](#)
- [Politi 2006] Politi C. T., Anagnostopoulos V., Matrakidis C. et Stadvas A., "Physical Layer Impairment Aware Routing algorithms base on Analytically Calculated Q-factor", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC06*, Anaheim, 2006. [4.4](#)
- [Ramamurthy 1998] Ramamurthy B., Feng H., Datta D., Heritage J. P. et Mukherjee B., "Transparent vs. opaque vs. translucent wavelength-routed optical networks", dans *Proceedings of IEEE/OSA OFC98*, 1998. [1.4](#), [1.6](#), [2.3.1](#)
- [Ramamurthy 2001] Ramamurthy B., Yaragorla S. et Yang X., "Translucent Optical WDM Networks for the Next-Generation Backbone Networks", dans *Proceedings of the IEEE Globecom01*, 2001. [1.6](#)
- [Ramaswami 1994] Ramaswami R. et Sivarajan K., "Optimal routing and wavelength assignment in all-optical networks", *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 3 :489–500, 1994. [1](#)
- [Ramaswami 1998] Ramaswami R. et Sivarajan K., *"Optical Networks - A Practical Perspective, Second Edition"*, Morgan Kaufmann, 1^{ère} édition, 1998. [1.1](#), [1.1](#), [1.3.1](#), [3.2.1](#), [3.2.3](#), [3.3.3](#)
- [Rejeb 2003] Rejeb R., Pavlosoglou I., Leeson M. S. et Green R. J., "Securing All-Optical Networks", dans *Proceedings of the IEEE ICTON03*, 2003. [3.4.2](#)
- [Rhee 2003] Rhee J.-K., Madara R. et Kondis J., "Group Delay Dispersion Performance Requirement for Optical Cross Connects and Add-Drop Multiplexers in Ultralong-Haul DWDM Transport Systems", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 15(No. 6) :876–878, 2003. [4.1.1](#)
- [Saad 2004] Saad M. et Luo Z., "On the Routing and Wavelength Assignment in Multifiber WDM Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 22(No. 9) :1708–1717, 2004. [2.3.1](#)
-

-
- [Sabella 1998] Sabella R., Iannone E., Listanti M., Berdusco M. et Binetti S., "Impact of Transmission Performance on Path Routing in All-Optical Transport Network", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 16(No. 11) :1965–1972, 1998. [2.3.1](#)
- [Saleh 2003] Saleh A. A. M., "Defining All-Optical Networking and Assessing Its Benefits in Metro, Regional and Backbone Networks", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC03*, 2003. [1.2](#), [1.6](#), [4.7.8](#)
- [Schinabeck 2006] Schinabeck A., Haunstein H., Zhou Y. R. et Lord A., "All Optical Network Dimensioning considering Transmission Impairments Mitigation using Electronic Equalization", dans *Proceedings of the Photonische Netze 2006*, Leipzig, 2006. [5.5.1](#)
- [Shen 2000] Shen S. et Weiner A. M., "Error-free detection of ultrashort-pulse CDMA signals in a hybrid optical WDM-CDMA systems", dans *Proceedings of the IEEE LEOS00*, 2000. [3.5.1](#)
- [Shen 1999] Shen Y., Lu K. et Gu W., "Coherent and Incoherent Crosstalk in WDM Optical Networks", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17(No. 5) :759–764, 1999. [4.1.1](#)
- [Shukla 2006] Shukla V. S., "Interoperability and optical network performance", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC*, 2006. [3.3.2](#), [6.3](#)
- [Simmons 2005] Simmons J. M., "On Determining the Optimal Reach for a Long-Haul Network", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23(No. 3) :1039 – 1048, 2005. [1.6](#), [5.4.1](#)
- [Staessens 2005] Staessens D., Audouin O., Verbrugge S., Colle D., Pickavet M. et Demeester P., "Assessment of economical interest of transparent switching", dans *Proceedings of the IEEE ECOC05*, Glasgow, 2005. [5.4.1](#)
- [Strand 2002] Strand J., "*Optical Fiber Telecommunications*", volume IV B, chapitre 3, pages 57–153, Elsevier Science Imprint, 2002. [1.1](#), [1.2](#), [1.4](#), [2.2.3](#), [3.3.1](#), [3.5](#)
- [Strand 2001] Strand J. et Chiu A. L., "Issues For Routing in the Optical Layer ", *IEEE Communication Magazine*, Vol. 39(No. 2) :81–87, 2001. [4.2.2](#), [4.2.2](#), [4.2.3](#), [4.2.4](#)
- [Titchmarsh 1994] Titchmarsh J. et Chown M., "Submarine cables ; the ultimate in reliability", dans *IEE colloquium on Reliability of Fiber Optic Cable Systems*, 1994. [3.2.2](#), [5.10.2](#)
- [Tkach 1998] Tkach R. W., Goldstein E. L., Nagel J. A. et Strand J. L., "Fundamental limits of optical transparency", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC98*, 1998. [3.5.1](#)
- [Tkach 2001] Tkach R. W. et Young M. R., "The Evolution of Optical Networks : the Value of Transparency and Ultra-Long Reach" , dans *Proceedings of the IEEE LEOS01*, San Diego, 2001. [5.3](#)
- [Tomkos 2001] Tomkos I., Rhee J. K., Iydroose P., Hesse R., Vodhanel R. et Boskovic A., "Filter concatenation penalties for 10 Gbit/s sources suitable for short-reach cost-effective WDM metropolitan area networks", dans *Proceedings of the IEEE ECOC01*, We.P.48, IEEE, Amsterdam, 2001. [4.2.6](#), [5.3](#)
- [Tornatore 2005] Tornatore M., Maier G. et Pattavina A., "Availability Design of Optical Transport Networks", *IEEE Journal on Selected Areas on Communications*, Vol. 23(No. 8) :1520 – 1532, 2005. [5.10.2](#)
- [Tropic Net] Tropic Net, 2006, URL www.tropicnetworks.com. [3.5.1](#)
- [Tur 2002] Tur M., Levy U. et Danziger Y., "Modules for chromatic dispersion and dispersion slope management", dans *Proceedings of the IEEE/OSA OFC02*, Anaheim, 2002. [4.2.4](#)
-

-
- [Vasilyev 2003] Vasilyev M., Tomkos I., Mehendale M., Ree J.-K., Kobayakov A., Ajgaonkar M., Tsuda S. et Sharma M., "Transparent Ultra-Long-Haul DWDM Networks with 'Broadcast-and-Select' OADM/OXC Architecture", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21(No. 11) :2661–2672, 2003. [4.2.5](#), [4.2.5](#)
- [Vasseur 2004] Vasseur J.-P., Pickavet M. et Demeester P., "*Network Recovery - Protection and Restoration of Optical, SONET - SDH, IP, and MPLS*", Elsevier, 2004. [1.1](#), [2.2.5](#)
- [Verbrugge 2005] Verbrugge S., Colle D., Demeester P., Huelsermann R. et Jaeger M., "General Availability Model for Multilayer Transport Networks", dans *Proceedings of the IEEE DRCN05*, Ishia, 2005. [5.9.2](#), [6.1](#)
- [Vorbeck 2003] Vorbeck S. et Leppla R., "Dispersion and Dispersion Slope Tolerance of 160 Gbit/s Systems, considering the temperature dependence of chromatic dispersion", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 15(No. 10) :1470–1472, 2003. [4.2.4](#)
- [Wagner 2000] Wagner R. E., "Evolution of optical networking", dans *Proceedings of the IEEE LEOS*, 2000. [1.4](#)
- [Willner 2002] Willner A. E. et Hoanco B., "*Optical Fiber Telecommunications*", volume IV A, chapitre 14, pages 642–724, Elsevier Science Imprint, 2002. [4.2.4](#), [4.2.5](#)
- [Winzer 2005] Winzer P. J. et Essiambre R.-J., "Electronic pre-distortion for advanced modulation formats", dans *Proceedings of the ECOC05*, Glasgow, 2005. [6.3](#)
- [Xie 2005] Xie C., "A Doubly Periodic Dispersion Map for Ultralong-Haul 10- and 40Gbit/s Hybrid DWDM Optical Mesh Networks", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 17(No. 5) :1091–1093, 2005. [4.2.5](#)
- [Y. Wang 2005] Y. Wang e. M. H. L. T. Hiang Chen, "A Tabu Search Algorithm for Static Routing and Wavelength Assignment Problem", *IEEE Communications Letters*, Vol. 9(No. 9) :841–843, 2005. [2.3.1](#)
- [Yang 2005a] Yang X. et Ramamurthy B., "Dynamic Routing in Translucent WDM Optical Networks : the Intradomain Case", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23(No. 3) :955–971, 2005. [2.2.1](#), [4.4.4](#)
- [Yang 2005b] Yang X., Shen L. et Ramamurthy B., "Survivable Lightpath Provisioning in WDM Mesh Networks Under Shared Path Protection and Signal Quality", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23(No. 4) :1556–1567, 2005. [2.3.1](#), [4.4](#)
- [Yaragolra 2000] Yaragolra S., "*Sparse Regeneration in a Translucent Wide Area Optical Network*", Thèse de doctorat, University of Nebraska, 2000. [1.6](#), [2.3.1](#)
- [Ye 2003] Ye Y., Chai T., Cheng T. et Lu C., "Algorithms for the design of WDM Translucent Optical Networks", *OSA Optics Express*, Vol.11(No. 22) :2917–2926, 2003. [2.3.1](#)
- [Zahr 2005] Zahr S. A., Gagnaire M., Puech N. et Koubaa M., "Physical Layer Impairments in WDM Core Networks : a Comparison between a North-American Backbone and a Pan-European Backbone", dans *Proceedings of the IEEE/CreateNet GOSP*, Boston, 2005. [4.5.2](#), [6.1](#)
- [Zami 2004] Zami T., Antona J.-C., Peloso P., Rouzic E. L., Morea A., Joindot M., Fracasso B., Gravey P. et Gagnaire M., "Dimensioning of WDM transparent networks based on the Quality of Transmission", dans *Proceedings of BroadBand Europe*, Brugge, 2004. [1.4](#), [4.2.1](#), [4.2.5](#)
- [Zang 2000] Zang H., Jue J. P. et Mukherjee B., "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks", *IEEE Optical Networks Magazine*, Vol. 1 :47–60, 2000. [1](#), [2.3.1](#)
-

-
- [Zyskind 2002] Zyskind J., Barry R., Pendock G., Cahill M. et Ranka J., "*Optical Fiber Telecommunications*", volume IV B, chapitre 5, pages 198–231, Elsevier Science Imprint, 2002.
[3.1.5](#), [4.1.1](#), [4.1.1](#), [4.2.1](#)
-

Liste des publications

A. Morea, H. Nakajima, L. Chacon, Y. Le Louedec, J.-P. Sebille, "Impact of the reach distance of the WDM systems on the cost of translucent optical transport networks", Proceedings de IEEE Networks2004, Wien, Juin 2004.

A. Morea, H. Nakajima, L. Chacon, E. Le Rouzic, B. Decocq et J.-P. Sebille, "Impact of the reach of WDM systems and traffic volume on the network resources and cost of translucent optical transport networks", Proceedings de IEEE ICTON04, Wroclav, Juillet 2004.

A. Morea, H. Nakajima, L. Chacon, E. Le Rouzic and J.-P. Sebille, "Resources and Cost Behaviour of Translucent Optical Transport Networks", Proceedings de IEEE ECOC04, Stockholm, Septembre 2004.

T. Zami, J.-C. Antona, P. Peloso, E. Le Rouzic, A. Morea, M. Joindot, B. Fracasso, P. Gravey et M. Gagnaire, "Dimensioning of WDM transparent networks based on the Quality of Transmission", Proceedings de BroadBand Europe, Brugge, Décembre 2004.

A. Morea et J. Poirrier, "Are Translucent Networks Always Economically Attractive ?", Proceedings de IEEE ECOC05, Glasgow, Septembre 2005.

A. Morea et J. Poirrier, "A Critical Analysis of the Possible Cost Savings of Translucent Networks", Proceedings de IEEE DRCN05, Ischia, Octobre 2005.

A. Morea et I. Boyer-Heard, "Availability of translucent networks based on WSS nodes, comparison with opaque networks", Proceedings de IEEE ICTON06, Nottingham, Juin 2006.

A. Morea et I. Boyer-Heard, "Availability of translucent networks based on WSS nodes, comparison with opaque networks", Proceedings de IEEE Networks2006, à publier, New Dehli, Novembre 2006.
