

1. Systèmes de Transmission

Chapitre 1 – Systèmes de Transmission

- Multiplexages (TDM, FDM, WDM, DWDM)
- Systèmes xDSL (Modulations OFDM, ADSL, VDSL)
- Systèmes sans fil (WiFi, WiMAX, LTE)
- Multiplexages & accès multiples (FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA)
- Hiérarchies numériques (PDH, SDH, SONET)

1. Systèmes de Transmission

Multiplexage

Il consiste en fait à faire passer **plusieurs informations** (conversations, flux de données) sur un **seul support de transmission** → moins de câbles pour faire passer la même quantité d'information) → larges **économies** sont possibles grâce à la **réduction des coûts** d'installation et/ou d'exploitation.

Exemple 1 : Système de radiodiffusion → Multiplexage en fréquence

- Le support physique : L'atmosphère (la bande de fréquences radio).
- Le multiplexage : Chaque station radio émet sur une fréquence légèrement différente (88.1 MHz, 98.5 MHz, 104.7 MHz, etc.). Sans multiplexage, toutes les stations émettraient sur la même fréquence et se brouilleraient mutuellement.
- Le démultiplexage : Poste radio permet de "choisir" une fréquence (un canal) et d'ignorer toutes les autres.

Exemple 2 : Fibre optique

Une fibre optique peut transporter 10 Gb/s.

Un appel VoIP nécessite ~64 kb/s. Sans multiplexage, plus de 99,99% de la capacité de la fibre serait gaspillée pour un seul appel. Un seul câble de fibre optique peut transporter plusieurs conversations en même temps.

1. Systèmes de Transmission

Intérêt du multiplexage

- Efficacité et Exploitation Maximale des Ressources

Un support de transmission (une fibre, une onde radio) a une capacité de transmission (débit) bien plus grande que ce dont a besoin un seul utilisateur.

- Optimisation et Réduction des Coûts

Beaucoup moins cher d'installer, d'entretenir et de louer une seule grosse liaison (une fibre optique, un câble coaxial, une liaison satellite) que des dizaines ou des centaines de petites liaisons distinctes pour chaque utilisateur.

- Modularité/Scalabilité

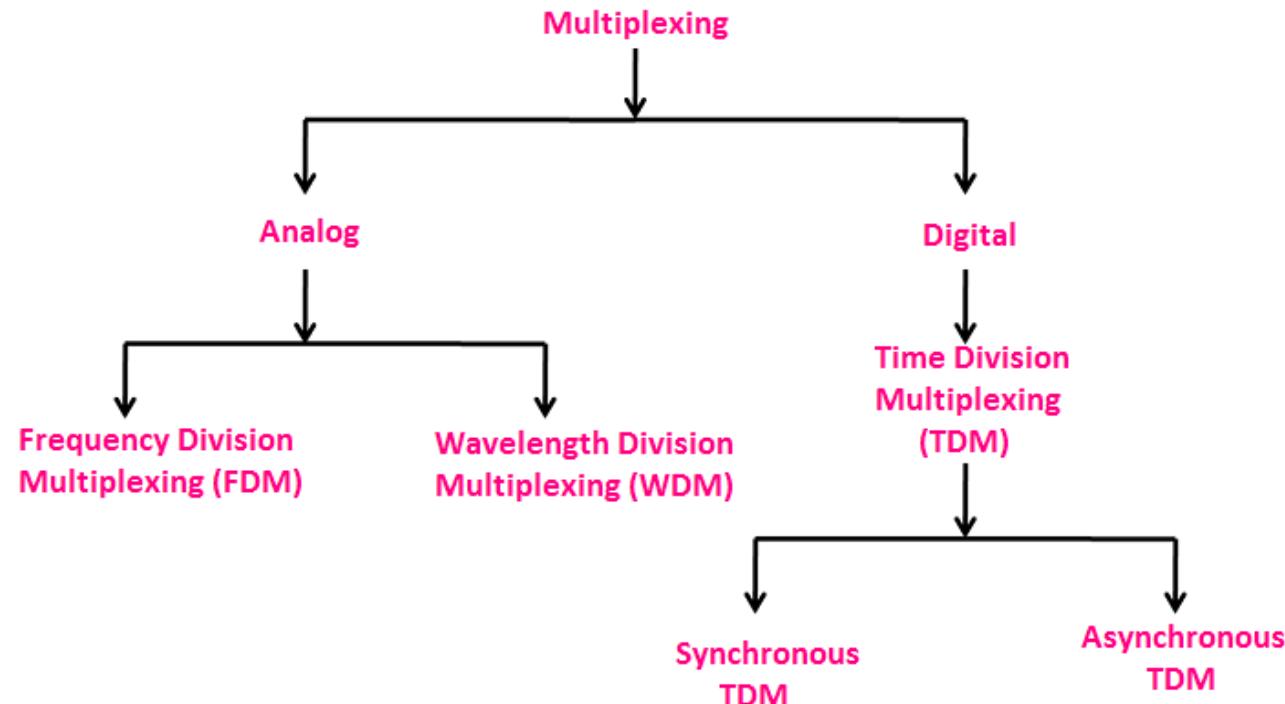
On peut facilement ajouter ou retirer des canaux (des utilisateurs) sur le support partagé sans devoir modifier toute l'infrastructure physique à chaque fois.

- Compatibilité avec les Réseaux Numériques

Les techniques de multiplexage modernes (comme le multiplexage par répartition dans le temps - TDM) sont parfaitement adaptées aux signaux numériques. Elles permettent de regrouper des données de nature différente (voix, vidéo, internet) sur le même support → réseaux numériques intégrés.

1. Systèmes de Transmission

Principales techniques de multiplexage



Technique	Acronyme	Principe	Exemple d'Application
Multiplexage par Répartition en Fréquence	FDM	Chaque canal utilise une partie de la bande de fréquence du support.	Radio FM/AM, Télévision analogique, Wi-Fi.
Multiplexage par Répartition dans le Temps	TDM	Chaque canal utilise toute la bande passante, mais seulement pendant de très courts intervalles de temps (time slots) qui se répètent.	Réseaux téléphoniques (RTC), SDH/SONET.
Multiplexage par Répartition en Longueur d'Onde	WDM	Un type de FDM pour la fibre optique. Chaque canal utilise une couleur (longueur d'onde) de lumière différente.	Réseaux de fibres optiques à haut débit.
Multiplexage par Répartition par Code	CDM	Chaque canal utilise un code unique pour encoder ses données. Tous les canaux émettent en même temps et sur les mêmes fréquences.	3G mobile (WCDMA), GPS.

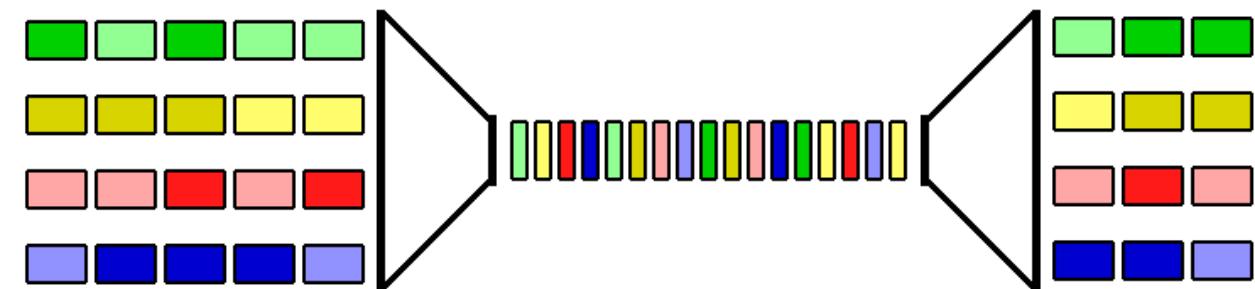
1. Systèmes de Transmission

Multiplexage temporel – TDM (Time Division Multiplexing)

Le Multiplexage par Répartition temporelle (**TDM**) une technique numérique qui divise le temps en petites tranches (slots de temps). Chaque signal reçoit un créneau temporel à tour de rôle, ce qui permet à plusieurs signaux de partager la même bande de fréquence en utilisant différents moments pour transmettre.

Le multiplexage temporel (TDM) combine plusieurs signaux numériques en un seul flux binaire numérique série. Un circuit spécialisé appelé *multiplexeur* met en forme des flux d'entrée parallèles dans les emplacements temporels de la sortie série.

Exemple : Dans un système sur fibre optique, le flux de bits Série est transmis comme une seule longueur d'onde sur un câble fibre optique. À l'extrémité éloignée du canal, un *demultiplexeur* reconstruit le signal parallèle d'origine à partir du flux binaire série,



Le débit de données série doit être suffisamment rapide pour garantir qu'aucune donnée ne soit perdue. Les émetteurs et récepteurs sur fibre optique pour les signaux audiovisuels haute résolution fonctionnent généralement à un débit de données de 4 à 6 Gb/s

Le TDM est utilisé pour transmettre un large éventail de signaux, dont l'HDMI, le DVI, le 3G-SDI, le RVB, la vidéo composante HD et SD, le S-Video, le composite, l'USB, l'audio, et le contrôle RS-232

1. Systèmes de Transmission

Multiplexage temporel – TDM (Time Division Multiplexing)

Exemple : Système Téléphonique Traditionnel (RTC)

Un opérateur téléphonique qui doit transmettre **4 appels vocaux** simultanés sur une seule ligne physique (ex: une fibre optique).

Chaque appel vocal est numérisé à **64 kbit/s**.

- Sans TDM → 4 lignes physiques distinctes → coûteux et inefficace.
- Avec TDM

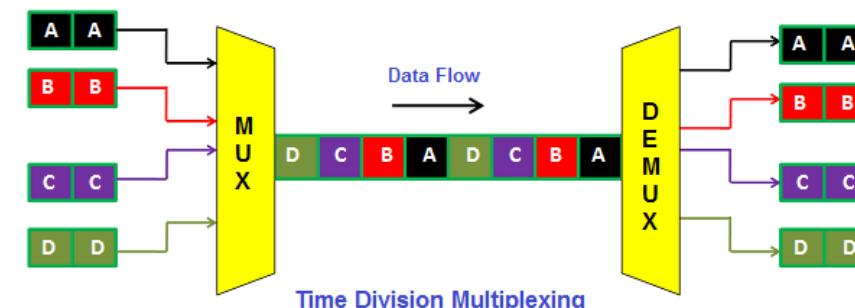
Découpage en trames :

La ligne physique a un débit bien supérieur (ex: 256 kbit/s, soit $4 \times 64 \text{ kbit/s}$).

Le temps est divisé en **trames** de durée **T**. Chaque trame contient **4 slots** (un par appel).

Attribution des slots :

- Slot 1 : Données de l'appel 1
- Slot 2 : Données de l'appel 2
- Slot 3 : Données de l'appel 3
- Slot 4 : Données de l'appel 4



Fonctionnement :

Pendant la durée **T**, chaque appel envoie une petite quantité de données (ex: $8 \text{ bits} \times 8000 \text{ trames/s} = 64 \text{ kbit/s}$).

Le multiplexeur assemble les 4 slots en une trame et envoie celle-ci sur la ligne.

À l'autre extrémité, le démultiplexeur récupère la trame, lit chaque slot, et redirige les données vers le destinataire correct.

Représentation Temporelle :

Trame k-1: [Slot1 | Slot2 | Slot3 | Slot4] Trame k : [Slot1 | Slot2 | Slot3 | Slot4] Trame k+1: [Slot1 | Slot2 | Slot3 | Slot4]

1. Systèmes de Transmission

Multiplexage temporel – TDM (Time Division Multiplexing)

- Avantages du TDM

- Économique : Réduction du nombre de supports physiques.
- Simple : Gestion predictable des canaux (délais constants).
- Adapté au numérique : Idéal pour la voix numérisée, les données structurées.

- Limites

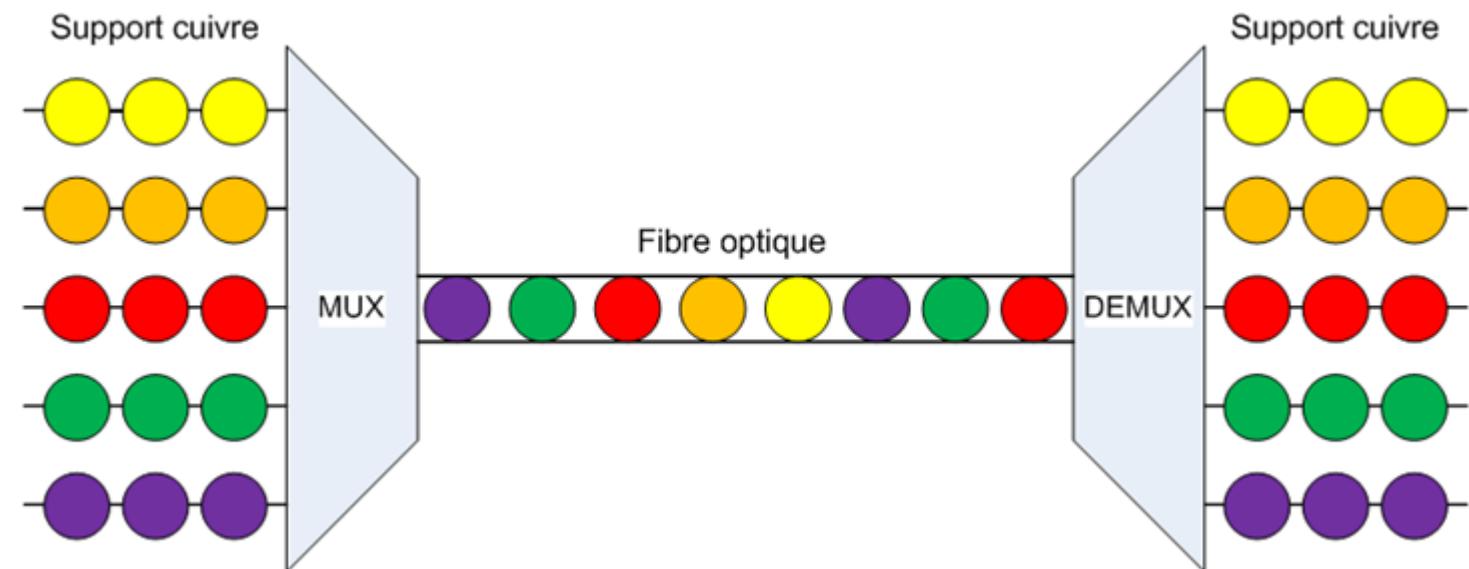
- Inefficacité si canaux inactifs (sauf en STDM).
- Délais potentiels dus à l'attente du slot.
- Synchronisation required entre MUX et DEMUX.

- Applications :

Réseaux téléphoniques (PCM, E1/T1).

Réseaux cellulaires (2G, GSM).

Fibre optique (SDH, SONET).

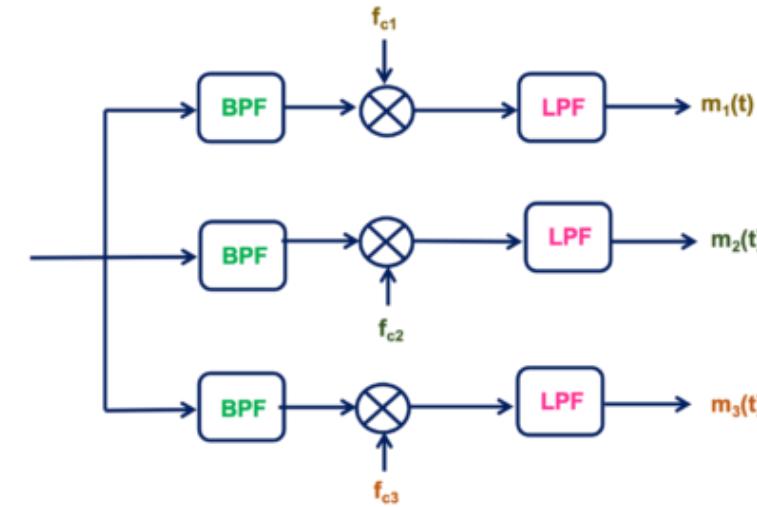
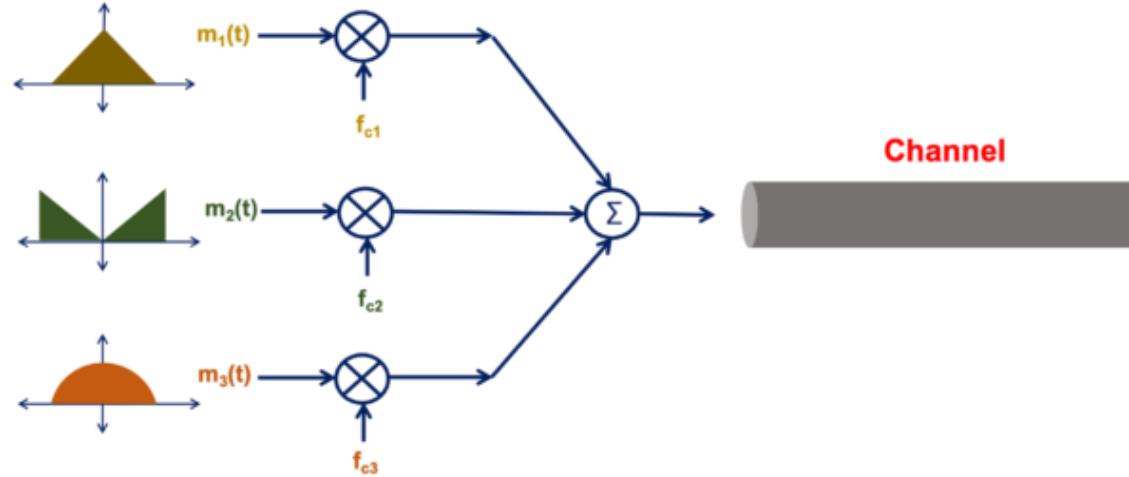


Remarque : Le TDM est une technique fondatrice des réseaux modernes, permettant une gestion ordonnée et fiable de multiples flux sur une infrastructure partagée.

1. Systèmes de Transmission

Multiplexage fréquentiel – FDM (Frequency Division Multiplexing)

Le Multiplexage par Répartition en Fréquence (FDM) est une technique analogique qui permet de combiner plusieurs signaux en les modulant sur des fréquences porteuses différentes pour les transmettre simultanément sur un même support physique. Chaque canal occupe une partie spécifique du spectre de fréquences.



- Le spectre de fréquences disponible est divisé en sous-bandes distinctes.
- Chaque signal à transmettre est modulé sur une fréquence porteuse unique.
- Tous les signaux modulés sont combinés et transmis ensemble sur le support.
- À la réception, des filtres passe-bande séparent les différentes fréquences pour reconstituer les signaux originaux.

1. Systèmes de Transmission

Multiplexage fréquentiel – FDM (Frequency Division Multiplexing)

Exemple 1: Radiodiffusion FM

Une tour de transmission radio qui doit diffuser **3 stations radio** simultanément sur la même antenne.

- Sans FDM : Impossible de diffuser plusieurs stations sans interférences.
- Avec FDM :

Attribution des fréquences : Chaque station se voit attribuer une fréquence porteuse différente :

Station A : **88.1 MHz**

Station B : **89.7 MHz**

Station C : **91.3 MHz**

Modulation des signaux :

Chaque station module son signal audio sur sa porteuse assignée (modulation FM).

Le signal modulé occupe une bande de **200 kHz** autour de sa fréquence centrale (ex: 88.0–88.2 MHz pour la Station A).

Combinaison et transmission :

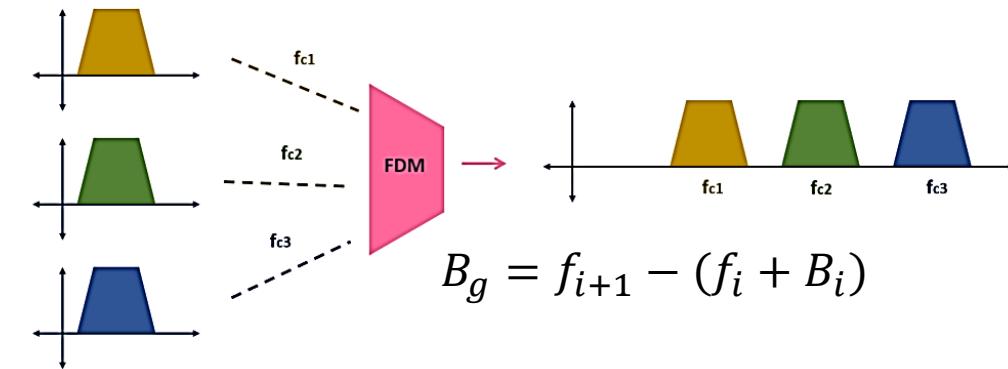
Un multiplexeur combine les 3 signaux modulés en un seul signal composite.

Ce signal est transmis via l'antenne.

Réception et démultiplexage :

Le poste radio utilise un **tuner** (filtre électrique réglable) pour sélectionner une fréquence spécifique (ex: 89.7 MHz pour la Station B).

Le démodulateur extrait le signal audio original de la porteuse.



1. Systèmes de Transmission

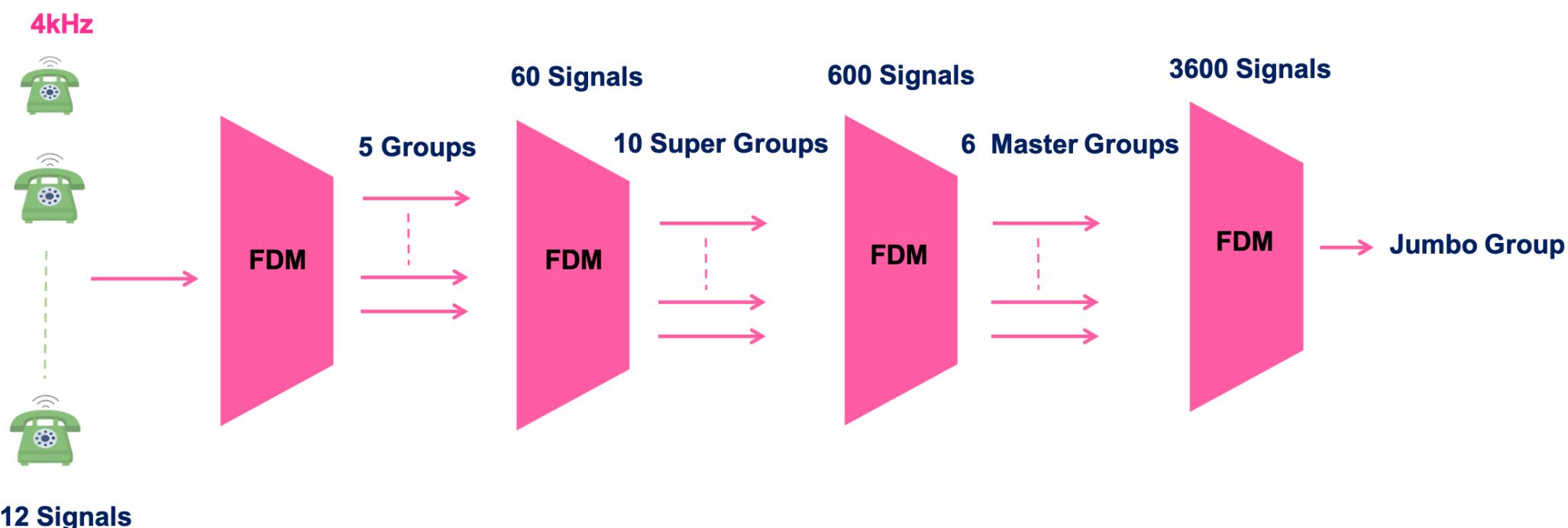
Multiplexage fréquentiel – FDM (Frequency Division Multiplexing)

Exemple 2 : Lignes Téléphoniques

Dans les systèmes traditionnels, 12 voies téléphoniques (chaque voie = 4 kHz) étaient multiplexées par FDM pour former un groupe (48 kHz de bande passante).

Plusieurs groupes pouvaient être combinés en super-groupes (240 kHz) puis en maîtres-groupes.

Chaque conversation téléphonique était décalée en fréquence pour éviter les chevauchements.



1. Systèmes de Transmission

Multiplexage fréquentiel – FDM (Frequency Division Multiplexing)

- Avantages du FDM

- Simplicité : Concept facile à comprendre et à mettre en œuvre.
- Compatibilité : Idéal pour les signaux analogiques (radio, TV).
- Transmission simultanée : Tous les canaux sont actifs en permanence.

- Limites

- Gaspillage de bande passante : Des bandes de garde sont nécessaires entre les canaux pour éviter les interférences.
- Intermodulation : Risque d'interférences entre les porteuses proches.
- Rigidité : Les canaux sont fixes et ne s'adaptent pas facilement à des débits variables.

Applications :

- Radio et Télévision : Diffusion analogique (FM, AM, TV hertzienne).
- Réseaux câblés : TV par câble (chaque chaîne sur une fréquence différente).
- Fibre optique : Version optique appelée WDM (Wavelength Division Multiplexing) où chaque canal utilise une longueur d'onde différente.
- Wi-Fi et 4G/5G : Utilisation de sous-porteuses FDM dans les techniques OFDM/OFDMA.

Remarque : Le FDM reste une technique fondamentale, surtout dans les communications analogiques, bien que souvent remplacée par le TDM dans les systèmes numériques purs.

1. Systèmes de Transmission

Multiplexage en longueur d'onde – WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Communication optique

Les communications optiques utilisent la lumière comme support de transmission, offrant des débits extrêmement élevés et une immunité aux interférences électromagnétiques. La fibre optique est le medium principal, et le WDM (Wavelength Division Multiplexing) permet de multiplier sa capacité.

- **Structure et Propagation**
- **Cœur** : Zone centrale où la lumière se propage (diamètre 8-10 µm pour mono-mode, 50-62.5 µm pour multi-mode).
- **Gaine** : Enveloppe confinant la lumière dans le cœur par réflexion totale interne.
- **Atténuation** : Perte de puissance lors de la propagation.
- **Formule d'atténuation** : $\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$ (en dB/km)

α : Coefficient d'atténuation

L : Longueur de la fibre (km)

P_{in} , P_{out} : Puissances d'entrée et de sortie (mW)

Exemple :

$$P_{in} = 1 \text{ mW}, P_{out} = 0.1 \text{ mW} \text{ après } L = 20 \text{ km} \rightarrow \alpha = \frac{10}{20} \log_{10} \left(\frac{1}{0.1} \right) = 0.5 \times 1 = 0.5 \text{ dB/km}$$

1. Systèmes de Transmission

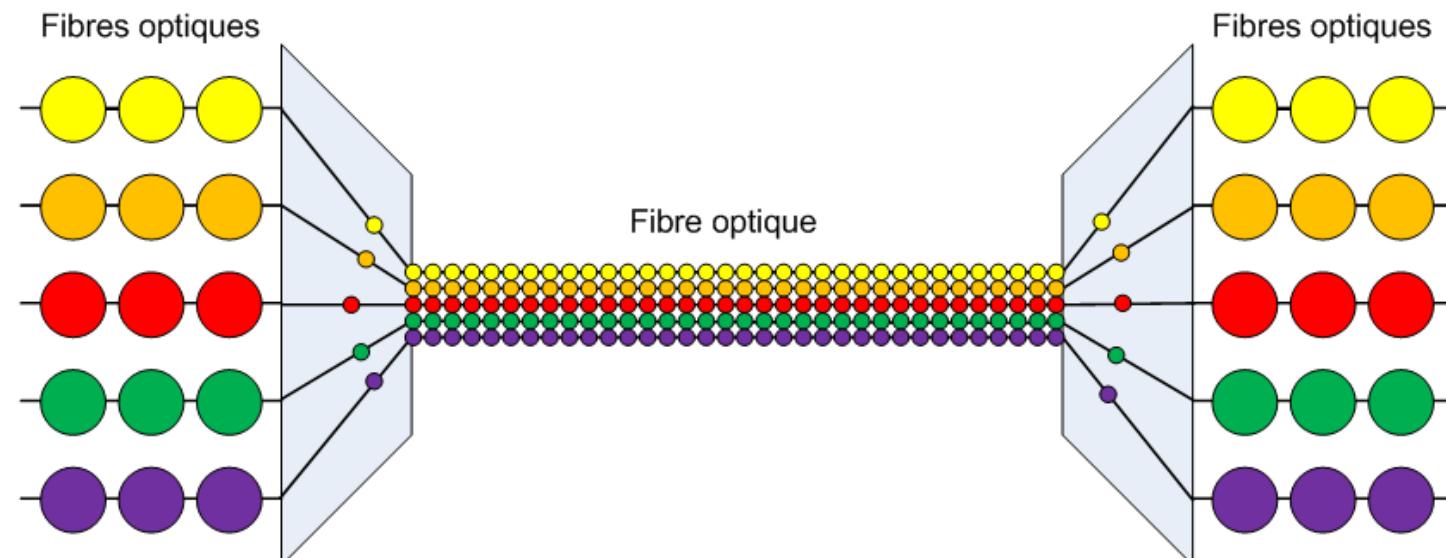
Multiplexage en longueur d'onde – WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Le Multiplexage par Répartition en Longueur d'Onde (WDM) est une technique optique qui permet de transmettre plusieurs signaux lumineux simultanément sur une seule fibre optique en utilisant des longueurs d'onde (couleurs) différentes. Chaque longueur d'onde forme un canal de communication indépendant.

La fibre optique a une énorme capacité de transmission (large bande passante optique).

Le WDM utilise cette capacité en attribuant à chaque canal une longueur d'onde spécifique ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\dots$).

- Un multiplexeur optique combine les signaux de différentes longueurs d'onde en un seul faisceau.
- Un démultiplexeur optique sépare les longueurs d'onde à la réception.



1. Systèmes de Transmission

Multiplexage en longueur d'onde – WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Le Multiplexage par Répartition en Longueur d'Onde (WDM) est une technique optique qui permet de transmettre plusieurs signaux lumineux simultanément sur une seule fibre optique en utilisant des longueurs d'onde (couleurs) différentes. Chaque longueur d'onde forme un canal de communication indépendant.

Formule de capacité théorique : $N = \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{\Delta\lambda} + 1$

N : Nombre de canaux

$\lambda_{min}, \lambda_{max}$: Longueurs d'onde min/max

$\Delta\lambda$: Espacement entre canaux (nm)

Variantes du WDM :

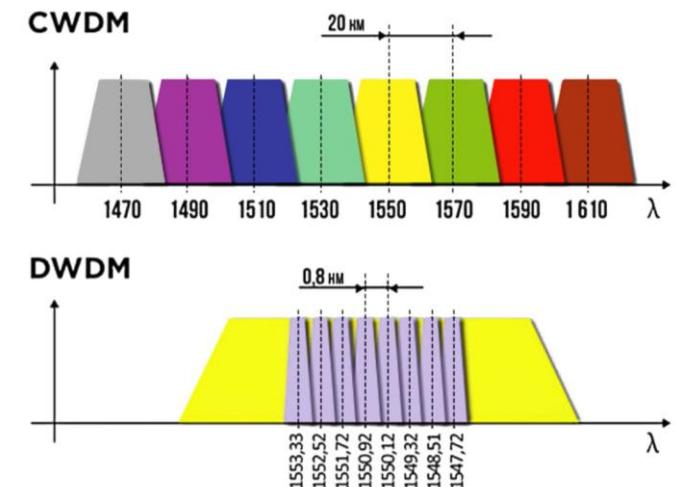
CWDM (Coarse WDM) : Espacement large entre les canaux (20 nm). Moins cher, pour des distances courtes.

DWDM (Dense WDM) : Espacement très serré (0,8 nm ou moins). Permet jusqu'à **80 canaux** simultanés sur une fibre. Idéal pour les longues distances

Exemple DWDM : Bande C : $\lambda_{min} = 1530 \text{ nm}$, $\lambda_{max} = 1565 \text{ nm}$

$\Delta\lambda = 0.8 \text{ nm (100 GHz)}$

$$N = \frac{1565 - 1530}{0.8} + 1 = \frac{35}{0.8} + 1 \approx 44 \text{ canaux}$$



1. Systèmes de Transmission

Multiplexage en longueur d'onde – WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Limites Physiques des communications optiques

- **Atténuation et Budget de Puissance :** $P_{out} = P_{in} \times 10^{-\frac{\alpha L}{10}}$

Exemple : $P_{in} = 0 \text{ dBm}(1 \text{ mW})$, $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$, $L = 100 \text{ km} \rightarrow P_{out} = 1 \times 10^{-\frac{0.2 \times 100}{10}} = 10^{-2} = 0.01 \text{ mW}(-20 \text{ dBm})$

- **Dispersion Chromatique :** $\Delta\tau = D \cdot L \cdot \Delta\lambda$

$\Delta\tau$: Étalement de l'impulsion (ps)

D : Coefficient de dispersion (ps/(nm·km))

$\Delta\lambda$: Largeur spectrale de la source (nm)

Condition pour éviter l'ISI : $\Delta\tau < \frac{1}{2B}$ B : Débit binaire (Gbps)

Exemple : $L = 80 \text{ km}$, $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$ $\rightarrow \Delta\tau = 17 \times 80 \times 0.1 = 136 \text{ ps} \rightarrow$ Débit maximal : $B < \frac{1}{2 \times 136 \times 10^{-12}} \approx 3.68 \text{ Gbps}$

- **C. Effets Non-Linéaires**

SBS (Scattering Brillouin Stimulé) : Seuil typique $\approx 5-10 \text{ dBm}$

SPM (Self-Phase Modulation) : Limite la puissance crête

XPM (Cross-Phase Modulation) : Interaction entre canaux WDM

1. Systèmes de Transmission

Multiplexage en longueur d'onde – WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Exemple : Réseau Internet Haut Débit

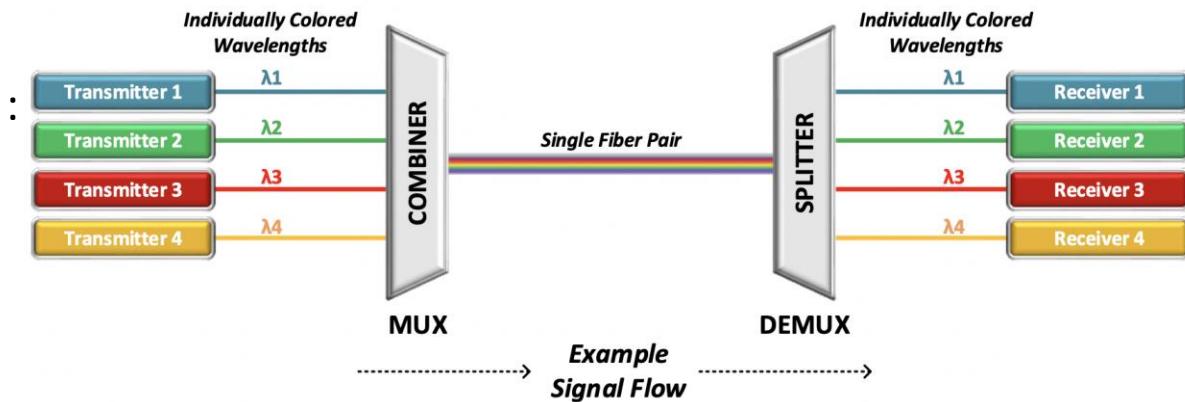
Un opérateur qui doit transporter les données de **4 clients différents** sur une même fibre optique entre Paris et Lyon. Chaque client nécessite un débit de 10 Gbit/s.

- Sans WDM : Il faudrait 4 fibres optiques distinctes → très coûteux et peu écologique.
- Avec WDM :

Attribution des longueurs d'onde :

Chaque client se voit attribuer une longueur d'onde différente :

- Client 1 : $\lambda_1 = 1550 \text{ nm}$ (rouge)
- Client 2 : $\lambda_2 = 1552 \text{ nm}$ (orange)
- Client 3 : $\lambda_3 = 1554 \text{ nm}$ (jaune)
- Client 4 : $\lambda_4 = 1556 \text{ nm}$ (vert)



Multiplexage :

Chaque client module ses données sur sa longueur d'onde assignée à l'aide d'un laser.

Un multiplexeur optique combine ces 4 signaux en un seul faisceau lumineux.

Transmission :

Le faisceau composite voyage dans la fibre optique sans interférence.

Démultiplexage :

À l'arrivée, un prisme optique (démultiplexeur) sépare les différentes longueurs d'onde.

Chaque signal est dirigé vers le récepteur approprié.

1. Systèmes de Transmission

Multiplexage en longueur d'onde – WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Exemple : Système DWDM avec 40 canaux à 10 Gbps sur 100 km.

Paramètres :

$$\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$$

$$\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$$

Espacement canaux : 0.8 nm

Puissance injectée par canal : 0 dBm

Atténuation totale : $P_{out} = 0 \text{ dBm} - (0.2 \times 100) = -20 \text{ dBm}$

Dispersion par canal : $\Delta\tau = 17 \times 100 \times 0.1 = 170 \text{ ps}$

$$\text{Débit max sans compensation : } B < \frac{1}{2 \times 170 \times 10^{-12}} \approx 2.94 \text{ Gbps}$$

Compensation nécessaire pour 10 Gbps

Capacité totale :

$$40 \text{ canaux} \times 10 \text{ Gbps} = \mathbf{400 \text{ Gbps}}$$

1. Systèmes de Transmission

Multiplexage en longueur d'onde – WDM (Wavelength Division Multiplexing)

- Avantages du WDM
 - Multiplication de la capacité : Une fibre peut transporter des dizaines de canaux → débit total énorme (plusieurs Tbit/s).
 - Flexibilité : On peut ajouter de nouveaux canaux sans modifier l'infrastructure physique.
 - Transparence : Transporte tout type de trafic (voix, données, vidéo).
 - Économie : Réduction du nombre de fibres et d'amplificateurs.
- Limitations
 - Coût élevé des lasers précis et des composants optiques.
 - Affaiblissement du signal sur longues distances → nécessité d'amplificateurs optiques.
 - Dispersion chromatique : Les différentes longueurs d'onde voyagent à des vitesses légèrement différentes.
- Applications :
 - Réseaux longue distance : Câbles sous-marins transocéaniques.
 - Réseaux métropolitains : Interconnexion de data centers.
 - Réseaux FTTH (Fiber To The Home) : Partage de la fibre entre plusieurs utilisateurs.

Remarque : Le WDM est la technologie clé qui permet à Internet de fonctionner à haut débit en exploitant pleinement le potentiel des fibres optiques.

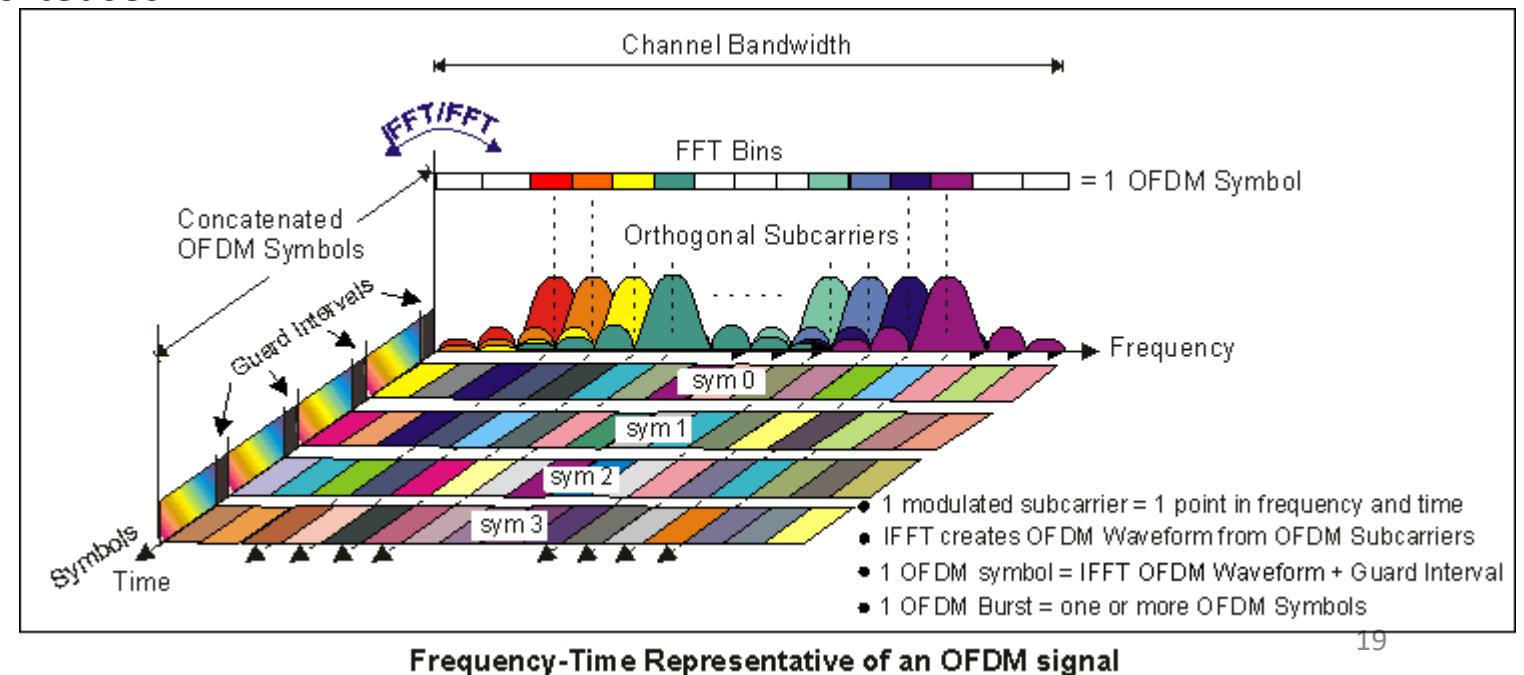
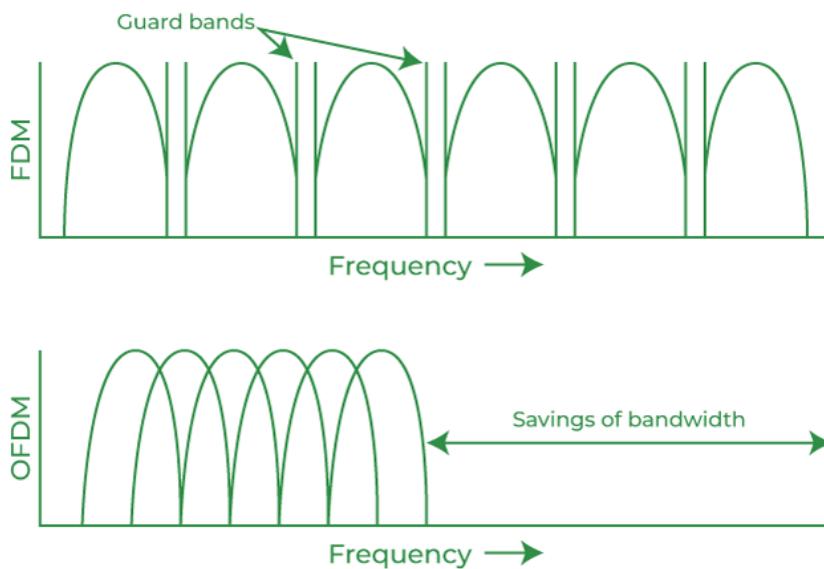
1. Systèmes de Transmission

Systèmes xDSL - Modulation OFDM

Intérêt : Dans un canal sélectif en fréquence (multi-trajets, fading, échos), une modulation classique (QAM, PSK) peut être fortement perturbée. L'**OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) résout ce problème en :

- Découplant le canal large bande en sous-canaux (plusieurs sous-porteuses étroites et orthogonales)
→ réduit l'ISI (Inter-Symbol Interference).
- Ajoutant un intervalle de garde (cyclic prefix)
→ évite l'interférence entre symboles dus aux échos.
- Chaque sous-porteuse transporte une partie du flux de données

L'**OFDM** est une technique de modulation multiporteuses



1. Systèmes de Transmission

Systèmes xDSL - Modulation OFDM

Intérêt : Dans un canal sélectif en fréquence (multi-trajets, fading, échos), une modulation classique (QAM, PSK) peut être fortement perturbée. L'**OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) résout ce problème en :

- Découplant le canal large bande en sous-canaux (plusieurs sous-porteuses étroites et orthogonales)
→ réduit l'ISI (Inter-Symbol Interference).
- Ajoutant un intervalle de garde (cyclic prefix)
→ évite l'interférence entre symboles dus aux échos.
- Chaque sous-porteuse transporte une partie du flux de données

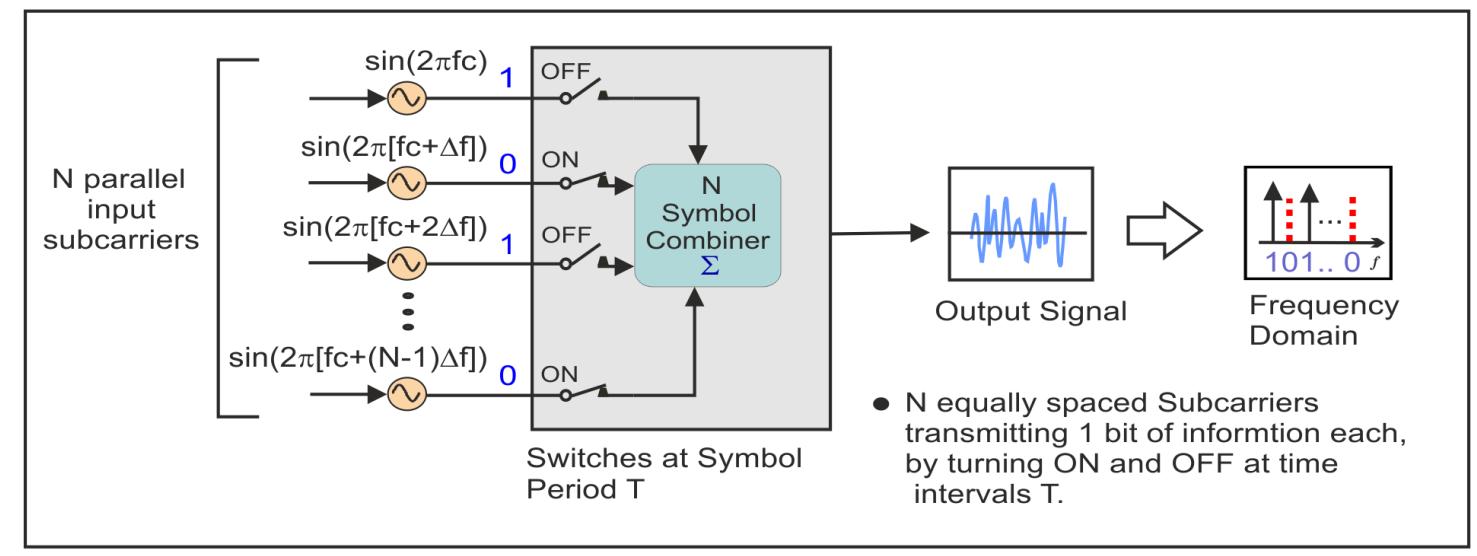
Exemple : Wi-Fi OFDM

Wi-Fi 802.11a/g/n utilise 64 sous-porteuses :

48 pour les données,
4 pilotes (synchronisation),
12 inutilisées (garde).

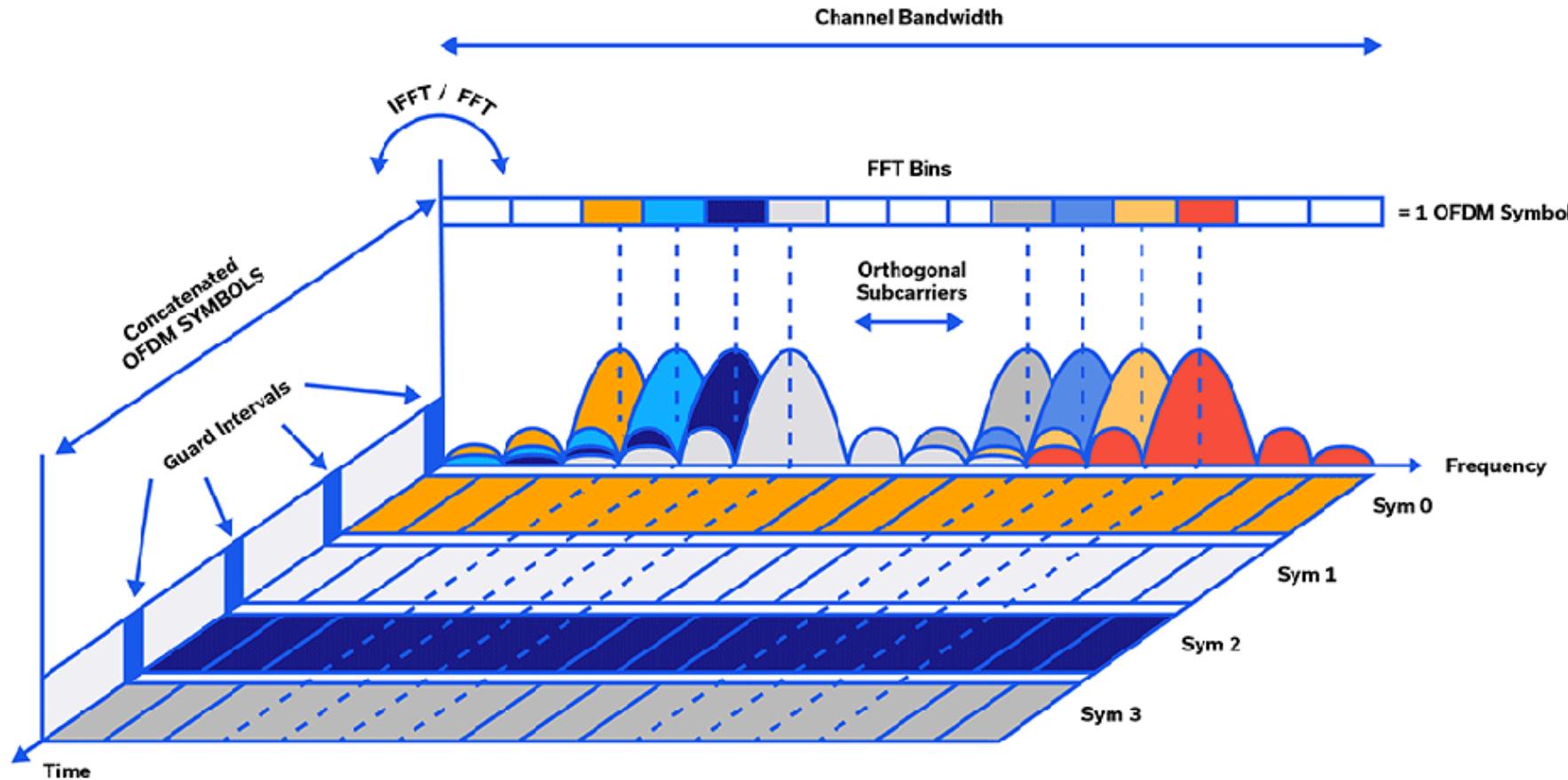
Modulation : BPSK, QPSK, 16-QAM ou 64-QAM.

Débit brut : jusqu'à 54 Mbps (802.11a/g).



1. Systèmes de Transmission

Systèmes xDSL - Modulation OFDM

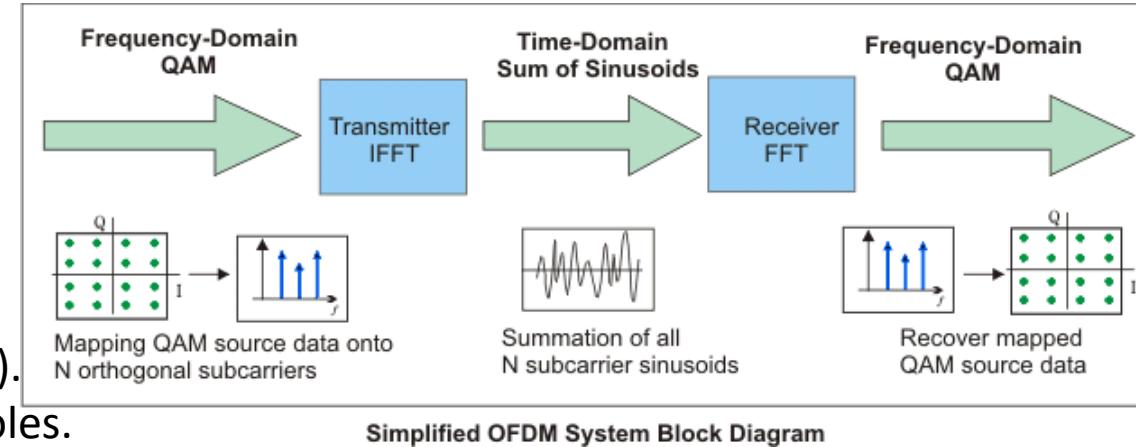


1. Systèmes de Transmission

Systèmes xDSL - Modulation OFDM

Structure du signal OFDM

- Les données sont découpées en blocs parallèles.
- Chaque bloc est modulé (BPSK, QPSK, QAM) sur une sous-porteuse.
- L'ensemble est converti en signal temporel par une IFFT (Inverse FFT).
- Un cyclic prefix (CP) est ajouté pour éviter l'interférence inter-symboles.



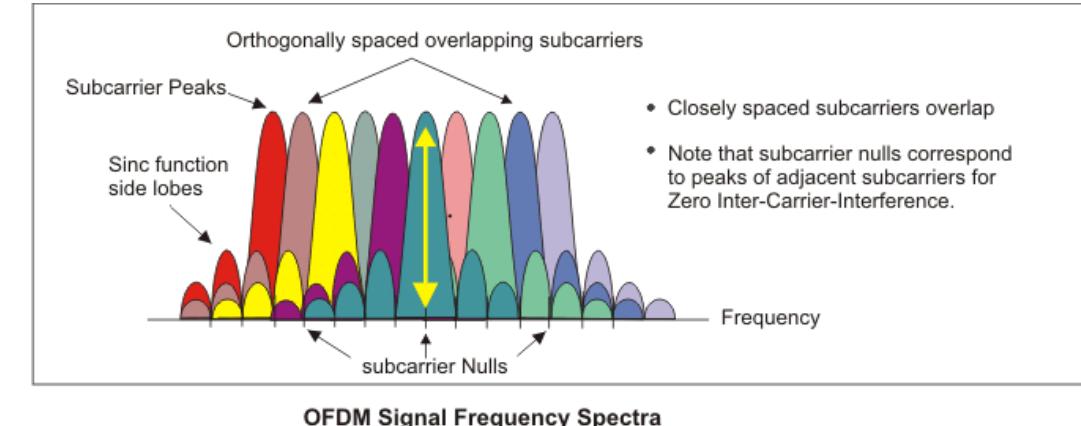
Le signal transmis est la somme des sous-porteuses : $s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi f_k t}, 0 \leq t \leq T$

X_k = symbole modulant la sous-porteuse k

f_k = fréquence de la sous-porteuse k

N = nombre total de sous-porteuses

T = durée d'un symbole OFDM



Orthogonalité des sous-porteuses

Les fréquences f_k sont choisies de sorte que les sous-porteuses soient orthogonales : $\int_0^T e^{j2\pi(f_k-f_m)t} dt = 0, si k \neq m$

Résultat : aucune interférence entre sous-porteuses, même si leurs spectres se chevauchent. Cela permet une efficacité spectrale élevée.

1. Systèmes de Transmission

Systèmes xDSL - Modulation OFDM

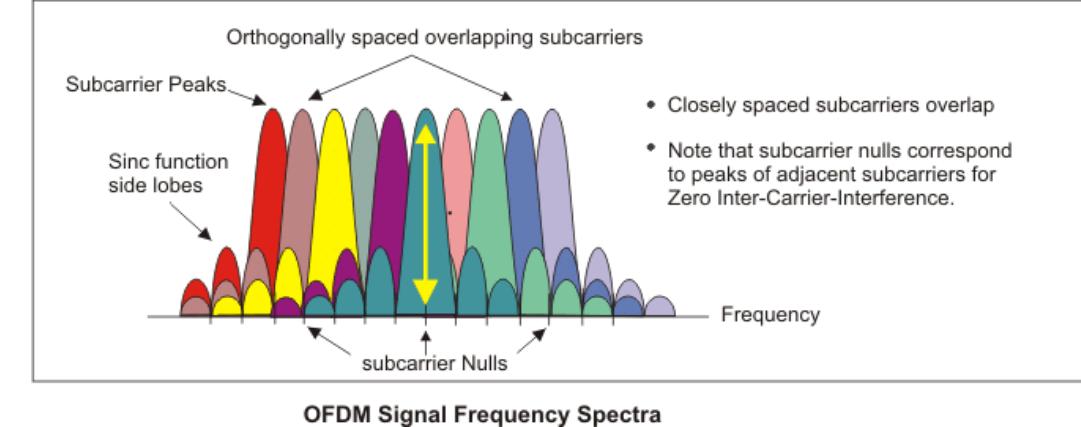
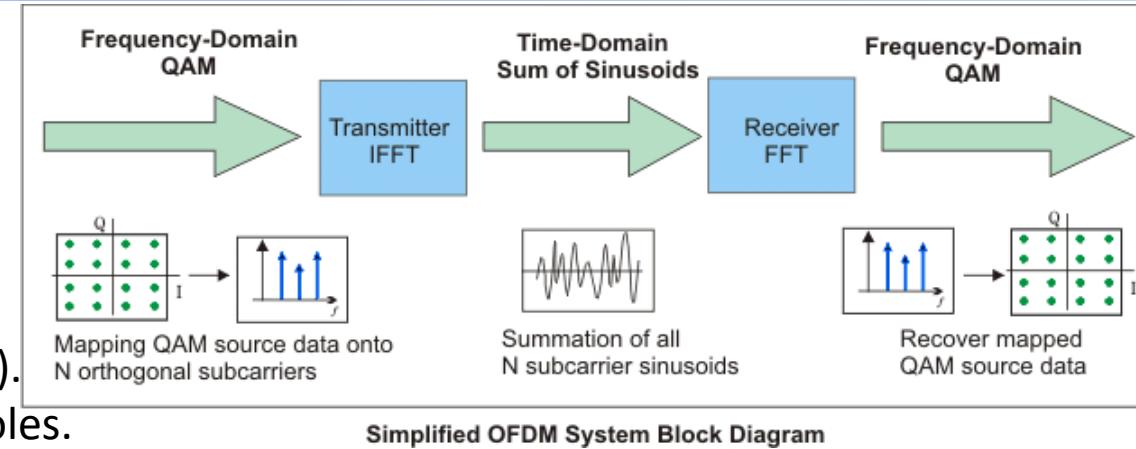
Structure du signal OFDM

- Les données sont découpées en blocs parallèles.
- Chaque bloc est modulé (BPSK, QPSK, QAM) sur une sous-porteuse.
- L'ensemble est converti en signal temporel par une IFFT (Inverse FFT).
- Un cyclic prefix (CP) est ajouté pour éviter l'interférence inter-symboles.

- Nombre de sous-porteuses : $N = \frac{B}{\Delta f}$
 Δf : Espace entre sous-porteuses (Hz).

- Débit par sous-porteuse : $D_{\text{sous-porteuse}} = \log_2(M) \cdot R_s$
- M : Ordre de modulation (ex: 4 pour QPSK, 64 pour 64-QAM).
- R_s : Débit de symboles (symboles/s).

- Débit total OFDM : $D_{\text{total}} = N \cdot \log_2(M) \cdot R_s$



1. Systèmes de Transmission

Systèmes xDSL - Modulation OFDM

- Avantages

Haute efficacité spectrale (les spectres des sous-porteuses se chevauchent).

Résistant au fading sélectif en fréquence.

Facile à implémenter grâce à la FFT/IFFT.

Flexible : modulation adaptative possible (chaque sous-porteuse peut utiliser une QAM différente selon le SNR).

- Limites

PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) élevé → exige des amplificateurs linéaires coûteux.

Sensible à la synchronisation en fréquence et en temps (décalage de fréquence détruit l'orthogonalité).

Ajout du cyclic prefix réduit légèrement l'efficacité spectrale.

- Applications principales

ADSL/VDSL : modulation DMT = OFDM avec 256 à 4096 sous-porteuses.

Wi-Fi : 802.11a/g/n/ac/ax, LTE/4G et 5G NR : OFDM (avec variantes SC-FDMA pour l'upload).

DVB-T/DVB-T2 : télévision numérique terrestre.

Remarque : L'OFDM est aujourd'hui la modulation de référence pour les transmissions haut débit. Elle découpe le canal en sous-porteuses orthogonales, ce qui améliore la robustesse aux interférences et optimise l'efficacité spectrale, au prix d'une complexité de traitement et de contraintes sur la linéarité des amplis RF.

1. Systèmes de Transmission

Systèmes xDSL - ADSL

Les technologies **xDSL** (Digital Subscriber Line) permettent d'utiliser les lignes téléphoniques en cuivre existantes pour transmettre des données à haut débit.

ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)

- Bande de fréquence : Utilise des fréquences au-dessus de la bande vocale (0-4 kHz) pour ne pas interférer avec le service téléphonique.
 Bande montante : 25 kHz – 138 kHz
 Bande descendante : 138 kHz – 1,1 MHz
- Asymétrique : Le débit descendant (download) est supérieur Jusqu'à 8–24 Mbit/s (théorique) au débit montant (upload)
Jusqu'à 1–3,5 Mbit/s
- Portée : Jusqu'à 5 km depuis le central téléphonique.
- La séparation des bandes est assurée par des filtres :Splitter (séparateur) côté abonné, pour isoler la voix du modem ADSL et DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) côté central téléphonique, qui regroupe les lignes ADSL de nombreux abonnés.
- Modulation : Utilise la modulation DMT (Discrete Multi-Tone), une variante de l'OFDM adaptée au cuivre. La bande ($\approx 1,1$ MHz) est découpée en 256 sous-porteuses de 4,3125 kHz. Chaque sous-porteuse est modulée en QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Le nombre de bits par sous-porteuse dépend du rapport signal/bruit (SNR). Si une sous-porteuse est trop bruitée, elle est désactivée.

1. Systèmes de Transmission

Systèmes xDSL - ADSL

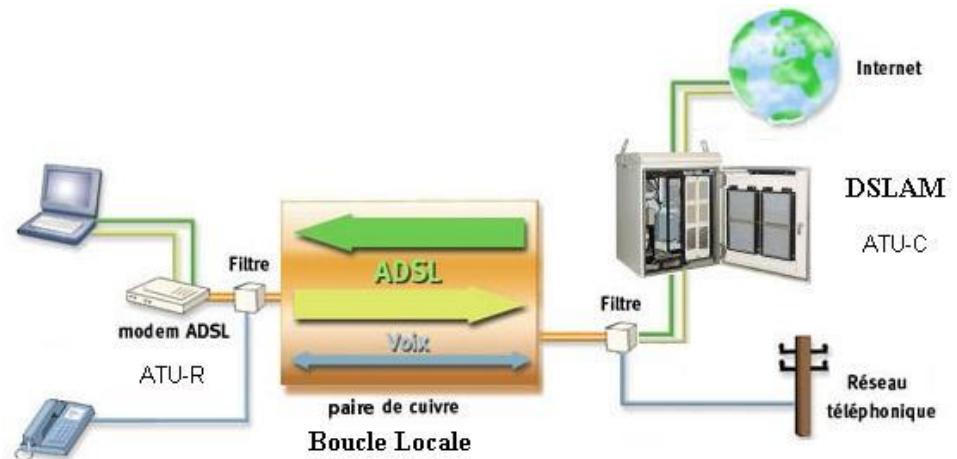
Les technologies **xDSL** (Digital Subscriber Line) permettent d'utiliser les lignes téléphoniques en cuivre existantes pour transmettre des données à haut débit.

○ Avantages

- Exploite l'infrastructure cuivre existante (faible coût d'installation).
- Débits suffisants pour Internet, VoIP et IPTV (à l'époque).
- Fonctionne en parallèle avec la téléphonie classique (grâce au splitter).

○ Limites

- Atténuation élevée avec la distance → baisse rapide du débit au-delà de 3–4 km.
- Sensible aux interférences électromagnétiques et diaphonie entre câbles.
- Débit asymétrique, moins adapté aux usages modernes (cloud, visioconférence).
- Aujourd'hui progressivement remplacé par la fibre optique (FTTH) ou le VDSL/FTTC.



1. Systèmes de Transmission

Systèmes xDSL - VDSL

Les technologies **xDSL** (Digital Subscriber Line) permettent d'utiliser les lignes téléphoniques en cuivre existantes pour transmettre des données à haut débit.

VDSL (Very High Bit Rate Digital Subscriber Line) est une évolution de l'ADSL, appartenant aussi à la famille DSL. Il vise à offrir des débits beaucoup plus élevés en utilisant une bande de fréquences plus large (jusqu'à plusieurs dizaines de MHz). Conçu pour des usages gourmands : **TV HD, VoIP, visioconférence, Internet haut débit, jeux en ligne**. Comme l'ADSL, il est asymétrique, mais certaines versions (VDSL2) peuvent être symétriques.

- Bande de fréquence : Utilise des fréquences plus élevées (jusqu'à 30 MHz pour le VDSL2).
 Bande descendante : Jusqu'à 17,6 MHz
 Bande montante : Jusqu'à 12 MHz
 Modulation DMT (Discrete MultiTone) : modulation multiporteuse (similaire OFDM).

- Débits typiques :

Descendant : Jusqu'à 100–200 Mbit/s (VDSL2)

Montant : Jusqu'à 50–100 Mbit/s

- Portée : Limitée à 1–1,5 km. Performances optimales à moins de 500 m.

- Modulation

Sous-porteuses plus nombreuses : Bande jusqu'à 30 MHz divisée en 4096 sous-canaux de 4,3125 kHz chacun.

Chaque sous-porteuse est modulée en QAM adaptative (jusqu'à 15 bits/symbole).

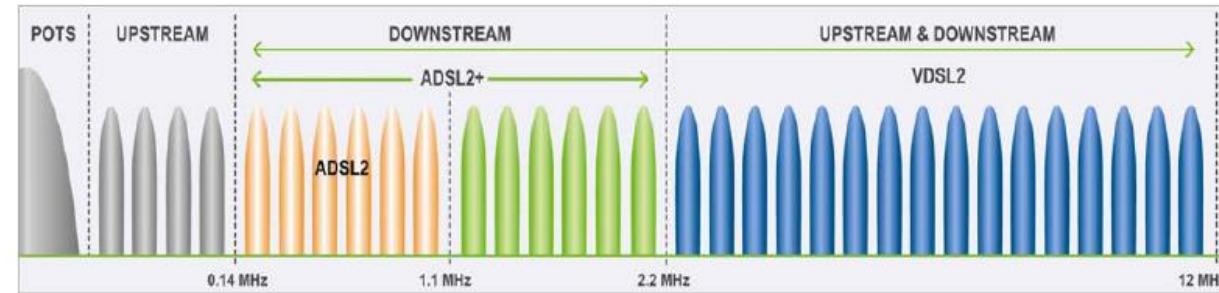
Adaptation dynamique : les sous-porteuses dégradées par le bruit ou la diaphonie sont désactivées.

1. Systèmes de Transmission

Systèmes xDSL - VDSL

○ Avantages

- Très haut débit sans changer totalement l'infrastructure cuivre.
- Compatible avec la téléphonie analogique (comme l'ADSL).
- Solution intermédiaire entre ADSL et FTTH (fibre jusqu'à l'abonné).
- Idéal pour la TV HD, IPTV, visioconférence.



○ Limites

- Forte dépendance à la distance → nécessite fibre proche de l'abonné (FTTC).
- Sensible aux interférences et diaphonie dans les câbles multi-paires.
- Moins évolutif que la fibre optique → à long terme remplacé par le FTTH.

Caractéristique	ADSL / ADSL2+	VDSL / VDSL2
Bande utilisée	$\leq 1,1 - 2,2$ MHz	$\leq 12 - 30$ MHz
Modulation	DMT (256 sous-porteuses)	DMT (jusqu'à 4096 sous-porteuses)
Débit descendant	8 – 24 Mbps	55 – 100 Mbps
Débit montant	1 – 3 Mbps	3 – 100 Mbps
Portée optimale	3 – 5 km	< 300 m (max 1 km)
Usage	Internet, VoIP	IPTV, Internet très haut débit, VoIP HD

1. Systèmes de Transmission

Technologies sans fil - WiFi (IEEE 802.11)

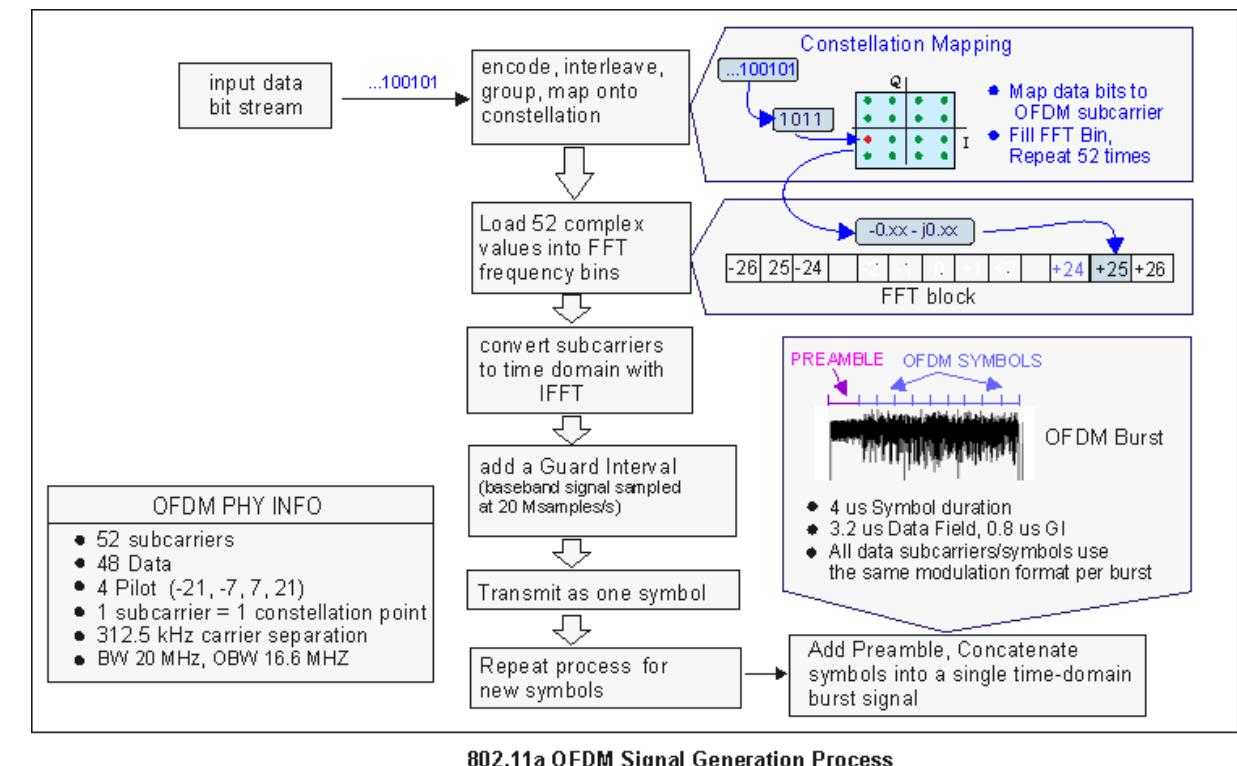
Le WiFi est une technologie de réseau local sans fil (WLAN) basée sur la norme IEEE 802.11. Il permet une connexion haut débit sur des distances courtes (quelques dizaines à centaines de mètres). Les versions courantes incluent 802.11n (WiFi 4), 802.11ac (WiFi 5), et 802.11ax (WiFi 6).

- Modulation et Accès Multiple
 - Modulation : OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) avec des modulations adaptatives (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM).
 - Accès Multiple : CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) pour le partage du médium.
- Débit Théorique (pour une liaison unique) : $D = N_{SS} \times \frac{N_{SD} \times N_{BPSCS} \times R}{T_{SYM}}$
 - N_{SS} : Nombre de flux spatiaux (MIMO).
 - N_{SD} : Nombre de sous-porteuses de données (ex: 52 pour 20 MHz en 802.11a/g).
 - N_{BPSCS} : Bits par sous-porteuse (dépend de la modulation : 2 pour QPSK, 4 pour 16-QAM, etc.).
 - R : Taux de codage (ex: 1/2, 3/4, 5/6).
 - T_{SYM} : Durée du symbole OFDM (inclus le préfixe cyclique).
- Efficacité Spectrale : $\eta = \frac{D}{B}$ (en bits/s/Hz)

1. Systèmes de Transmission

Technologies sans fil - WiFi (IEEE 802.11)

Le WiFi est une technologie de réseau local sans fil (WLAN) basée sur la norme IEEE 802.11. Il permet une connexion haut débit sur des distances courtes (quelques dizaines à centaines de mètres). Les versions courantes incluent 802.11n (WiFi 4), 802.11ac (WiFi 5), et 802.11ax (WiFi 6).



Exemple (802.11ac)

- Bande passante : 80 MHz.
- Modulation : 256-QAM ($N_{BPSCS} = 8$)
- Taux de codage : $R = 5/6$.
- Sous-porteuses : $N_{SD} = 234$ pour 80 MHz.
- Durée de symbole : $T_{SYM} = 3.6\mu s$ dont préfixe cyclique de $0.8 \mu s$.
- Flux spatiaux : $N_{SS} = 4$.

$$D = N_{SS} \times \frac{N_{SD} \times N_{BPSCS} \times R}{T_{SYM}} \rightarrow D = 4 \times \frac{234 \times 8 \times (5/6)}{3.6 \times 10^{-6}} \approx 4 \times 433.33 = 1733.33 \text{ Mbps}$$

1. Systèmes de Transmission

Technologies sans fil - WiFi (IEEE 802.11)

Le WiFi est une technologie de réseau local sans fil (WLAN) basée sur la norme IEEE 802.11. Il permet une connexion haut débit sur des distances courtes (quelques dizaines à centaines de mètres). Les versions courantes incluent 802.11n (WiFi 4), 802.11ac (WiFi 5), et 802.11ax (WiFi 6).

Generation	IEEE Standard	Max Link Rate (Mbits/s)	Radio Frequency (GHz)	Modulation	Adopted
Wi-Fi 0*	802.11	1-2	2.4	FHSS	1997
Wi-Fi 1*	802.11b	1.11	2.4	QPSK	1999
Wi-Fi 2*	802.11a	6-54	5	16 QAM	1999
Wi-Fi 3*	802.11g	6-54	2.4	64 QAM	2003
Wi-Fi 4	802.11n	72-600	2.4/5	64 QAM	2008
Wi-Fi 5	802.11ac	433-6933	5	256 QAM	2014
Wi-Fi 6	802.11ax	572-9608	2.4/5	1024 QAM	2019
Wi-Fi 6e	802.11ax	574-9608	2.4/5/6	1024 QAM	2020
Wi-Fi 7	802.11be	1376-46120	2.4/5/6	4096 QAM	(2024)

* Wi-Fi 0-3 were never officially named when they were introduced

Exemple (802.11ac)

- Bande passante : 80 MHz.
- Modulation : 256-QAM ($N_{BPSCS} = 8$)
- Taux de codage : $R = 5/6$.
- Sous-porteuses : $N_{SD} = 234$ pour 80 MHz.
- Durée de symbole : $T_{SYM} = 3.6\mu s$ dont préfixe cyclique de $0.8 \mu s$.
- Flux spatiaux : $N_{SS} = 4$.

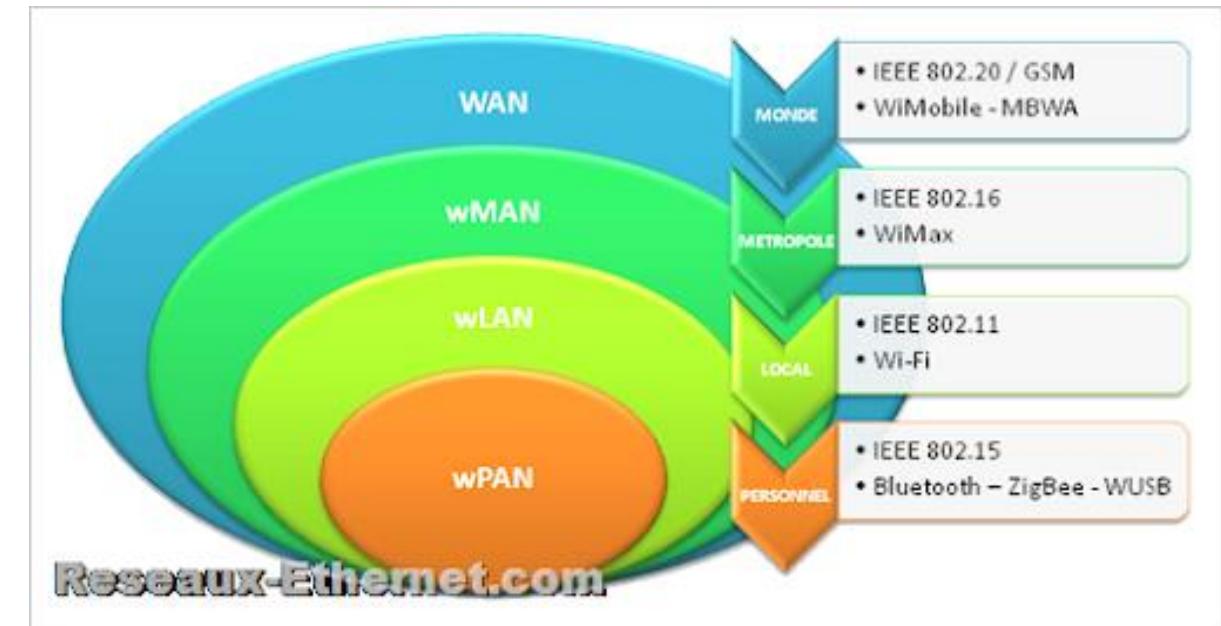
$$D = N_{SS} \times \frac{N_{SD} \times N_{BPSCS} \times R}{T_{SYM}} \rightarrow D = 4 \times \frac{234 \times 8 \times (5/6)}{3.6 \times 10^{-6}} \approx 4 \times 433.33 = 1733.33 \text{ Mbps}$$

1. Systèmes de Transmission

Technologies sans fil - WiMAX (IEEE 802.16)

Le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) est une technologie pour réseaux métropolitains sans fil (WMAN). Il offre une couverture étendue (jusqu'à 50 km) et des débits élevés.

- Modulation et Accès Multiple
 - Modulation : OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) avec modulations adaptatives (QPSK, 16-QAM, 64-QAM).
 - Accès Multiple : Répartition dynamique des ressources en temps et fréquence.
- Débit Théorique : $D = N_{USC} \times N_{BPSCS} \times R \times F_S$
 - N_{USC} : Nombre de sous-porteuses utiles.
 - F_S : Fréquence de symboles/s.
 - Autres paramètres similaires au WiFi.
- Capacité de Lien (Shannon) : $C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$
- Portée: $d = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 P_r}}$



1. Systèmes de Transmission

Technologies sans fil - WiMAX (IEEE 802.16)

Le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) est une technologie pour réseaux métropolitains sans fil (WMAN). Il offre une couverture étendue (jusqu'à 50 km) et des débits élevés.

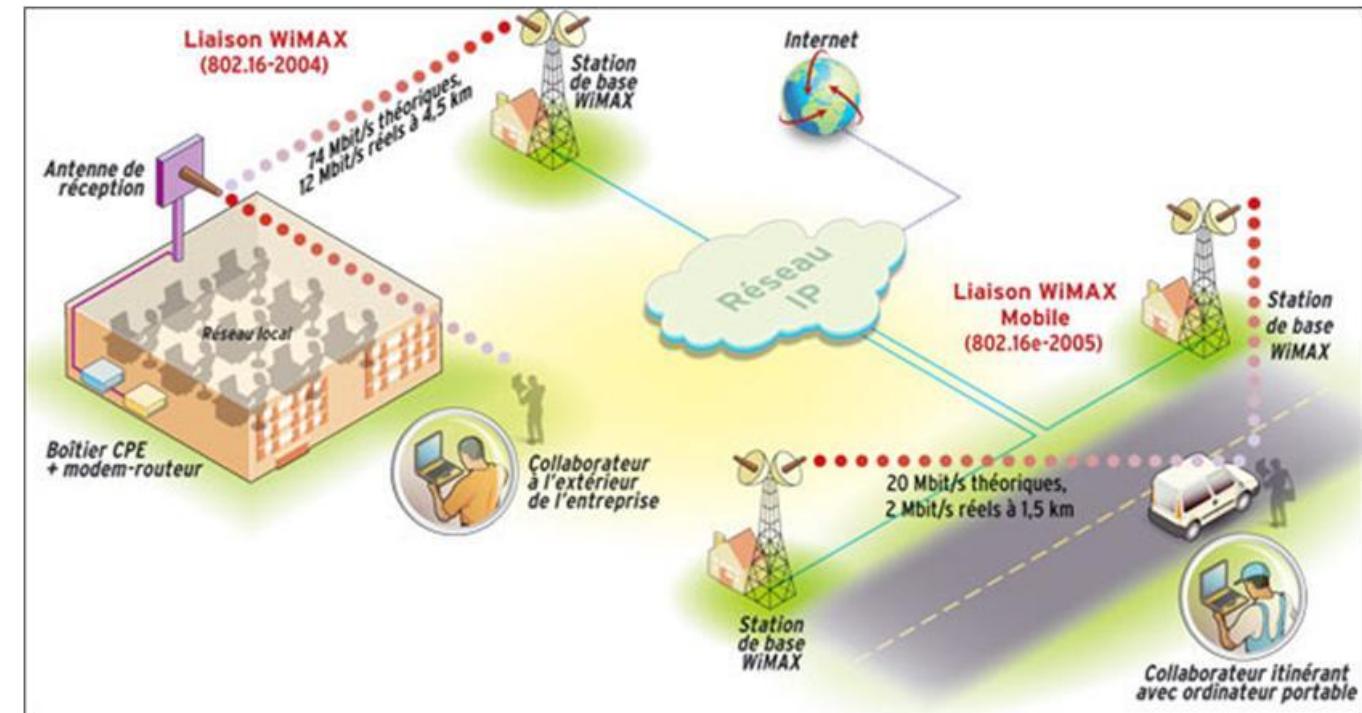
Exemple

- Bande passante : 10 MHz.
- Modulation : 64-QAM ($N_{BPSCS} = 6$)
- Taux de codage : $R = 3/4$.
- Sous-porteuses : $N_{USC} = 840$ pour 10 MHz).
- Fréquence de symboles : $F_S = 10.94 \times 10^3$ symboles/s.

$$D = N_{USC} \times N_{BPSCS} \times R \times F_S$$

$$\rightarrow D = 840 \times 6 \times (3/4) \times 10.94 \times 10^3$$

$$\rightarrow D \approx 840 \times 4.5 \times 10.94 \times 10^3 \approx 41.3 \text{ Mbps}$$



Les formules permettent de calculer les débits théoriques, mais les débits réels dépendent des conditions radio et de la charge du réseau.

1. Systèmes de Transmission

Technologies sans fil - LTE (Long Term Evolution)

Le LTE est la norme 4G pour les réseaux cellulaires. Il offre des débits élevés, une faible latence, et une grande mobilité.

- Modulation et Accès Multiple

Modulation : OFDMA en downlink, SC-FDMA en uplink (pour réduire la puissance d'émission).

Modulations adaptatives : QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM.

Accès Multiple : Répartition des ressources en blocs de ressources (RB).

- Débit Théorique :

$$D = N_{RB} \times N_{SC} \times N_{SYM} \times N_{BPSCS} \times R \times F_{frame}$$

N_{RB} : Nombre de blocs de ressources (ex: 100 pour 20 MHz).

N_{SC} : Sous-porteuses par RB (12).

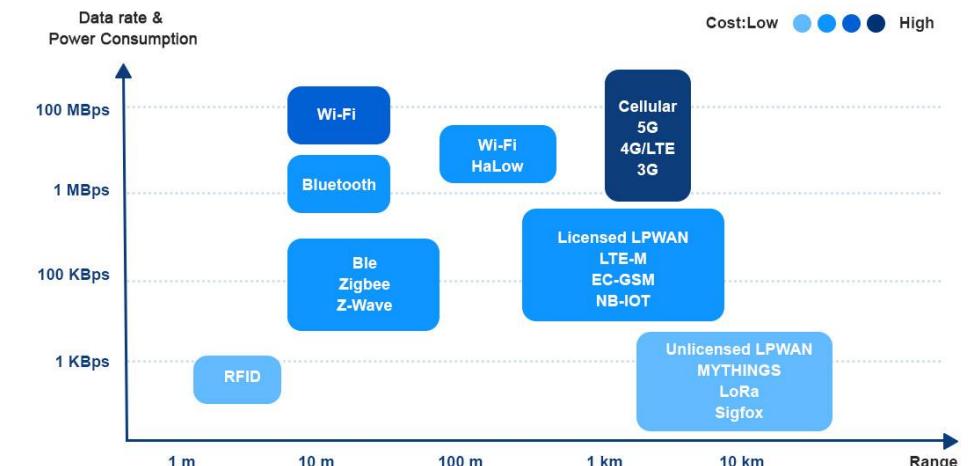
N_{SYM} : Symboles OFDM par slot (7 ou 6 avec préfixe étendu).

F_{frame} : Fréquence des frames (1000 frames/s pour LTE).

- Débit Maximal Simplifié :

$$D_{max} \approx 0.95 \times N_{RB} \times N_{SC} \times N_{SYM} \times N_{BPSCS} \times R \times F_{frame}$$

Le facteur 0.95 account for overhead.



1. Systèmes de Transmission

Technologies sans fil - LTE (Long Term Evolution)

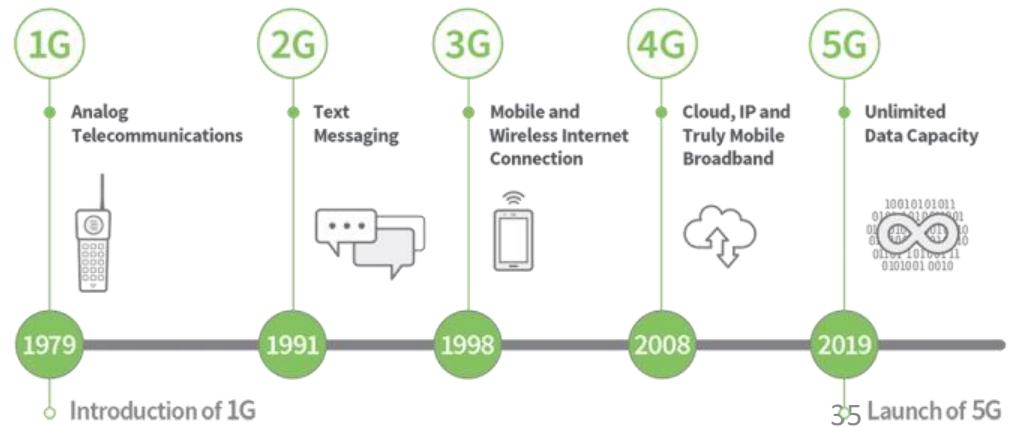
Le LTE est la norme 4G pour les réseaux cellulaires. Il offre des débits élevés, une faible latence, et une grande mobilité.

Exemple (LTE Downlink)

- Bande passante : 20 MHz ($N_{RB} = 100$).
 - Modulation : 64-QAM ($N_{BPSCS} = 6$).
 - Taux de codage : $R = 3/4$.
 - Symboles/slot : $N_{SYM} = 7$.
 - Frames/s : $F_{frame} = 1000$.

$$D = N_{RB} \times N_{SC} \times N_{SYM} \times N_{BPSCS} \times R \times F_{frame} \quad \rightarrow \\ D = 100 \times 12 \times 7 \times 6 \times (3/4) \times 1000 = 100 \times 12 \times 7 \times 4.5 \times 1000 = 37.8 \text{ Mbps}$$

Note : Ce débit est par flux spatial. Avec MIMO 4x4, multiplier par 4.



1. Systèmes de Transmission

Technologies sans fil

Ces technologies utilisent toutes l'OFDM/OFDMA pour maximiser l'efficacité spectrale et s'adapter aux conditions de canal.

Paramètre	WiFi (802.11ac)	WiMAX	LTE (4G)
Portée	100 m	10-50 km	1-10 km
Débit max	1.73 Gbps (4x4)	41 Mbps (10 MHz)	150 Mbps (20 MHz)
Bandé passante	20/40/80/160 MHz	5/10/20 MHz	1.4–20 MHz
Modulation	OFDM	OFDMA	OFDMA/SC-FDMA
Application	Réseaux locaux	Accès fixe/nomade	Réseaux cellulaires

- Le **WiFi** est optimisé pour les débits élevés sur de courtes distances.
- Le **WiMAX** offre une couverture étendue avec des débits modérés.
- Le **LTE** équilibre débit, mobilité et couverture pour les réseaux cellulaires

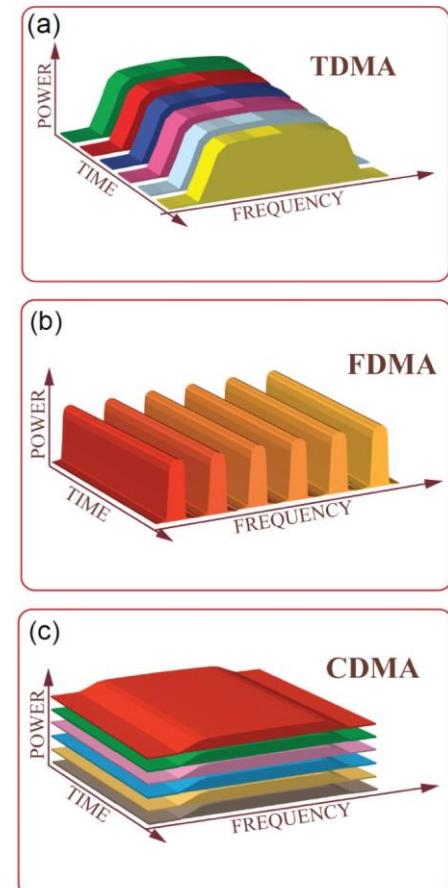
Les formules permettent de calculer les débits théoriques, mais les débits réels dépendent des conditions radio et de la charge du réseau.

1. Systèmes de Transmission

Techniques d'accès Multiples

Ces techniques permettent de partager équitablement les ressources radio entre plusieurs utilisateurs, maximisant l'efficacité spectrale et la capacité du réseau.

Technique	Principe	Avantages	Inconvénients	Applications
FDMA	Partage en fréquence	Simple à mettre en œuvre	Gaspillage de bande passante	Radio, TV analogique
TDMA	Partage en temps	Débits élevés par utilisateur	Synchronisation nécessaire	GSM, Wi-Fi (CSMA/CA)
CDMA	Partage par code	Robustesse aux interférences	Complexité de décodage	3G (UMTS)
OFDMA	Partage temps-fréquence	Flexibilité et efficacité	Complexité algorithmique	LTE, 5G, Wi-Fi 6



- **FDMA** et **TDMA** sont des méthodes simples mais peu flexibles.
- **CDMA** offre une bonne capacité mais est complexe.
- **OFDMA** est la technique la plus efficace pour les réseaux modernes (4G/5G), combinant flexibilité et haute performance.

1. Systèmes de Transmission

Techniques d'accès Multiples - FDMA

FDMA (Frequency Division Multiple Access)

Chaque utilisateur se voit attribuer une fréquence porteuse unique dans le spectre disponible. Les canaux sont séparés par des bandes de garde pour éviter les interférences.

$$B_{total} = \sum_{i=1}^N B_i + B_{garde}$$

B_{total} : Bande passante totale.

B_i : Bande passante allouée à l'utilisateur i .

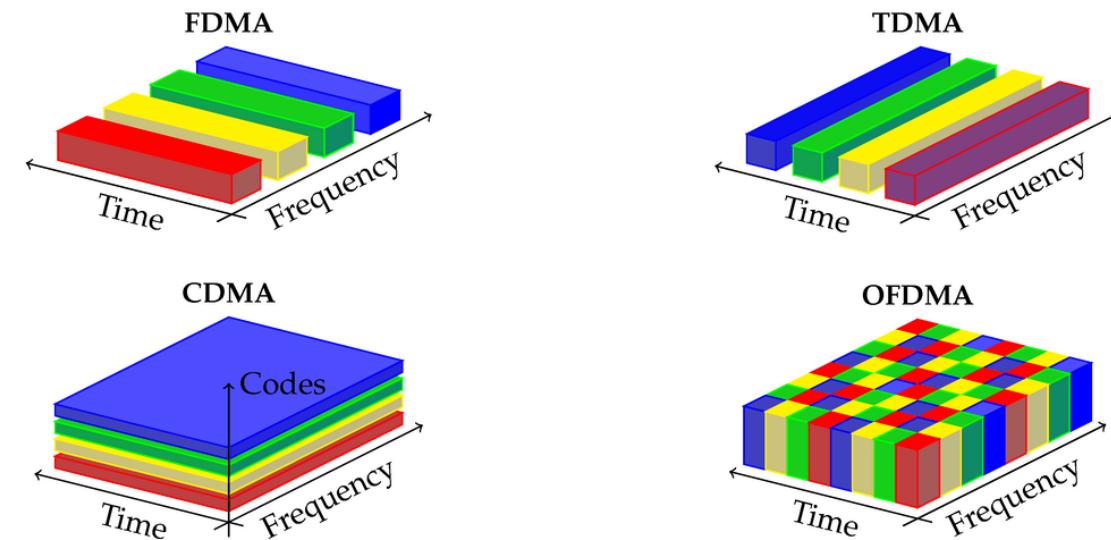
B_{garde} : Bande passante perdue due aux bandes de garde.

Exemples :

Radio FM : Chaque station émet sur une fréquence différente (ex: 88.1 MHz, 89.7 MHz).

Télévision analogique : Chaque chaîne utilise un canal fréquentiel distinct.

FDMA : Simple mais gaspille de la bande passante (bandes de garde).



1. Systèmes de Transmission

Techniques d'accès Multiples - FDMA

FDMA (Frequency Division Multiple Access)

Exemple : Système radio avec 4 stations, chaque station nécessite une bande de 200 kHz. Les bandes de garde entre les canaux sont de 10 kHz.

Calcul de la bande passante totale : $B_{total} = 4 \times (200 \text{ kHz} + 10 \text{ kHz}) = 840 \text{ kHz}$

Fréquences attribuées (en partant de 88.0 MHz) :

Station 1 : 88.0 - 88.2 MHz

Station 2 : 88.21 - 88.41 MHz

Station 3 : 88.42 - 88.62 MHz

Station 4 : 88.63 - 88.83 MHz

Débit par utilisateur (modulation QPSK, efficacité spectrale 2 bps/Hz) : $D_{utilisateur} = 200 \text{ kHz} \times 2 \text{ bps/Hz} = 400 \text{ kbps}$

Débit total : $D_{total} = 4 \times 400 \text{ kbps} = 1.6 \text{ Mbps}$

Efficacité spectrale : $\eta = \frac{1.6 \text{ Mbps}}{840 \text{ kHz}} \approx 1.9 \text{ bps/Hz}$

1. Systèmes de Transmission

Techniques d'accès Multiples - TDMA

TDMA (Time Division Multiple Access)

Le temps est divisé en intervalles (slots). Chaque utilisateur utilise toute la bande passante pendant son slot dédié, dans une trame cyclique.

$$T_{trame} = \sum_{i=1}^N T_{slot_i}$$

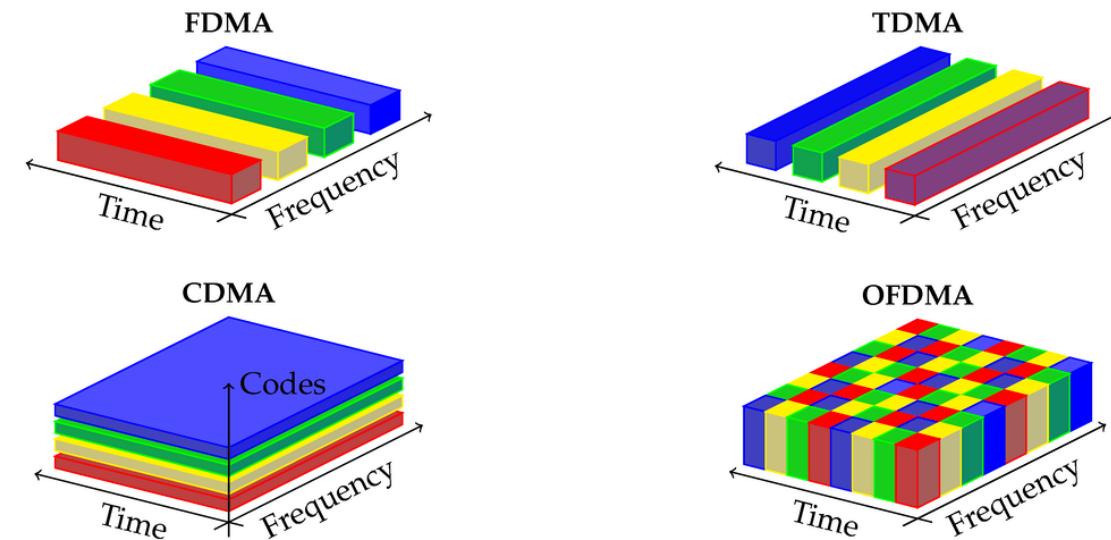
T_{trame} : Durée d'une trame.

T_{slot_i} : Durée du slot alloué à l'utilisateur i .

Exemple :

GSM (2G) : Une trame de 4.615 ms est divisée en 8 slots. Chaque utilisateur parle pendant 0.577 ms, puis attend son tour.

TDMA : Efficace en débit mais nécessite une synchronisation précise.



1. Systèmes de Transmission

Techniques d'accès Multiples - TDMA

TDMA (Time Division Multiple Access)

Exemple : Système GSM avec une trame de 4.615 ms divisée en 8 slots. Chaque slot transporte 114 bits.

$$\text{Durée d'un slot : } T_{slot} = \frac{4.615 \text{ ms}}{8} = 0.577 \text{ ms}$$

$$\text{Débit par utilisateur : } D_{utilisateur} = \frac{114 \text{ bits}}{0.004615 \text{ s}} \approx 24.7 \text{ kbps}$$

$$\text{Débit total (8 utilisateurs) : } D_{total} = 8 \times 24.7 \text{ kbps} = 197.6 \text{ kbps}$$

Bandé passante utilisée : 200 kHz (pour GSM).

$$\text{Efficacité spectrale : } \eta = \frac{197.6 \text{ kbps}}{200 \text{ kHz}} \approx 0.99 \text{ bps/Hz}$$

1. Systèmes de Transmission

Techniques d'accès Multiples - TDMA

CDMA (Code Division Multiple Access)

Tous les utilisateurs émettent simultanément sur les mêmes fréquences, mais avec des codes orthogonaux uniques. Le récepteur décode le signal en corrélant avec le code spécifique.

$$S_{\text{emis}} = D \cdot C$$

S_{emis} : Signal émis.

D : Donnée utilisateur.

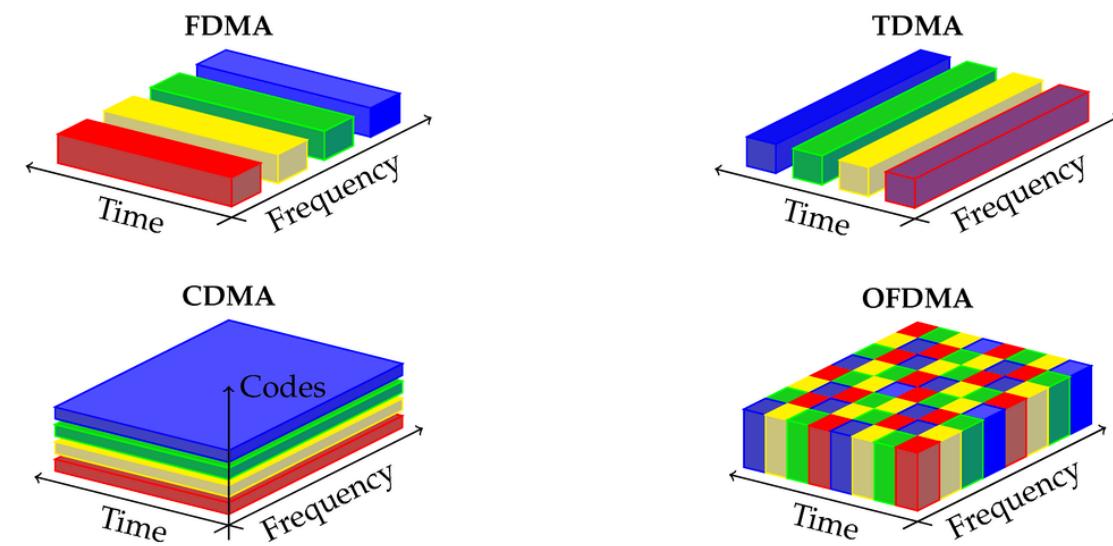
C : Code orthogonal (ex: code Walsh-Hadamard).

$$\int_0^T c_i(t)c_j(t)dt = 0 \text{ pour } i \neq j$$

Exemple :

3G (UMTS) : Plusieurs utilisateurs partagent la même bande de 5 MHz, distingués par leurs codes.

CDMA : Robustesse aux interférences mais complexité de mise en œuvre.



1. Systèmes de Transmission

Techniques d'accès Multiples - TDMA

CDMA (Code Division Multiple Access)

Exemple : Système UMTS (3G) avec une bande passante de 5 MHz, débit utilisateur de 12.2 kbps (voix), et rapport E_b/N_0 de 7 dB (≈ 5 en ratio).

Gain de traitement : $G = \frac{5 \text{ MHz}}{12.2 \text{ kbps}} \approx 409.8$

Nombre maximal d'utilisateurs (théorique) : $N_{max} = \frac{G}{E_b/N_0} = \frac{409.8}{5} \approx 82$

Capacité pratique (avec interférences et activité vocale) : ~ 100 utilisateurs.

Débit total : $D_{total} = 100 \times 12.2 \text{ kbps} = 1.22 \text{ Mbps}$

Efficacité spectrale : $\eta = \frac{1.22 \text{ Mbps}}{5 \text{ MHz}} \approx 0.244 \text{ bps/Hz}$

1. Systèmes de Transmission

Techniques d'accès Multiples - TDMA

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

Combine le FDMA et le TDMA. Le spectre est divisé en sous-porteuses orthogonales, et les ressources sont allouées en temps et en fréquence.

$$D_{utilisateur} = \sum_{k=1}^M \log_2 (M_k) \cdot R_{s,k}$$

M : Nombre de sous-porteuses allouées.

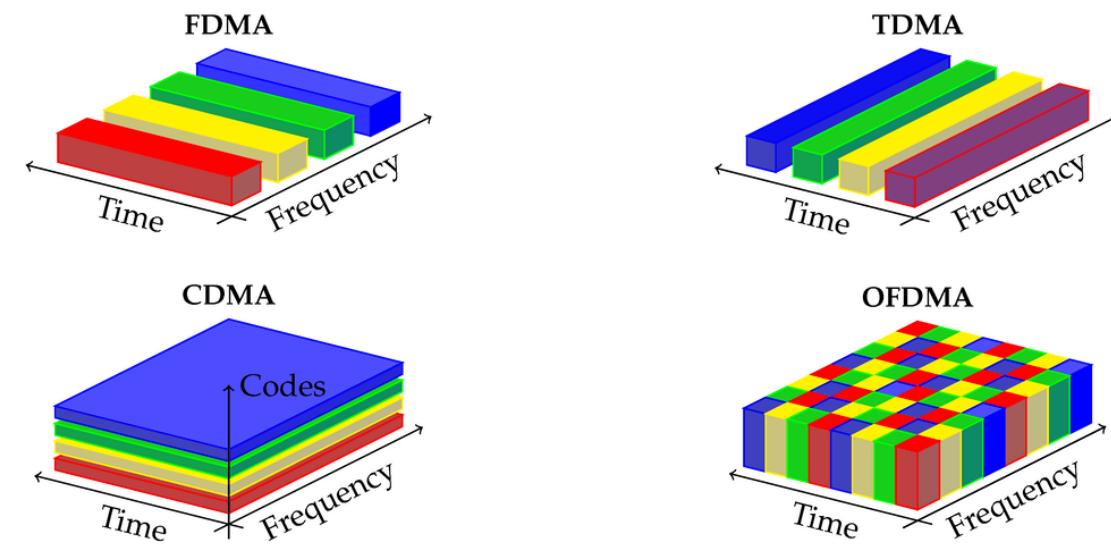
M_k : Ordre de modulation sur la sous-porteuse k .

$R_{s,k}$: Débit de symboles sur la sous-porteuse k .

Exemples :

LTE (4G) et WiMAX : Les utilisateurs se voient attribuer des groupes de sous-porteuses (ressource blocks) pendant des intervalles de temps spécifiques.

OFDMA : Flexibilité optimale, utilisé dans les réseaux 4G/5G pour son efficacité spectrale.



1. Systèmes de Transmission

Techniques d'accès Multiples - TDMA

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

Exemple : Système LTE avec bande passante de 10 MHz, 600 sous-porteuses de données, 10 utilisateurs, modulation 64-QAM (6 bits/symbole), durée de symbole 71.4 µs.

$$\text{Sous-porteuses par utilisateur : } N_{\text{sous-porteuses}} = \frac{600}{10} = 60$$

$$\text{Débit de symboles : } R_s = \frac{1}{71.4 \times 10^{-6}} \approx 14 \text{ kHz}$$

$$\text{Débit par utilisateur : } D_{\text{utilisateur}} = 60 \times 6 \times 14 \times 10^3 = 5.04 \text{ Mbps}$$

$$\text{Débit total : } D_{\text{total}} = 10 \times 5.04 \text{ Mbps} = 50.4 \text{ Mbps}$$

$$\text{Efficacité spectrale : } \eta = \frac{50.4 \text{ Mbps}}{10 \text{ MHz}} = 5.04 \text{ bps/Hz}$$

1. Systèmes de Transmission

Transmission par fibre optique

Les communications optiques utilisent la lumière comme support de transmission, offrant des débits extrêmement élevés et une immunité aux interférences électromagnétiques. La fibre optique est le medium principal, et le WDM (Wavelength Division Multiplexing) permet de multiplier sa capacité.

- **Structure et Propagation**
- **Cœur** : Zone centrale où la lumière se propage (diamètre 8-10 µm pour mono-mode, 50-62.5 µm pour multi-mode).
- **Gaine** : Enveloppe confinant la lumière dans le cœur par réflexion totale interne.
- **Atténuation** : Perte de puissance lors de la propagation.
- **Formule d'atténuation** : $\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$ (en dB/km)

α : Coefficient d'atténuation

L : Longueur de la fibre (km)

P_{in} , P_{out} : Puissances d'entrée et de sortie (mW)

Exemple :

$$P_{in} = 1 \text{ mW}, P_{out} = 0.1 \text{ mW} \text{ après } L = 20 \text{ km} \rightarrow \alpha = \frac{10}{20} \log_{10} \left(\frac{1}{0.1} \right) = 0.5 \times 1 = 0.5 \text{ dB/km}$$

1. Systèmes de Transmission

Hiérarchie numérique - PDH

PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy)

Système historique de multiplexage numérique où les signaux ont des horloges *presque synchrones* (d'où "plésiochrone"). Utilisé pour agréger des voies téléphoniques (64 kbps) en flux à haut débit.

Formule générale : $\text{Débit}_N = 4 \times \text{Débit}_{N-1} + \text{Overhead}$

Exemple de calcul (E2) :

$$4 \times 2.048 = 8.192 \text{ Mbps}$$

$$\text{Overhead : } 8.448 - 8.192 = 0.256 \text{ Mbps}$$

$$\rightarrow \text{Débit E2} = \mathbf{8.448 \text{ Mbps}}$$

Problème : Manque de souplesse, complexité de démultiplexage.

Ancien standard rigide, encore utilisé dans certains réseaux.

1. Systèmes de Transmission

Hiérarchie numérique – SDH / SONET

- **SDH (Synchronous Digital Hierarchy) & SONET (Synchronous Optical Network)**

Normes *synchrones* permettant une gestion flexible de la bande passante et une meilleure surveillance.

Structure de trame SDH (STM-1) :

Débit STM- $N=N \times 155.52$ Mbps

- Trame = 9×270 octets = 2430 octets
- Durée = $125 \mu\text{s}$ (débit de trame = 8000 trames/s)

$$\text{Débit STM-1} : \frac{9 \times 270 \times 8}{125 \times 10^{-6}} = 155.52 \text{ Mbps}$$

Critère	PDH	SDH/SONET
Synchronisation	Plésiochrone (horloges proches)	Synchrone (horloge unique)
Flexibilité	Faible	Élevée (accès direct aux VC)
Surveillance	Limitée	Riches fonctions OAM
Débits	2 Mbps à 140 Mbps	155 Mbps à 40 Gbps

- **SONET** (Amérique du Nord) et **SDH** (Europe/International) sont compatibles. Utilisent des **conteneurs virtuels** (VC) pour transporter des données.

Débit OC- $N=N \times 51.84$ Mbps

$$\text{Débit STM-4} : 4 \times 155.52 = 622.08 \text{ Mbps}$$

SDH/SONET : Normes synchrones modernes, permettant une gestion flexible et fiable des réseaux optiques.

Les débits sont calculés à partir de structures de trames fixes et de multiples hiérarchiques.