

Les réseaux tout optique

Cours MASTER 2

15 décembre 2006

Miklós MOLNÁR (et Bernard Cousin)

équipe ARMOR2 / IRISA



1

Plan

- ❑ **Spécificités des réseaux tout optiques**
 - ❑ Les fibres
 - ❑ Atténuation et déformation – amplification et régénération
 - ❑
 - ❑ Le multiplexage (TDM et WDM)
 - ❑ Les switches
 - ❑ Multiplexeur WADM
 - ❑ Commutateur WXC
 - ❑ Conversion de longueur d'ondes
 - ❑ La duplication (splitting)
- ❑ **Technologie SONET/SDH**
 - ❑ Principe, technologie et protection
- ❑ **Réseaux WDM**
 - ❑ Le routage tout optique
 - ❑ Contraintes sur les longueurs d'ondes
 - ❑ Assignation des longueurs d'onde
 - ❑ Algorithmes unicast
 - ❑ Multicast dans les réseaux tout optiques
 - ❑ Réseaux de nouvelle génération
 - ❑ Commutation optique par « burst » et par paquet



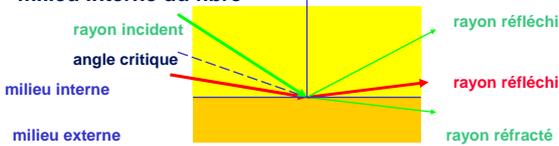
2

1. Spécificités des réseaux tout optique

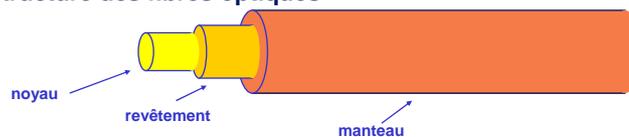
- ❑ Propriétés
 - ❑ Transmission de l'information à l'aide de la lumière
 - ❑ Conduite dans des fibres en verre
 - ❑ Aiguillage optique dans les nœuds
- ❑ Conséquences
 - ❑ Insensibilité aux interférences extérieures
 - ❑ Capacité, distance et vitesse de propagation importantes
 - ❑ Poids faible, transmission avec peu de pertes d'énergie (pas d'échauffement)
 - ❑ Confidentialité
 - ❑ Faibles atténuation et interférences dans la fibre,
 - ❑ Peu ou pas de délai dû aux traitements

1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

- ❑ Conduite de la lumière
 - ❑ Elle est basée sur la réflexion totale de la lumière à la frontière du milieu interne du fibre
- 
- ❑ Il y a une réflexion totale, si l'angle est supérieure à l'angle critique et si l'indice de réfraction $n_{interne} > n_{externe}$

- ❑ Structure des fibres optiques

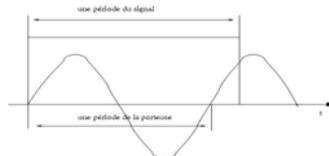


1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

□ Capacité

- Technologie : modulation de la porteuse (AM) par les signaux 0 et 1 à transmettre



□ Limite absolue : chaque période du signal doit contenir au moins une période de l'onde de la porteuse

- Quelques ordres de grandeur des longueurs d'onde employées

- Téléphonie : ~ 60 kHz
- Télévision : ~ 10 - 100 MHz
- Transmission radio : ~ 10^5 - 10^{10} Hz
- Lumière : ~ 10^{14} - 10^{15} Hz

1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

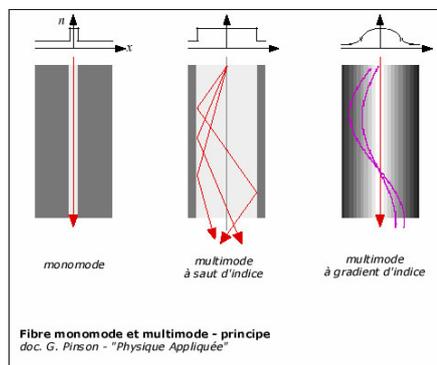
- Fibres monomodes ou multimodes

- Monomode – plus puissant

- Réseaux MAN et WAN

- Multimode – portée limitée

- Réseaux locaux
- À saut d'indice ou à gradient d'indice



1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

- ❑ **Distance**
 - ❑ Les fibres optiques impliquent une atténuation plus faible que les paires électriques en cuivre
 - Exemple : une porteuse de 1 GHz (10^9 Hz)
 - ❑ Perte électrique dans un câble coaxial d'un km : 99,9 %
 - ❑ Perte dans un fibre optique (sur la même distance) : 5 %
 - ❑ La reconnaissance des bits nécessite une certaine puissance lumineuse
 - ❑ il faut 500 photons par bit pour la détection d'un bit
 - ❑ émission d'un diode laser : 10^{16} photons par seconde
 - ❑ avec la porteuse donnée, il y a 10^7 photons par bit
- ❑ **Des amplifications (répéteurs) sont nécessaires**
 - ❑ Premiers amplificateurs : $O/E + \text{amplification} + E/O$
 - ❑ fréquence limitée : ~ 1 GHz (à cause des éléments électroniques)
 - ❑ Depuis : amplificateurs optiques à fibre de verre dopée à l'erbium
 - ❑ Émission stimulée du laser : amplification par 10^4
- ❑ On peut faire des distances importantes avec des fibres
- ❑ Les amplificateurs optiques acceptent plusieurs THz (10^{12} Hz)

on peut faire
200 km

1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

Comment utiliser la capacité physique importante des fibres ?

- ❑ *Émission* par laser sans les contraintes des circuits électroniques
- ❑ *Transmission* de plusieurs communications sur une même fibre
 - ❑ Multiplexage : transport de plusieurs signaux sur un même support physique
 - ❑ TDM
 - ❑ WDM
 - ❑ Fibres multimodes
 - ❑ Plusieurs ondes lumineuses sont injectées sous des angles différentes
 - ❑ Commutation : assurer l'acheminement des signaux des émetteurs jusqu'aux récepteurs
- ❑ *Réception* et transformation en signaux électroniques

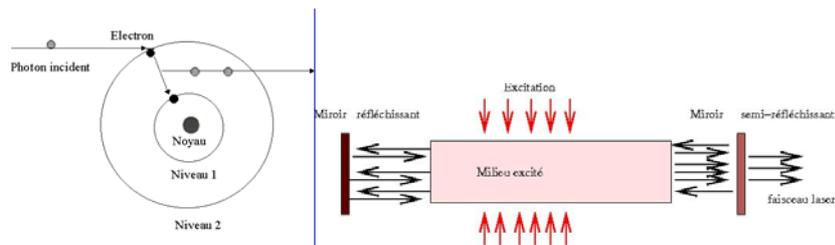
1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

□ Émetteurs optiques

□ Génération d'un signal optique (le laser)

- Amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement : un faisceau intense et monochrome



□ Modulation du signal par l'information à émettre

- Amplitude
- Fréquence
- Phase

1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

□ Récepteurs optiques

□ Détection

- Directe : avec une photo-diode (le plus simple)
- Cohérente : interférence avec un faisceau local pour détecter les différences (valable pour les 3 types de modulation)

□ Démodulation

- Se fait en général au niveau électronique

1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

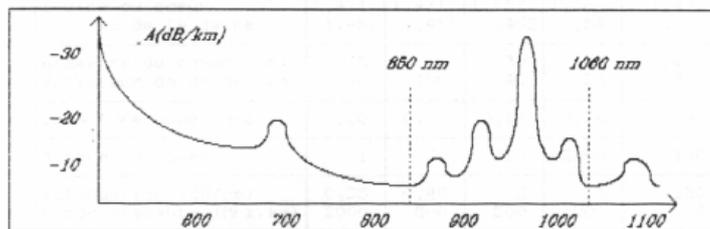
- ❑ Atténuation
 - ❑ Réduction de la puissance du signal grâce à des impuretés dans la verre
 - ❑ Elle dépend du fibre mais aussi de *la longueur d'onde*
0,2 à 5 dB/km
- ❑ Déformation
 - ❑ Dispersion
 - ❑ A cause de la variation de la vitesse de propagation par rapport à la fréquence
 - ❑ Les faisceaux ne sont pas parfaitement monochromes => les composantes lumineuses arrivent avec des vitesses différentes



1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

- ❑ Atténuation
 - ❑ Des imperfections et d'autres propriétés de la fibre donnent une atténuation non linéaire en fonction de la fréquence
 - ❑ certaines plages de fréquences favorables ont une faible atténuation



1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

☐ Amplificateurs optiques

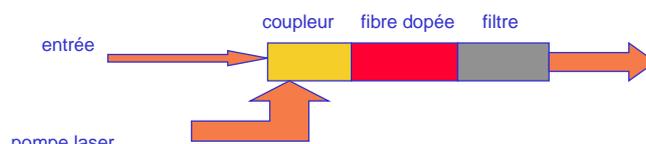
☐ Amplificateurs à semi-conducteur

- ☐ contiennent un laser qui amplifie la lumière en entrée

☐ Amplificateurs à fibre dopée (à l'erbium en général)

- ☐ ressemblent à un « transistor » optique

- ☐ Il y a une pompe laser qui donne la puissance et
- ☐ un coupleur qui transmet le signal d'entrée + le laser vers la zone de l'émission stimulée



- ☐ Gain : 25 – 50 dB

- ☐ Remarque : le bruit est également amplifié

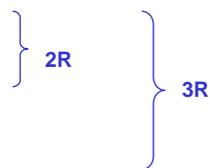
1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

☐ Régénération des signaux

- ☐ Amplification
- ☐ Régénération – régénère la forme d'origine
- ☐ Resynchronisation des composantes

Répéteurs



☐ Distances tolérées

- ☐ entre amplificateurs : 40 – 50 km
- ☐ entre répéteurs : 80 – 120 km

1. Spécificités des réseaux tout optique

1.1 Les fibres

□ Avantages

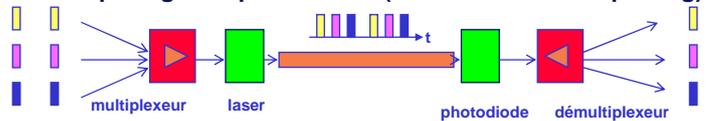
- Débit très important
- Une faible puissance est suffisante
- Atténuation faible, des longues distances sont faisables
- Taux de pertes, taux d'erreurs faibles
- Peu de perturbations :
 - Pas d'influence électromagnétique (électronique ou radio)
 - Pas de perturbations entre deux fibres distinctes
- Installation facile, résistance importante
 - Pas de corrosion
 - Pas de signaux électroniques, pas d'étincelles
- Transmission sécurisée : difficile d'écouter les messages

1. Spécificités des réseaux tout optique

1.2 Le multiplexage optique

- Multiplexage : la capacité importante des fibres est divisée en un ensemble de canaux indépendants

□ Multiplexage temporel – TDM (Time Division Multiplexing)

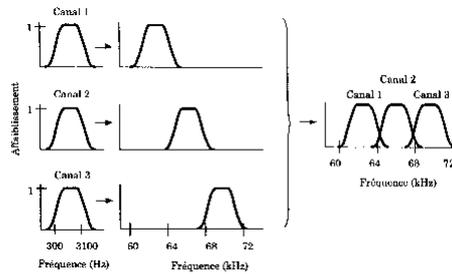


- Utilisé dans les multiplexeurs SONET/SDH
- Limite : 40 GHz
- Inconvénients :
 - Rigide pour l'ajout d'un nouveau canal
 - Commutation difficile

1. Spécificités des réseaux tout optique

1.2 Le multiplexage optique

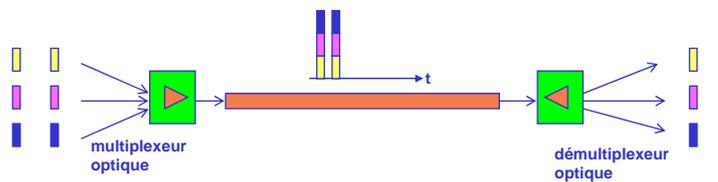
- ❑ **Multiplexage par répartition de fréquences - FDM**
(*Frequency Division Multiplexing*)
 - ❑ Le multiplexage fréquentiel consiste à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux (sous-bandes fréquentielles) plus étroits
 - ❑ à affecter en permanence chacun de ces canaux à un usager exclusif.



1. Spécificités des réseaux tout optique

1.2 Le multiplexage optique

- ❑ **Multiplexage en longueur d'onde – WDM**
(*Wavelength Division Multiplexing*)
 - ❑ Le spectre optique des fibres est découpé en un ensemble de canaux selon la longueur d'onde



- ❑ Chaque intervalle (fréquence) supporte un canal dans les régions de faible atténuation ($\lambda = 0,8$ et $1-1,5 \mu\text{m}$)
- ❑ L'accès au canal est assuré par un émetteur laser
- ❑ Le multiplexage se fait à l'aide d'un élément optique passif

1. Spécificités des réseaux tout optique

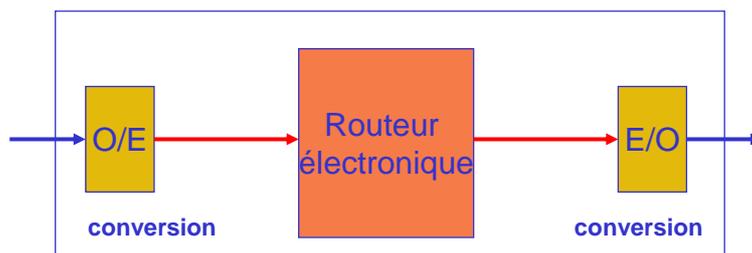
1.2 Le multiplexage optique

- ❑ **Multiplexage en longueur d'onde – WDM**
 - ❑ **Capacité**
 - ❑ Cuivre : ~ 100 Mhz
 - ❑ Fibre avec TDM : ~ 40 GHz
 - ❑ Fibre avec WDM : > 1000 THz

1. Spécificités des réseaux tout optique

1.3 Les switches

- ❑ **Les switches optoélectroniques**



1. Spécificités des réseaux tout optique

1.3 Les switches

- ❑ Les fonctionnalités attendues d'un nœud optique
 - ❑ Commutation
 - ❑ Multiplexage / démultiplexage
 - ❑ Insertion / extraction
 - ❑ Amplification
 - ❑ Conversion de longueur d'onde
 - ❑ Duplication

1. Spécificités des réseaux tout optique

1.3 Les switches

- ❑ Les répartiteurs
 - élément de base : 2x2 Optical Cross-Connect*

- ❑ 2 entrées et deux sorties
- ❑ 2 états : bar et cross



1. Spécificités des réseaux tout optique

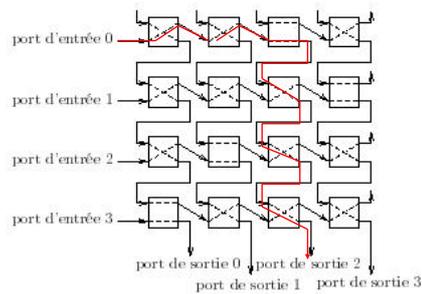
1.3 Les switches

Les répartiteurs

Fiber Optical Cross-Connect F-OXC

commutation par fibre

- les canaux d'une fibre sont connectés ensemble à une sortie (pas de démultiplexage / multiplexage – moins cher)



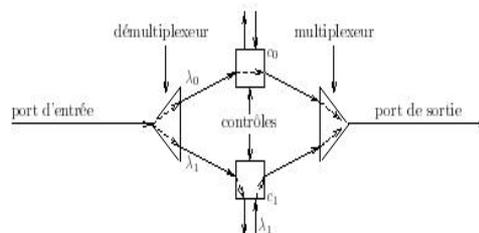
1. Spécificités des réseaux tout optique

1.3 Les switches

Les multiplexeurs à insertion / extraction

Optical Add / Drop Multiplexer OADM

- permet d'extraire et ajouter certains canaux
- 1 commutateur 2 x 2 par longueur d'onde
- contrôle électronique des commutateurs



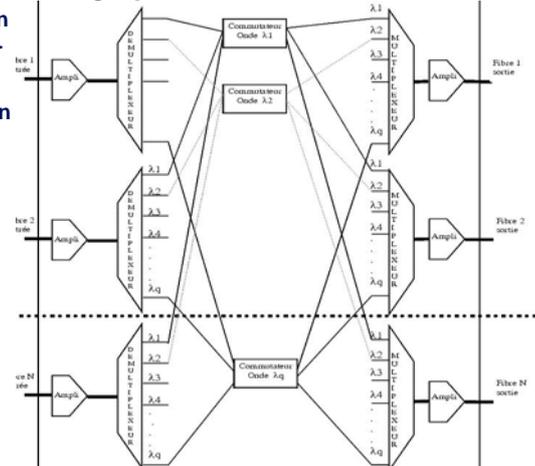
1. Spécificités des réseaux tout optique

1.3 Les switches

Les brasseurs

Wavelength Routing Optical Cross-Connect WR-OXC

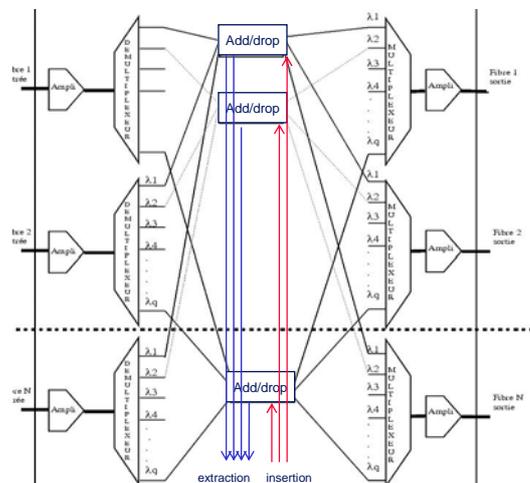
- Commutation par longueur d'onde
- Configuration électronique



1. Spécificités des réseaux tout optique

1.3 Les switches

Les répartiteurs avec multiplexeur à insertion / extraction

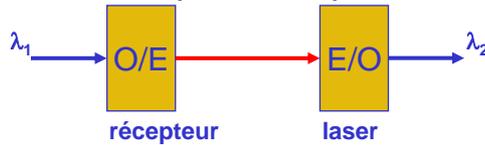


1. Spécificités des réseaux tout optique

1.3 Les switches

□ La conversion de longueurs d'onde

□ Conversion opto-électronique



□ Réalisation simple, mais elle limite la vitesse du réseau

□ Conversion tout-optique

□ Des méthodes basées sur la saturation des diodes laser et des amplificateurs optiques ont été testées

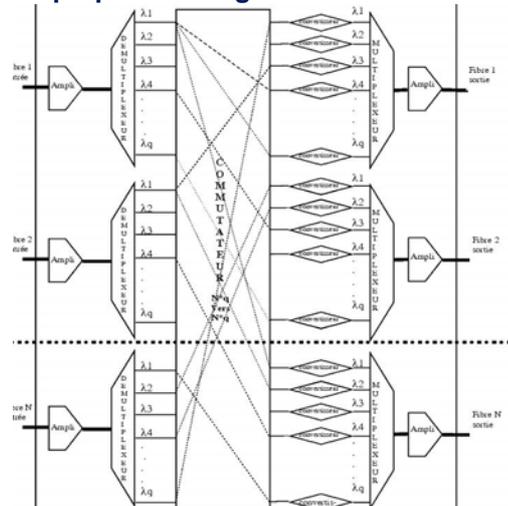
□ Plus rapide

□ Seulement vers les fréquences voisines

1. Spécificités des réseaux tout optique

1.3 Les switches

□ Les convertisseurs optiques de longueurs d'onde



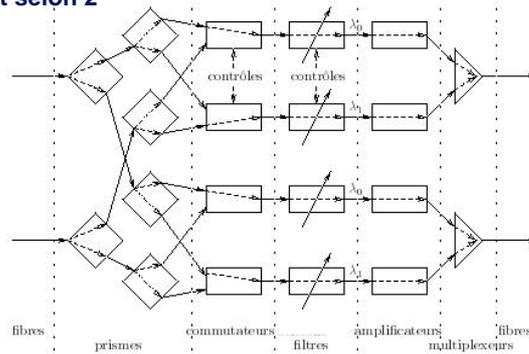
1. Spécificités des réseaux tout optique

1.3 Les switches

❑ Les splitters

Routeurs optiques pouvant dupliquer les signaux

❑ Souvent selon 2^k



1. Spécificités des réseaux tout optique

1.3 Les switches

❑ Les avantages des switches optiques

- ❑ Le temps de traitement des signaux est faible ou négligeable (pas de file d'attente)
- ❑ Bande passante importante (~Tbps)

❑ Les inconvénients

- ❑ Technologie et opérations limitées
- ❑ Coûts importants

2. Réseaux optiques synchrones

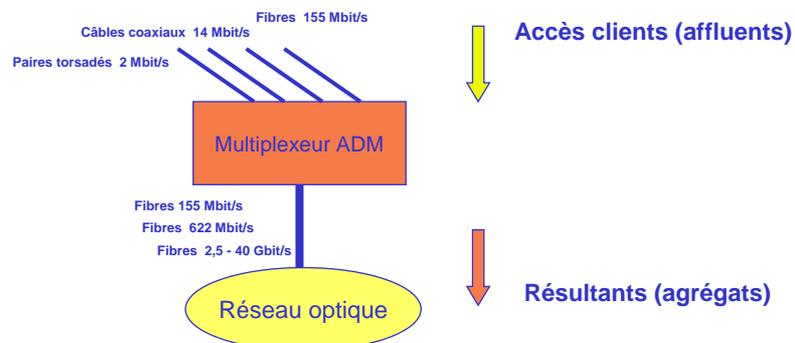
2.1 Idées de base

- ❑ Objectifs
 - ❑ Augmenter le débit des réseaux dorsaux
 - ❑ Grâce à une solution simple et robuste
 - ❑ Synchronisation du réseau
 - ❑ Trafic prédictible, prévisible et gestion simple
 - ❑ Conception efficace des trames

2. Réseaux optiques synchrones

2.1 Idées de base

- ❑ Utilisation du cœur optique d'un réseau
- ❑ Agrégation des trafics abonnés (utilisateur)
- ❑ Pour des flux synchrones ou asynchrones



2. Réseaux optiques synchrones

2.2 Technologie SONET/SDH

- ❑ **Un peu d'histoire**
 - ❑ Demande de transport des communications à large bande – à partir de 1984
 - ❑ Premières propositions pour des réseaux optiques synchrones – **SONET** (USA, en 1986)
 - ❑ Différence avec les européens et avec les japonais
 - ❑ La bande passante
 - ❑ Problème de synchronisation et interconnexion des réseaux des opérateurs
 - ❑ Normalisation : **Synchronous Digital Hierarchy - SDH**
 - ❑ Compromis : **Recommandations du CCITT en 1988**
 - ❑ G.707 : **Synchronous Digital Bit Rate**
 - ❑ G.708 : **Network Node Interface for SDH**
 - ❑ G.709 : **Synchronous Multiplexing Structure**

2. Réseaux optiques synchrones

2.2 Technologie SONET/SDH

- ❑ « **Synchronous Digital Bit Rates** »
- ❑ L'unité de base correspond à **51,84 Mbit/s**
- ❑ **Plusieurs niveaux sont définis : multiples de l'unité de base**
(pour interfacier, multiplexer, démultiplexer)
 - ❑ Dans SONET : **Optical Container (OC)**
 - ❑ Dans SDH : **Synchronous Transport Signal (STM)**

- ❑ **Les correspondances**

Les réseaux déployés :
STM-1 ... STM-256

SDH	SONET	Débit
STM -1	OC -3	155 Mb/s
STM -4	OC -12	622 Mb/s
STM -16	OC -48	2,5 Gb/s
STM -64	OC -192	10 Gb/s
STM -128	OC -384	20 Gb/s
STM -256	OC -768	40 Gb/s

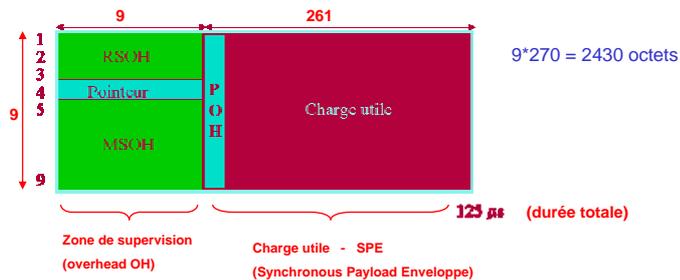
2. Réseaux optiques synchrones

2.2 Technologie SONET/SDH

❑ Les trames

❑ sont normalisées et construites

- ❑ pour le haut débit
- ❑ par multiplexage synchrone d'une unité STM (Synchronous Transport Module)
- ❑ incluant les éléments nécessaires pour le contrôle des flux



2. Réseaux optiques synchrones

2.2 Technologie SONET/SDH

❑ Les conteneurs

- ❑ Les signaux à transmettre sont cumulés dans des conteneurs C-n adaptés au débit (C-2 = 2 Mbps)
- ❑ En ajoutant des informations sur le chemin à suivre (Path Overhead), on obtient un conteneur virtuel :
 $VC-n = POH + C-n$

❑ Les conteneurs VC sont multiplexés dans la trame à l'aide des *pointeurs* (pour localisation immédiate)

Administrative unit : $AU = \text{Pointeur} + VC$

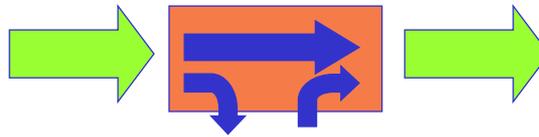
- ❑ Une combinaison des conteneurs donne le contenu de SPE (charge utile) dans un STM-n
- ❑ Les conteneurs suivent un *chemin (conduit)* prédéterminé
- ❑ Les *entêtes* en début de trames servent à contrôler la transmission de la *section STM* :
 - ❑ Regenerator Section Overhead RSOH
 - ❑ Multiplex Section Overhead MSOH

2. Réseaux optiques synchrones

2.2 Technologie SONET/SDH

□ ADM

- *Add-Drop Multiplexer* (Multiplexeur à insertion et extraction)
- Une façon de multiplexer/démultiplexer un flot à haut-débit en ses composants de débits plus faibles afin de pouvoir y ajouter (retirer) un canal à bas débit.
- Quand un canal supplémentaire doit être ajouté, il est nécessaire d'avoir recours à l'ADM pour démultiplexer le flot à haut-débit en canaux de plus faibles débits. Le trafic, incluant le nouveau canal ajouté, est ensuite multiplexé de nouveau et transmis au noeud suivant.

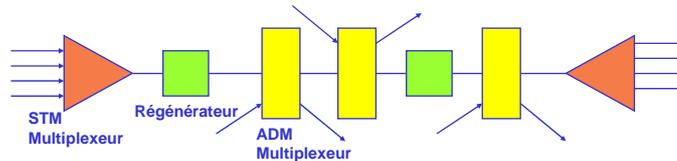


2. Réseaux optiques synchrones

2.2 Technologie SONET/SDH

□ Schéma du système SONET/SDH

□ Composants typiques



← section → ← section →

← line → ← line → ← line → ← line →

← path →

2. Réseaux optiques synchrones

2.2 Technologie SONET/SDH

☐ Couches du système SONET/SDH

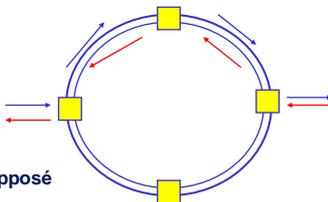
4 couches :

- ☐ Photonic layer
 - ☐ Transmission physique (optique)
- ☐ Section layer
 - ☐ Forme électronique des signaux (formatage, scrambling, traitement d'erreurs)
- ☐ Line layer
 - ☐ Multiplexage : démultiplexage de lignes
- ☐ Path layer
 - ☐ Transmission de la source à la destination

2. Réseaux optiques synchrones

2.2 Technologie SONET/SDH

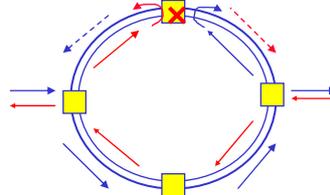
☐ Topologies typiques SONET/SDH

- ☐ Bus 
 - ☐ Faible niveau de sûreté
- ☐ Anneaux avec deux fibres 
 - ☐ Anneaux unidirectionnels
 - ☐ les trames circulent dans le même sens (une fibre est le backup)
 - ☐ Anneaux bidirectionnels
 - ☐ utilisent les deux fibres en sens opposé
- ☐ Etoiles
- ☐ Maillés
 - ☐ Ils nécessitent des brasseurs

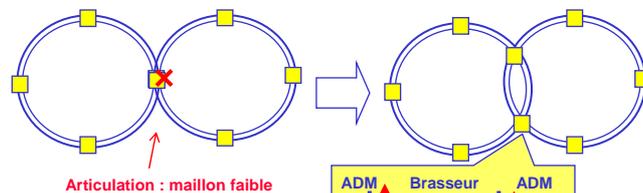
2. Réseaux optiques synchrones

2.2 Technologie SONET/SDH

- ❑ Un mot sur la tolérance aux pannes
 - ❑ Les doubles anneaux sont des structures auto cicatrisantes
 - ❑ En cas de pannes :
 - ❑ Utilisation de l'anneau dans l'autre sens
 - ❑ Utilisation de l'autre fibre
 - ❑ Temps de cicatrisation < 50 ms



- ❑ Interconnexion des anneaux



2. Réseaux optiques synchrones

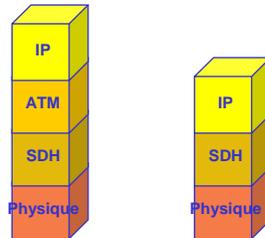
2.2 Résumé de SONET/SDH

- ❑ La SHD repose sur une trame numérique qui apporte, en plus du haut débit :
 - ❑ Une souplesse accrue quant à la possibilité d'extraire ou d'insérer directement un signal constituant du multiplex
 - ❑ Une facilité d'exploitation-maintenance : des canaux aux débits importants sont réservés à ces fonctions (*overhead*)
 - ❑ Une possibilité d'évolution vers des hauts débits : les trames synchrones hauts débits sont construites *par multiplexage synchrone* de l'entité de base. L'entité de base définit implicitement toutes les trames à haut débit
 - ❑ Une interconnexion à haut débit facilitée par la normalisation de la trame de ligne et des interfaces optiques correspondantes
 - ❑ Des architectures de réseaux assurant la sécurisation contre les pannes (défauts de ligne ou d'équipements)
 - ❑ La modularité des équipements SDH est adaptée aux progrès de la technologie

2. Réseaux optiques

2.3. IP over SONET/SDH

- ❑ Idée : véhiculer le trafic IP (ou ATM) sur SDH

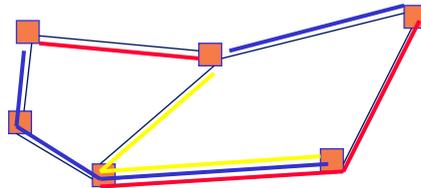


- ❑ Chaque couche ajoute ses services : gestion, traitement d'erreurs, protections, ...
- ❑ Chaque service implique des coûts

3. Réseaux optiques WDM

3.1 Idées de base

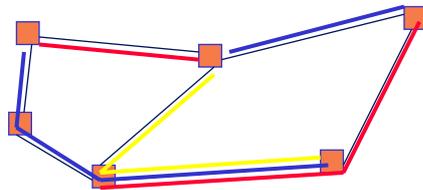
- ❑ Réseaux à routage en longueur d'onde
 - ❑ Associer une longueur d'onde à chaque flux (agrégé ou non)
 - ❑ Appliquer le multiplexage WDM
 - ❑ Utiliser une longueur d'onde (une connexion optique « lightpath ») de bout à bout



3. Réseaux optiques WDM

3.1 Idées de base

- ❑ **Multiplicité**
 - ❑ Réseaux physique, réseaux virtuels
 - ❑ Plan de données et plan de contrôle
 - ❑ Conception de la topologie virtuelle et reconfiguration



3. Réseaux optiques WDM

3.1 Idées de base

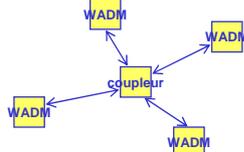
- ❑ **Espacement, capacité**
 - ❑ **WDM (Wavelength Division Multiplexing) (G.692)**
 - ❑ plusieurs trains de signaux numériques à la même vitesse de modulation, mais chacun sur une longueur d'onde distincte
 - ❑ **DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)**
 - ❑ l'espacement utilisé entre deux longueurs d'onde < 100 GHz
 - ❑ beaucoup de signaux portés par des fréquences très rapprochées les unes des autres
 - ❑ on l'emploie pour les transmissions longues distances
 - ❑ **U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing)**
 - ❑ permet jusqu'à 400 canaux de transmission
 - ❑ **CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)**
 - ❑ seulement 8 à 16 canaux, mais une technologie moins coûteuse utilisable notamment pour les boucles locales (MAN).

3. Réseaux optiques WDM

3.2 Architectures

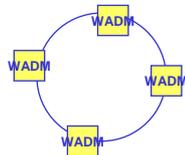
❑ Broadcast and Select Networks

- ❑ Le coupleur central combine les messages et les envoie à tout le monde – les nœuds sélectionnent les messages



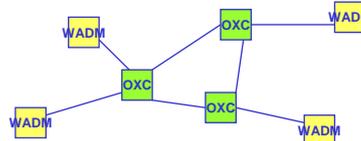
❑ Wavelength Routed Networks

❑ Anneaux



Maillés

Nécessitent des brasseurs



3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

❑ Les contraintes

- ❑ C1 : Allocation de longueurs d'onde distinctes
- ❑ C2 : Continuité de la longueur d'onde
- ❑ C3 : Réutilisation des longueurs d'onde
- ❑ C4 : Nombre d'équipements intermédiaires limité
- ❑ C5 : Longueur maximale du chemin optique

3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

□ Routage et allocation des longueurs d'onde (Routing and Wavelength Assignment)

La topologie du réseau est donnée. Pour des couples (source, destination) trouver des *lightpaths* qui satisfont les contraintes en utilisant les ressources du réseau au minimum

□ Problème statique (NP-difficile)

- Les demandes sont connues *a priori*. L'objectif est de satisfaire le max des demandes en utilisant un min de longueurs d'onde (ou un nombre limité de porteuses)
- Des solutions en temps polynomial pour la pré-configuration sont acceptées

□ Problème dynamique

- Les demandes arrivent (et partent) d'une façon aléatoire.
- L'état du réseau est connu mais pas de connaissance sur le trafic futur
- Il faut trouver une route (lightpath) rapidement



49

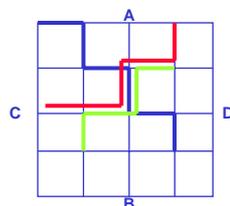
3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

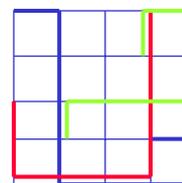
□ Routage et allocation des longueurs d'onde (Routing and Wavelength Assignment)

□ Illustration

Supposons que chaque lien possède 3 longueurs d'onde



Les plus courts chemins bloquent la partie centrale (A,B)=? (C,D)=?



Les chemins longs occupent des liens (longueurs d'onde) inutilement

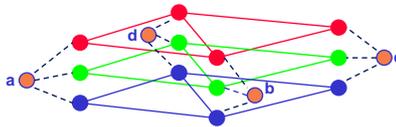


50

3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

- **Routage et allocation des longueurs d'onde**
(*Routing and Wavelength Assignment*)
 - Métriques : probabilité de blocage, trafic accepté
 - Composants : 1) *sélection de route*
2) *allocation de longueur d'onde*
 - Les deux fonctionnalités peuvent être exécutées l'une après l'autre ou ensemble.
 - Modèle souvent utilisé : un graphe $G_a = (V_a, E_a)$ qui contient un sous-graphe $G = (V, E)$ correspondant à une longueur d'onde W fois (W est le nombre de lo)



3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

- **Routage et allocation des longueurs d'onde**
(*Routing and Wavelength Assignment*)
 - 1) *sélection de route*
 - 1.1 *Fixed routing* : une route est sélectionnée (off-line) pour une paire (s,d) (ex: avec l'algo de Dijkstra)
 - 1.2 *Alternate routing* : k routes sont calculées pour une paire (s,d) et une est sélectionnée (selon une critère ou aléatoirement) parmi les routes de l'ensemble
 - 1.3 *Exhaust routing* : pas de route pré-calculée. L'état du réseau est supposé connu (dynamiquement). On cherche la meilleure route selon l'état
 - 1.4 *Least congested path routing* : la congestion d'un lien est caractérisée par le nombre de longueurs d'onde allouées. On sélectionne la route avec la congestion minimale

3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

□ Routage et allocation des longueurs d'onde (Routing and Wavelength Assignment)

2) allocation de longueur d'onde

2.1 *First wavelength assignment* : après avoir sélectionné la route, on choisie la première couche (la couleur) où la route est faisable

2.2 *Joint wavelength-route selection* : en utilisant un « alternate routing », on associe un coût à chaque chemin P

$$C(P) = \alpha_1 A(P) + (1 - \alpha_1) \{ \alpha_2 [W - F(P)] + (1 - \alpha_2) L(p) \}$$

Ici W - nombre de longueurs d'onde

$A(P)$ - nombre de sauts

$L(P)$ - nombre de sauts

$F(P)$ - nombre de longueurs d'onde libres sur P

2.3 *LCPR (1.4)* : on peut choisir directement la couleur qui est la moins bloquante

3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

□ Re-routage des longueurs d'onde

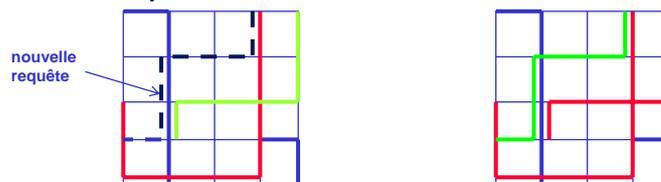
□ Objectif : diminuer la bande passante perdue (non utilisée à cause des contraintes)

□ Méthodes :

□ (re-routage des communications, ce qui revient cher et perturbe la communication)

□ re-routage (changement) des longueurs d'onde de certaines communications afin de pouvoir accepter des nouvelles requêtes

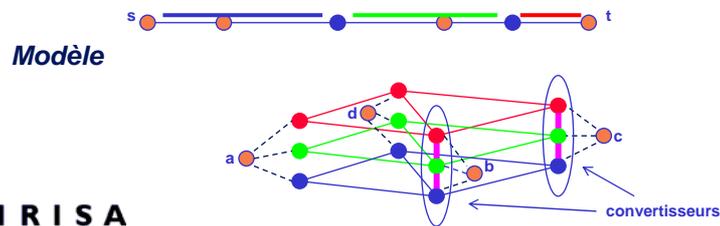
□ Exemple



3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

- ❑ Routage et allocation des longueurs d'onde avec possibilité de conversion de longueurs d'onde
 - ❑ Pour palier le problème du routage
 - ❑ sous contrainte des longueurs d'onde distinctes (C1)
 - ❑ mais en éliminant la contrainte de la continuité de longueur d'onde (C2)
 - ❑ Des convertisseurs de longueurs d'onde sont présents
 - ❑ Un chemin de s à t correspond alors à un ensemble de segments, chacun respectant (C2) entre les convertisseurs



3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

- ❑ Routage et allocation des longueurs d'onde avec possibilité de conversion de longueurs d'onde

Objectifs :

- ❑ trouver le plus court chemin pour (s,d)
- ❑ trouver le chemin le moins congestionné pour (s,d)
- ❑ ...
- ❑ Algorithme de Dijkstra modifié

3. Réseaux optiques WDM

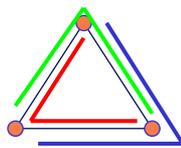
3.3 Routage en longueur d'onde

❑ Réseaux k-fibres

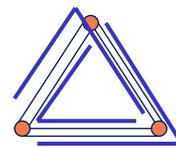
- ❑ Le coût de l'installation dépasse le coût du câble
- ❑ L'installation des câbles multifibres rend le problème de l'allocation de longueurs d'onde plus facilement solvable

❑ Démonstration

- ❑ Supposons qu'il y a W couleurs dans chacune des k fibres
- ❑ Supposons que le trafic M est faisable dans le réseau G
- ❑ En utilisant $k+1$ fibres, M est faisable avec une seule couleur



1 fibre



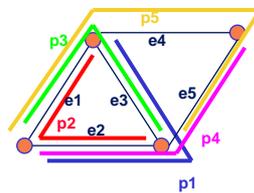
2 fibres

3. Réseaux optiques WDM

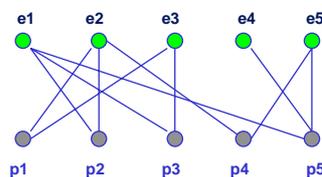
3.3 Routage en longueur d'onde

❑ Réseaux k-fibres

- ❑ Modélisation : graphe de conflits



routage



graphe de conflits

- ❑ Le problème consiste à trouver un k -coloriage dans le graphe de conflits

3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

- ❑ **Traffic grooming - groupage de trafic**
 - ❑ **Groupage de trafic : l'agrégation de flux de faible débit dans des conduits de plus gros débit**
 - ❑ Par exemple dans les réseaux SONET/WDM on regroupe plusieurs OC-3 (155 Mb/s) dans un même OC-48 (2.5 Gb/s) qui sera transporté par une seule longueur d'onde (sur un seul chemin optique)
 - ❑ **Conditions techniques**
 - ❑ A chaque insertion ou extraction de trafic sur une longueur d'onde, il faut placer un ADM
 - ❑ **Objectifs**
 - ❑ le partage efficace de la bande passante
 - ❑ la réduction du nombre et de la taille des équipements de routage.

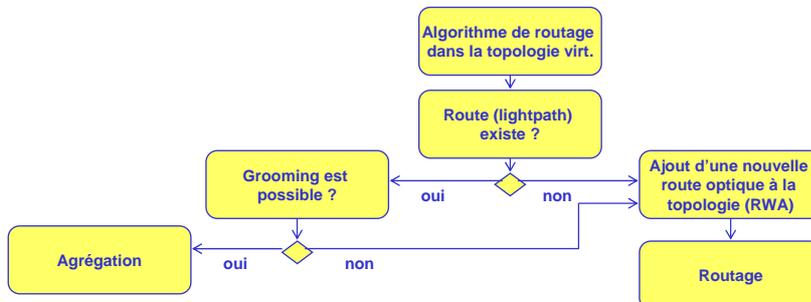
3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

- ❑ **Traffic grooming - groupage de trafic**
 - ❑ **Pour mieux utiliser les ressources**

Entrées :

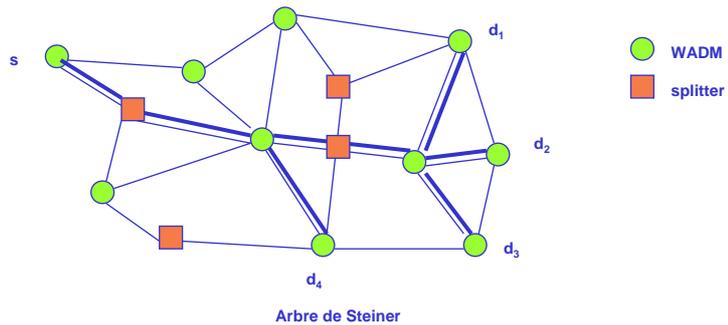
 - ❑ l'état du réseau (la topologie virtuelle et les charges)
 - ❑ une demande (s,d) et sa bande passante



3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

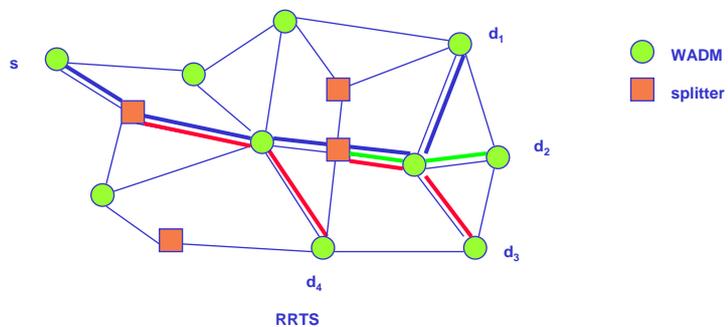
- **Routage multicast optique**
 - **Contrainte sur la duplication**
 - Les splitters sont rares
 - La source peut toujours dupliquer ses messages
 - Structure multicast : arbre (light tree) ou « forêt »



3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

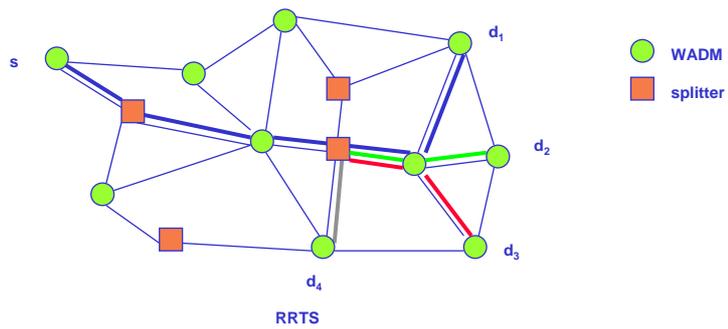
- **Heuristique « Reroute to source »**
 - Une destination est rattachée au premier nœud pouvant dupliquer en remontant vers la source



3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

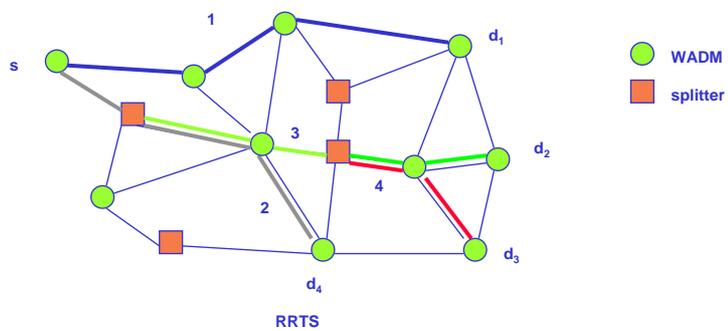
- Heuristique « Reroute to any »
 - Une destination est rattachée au nœud le plus proche qui se trouve dans la forêt et qui peut dupliquer



3. Réseaux optiques WDM

3.3 Routage en longueur d'onde

- Heuristique « Member Only »
 - Application de l'heuristique « Takahashi-Matsuyama » au routage optique



3. Réseaux optiques WDM

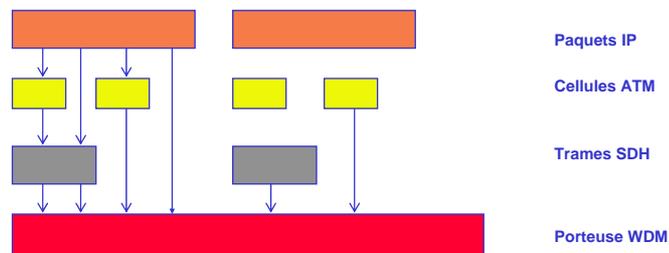
3.3 Routage en longueur d'onde

- ❑ Heuristique « Member Only »
 - ❑ Entrée : la topologie G , la source s et les destinations D
 - ❑ Résultat : un ensemble d'arbres F
 - ❑ Initialisation de F avec la source s ;
 - ❑ Tant que D n'est pas vide faire :
 - ❑ Calculer les plus courts chemins entre les destinations dans D et les nœuds pouvant dupliquer dans F ;
 - ❑ Sélectionner le chemin calculé le plus court ayant d comme extrémité;
 - ❑ Ajouter d à F avec son chemin;
 - ❑ $D = D \setminus \{d\}$;
 - ❑ fait.

3. Réseaux optiques WDM

3.4 Réseaux de nouvelle génération

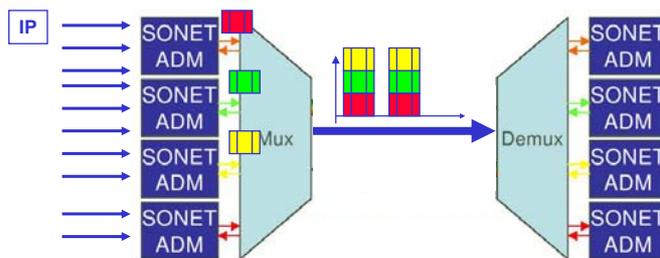
- ❑ Trafic IP dans les réseaux tout optique
 - ❑ IP over SDH over WDM
 - ❑ IP over ATM over WDM
 - ❑ IP over WDM



3. Réseaux optiques WDM

3.4 Réseaux de nouvelle génération

❑ IP / ATM over SDH over WDM



Problèmes : SDH alloue la bande passante par des unités fixes (QoS pour la voix) ici → gaspillage
 WDM alloue la capacité totale d'un canal à une connexion SDH → gaspillage, rigidité

3. Réseaux optiques WDM

3.4 Réseaux de nouvelle génération

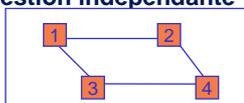
❑ IP over WDM

- ❑ La couche Liaison de données SDH assure :
 - ❑ Contrôle des flux de bits
 - ❑ Synchronisation des trames
 - ❑ Contrôle d'erreurs
- ❑ Ces services sont inutiles (WDM ne nécessite pas de synchronisation et contrôle les flux / lightpath)
- ❑ Avec IP sur WDM
 - ❑ Les paquets ne sont pas découpés plusieurs fois (pas de trames SDH ou ATM)
 - ❑ Pas de perte de bande passante par les AU ou trames non utilisées
 - ❑ Optimisation direct du trafic (pas de frontières entre les couches)
- ❑ Par contre : le routage IP doit tenir compte des fonctionnalités des switches optiques

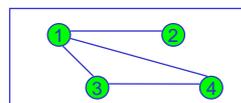
3. Réseaux optiques WDM

3.4 Réseaux de nouvelle génération

- ❑ **Optical Circuit Switching - OCS**
 - ❑ La couche optique est utilisée pour le transport du trafic IP
 - ❑ Elle offre un service de commutation des circuits optiques (lightpaths)
 - ❑ Les transparents précédents ont analysés ce mode de fonctionnement : routage par longueur d'onde et commutation des circuits
- ❑ **Modèles « Network Control and Management »**
 - ❑ **Overlay : gestion indépendante**

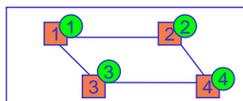


Topologie physique (optique)



Topologie virtuelle IP

- ❑ **Intégré**



3. Réseaux optiques WDM

3.4 Réseaux de nouvelle génération

- ❑ **Optical Circuit Switching**
 - ❑ Comme nous avons vu, le transport utilise SDH / ATM
 - ❑ La transmission orientée connexion / circuit offre :
 - ❑ Un débit important et garanti (QoS) avec SDH
 - ❑ Une allocation flexible de débits, QoS et TE avec ATM
 - ❑ Une connexion souvent tolérante aux fautes (SDH)
 - ❑ **Problème : moins flexible que la commutation par paquets**

3. Réseaux optiques WDM

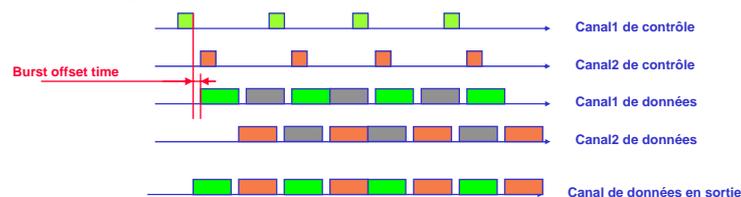
3.4 Réseaux de nouvelle génération

- ❑ **Optical Burst Switching - OBS**
 - ❑ **Compromis pour profiter des avantages de la commutation par circuit et par paquets :**
 - ❑ Pas de traitement électronique ni de file d'attente (comme dans OCS)
 - ❑ Utilisation efficace de la bande passante en réservant la canal quand il y a vraiment des données (paquets) à transmettre (comme dans OPS)
 - ❑ **Entité de base : rafale (Burst) → agrégation d'un ensemble de paquets IP dans le routeur d'entrée et allant tous vers une même destination. Il a une longueur variable.**
 - ❑ **Un rafale a deux composants :**
 - ❑ **Control burst (CB)**
 - ❑ contient les informations « header »
 - ❑ souvent, il est transmis sur un canal spécifique, différent du canal de données
 - ❑ Il précède les données afin de réserver les ressources avant que les données arrivent sur les routeurs
 - ❑ **Data burst (DB)**

3. Réseaux optiques WDM

3.4 Réseaux de nouvelle génération

- ❑ **Optical Burst Switching - OBS**
 - ❑ **Le routeur d'entrée**
 - ❑ accumule les paquets ayant une même destination jusqu'à un seuil (délai ou taille)
 - ❑ ajoute le contrôle (source, destination, QoS, longueur de DB, etc.)
 - ❑ synchronise la transmission des deux (le contrôle est le premier)
 - ❑ **Les routeurs de core**
 - ❑ reçoivent le contrôle, le traitent électroniquement et allouent le canal de sortie pour la durée de DB
 - ❑ si échec : le burst de données est rejeté
 - ❑ **Exemple : deux entrées vers une même sortie**



3. Réseaux optiques WDM

3.4 Réseaux de nouvelle génération

- ❑ **Optical Packet Switching**
 - ❑ Le traitement électronique de l'entête des paquets ralentit la communication et diminue le débit
 - ❑ Le traitement peut être amélioré par
 - ❑ Techniques rapides de recherche dans les tables
 - ❑ Agrégation
 - ❑ Parallélisation, etc.
 - ❑ Les besoins des réseaux optiques : traitement avec x Tbit/s
 - ❑ Des switches optiques pour la commutation selon les header sont en cours de développement
 - ❑ Introduire un délai par une fibre à retard pendant l'examen de l'entête
 - ❑ Architecture très compliquée et chère

Bibliographie

- C. Siva Ram Murthy, Mohan Gurusamy. *WDM Optical Networks. Concepts, Design and Algorithms*. Prentice Hall, 2002
- B. Beauquier. *Communications dans les réseaux optiques par multiplexage en longueur d'onde*. Thèse à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, 2000.
- S. Dixit. *IP over WDM: Building the Next Generation Optical Internet*. John Wiley & Sons - Interscience, 2003.
- Benoit de Dinechin. *La SDH : après la PDH*. <http://www.epinard.free.fr/SDH/Plan.php>
- Gilbert Moisio. *Réseaux Haut Débit. Contraintes et enjeux*. Alcatel. http://www.languedoc-roussillon.pref.gouv.fr/grandsdossiers/tic/pdf/hautes_debits-presentation_alcatel.pdf, sept 2001.
- David Coudert, Hervé Rivano. *Lightpath assignment for multifibers wdm optical networks with wavelength translators*. Rapport de recherche de l'INRIA - RR-4487, Juin 2002