

# 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
    - ❑ Assignment des longueurs d'onde
    - ❑ Algorithmes unicast
    - ❑ Multicast dans les réseaux tout optiques
  - ❑ Réseaux de nouvelle génération
    - ❑ Commutation optique par « burst » et par paquet



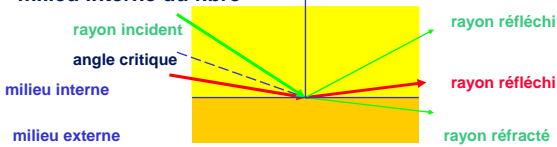
2

# 1. Spécificités des réseaux tout optique

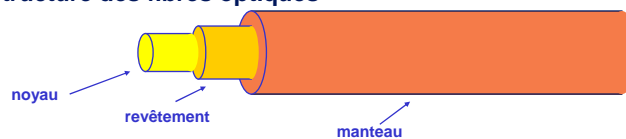
- ❑ Propriétés
  - ❑ Transmission de l'information à l'aide de la lumière
  - ❑ Conduite dans des fibres en verre
  - ❑ Aiguillage optique dans les nœuds
- ❑ Conséquences
  - ❑ Insensibilité aux interférences extérieures
  - ❑ Capacité, distance et vitesse de propagation importantes
  - ❑ Poids faible, 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

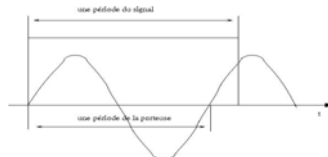


# 1. Spécificités des réseaux tout optique

## 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

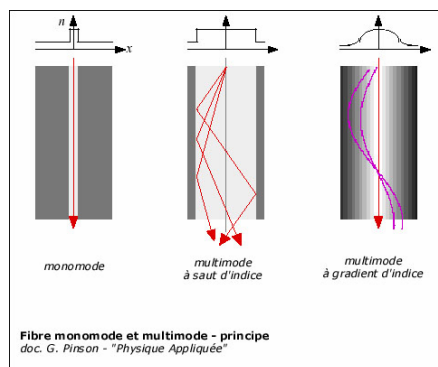
- Fibres monomodes ou multimodes

- 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

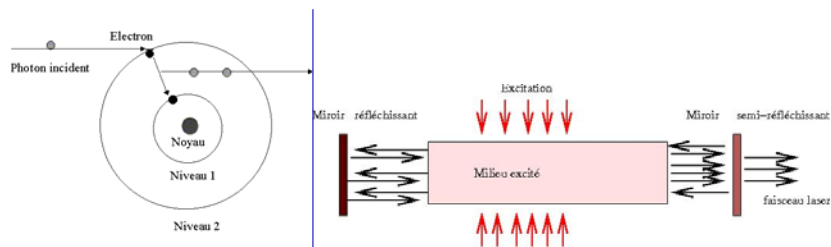
# 1. Spécificités des réseaux tout optique

## 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

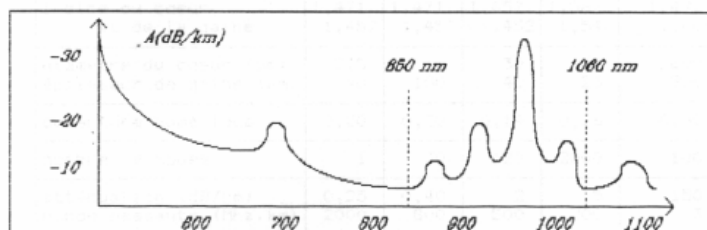
- ❑ **Atténuation**
  - ❑ Réduction de la puissance du signal grâce à des impuretés dans la verre
  - ❑ Elle dépend du fibre mais aussi de *la longueur d'onde*  
0,2 à 5 dB/km
  
- ❑ **Déformation**
  - ❑ Dispersion
    - ❑ A cause de la variation de la vitesse de propagation par rapport à la fréquence
    - ❑ 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

### □ Avantages

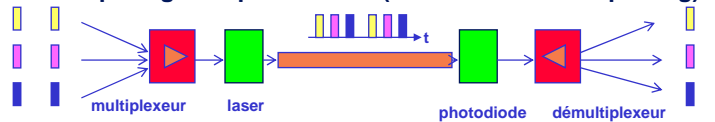
- Débit très important
- Une faible puissance est suffisante
- Atténuation faible, des longues distances sont faisables
- Taux de pertes, taux d'erreurs faibles
- Peu de perturbations :
  - Pas d'influence électromagnétique (électronique ou radio)
  - Pas de perturbations entre deux fibres distinctes
- 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)

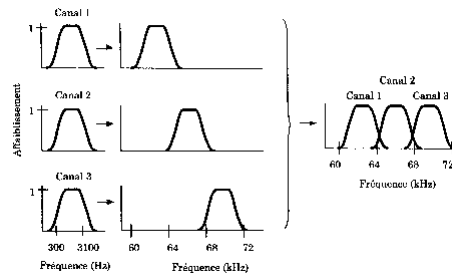


- Utilisé dans les multiplexeurs SONET/SDH
- Limite : 40 GHz
- Inconvénients :
  - Rigide pour l'ajout d'un nouveau canal
  - Commutation difficile

# 1. Spécificités des réseaux tout optique

## 1.2 Le multiplexage optique

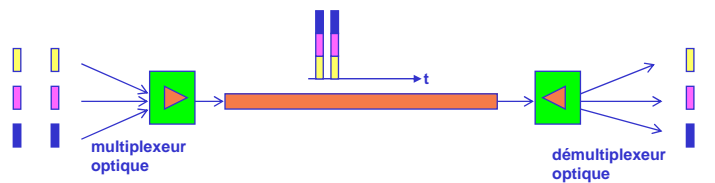
- ❑ **Multiplexage par répartition de fréquences - FDM**  
(*Frequency Division Multiplexing*)
  - ❑ Le multiplexage fréquentiel consiste à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux (sous-bandes fréquentielles) plus étroits
  - ❑ à affecter en permanence chacun de ces canaux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

---

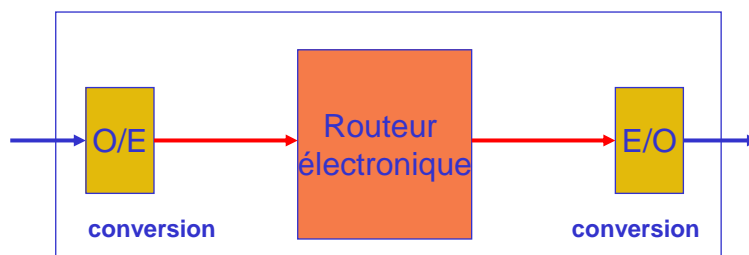
- ❑ Multiplexage en longueur d'onde – WDM
  - ❑ Capacité
    - ❑ Cuivre : ~ 100 Mhz
    - ❑ Fibre avec TDM : ~ 40 GHz
    - ❑ Fibre avec WDM : > 1000 THz

# 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

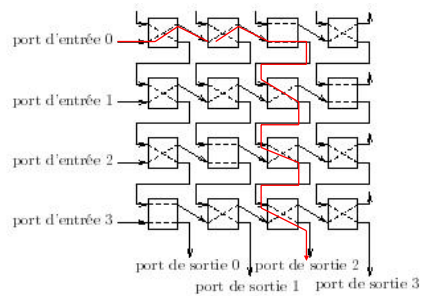
## 1.3 Les switches

### 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)



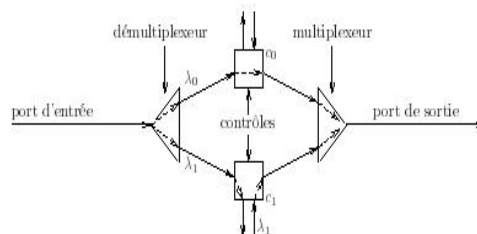
# 1. Spécificités des réseaux tout optique

## 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



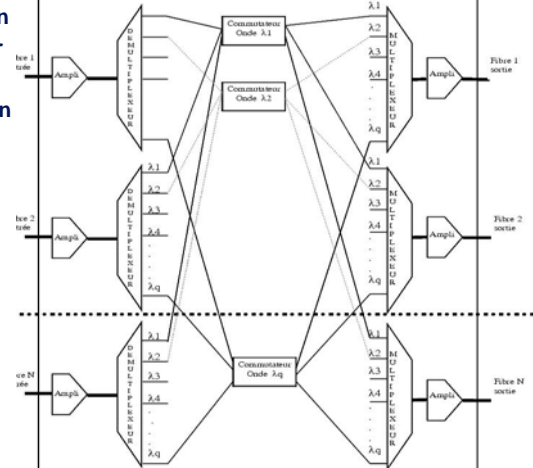
# 1. Spécificités des réseaux tout optique

## 1.3 Les switches

### Les brasseurs

#### Wavelength Routing Optical Cross-Connect WR-OXC

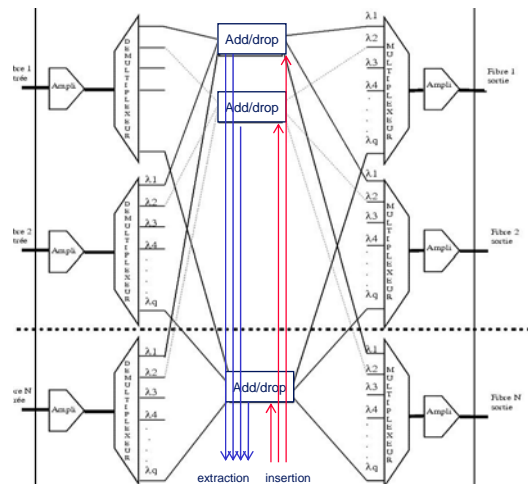
- Commutation par longueur d'onde
- Configuration électronique



# 1. Spécificités des réseaux tout optique

## 1.3 Les switches

### Les répartiteurs avec multiplexeur à insertion / extraction

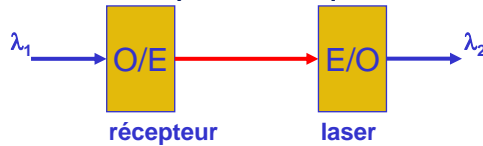


# 1. Spécificités des réseaux tout optique

## 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

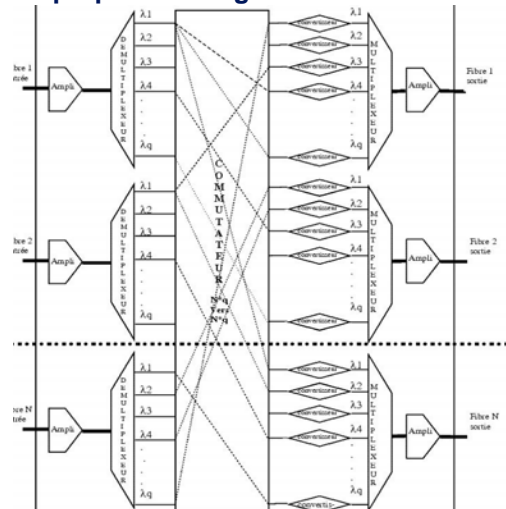
□ Plus rapide

□ Seulement vers les fréquences voisines

# 1. Spécificités des réseaux tout optique

## 1.3 Les switches

### □ Les convertisseurs optiques de longueurs d'onde



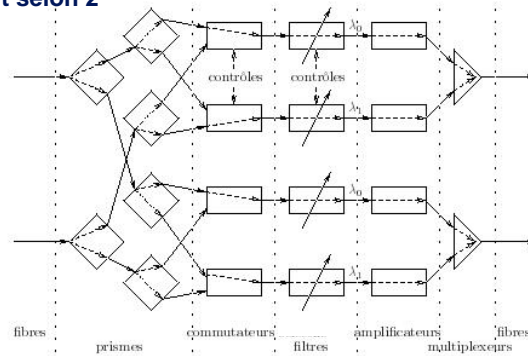
# 1. Spécificités des réseaux tout optique

## 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

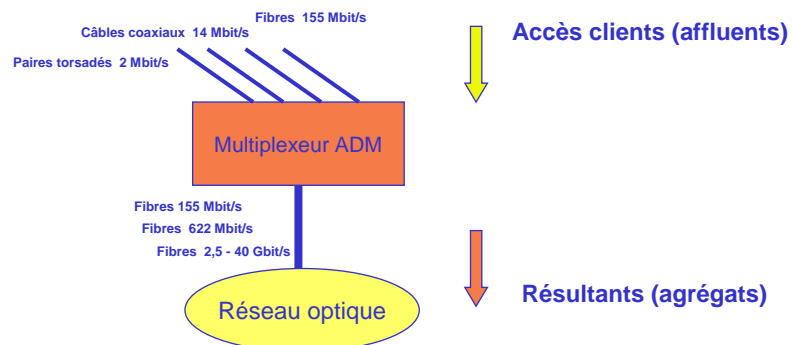
### 2.1 Idées de base

- ❑ 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

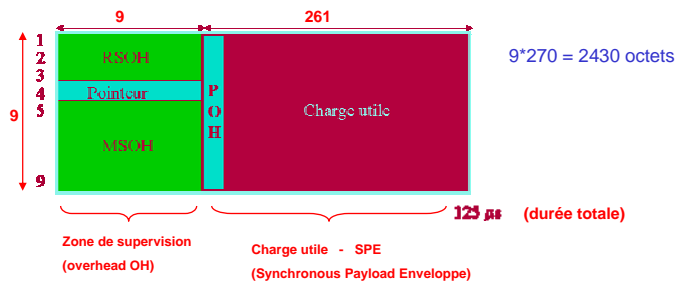
## 2. Réseaux optiques synchrones

### 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* :  $AU = \text{Pointeur} + VC$

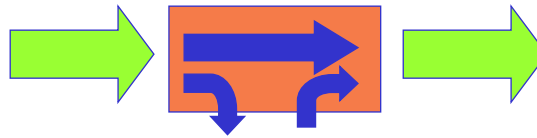
- ❑ Une combinaison des conteneurs donne le contenu de SPE (charge utile) dans un STM-n
- ❑ Les conteneurs suivent un *chemin (conduit)* prédéterminé
- ❑ Les *entêtes* en début de trames servent à contrôler la transmission de la *section STM* :
  - ❑ Regenerator Section Overhead RSOH
  - ❑ Multiplex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

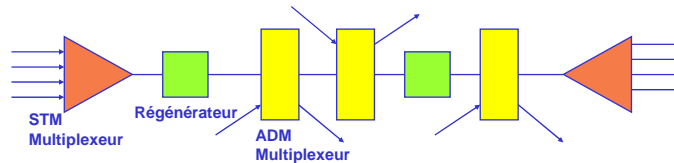


## 2. Réseaux optiques synchrones

### 2.2 Technologie SONET/SDH

#### □ Schéma du système SONET/SDH

##### □ Composants typiques



← section → ← section → ← section → ← section → ← section → ← section →

← line → ← line → ← line → ← line →

← path →

## 2. Réseaux optiques synchrones

### 2.2 Technologie SONET/SDH

#### ☐ Couches du système SONET/SDH


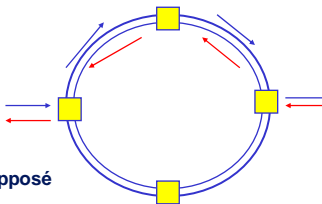
##### 4 couches :

- ☐ 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

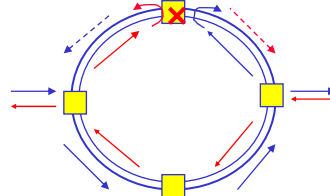
#### ☐ Topologies typiques SONET/SDH

- ☐ 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

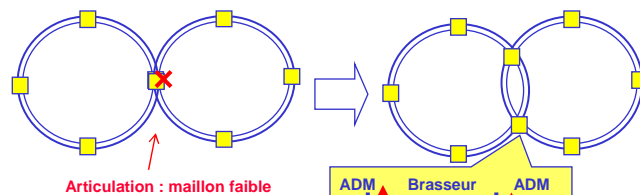
## 2. Réseaux optiques synchrones

### 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

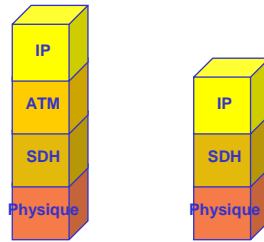
### 2.2 Résumé de SONET/SDH

- ❑ 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

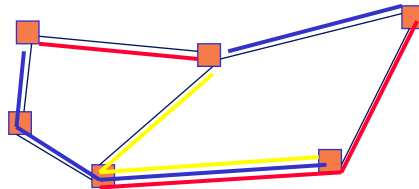


- ❑ Chaque couche ajoute ses services : gestion, traitement d'erreurs, protections, ...
- ❑ Chaque service implique des coûts

## 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

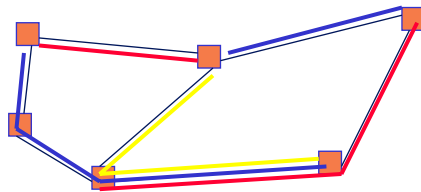


### 3. Réseaux optiques WDM

#### 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

---

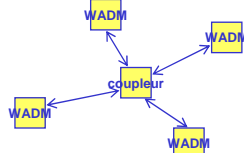
- ❑ **Espacement, capacité**
  - ❑ **WDM (Wavelength Division Multiplexing) (G.692)**
    - ❑ plusieurs trains de signaux numériques à la même vitesse de modulation, mais chacun sur une longueur d'onde distincte
  - ❑ **DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)**
    - ❑ l'espacement utilisé entre 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

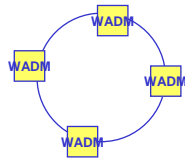
#### ❑ Broadcast and Select Networks

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



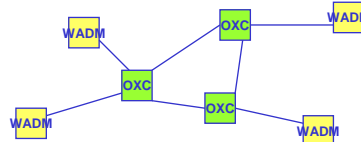
#### ❑ Wavelength Routed Networks

- ❑ 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

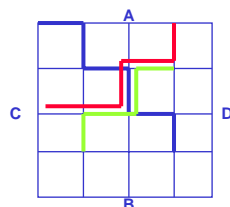
### 3. Réseaux optiques WDM

#### 3.3 Routage en longueur d'onde

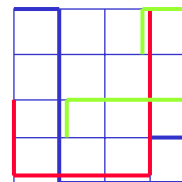
#### □ Routage et allocation des longueurs d'onde (Routing and Wavelength Assignment)

#### □ Illustration

Supposons que chaque lien possède 3 longueurs d'onde



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

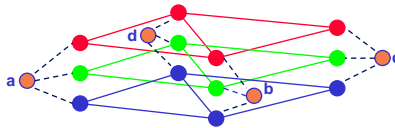


Les chemins longs occupent des liens (longueurs d'onde) inutilement

### 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



53

### 3. Réseaux optiques WDM

#### 3.3 Routage en longueur d'onde

#### □ Re-routage des longueurs d'onde

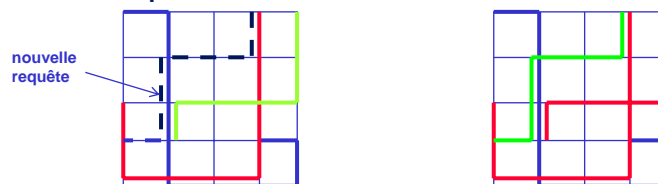
□ Objectif : diminuer la bande passante perdue (non utilisée à cause des contraintes)

□ 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

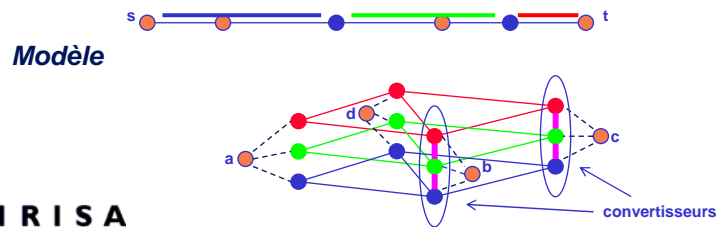


54

### 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

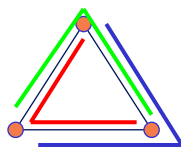
#### 3.3 Routage en longueur d'onde

#### ❑ Réseaux k-fibres

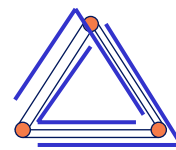
- ❑ Le coût de l'installation dépasse le coût du câble
- ❑ L'installation des câbles multifibres rend le problème de l'allocation de longueurs d'onde plus facilement solvable

#### ❑ 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



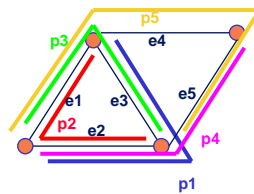
2 fibres

### 3. Réseaux optiques WDM

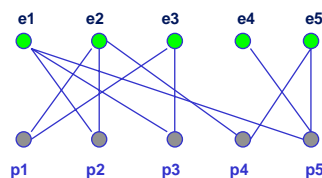
#### 3.3 Routage en longueur d'onde

#### ❑ 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.

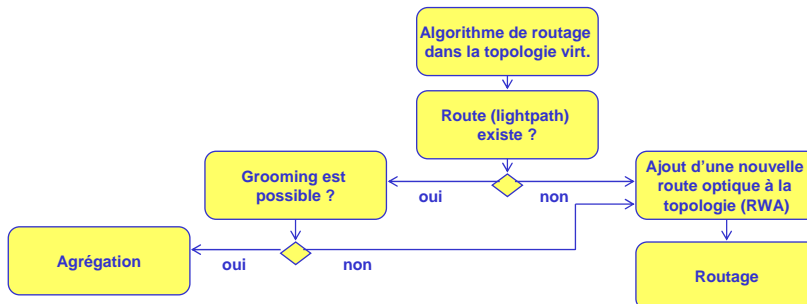
### 3. Réseaux optiques WDM

#### 3.3 Routage en longueur d'onde

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

Entrées :

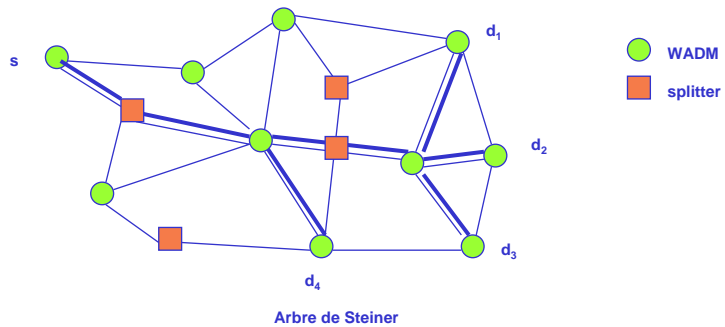
    - ❑ l'état du réseau (la topologie virtuelle et les charges)
    - ❑ une demande  $(s,d)$  et sa bande passante



### 3. Réseaux optiques WDM

#### 3.3 Routage en longueur d'onde

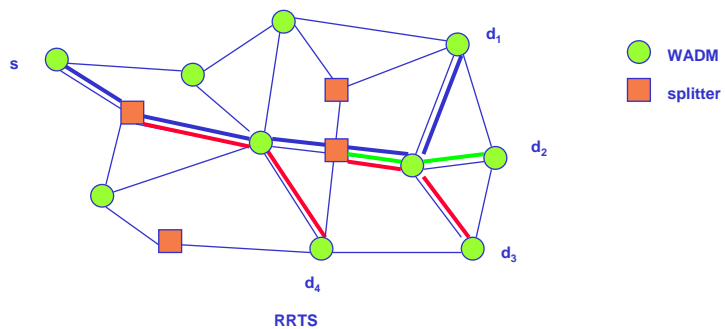
- **Routage multicast optique**
  - **Contrainte sur la duplication**
    - Les splitters sont rares
    - La source peut toujours dupliquer ses messages
    - Structure multicast : arbre (light tree) ou « forêt »



### 3. Réseaux optiques WDM

#### 3.3 Routage en longueur d'onde

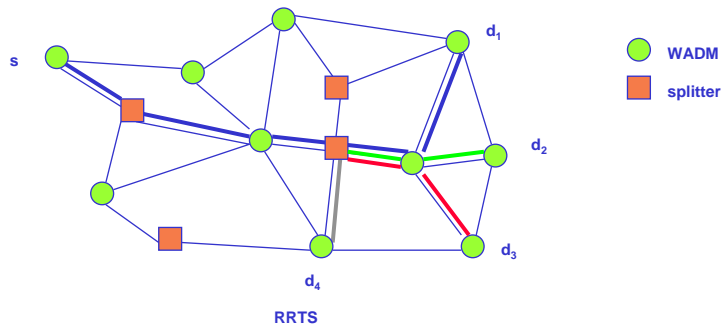
- **Heuristique « Reroute to source »**
  - Une destination est rattachée au premier nœud pouvant dupliquer en remontant vers la source



### 3. Réseaux optiques WDM

#### 3.3 Routage en longueur d'onde

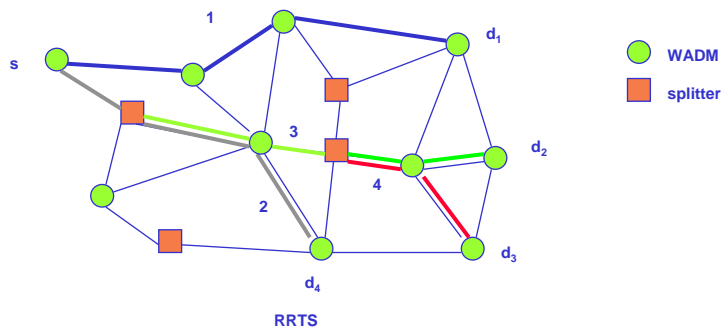
- Heuristique « Reroute to any »
  - Une destination est rattachée au nœud le plus proche qui se trouve dans la forêt et qui peut dupliquer



### 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

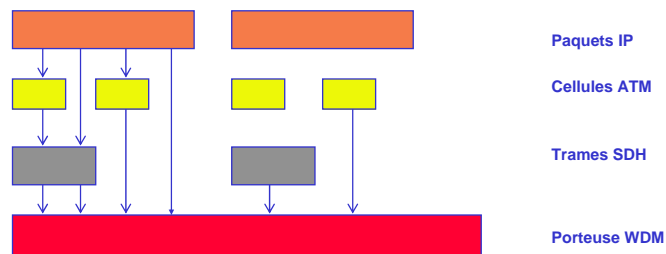
#### 3.3 Routage en longueur d'onde

- ❑ 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

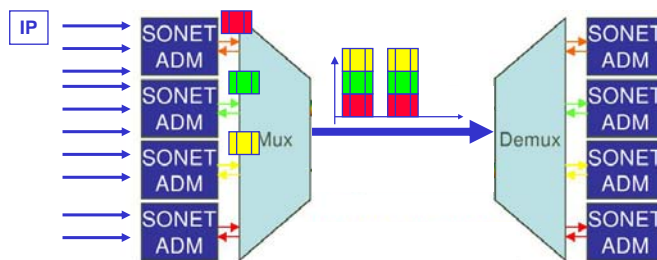
- ❑ Trafic IP dans les réseaux tout optique
  - ❑ IP over SDH over WDM
  - ❑ IP over ATM over WDM
  - ❑ IP over WDM



### 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

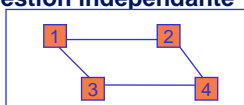
#### ❑ IP over WDM

- ❑ 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

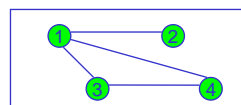
### 3. Réseaux optiques WDM

#### 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**

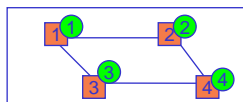


Topologie physique (optique)



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

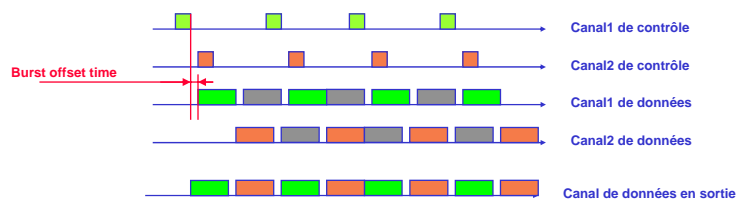
#### 3.4 Réseaux de nouvelle génération

- ❑ **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 Moasio. *Réseaux Haut Débit. Contraintes et enjeux*. Alcatel. [http://www.languedoc-roussillon.pref.gouv.fr/grandsdossiers/tic/pdf/hautes\\_debits-presentation\\_alcatel.pdf](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