

Démultiplexage en longueur d'onde

Cette partie introduit le démultiplexage en longueur d'onde. Après avoir défini son principe de fonctionnement, je vais expliquer pourquoi et comment nous allons combiner cette technologie avec des sources de photons corrélés et intriqués. Par la suite je vais décrire les différentes caractéristiques d'un démultiplexeur et leur impact sur la distribution des paires de photons. Je finirai par la présentation de trois technologies différentes de démultiplexeurs.

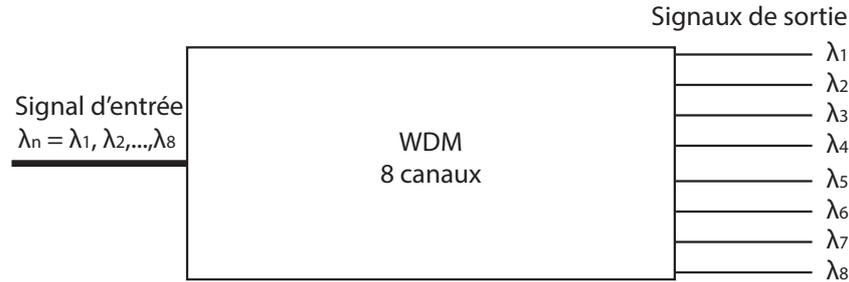
2.1 Principe du démultiplexage en longueur d'onde

Le démultiplexage en longueur d'onde est une opération où on sépare les différentes longueurs d'onde. Considérons un signal optique comprenant les longueurs d'onde $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$. Il est possible de diviser celui-ci en une série n de signaux de sortie (avec $n = 1, 2, \dots, i$) de telle sorte que la sortie $sortie(n)$ permette d'extraire la longueur d'onde λ_n . La figure 2.1 illustre ce principe avec un exemple de démultiplexeur à 8 canaux de sortie.

Le procédé inverse est le multiplexage en longueur d'onde. Dans ce cas, il est possible de fusionner plusieurs signaux optiques de différentes longueurs d'ondes en un seul. A noter que le même composant peut-être utilisé comme multiplexeur et démultiplexeur. Le multiplexage en longueur d'onde est utilisé dans les communications classiques, pour augmenter la capacité d'un réseau.

Le démultiplexage en temps (Time Division Multiplexing : TDM) permet à partir d'un même chemin de transmission, de connecter plusieurs utilisateurs, en répartissant en domaines temporels, les temps d'interactions qui leur sont attribués. Il nécessite une conversion des signaux optiques en signaux électriques et vice versa, ce qui limite la vitesse de traitement à celle des circuits électroniques employés dans le réseau.

Le démultiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing : WDM) quant à lui, permet un traitement direct sur les signaux optiques, du fait que chaque utilisateur a une bande passante fréquentielle qui lui est attribuée [DDF03].

FIGURE 2.1: *Démultiplexeur à 8 canaux de sortie*

Comment peut-on exploiter cette technologie dans les communications quantiques? Quelles sont les technologies utilisées pour aboutir au démultiplexage? Comment les caractéristiques d'un démultiplexeur influencent-elles les performances en communications classiques puis quantiques? C'est ce que nous allons décrire dans les parties suivantes.

2.2 Le démultiplexage pour les communications quantiques

Cette discrimination en longueur d'onde présente un intérêt majeur pour la distribution de paires de photons intriqués à plusieurs couples d'utilisateurs. Au lieu de se limiter à deux interlocuteurs par source, il devient possible à partir d'une seule qui est large bande, de réaliser une multidistribution en associant un utilisateur à chaque canal de sortie. La bande spectrale comprend une infinité de couples de photons signal et complémentaire aux fréquences respectives ω_s et ω_i et est limitée par les conditions d'accord de phase. L'utilisation d'une source unique permet un gain considérable de ressources.

Afin d'obtenir une source de photons corrélés ou intriqués qui soit large bande, il faut pouvoir générer des paires de photons dont les fréquences sont réparties selon le spectre fréquentiel le plus large possible. Ici on considère toute source dont la bande spectrale est supérieure à 10 nanomètres, comme large bande, du fait qu'elle est susceptible de couvrir spectralement un démultiplexeur à 8 canaux de sortie (chacun ayant une largeur de canal de 100 GHz, caractéristiques identiques à 2 de nos 4 démultiplexeurs testés par la suite.) Le cristal de MgOPPLN que nous utilisons génère des paires de photons sur un spectre s'étalant sur une centaine de nanomètres [Smi10]. Un démultiplexeur à 16 canaux de sortie couvre typiquement vingt nanomètres, ce qui est cinq fois moins. Par conséquent la bande spectrale de notre source est donc largement suffisante.

Je vais m'intéresser ici au démultiplexage en longueur d'onde, sur des paires de photons corrélés générées par fluorescence paramétrique. Rappelons que la conservation d'énergie $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ assure une symétrie entre les photons signal et complémentaire par rapport à la fréquence moitié de pompe. Reprenons l'exemple du démultiplexeur de la figure 2.1. En choisissant une fréquence de pompe ω_p tel que $\omega_p/2$ corresponde

à la fréquence centre du démultiplexeur, soit $\omega_c = \frac{\omega_8 - \omega_1}{2}$, on rend ainsi possible la répartition de chaque paire de photons signal et complémentaire vers un couple de canaux symétriques par rapport à $\omega_p/2$. A noter que la fréquence centrale du filtre ne correspond pas nécessairement à un canal. Dans le cas d'un filtre à 8 canaux, on permet ainsi aux couples de canaux 4-6, 3-5, 2-7 et 1-8 de communiquer si leur répartition est régulière.

Ce système présente une grande flexibilité. En effet, si maintenant nous sommes intéressés à effectuer une distribution entre les canaux 2 et 4, il suffit de varier la fréquence de pompe ω_p de façon à se placer symétriquement par rapport à ces deux canaux.

Les démultiplexeurs présentent des spécifications de fonctionnement qui peuvent altérer la qualité de la distribution des paires de photons, comme on va le voir dans cette thèse. Nous allons les décrire dans la partie suivante.

2.2.1 Caractéristiques des démultiplexeurs

Les canaux de sortie présentent des largeurs fréquentielles pouvant typiquement être de 25, 50, 100 ou 200 GHz. La fréquence ω_i correspondant à un canal de sortie i représente la fréquence centrale de celui-ci. Les canaux de sortie d'un démultiplexeur sont numérotés suivant la notation de la grille internationale ITU, où chaque numéro correspond à une fréquence centrale. Pour chaque largeur fréquentielle, il existe une grille ITU différente. En annexe A, on peut trouver la grille ITU dans le cas de canaux de largeur fréquentielle égale à 100 GHz qui correspond aux démultiplexeurs que nous avons utilisés.

La distance fréquentielle séparant les fréquences centrales de deux canaux consécutifs est appelée **espacement intercanal**. Sa valeur est identique à la largeur fréquentielle. Réduire ces 2 paramètres augmente le nombre de canaux de sortie et par conséquent le nombre d'utilisateurs, mais réduit la bande attribuée par utilisateur et par conséquent le débit.

L'isolation de deux canaux adjacents n'est pas parfaite, et on peut avoir entre eux un recouvrement spectral. Ce phénomène appelé **crosstalk** est représenté par la figure 2.2. Un photon occupant le domaine spectral hachuré, a une probabilité statistique d'être transmis soit par le canal 1 soit par le canal 2. Considérons le cas d'une distribution entre les utilisateurs des canaux 2 et 4. Si un photon sensé être transmis par le canal 2, est transmis par le canal 1, il y aura perte de corrélations. On qualifie de crosstalk adjacent, tout crosstalk entre deux canaux voisins et crosstalk non adjacent, tout crosstalk entre deux canaux non voisins.

Un autre facteur à prendre en compte est **l'uniformité d'espacement entre les canaux**. Les démultiplexeurs n'étant pas parfaits, il existe un offset δ_λ entre la fréquence centrale annoncée selon la grille ITU pour un canal donné, et sa valeur mesurée. Dans le cas d'une fréquence de pompe ω_p fixe, on se trouve dans un cas de figure où un canal i présente un facteur δ_{λ_i} supérieur à celui d'un canal j δ_{λ_j} . La figure 2.3 montre un exemple de non uniformité d'espacement ($a < b$), permettant au couple de canaux 2 et 4 de répartir les paires de photons en conservant la transmission

FIGURE 2.2: Crosstalk entre deux canaux adjacents

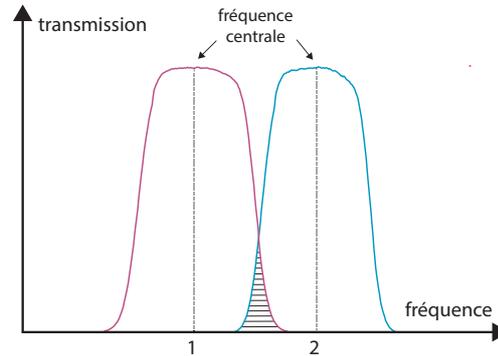
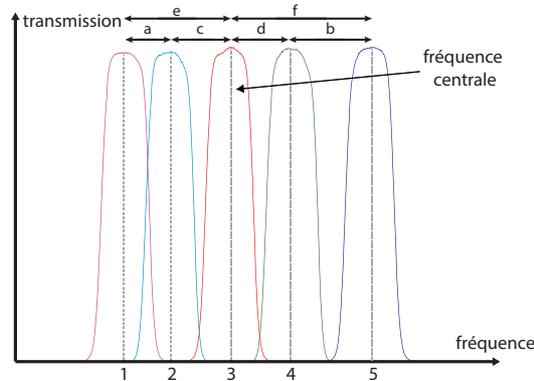


FIGURE 2.3: Espacement irrégulier entre deux canaux adjacents



la plus grande possible, par rapport au couple 1 et 5. Ce même offset δ_λ peut de plus être différent selon la polarisation du signal d'entrée. Pour une polarisation du signal d'entrée rectiligne horizontale, on peut avoir pour un canal donné, une fréquence centrale α et pour une polarisation rectiligne verticale, une fréquence centrale $\beta \neq \alpha$.

Les caractéristiques présentées ci-dessus font partie des caractéristiques de type fréquentiel. Une dernière caractéristique que l'on se doit de citer est la **forme spectrale de la courbe de transmission** du démultiplexeur. Il existe deux types principaux, la forme **flat-top** et la forme **gaussienne**. Les démultiplexeurs dits flat-top présentent une forme de fonction de transmission avec une valeur constante dans un intervalle donné autour de la fréquence centrale. On peut l'assimiler à une forme trapézoïdale. Les démultiplexeurs de type Gaussien présentent une fonction de transmission gaussienne. La figure 2.4 illustre la différence de forme entre deux canaux ayant une même largeur de bande.

Le plateau de transmission constant dans le cas du flat-top réduit l'impact d'un jitter fréquentiel du faisceau de pompe (on qualifie de jitter fréquentiel toute fluctuation de fréquence de pompe de $\pm\delta\omega_p$), c'est à dire que lorsque ω_p varie légèrement, les photons signal et complémentaires pourront toujours être transmis avec le même facteur de transmission comme le montre la figure 2.5 a). Cependant dans le cas d'une

FIGURE 2.4: Comparaison entre deux formes de canaux de même largeur spectrale, Flat-Top à gauche et Gaussien à droite

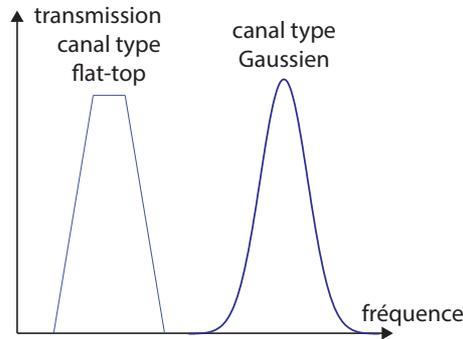
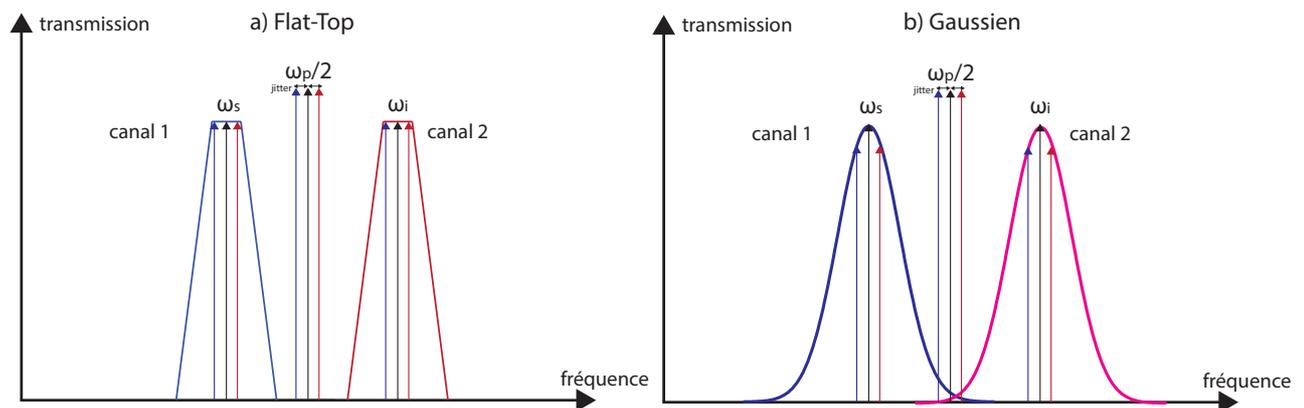


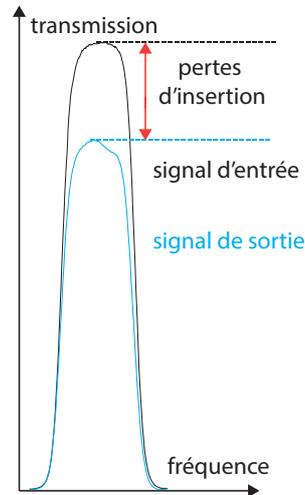
FIGURE 2.5: Conséquence du jitter fréquentiel de pompe dans le cas a) de canaux de type Flat-Top et b) de canaux de type Gaussien



fonction de transmission Gaussienne, la tolérance à une fluctuation du faisceau de fréquence de pompe est beaucoup plus faible. Comme le montre la figure 2.5 b), pour une même fluctuation de pompe que le cas a), la transmission est beaucoup plus faible.

Un autre aspect critique de ces dispositifs est constitué par les pertes d'insertion. Lors de la séparation d'un signal optique d'entrée, le passage par les différents éléments à l'intérieur du démultiplexeur ainsi que le recouplage vers les canaux de sortie réduisent l'amplitude du signal initial. La figure 2.6 montre la différence d'amplitude entre le signal de sortie et le signal d'entrée. Le rapport entre ces deux quantités est appelée **pertes d'insertion**. Nous avons vu précédemment que les canaux de type flat-top tolèrent une légère fluctuation fréquentielle du faisceau de pompe ω_p . Cependant, ils présentent des pertes d'insertion plus élevées que dans le cas d'un canal de type gaussien. Ceci vient du fait que la conception d'un canal de démultiplexeur de type flat-top est en fait un canal de type Gaussien dont on rend le seuil de transmission maximal constant sur un intervalle spectral bien défini. Par conséquent, ce type de canal présente au final plus de pertes d'insertion. On

FIGURE 2.6: Pertes d'insertion d'un démultiplexeur



verra plus tard quel est le compromis à faire entre type de forme de canal et pertes d'insertions afin de préserver au mieux les corrélations entre les photons.

Les pertes d'insertion peuvent également dépendre de la polarisation du signal d'entrée. Pour un même canal, on peut donc avoir deux valeurs différentes de pertes d'insertion, en fonction de la polarisation initiale que l'on injecte dans le démultiplexeur. Ce phénomène s'appelle **Polarisation Dependent Loss** ou **PDL**. Elle est donnée par un rapport de puissance, l'une obtenue pour la polarisation qui donne la transmission maximale et l'autre la transmission minimale. Son expression mathématique est donnée par :

$$PDL_{dB} = 10 \log \frac{P_{max}}{P_{min}} \quad (2.2.1)$$

Tout comme l'espacement fréquentiel, les pertes d'insertion peuvent ne pas être similaires pour tous les canaux de sortie. On a alors une non uniformité des pertes d'insertion entre les canaux du filtre. Ceci dépend de la technologie du filtre. Nous allons donc voir dans la partie qui suit quelles sont les différentes technologies de filtres et les différences fondamentales entre elles.

2.3 Types de démultiplexeurs

2.3.1 Film diélectriques à couches minces (Dielectric Thin Film (DTF))

Cette technologie est basée sur une succession de cavités Fabry-Pérot placées entre des miroirs multicouches, formés par une alternance de couches $\lambda/4$ à différents indices de réfractons (indices faibles et élevés) 2.7. Les démultiplexeurs basés sur les films diélectriques à couches minces connaissent un grand succès, du fait qu'ils permettent d'atteindre de hautes performances : grâce à cette technologie, on peut

FIGURE 2.7: Schéma représentant la séparation d'une longueur d'onde λ_1 dans le cas d'un démultiplexeur à technologie DTF

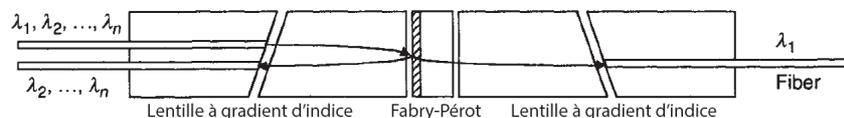
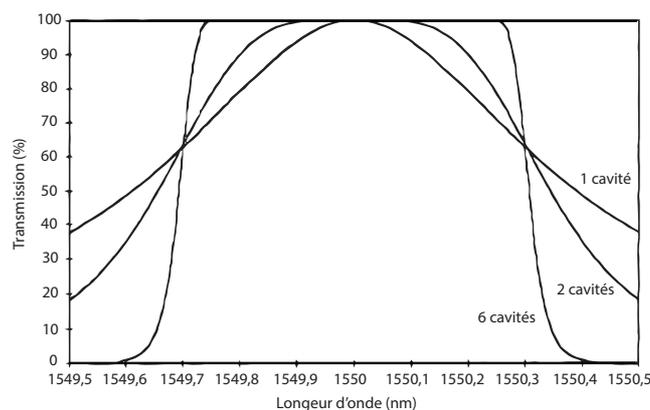


FIGURE 2.8: Comparaison de la bande passante et de l'isolation de filtres à couche minces pour différent nombre de cavités. Graphe tiré de [DDF03]

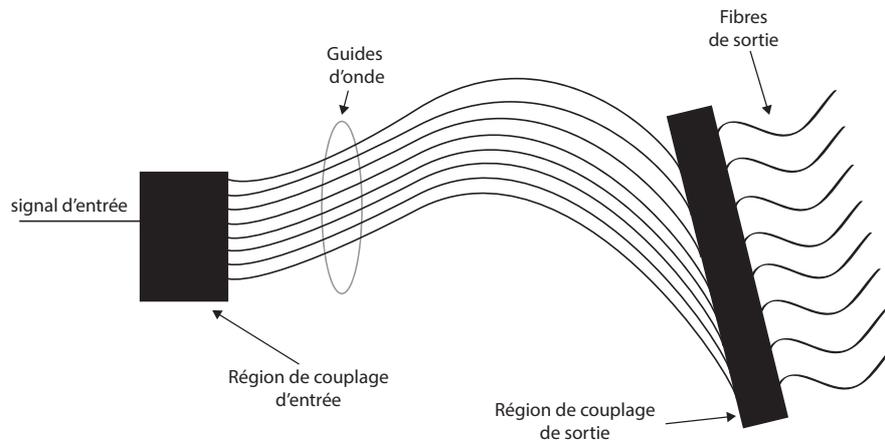


obtenir de faibles pertes d'insertion (environ 1 dB) [DDF03].

L'épaisseur e de la cavité de Fabry-Perot permet de choisir la longueur d'onde de résonance et l'alternance des couches $\lambda/4$ détermine la réflectivité du miroir. Lorsqu'un signal incident contient la longueur d'onde de résonance de la cavité, cette partie du signal est transmise et le reste réfléchi. Cependant une seule cavité par canal n'est pas une configuration optimale. En effet, la figure 2.8 montre que dans le cas de 6 cavités, il est possible d'augmenter considérablement le domaine spectral pour lequel la transmission est maximale ainsi que l'isolation avec les canaux adjacents. Cependant augmenter le nombre de cavités, augmentera le nombre de miroirs et par suite le nombre de couches minces à déposer, ce qui devient techniquement impossible à réaliser dû aux limitations de fabrication.

Malgré les avantages qu'il présente, le démultiplexeur basé sur les films diélectriques à couches minces présente une non uniformité au niveau des pertes d'insertion. Ceci est dû au fait que le signal d'entrée subit un filtrage en cascade [DDF03]. La séparation des différentes longueurs d'ondes n'est pas simultanée. Le canal de sortie i qui aura le moins de pertes d'insertion correspond au cas où le signal d'entrée n'est passé que par les empilements de cavité résonnant à la longueur d'onde λ_i avant d'être couplé à la sortie du démultiplexeur. Le canal de sortie le plus pénalisé sera celui à la longueur d'onde qui aura été réfléchi par toutes les cavités Fabry-Pérot du démultiplexeur avant d'être finalement transmise (voir figure 2.7).

FIGURE 2.9: Schéma représentant un AWG à 8 canaux



2.3.2 Réseaux de guides d'ondes (AWG)

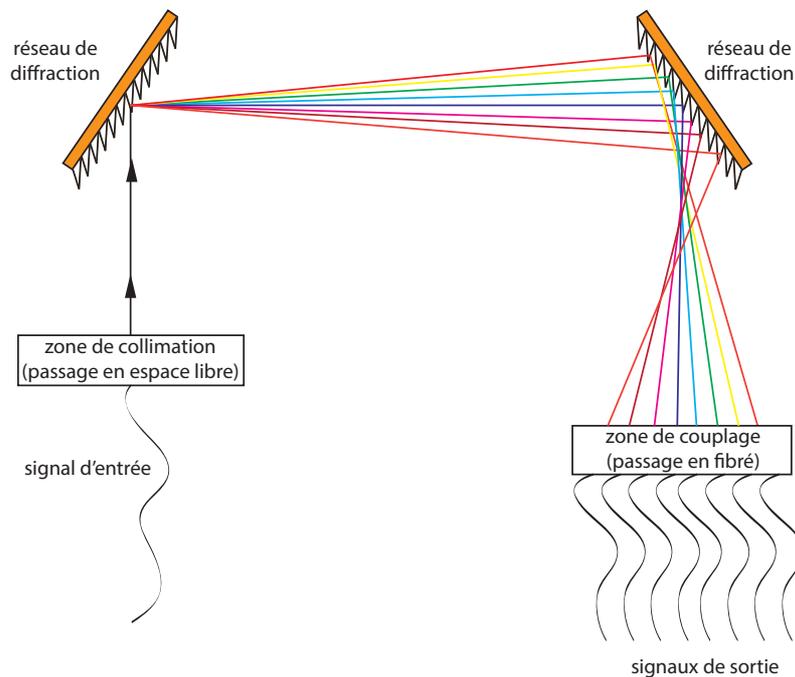
Les réseaux de guides d'ondes ou Arrayed Waveguid Grating (AWG) en anglais sont un type de démultiplexeur basé sur une interférence multisignal. Un démultiplexeur de type AWG est composé d'une fibre d'entrée, de deux régions de couplage, d'une série de N guides d'ondes et de N fibres de sorties. Chacun de ces guides d'ondes a une différence de chemin optique constante ΔL avec son voisin. Dans la région de couplage d'entrée, le signal d'entrée incident est diffracté et illumine les guides d'ondes. La lumière se propage ensuite dans les guides d'ondes. Dans la région de couplage de sortie, une interférence constructive se produit entre les différents signaux de sorties de ces guides d'ondes. Ces interférences sont focalisées en différents points en fonction de la longueur d'onde. C'est ce qui permet de discriminer entre les différentes longueurs d'onde, et d'obtenir un démultiplexage du signal. La figure 2.9 illustre le schéma d'un AWG à 8 canaux.

Parmi les avantages de l'AWG on cite notamment l'uniformité des pertes d'insertion, vu que toutes les longueurs d'ondes subissent la même opération de séparation de façon simultanée. Cependant les pertes d'insertions assez élevées (4 à 5 dB) sont causées par les pertes de couplage entre les fibres et les guides d'ondes.

2.3.3 Réseaux de diffraction (DG)

Un réseau de diffraction ou Diffraction Grating (DG) en anglais, permet de séparer les différentes longueurs d'onde d'un signal incident. Lorsque celui-ci frappe sa surface, il subit une diffraction et chaque longueur d'onde subit une réflexion avec un angle donné, ce qui aboutit à une séparation spatiale des différentes composantes fréquentielles. Lorsque le signal d'entrée entre dans le démultiplexeur, il est collimaté et passe dans une région de propagation en espace libre. Il passe ensuite par une série de réseaux de diffractions afin de séparer les différentes longueurs d'ondes. Une fois les longueurs d'ondes séparées, il devient possible de coupler (passage espace libre-fibré) celles que l'on désire. Le centrage en longueur d'onde du filtre se fait en

FIGURE 2.10: Schéma représentant un démultiplexeur à 8 canaux basé sur deux réseaux de diffraction



ajustant les angles d'inclinaison des réseaux de diffraction. La figure 2.10 représente un démultiplexeur basé sur deux réseaux de diffraction. Un avantage de cette technologie est l'uniformité des pertes d'insertion vu que toutes les longueurs d'ondes sont traitées simultanément comme dans le cas de l'AWG. Ces pertes dépendent de la qualité de surface des réseaux de diffraction ainsi que de la qualité de couplage à la sortie. Pour un démultiplexeur à forme de canal gaussien, on arrive à des pertes d'insertion de l'ordre de 3 dB, et de l'ordre de 6 dB dans le cas d'un canal à forme flat-top.

En conclusion de ce chapitre, le tableau 2.1 résume les différentes valeurs annoncées des paramètres que nous avons décrit, pour les 4 démultiplexeurs à notre disposition (Filtre à couches minces Flat-Top, AWG Flat-Top, Réseau de Diffraction Flat-Top et Réseau de diffraction Gaussien). On y trouve à première vue que le DTF grâce aux plus faibles pertes d'insertion et PDL, ainsi que sa bonne qualité de centrage, semble être le plus prometteur pour des applications de distribution de paires de photons intriqués en polarisation. Quant au DG Flat-Top, il semble être le moins adapté, surtout à cause de sa médiocre qualité de centrage.

Les courbes de transmission de chaque filtre est rapportée à la suite de tableau. J'ai réalisé ces mesures en injectant une source de lumière large bande (100 nm centrée à 1550 nm) à l'entrée du filtre et en connectant chaque sortie à un spectromètre (résolution de 0,008 nm) afin de relever sa courbe de transmission. Les transmissions des figures 2.11 et 2.12 sont rapportées en deux échelles : linéaire et logarithmique. L'échelle linéaire permet de mieux observer les différences de forme spectrale des canaux, en particulier au niveau des pertes d'insertion. L'échelle logarithmique permet

TABLE 2.1: *Tableau comparatif des caractéristiques des différents démultiplexeurs à notre disposition (canaux de 100 GHz). Pour les valeurs de crosstalk, elles sont données pour une échelle maximale à 0 dB*

Type de technologie	DTF	AWG	DGFT	DGG
Forme des canaux	Flat-Top	Flat-Top	Flat-Top	Gaussien
Nombre de canaux	16	16	8	8
Pertes d'insertion Moyenne (dB)	3,8	6	6	3,5
PDL (dB)	0,25	0,5	0,3	0,3
Qualité centrage (nm)	0,1982	0,1756	0,3143	0,1670
Crosstalk adjacent (dB)	25	30	25	30
Crosstalk non-adjacent (dB)	45	40	40	40
Gamme de fréquences	ITU 21 à 36	ITU 22 à 37	ITU 21 à 28	ITU 21 à 28

de bien observer les niveaux de crosstalk entre les canaux adjacents. Ces trois types de technologies feront l'objet dans le chapitre 4 d'une étude comparative dans le cas d'une source de photons jumeaux et dans le chapitre 5 dans le cas d'une source de photons intriqués en polarisation.

FIGURE 2.11: Schéma représentant la transmission linéaire des nos 4 démultiplexeurs

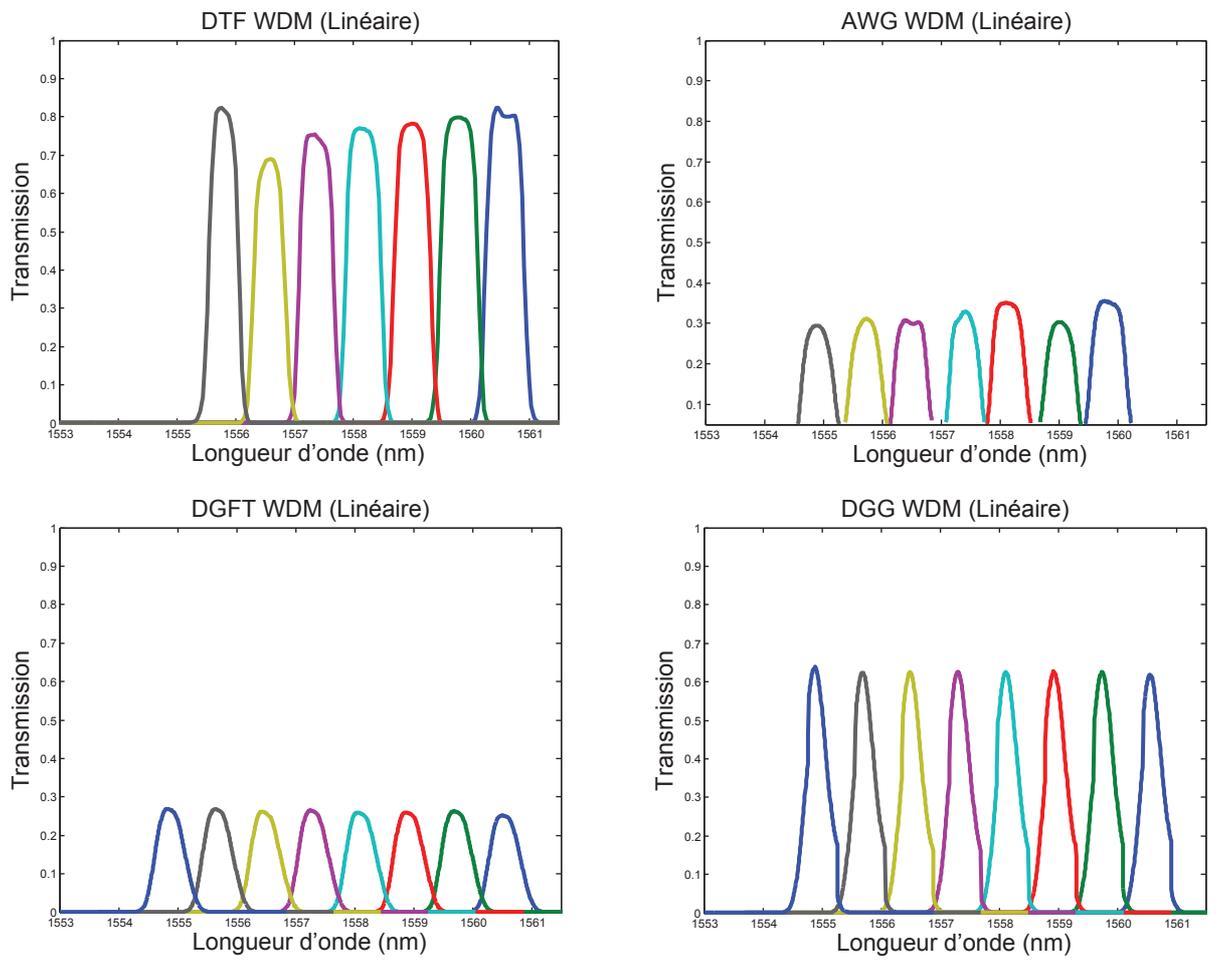


FIGURE 2.12: Schéma représentant la transmission logarithmique des nos 4 démultiplexeurs

