

# INF 2104 - Communications Numériques

---

M. Désiré GUEL

Enseignant en Réseaux et Télécommunications  
U-JKZ, Dept. Informatique

[guel.desire@gmail.com](mailto:guel.desire@gmail.com)

24 octobre 2023

# Prérequis du cours- INF 2104- Communications Numériques

## 1. Part 1 : Fondements des Communications Numériques

### 1.1.Introduction aux communications numériques

L'introduction aux communications numériques est une étape essentielle pour comprendre comment les informations sont transmises, traitées et reçues dans le monde numérique d'aujourd'hui. Les communications numériques sont le fondement des technologies de l'information et des réseaux modernes.

L'introduction aux communications numériques est la première étape pour acquérir une compréhension solide de la manière dont les informations sont échangées dans le monde moderne. Elle sert de base pour des cours et des carrières dans les télécommunications, les réseaux, l'informatique et d'autres domaines liés à la technologie de l'information.

**1. Compréhension du Numérique** : Il est important de définir ce que signifie "numérique". Cela implique de comprendre que l'information est représentée sous forme de bits (0 et 1), ce qui permet une manipulation précise et une transmission fiable.

**2. Les Signaux Numériques** : Une introduction doit aborder les différents types de signaux numériques, y compris les signaux binaires, les signaux à plusieurs niveaux, et les signaux temporels (série temporelle).

**3. Codage et Décodage** : Les informations sont codées en signaux numériques à l'émetteur et décodées à destination. Les méthodes de codage, telles que le codage en ligne, hors ligne, et le codage en bloc, sont explorées.

**4. Modulation** : L'introduction aux communications numériques explique également comment les signaux numériques sont modulés (modifiés) pour être transmis sur des canaux physiques tels que des câbles ou des ondes radio.

**5. Multiplexage** : Le multiplexage est le processus qui permet de transmettre plusieurs signaux sur un même canal. L'introduction couvre des méthodes telles que la division temporelle, la division fréquentielle, et la division par code.

**6. Canaux de Transmission** : Les différentes propriétés des canaux de transmission, comme le bruit, l'atténuation, et la distorsion, sont abordées pour expliquer comment elles affectent la qualité de la communication.

**7. Réseaux de Communication** : L'introduction peut également couvrir les concepts de réseaux de communication, tels que les réseaux locaux (LAN) et les réseaux étendus (WAN), ainsi que les technologies de transmission de données.

**8. Applications :** Enfin, il est important de montrer comment ces concepts sont utilisés dans la vie de tous les jours, que ce soit pour les communications téléphoniques, Internet, les réseaux sociaux, ou d'autres domaines.

## 1.2.Principes de la transmission en bande de base

Les principes de la transmission en bande de base sont un élément clé des communications numériques. Cette transmission concerne le transfert de signaux numériques à travers un canal de communication sans modulation.

La transmission en bande de base est utilisée dans de nombreuses applications, en particulier sur des réseaux locaux et des connexions filaires.

**1. Bande de Base :** La transmission en bande de base signifie que les signaux sont transmis sans modulation, ce qui signifie que la bande passante utilisée est relativement étroite par rapport à la fréquence du signal. Par exemple, la voix humaine, qui est un signal audio, peut être considérée comme une transmission en bande de base.

**2. Signaux Numériques :** La transmission en bande de base utilise des signaux numériques, c'est-à-dire des signaux qui sont représentés par des valeurs discrètes telles que des bits (0 et 1). Ces signaux numériques peuvent être des données textuelles, des images, des vidéos, etc.

**3. Signal en Bande de Base :** Le signal de bande de base est généralement à basse fréquence et est souvent centré sur une fréquence nulle (DC). Cela signifie que le signal occupe une petite bande de fréquences autour de zéro Hertz.

**4. Absence de Modulation :** Contrairement à la modulation, où le signal de bande de base est modifié pour être transmis sur un canal de communication, la transmission en bande de base consiste à envoyer directement le signal d'origine sans modification. Par exemple, un signal audio en bande de base est transmis tel quel.

**5. Avantages :** Les avantages de la transmission en bande de base sont sa simplicité et son efficacité en termes de bande passante. Elle est couramment utilisée pour transmettre des signaux numériques sur des canaux de communication courts, tels que des câbles Ethernet.

**6. Limitations :** La transmission en bande de base n'est pas adaptée aux transmissions à longue distance en raison de l'atténuation du signal. De plus, elle est vulnérable aux perturbations et au bruit, ce qui limite sa portée.

**7. Exemples :** Des exemples de transmission en bande de base incluent les connexions filaires comme Ethernet, les liaisons point à point, les communications série entre dispositifs électroniques, et les transmissions vocales analogiques dans les télécommunications traditionnelles.

## 1.3.Concepts de modulation numérique

Les concepts de modulation numérique sont essentiels pour comprendre comment les signaux numériques sont transformés en signaux analogiques modulés pour la transmission à travers différents canaux de communication.

Comprendre les concepts de modulation numérique est crucial pour quiconque travaille dans les domaines des communications, des réseaux, de la téléphonie ou de la technologie de l'information, car cela permet de concevoir, mettre en œuvre et optimiser des systèmes de communication efficaces.

**1. Modulation :** La modulation est le processus par lequel un signal numérique est converti en un signal analogique pour la transmission. Cela permet aux signaux numériques de voyager sur des canaux physiques, tels que des câbles ou des ondes radio, qui sont plus adaptés à la transmission de signaux analogiques.

**2. Signal Numérique :** Un signal numérique est constitué de bits, qui sont généralement représentés par les valeurs 0 et 1. Ces bits portent l'information sous forme binaire.

**3. Signal Analogique :** Un signal analogique est un signal continu qui peut varier en amplitude et en fréquence. Il est généralement représenté sous forme d'ondes sinusoïdales.

**4. Types de Modulation :** Il existe plusieurs types de modulation, notamment :

- *Modulation d'amplitude (AM) :* La modulation de l'amplitude d'une porteuse pour transmettre l'information.
- *Modulation de fréquence (FM) :* La modulation de la fréquence d'une porteuse pour transmettre l'information.
- *Modulation de phase (PM) :* La modulation de la phase d'une porteuse pour transmettre l'information.
- *Modulation d'amplitude et de phase (APM) :* La combinaison de la modulation d'amplitude et de la modulation de phase.

**5. Porteuse :** La porteuse est une onde sinusoïdale à une fréquence spécifique qui est utilisée pour transporter le signal modulé. La fréquence de la porteuse est généralement beaucoup plus élevée que la fréquence du signal modulant.

**6. Signal Modulant :** Le signal modulant est le signal numérique que l'on souhaite transmettre. Il module la porteuse pour transmettre l'information.

**7. Démodulation :** La démodulation est le processus inverse de la modulation, où le signal modulé est converti en signal numérique original à la réception.

**8. Avantages de la Modulation Numérique :** La modulation numérique offre plusieurs avantages, notamment la résistance au bruit, une meilleure qualité de signal, et la capacité de multiplexage, qui permet de transmettre plusieurs signaux simultanément sur un même canal.

**9. Exemples d'Applications :** La modulation numérique est largement utilisée dans les communications sans fil, la télévision, la radio, la téléphonie mobile, Internet, et de nombreuses autres applications de transmission de données.

## 2. Part 2 : Transmission en Bande de Base

La transmission en bande de base est un concept fondamental dans les communications qui se réfère à la transmission d'un signal dans sa forme originale, non modulée. Voici une vue d'ensemble de la transmission en bande de base :

## 2.1. Transmission à bande passante infinie en absence de bruit

La « Transmission à bande passante infinie en absence de bruit » est un concept important dans les communications numériques. Cela fait référence à un scénario idéal où la transmission de données se produit sur un canal de communication sans aucune limitation de bande passante et sans aucune perturbation ou bruit.

La « Transmission à bande passante infinie en absence de bruit » sert de point de départ pour comprendre les communications numériques, mais il est important de prendre en compte les limitations du monde réel lors de la conception de systèmes de communication robustes et fiables.

**1. Bande Passante Infinie :** Dans un environnement de transmission à bande passante infinie, il n'y a pas de limitation sur la plage de fréquences que le canal peut transmettre. Cela signifie que le canal peut supporter des signaux de toutes fréquences, des plus basses aux plus élevées.

**2. Signal Idéal :** Dans ce scénario idéal, le signal transmis conserve toutes ses caractéristiques sans aucune distorsion. Il n'y a pas d'atténuation ni de déformation du signal lorsqu'il traverse le canal.

**3. Pas de Bruit :** L'absence de bruit signifie qu'il n'y a aucune interférence ni aucune perturbation indésirable qui pourrait altérer le signal pendant la transmission. Cela rend la réception du signal parfaitement claire et fidèle à l'original.

**4. Débit de Données Illimité :** Avec une bande passante infinie et l'absence de bruit, il n'y a pas de limitation sur le débit de données que l'on peut transmettre sur ce canal. On pourrait théoriquement transmettre une quantité illimitée de données en un temps record.

**5. Utilisation Théorique :** La « Transmission à bande passante infinie en absence de bruit » est un modèle théorique qui permet de comprendre les principes fondamentaux des communications numériques. Cependant, dans le monde réel, il n'existe pas de canal de transmission sans limitation de bande passante ni de bruit.

**6. Comparaison avec la Réalité :** En pratique, les canaux de communication ont des limites de bande passante, sont sujets au bruit et peuvent provoquer de l'atténuation et de la distorsion du signal. Les ingénieurs en télécommunications doivent tenir compte de ces facteurs pour concevoir des systèmes de communication efficaces.

## 2.2. Transmission sur un canal BBAG à bande passante infinie

La transmission sur un canal BBAG (Bande de Base à Bande Passante Infinie) est un concept important en communications numériques. Il fait référence à la transmission d'un signal numérique sur un canal qui peut théoriquement transmettre des fréquences de manière illimitée.

La compréhension de la transmission sur un canal BBAG à bande passante infinie est essentielle pour concevoir des systèmes de communication efficaces et comprendre les principes de base des communications numériques. Elle sert de base pour la conception de systèmes de modulation et de démodulation.

**1. Canal BBAG à Bande Passante Infinie :** L'idée d'un canal BBAG à bande passante infinie est un modèle idéalisé qui suppose que le canal de transmission peut transmettre des fréquences sur une

gamme illimitée. Cela signifie qu'il peut transmettre des signaux de toutes les fréquences possibles sans aucune limitation de bande passante.

## 2. Théorème d'Echantillonnage de Nyquist :

- Pour transmettre efficacement un signal numérique sur un canal BBAG à bande passante infinie, il faut suivre le théorème d'échantillonnage de Nyquist. Ce théorème stipule que pour éviter la perte d'information, la fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois la fréquence maximale du signal. Cela permet de reconstruire le signal à la réception.
- Le théorème d'échantillonnage de Nyquist, également connu sous le nom de critère de Nyquist, est un principe fondamental en traitement du signal et en communications numériques. Il a été formulé par l'ingénieur en télécommunications et mathématicien Harry Nyquist au début du 20e siècle. Le théorème d'échantillonnage de Nyquist énonce les conditions nécessaires pour échantillonner un signal analogique de manière à pouvoir le reconstruire de manière précise et sans perte d'information. Voici les principaux points du théorème :
  - **(a) Fréquence d'échantillonnage** : Selon le théorème de Nyquist, pour échantillonner un signal analogique de manière adéquate, la fréquence d'échantillonnage (le nombre d'échantillons par seconde) doit être au moins deux fois la fréquence maximale présente dans le signal. Cette fréquence maximale est souvent appelée la "fréquence de Nyquist" ou la « fréquence de coupure ».
  - **(b) Fréquence de Nyquist** : La fréquence de Nyquist est la moitié de la fréquence d'échantillonnage. En d'autres termes, si vous échantillonnez un signal à une fréquence  $F_s$ , la fréquence de Nyquist est  $F_s/2$ . Cela signifie que le signal peut être échantillonné efficacement si sa fréquence maximale ne dépasse pas  $F_s/2$ .
  - **(c) Théorème de Reconstruction** : Le théorème de Nyquist indique que si un signal est échantillonné à une fréquence au moins deux fois sa fréquence de Nyquist, il peut être reconstruit de manière précise à partir des échantillons. Cela signifie que le signal original peut être récupéré sans perte d'information.
  - **(d) Application aux Communications Numériques** : Le théorème d'échantillonnage de Nyquist est d'une grande importance dans les communications numériques. Il garantit que lors de la conversion d'un signal analogique en un signal numérique (processus d'échantillonnage et de quantification), la fréquence d'échantillonnage doit être suffisamment élevée pour préserver l'information du signal analogique.
  - **(e) Exemple** : Par exemple, pour échantillonner un signal audio de qualité CD, dont la fréquence maximale est d'environ 22 kHz, on utilise une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz, conformément au théorème de Nyquist. Cela permet de conserver fidèlement toutes les fréquences audibles.

**3. Signaux en Bande de Base** : Les signaux en bande de base sont des signaux numériques qui occupent une gamme de fréquences allant de zéro à une fréquence maximale. Les signaux en bande de base sont généralement utilisés pour la transmission sur un canal BBAG.

**4. La Norme de Nyquist** : La norme de Nyquist, également connue sous le nom de critère de Nyquist, est utilisée pour déterminer le nombre optimal de niveaux d'amplitude qui peuvent être transmis sur un canal BBAG à bande passante infinie sans interférence significative.

**5. L'utilisation Pratique :** En pratique, il est rare de disposer d'un canal avec une bande passante infinie. Les canaux de transmission ont presque toujours une bande passante limitée. Cependant, la transmission sur un canal BBAG à bande passante infinie est un modèle utile pour comprendre les concepts fondamentaux des communications numériques.

**6. Limitations :** Bien que la transmission sur un canal BBAG à bande passante infinie soit un concept théorique utile, en réalité, il y a toujours des limitations de bande passante dans les canaux de communication. Par conséquent, des techniques de modulation et de filtrage sont utilisées pour adapter les signaux numériques à la bande passante disponible dans le monde réel.

### 2.3. Transmission sur un canal BBAG à bande passante limitée

La transmission sur un canal BBAG (Bande de Base à Bande Passante Limitée) est un concept fondamental en communications numériques qui s'oppose à la transmission sur un canal BBAG à bande passante infinie. Elle fait référence à la transmission de signaux numériques sur un canal dont la bande passante est limitée, c'est-à-dire qu'il ne peut transmettre que sur une gamme spécifique de fréquences.

Comprendre les concepts associés à la transmission sur un canal BBAG à bande passante limitée est crucial pour la conception de systèmes de modulation et de démodulation efficaces et pour optimiser la transmission de données sur des canaux présentant des limitations de bande passante.

**1. Canal BBAG à Bande Passante Limitée :** Contrairement au modèle idéalisé de la bande passante infinie, un canal BBAG à bande passante limitée a des limitations en termes de la gamme de fréquences qu'il peut transmettre. La bande passante du canal dépend de sa conception physique et de ses caractéristiques techniques.

**2. Filtres de Bande Passante :** Pour s'adapter à un canal BBAG à bande passante limitée, les signaux numériques sont généralement soumis à des filtres de bande passante qui limitent la largeur spectrale du signal. Cela garantit que le signal émis n'occupe que la gamme de fréquences que le canal est capable de transmettre.

**3. Critère de Nyquist :** Le critère de Nyquist est également appliqué à la transmission sur un canal BBAG à bande passante limitée. Il stipule que pour éviter la perte d'information, la fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois la largeur de bande du canal.

**4. Egalisation et Correction d'Erreur :** En raison des limitations de la bande passante, la transmission sur un canal BBAG à bande passante limitée peut entraîner une distorsion du signal. Par conséquent, des techniques d'égalisation et de correction d'erreur sont souvent utilisées pour améliorer la qualité de la transmission.

**5. Exemples de Canaux à Bande Passante Limitée :** De nombreux canaux de communication du monde réel, tels que les câbles coaxiaux, les fibres optiques, et les canaux sans fil, ont une bande passante limitée. La conception des systèmes de communication doit prendre en compte ces limitations.

**6. Efficacité Spectrale :** La transmission sur un canal BBAG à bande passante limitée nécessite une utilisation efficace de la bande passante disponible pour maximiser le débit binaire (bits par seconde) transmis.

### 3. Part 3 : Modulations Numériques

Les modulations numériques sont des techniques utilisées en communications numériques pour convertir des signaux numériques en signaux analogiques, qui sont ensuite transmis sur des canaux de communication. Ces techniques permettent une transmission efficace et fiable de données numériques.

#### 3.1. Modulation par déplacement d'amplitude (ASK)

- La modulation par déplacement d'amplitude (ASK), également connue sous le nom de modulation d'amplitude en déplacement, est l'une des techniques fondamentales de modulation numérique en communications. Elle consiste à varier l'amplitude d'une onde porteuse en fonction des valeurs du signal numérique à transmettre.
- Exemples d'Applications :
  - Les télécommandes infrarouges utilisent fréquemment la modulation ASK pour transmettre des commandes à des téléviseurs, des appareils audio, etc.
  - La communication par infrarouge pour les transferts de données à courte portée.
  - Certaines technologies de communication optique, telles que la communication optique à courte portée dans les réseaux locaux.

#### 3.2. Modulation par déplacement de phase (PSK)

- La modulation par déplacement de phase (PSK, Phase Shift Keying) est une technique de modulation numérique largement utilisée en communications numériques. Elle consiste à varier la phase d'une porteuse sinusoïdale pour représenter différents symboles binaires. Modulations par déplacement d'amplitude et de phase (APSK)
- Avantages : La modulation PSK est efficace en termes de bande passante, ce qui signifie qu'elle permet de transmettre plusieurs bits par symbole. Elle est également robuste face aux distorsions du canal.
- Applications : La modulation PSK est largement utilisée dans les communications numériques, y compris la transmission de données numériques sur des canaux filaires, sans fil et optiques. Elle est également utilisée dans des normes de communication telles que le Wi-Fi, le Bluetooth et la 4G (LTE)..

#### 3.3. Modulation par déplacement de fréquence (FSK)

- La modulation par déplacement de fréquence (FSK, Frequency Shift Keying) est une technique de modulation couramment utilisée en communications numériques pour transmettre des signaux numériques en modifiant la fréquence de la porteuse.
- Types de FSK : Il existe deux principaux types de FSK :
  - FSK binaire (2-FSK) : Dans ce cas, il y a deux fréquences porteuses distinctes, l'une pour le bit 0 et l'autre pour le bit 1.
  - FSK à plusieurs niveaux (M-FSK) : Cette variation de FSK utilise plus de deux fréquences porteuses pour représenter plusieurs symboles, ce qui permet de transmettre plusieurs bits en même temps.



- Avantages de la Modulation FSK : FSK est une technique de modulation relativement simple à mettre en œuvre. Elle est moins sensible aux interférences électromagnétiques et offre une bonne tolérance au bruit.
- Utilisations Courantes : FSK est largement utilisée dans de nombreuses applications de communication, notamment dans les modems, les systèmes de téléphonie sans fil, la téléphonie numérique, les transmissions de données à bas débit, et même dans certains types de radiocommunications.

## 4. Part 4 : Systèmes de Communications

Les systèmes de communications sont des infrastructures et des dispositifs qui permettent la transmission, la réception et l'échange d'informations entre deux ou plusieurs parties. Ils jouent un rôle essentiel dans notre monde connecté, permettant la communication à distance, le partage de données et la diffusion d'informations.

Les systèmes de communications continuent d'évoluer pour répondre aux besoins changeants de la société et aux avancées technologiques.

### 4.1.Compréhension du multiplexage

La compréhension du multiplexage est essentielle dans le domaine des communications, en particulier dans les réseaux de télécommunications. Le multiplexage est le processus de combinaison de plusieurs signaux ou flux d'informations distincts en un seul canal de transmission pour une distribution efficace.

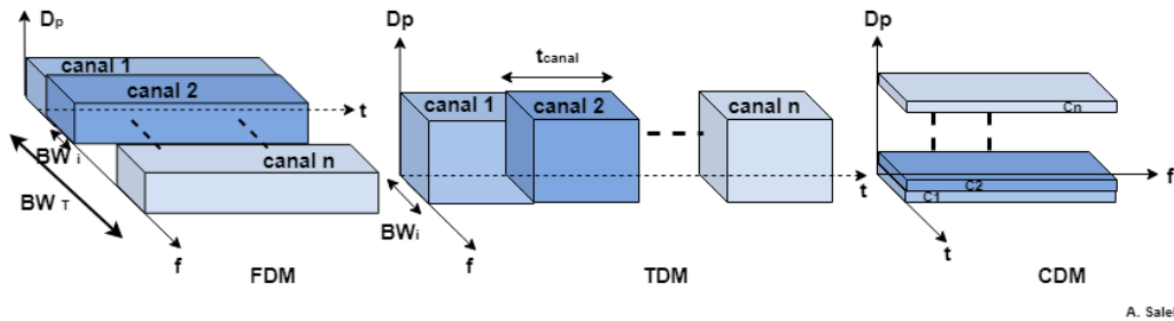
La compréhension du multiplexage est également essentielle pour concevoir des systèmes de communication efficaces et pour gérer les réseaux de manière optimale. Les ingénieurs et les professionnels des télécommunications utilisent ces concepts pour optimiser l'utilisation des canaux de communication et garantir une transmission efficace des données et des informations.

**1. Signaux Multiplexés** : Le multiplexage est utilisé pour combiner plusieurs signaux, également appelés canaux, en un seul flux. Ces signaux peuvent être des données, des voix, de la vidéo, ou d'autres types d'informations.

**2. Objectifs du Multiplexage** : Les principaux objectifs du multiplexage sont l'efficacité spectrale et la maximisation de l'utilisation du canal de transmission. Il permet de transmettre plus d'informations sur un seul canal.

**3. Types de Multiplexage** : Il existe plusieurs techniques de multiplexage, notamment :

- Multiplexage fréquentiel (FDM) : Les signaux sont multiplexés en utilisant différentes plages de fréquences.
- Multiplexage temporel (TDM) : Les signaux sont multiplexés en fonction du temps, où chaque signal dispose de créneaux temporels dédiés.
- Multiplexage par répartition de code (CDM) : Chaque signal est codé avec un code unique, puis tous les signaux sont transmis simultanément. Le récepteur utilise le code approprié pour extraire le signal souhaité.



**4. Multiplexage Statique vs Dynamique :** Le multiplexage peut être statique, où les créneaux temporels ou les plages de fréquences sont alloués de manière fixe, ou dynamique, où ils sont alloués en fonction de la demande.

**5. Avantages du Multiplexage :** Le multiplexage permet de partager efficacement la bande passante et de rationaliser l'utilisation des canaux de communication. Il est essentiel pour la transmission de multiples types d'informations sur un même réseau.

**6. Applications du Multiplexage :** Le multiplexage est largement utilisé dans les réseaux de télécommunications, la téléphonie, les réseaux informatiques, la diffusion de médias, les réseaux câblés, etc.

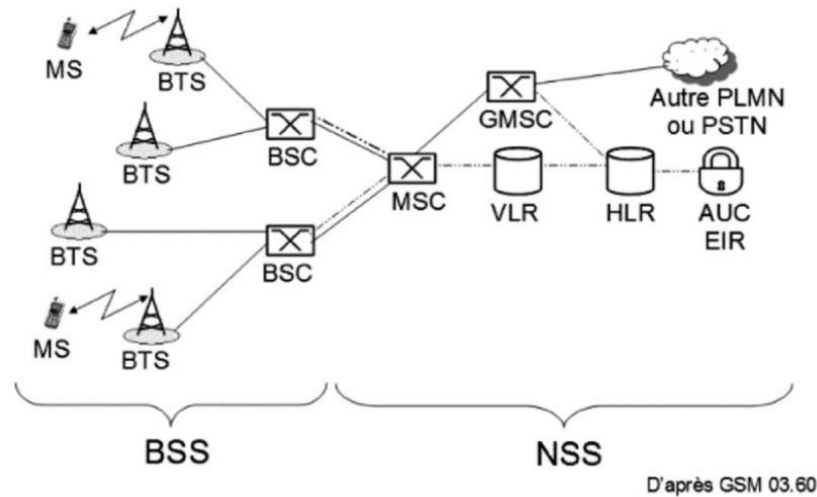
**7. Démultiplexage :** À la réception, le signal multiplexé doit être démultiplexé pour extraire les signaux individuels. Cela implique d'utiliser des techniques de démultiplexage correspondantes à celles utilisées lors du multiplexage.

## 4.2. Étude des systèmes de téléphonie, notamment le GSM

L'étude des systèmes de téléphonie, en particulier du GSM (Global System for Mobile Communications), est importante pour comprendre les réseaux de téléphonie mobile et les technologies sous-jacentes. Elle offre un aperçu des concepts fondamentaux des communications sans fil et constitue la base de l'évolution constante des réseaux mobiles vers des normes plus avancées et plus rapides.

**1. Introduction au GSM :** Le GSM est un standard mondial de téléphonie mobile qui a révolutionné les communications sans fil. Il a été introduit pour la première fois dans les années 1990 et a ouvert la voie aux réseaux de téléphonie mobile modernes.

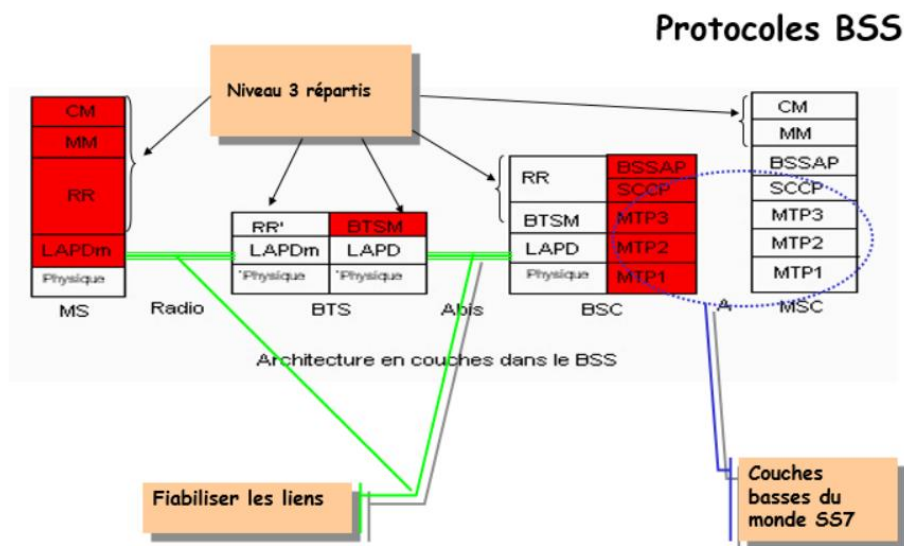
**2. Architecture du Réseau GSM :** L'étude du GSM commence par une exploration de l'architecture du réseau. Cela inclut les composants clés tels que les stations de base (BTS), les stations de base de commutation (BSC), les stations de base de contrôle (BCS), le centre de commutation mobile (MSC), et le registre de localisation (HLR/VLR).



**3. Fréquences et Canaux :** Le GSM utilise un ensemble de fréquences radio pour la communication. Il y a des canaux montants et descendants, et l'étude examine comment les informations sont transmises sur ces canaux en utilisant différentes fréquences.

**4. Modulation GSM :** La modulation GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) est utilisée pour transmettre les signaux dans le GSM. L'étude se penche sur la manière dont cette modulation est mise en œuvre pour une communication efficace.

**5. Protocoles de Communication :** Le GSM repose sur un ensemble de protocoles de communication, notamment le protocole de contrôle de la couche radio (RLC), le protocole de signalisation, et d'autres normes qui assurent le bon déroulement des communications.



**6. Sécurité GSM :** L'étude inclut une exploration des mesures de sécurité du GSM, telles que le chiffrement des communications pour protéger la vie privée des utilisateurs.

**7. Services GSM :** Les services GSM vont au-delà de la simple voix. L'étude aborde également les services de messagerie, la transmission de données, l'accès à Internet et d'autres fonctionnalités offertes par le GSM.

**8. Évolution du GSM :** L'étude peut également examiner l'évolution du GSM vers les normes plus récentes, comme la 3G, la 4G et la 5G, et comment ces normes ont amélioré les capacités de communication mobile.

#### 4.3. Analyse des systèmes de télévision, comme la TNT

L'analyse des systèmes de télévision, en particulier la TNT (Télévision Numérique Terrestre), est un domaine en constante évolution en raison des avancées technologiques. Comprendre ces systèmes est essentiel pour ceux qui travaillent dans l'industrie de la diffusion, des télécommunications et de l'audiovisuel.

**1. Télévision Numérique Terrestre (TNT) :** La TNT est un système de diffusion de signaux de télévision sous forme numérique via des ondes radio terrestres. Il remplace progressivement la diffusion analogique de la télévision.

**2. Compression de Signal :** Un aspect clé de la TNT est la compression de signal. Les signaux vidéo et audio sont compressés pour économiser de la bande passante et permettre la transmission de plusieurs chaînes sur un seul canal.

**3. Multiplexage :** La TNT utilise le multiplexage pour combiner plusieurs chaînes de télévision dans un seul flux numérique. Les téléspectateurs peuvent ensuite sélectionner la chaîne souhaitée à l'aide d'un décodeur.

**4. Normes de TNT :** Il existe différentes normes de TNT dans le monde, telles que DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial) en Europe, ATSC (Advanced Television Systems Committee) aux États-Unis, ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial) au Japon, etc. L'analyse des normes spécifiques est souvent abordée.

	DVB-T	DVB-T2 (new/improved options in <b>bold</b> )
<b>FEC</b>	Convolutional Coding+Reed Solomon 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	LDPC + BCH 1/2, <b>3/5</b> , 2/3, 3/4, <b>4/5</b> , 5/6
<b>Modes</b>	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, <b>256QAM</b>
<b>Guard Interval</b>	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, <b>19/128</b> , 1/8, <b>19/256</b> , 1/16, 1/32, <b>1/128</b>
<b>FFT Size</b>	2k, 8k	<b>1k</b> , 2k, <b>4k</b> , 8k, <b>16k</b> , 32k
<b>Scattered Pilots</b>	8% of total	<b>1%</b> , <b>2%</b> , <b>4%</b> , 8% of total
<b>Continual Pilots</b>	2.0% of total	<b>0.4%-2.4%</b> (0.4%-0.8% in 8K-32K)
<b>Bandwidth</b>	6, 7, 8 MHz	<b>1.7</b> , <b>5</b> , <b>6</b> , <b>7</b> , <b>8</b> , <b>10</b> MHz
<b>Typical data rate (UK)</b>	24 Mbit/s	<b>40</b> Mbit/s
<b>Max. data rate (@20 dB C/N)</b>	31.7 Mbit/s (using 8 MHz)	<b>45.5</b> Mbit/s (using 8 MHz)
<b>Required C/N ratio (@24 Mbit/s)</b>	16.7 dB	<b>10.8</b> dB

**5. Qualité d'Image et de Son :** L'analyse des systèmes de télévision inclut l'examen de la qualité de l'image et du son offerte par la TNT. Cela comprend la résolution de l'image, la qualité audio, et les normes de compression telles que MPEG (Moving Picture Experts Group).

**6. Distribution de Contenu :** L'analyse de la TNT couvre également la manière dont le contenu est distribué, notamment par voie terrestre, par câble, par satellite, ou via Internet (TNT par IP).

**7. Transition de l'Analogique au Numérique** : L'analyse de la transition de l'analogique au numérique est importante pour comprendre les avantages de la TNT, notamment la meilleure qualité d'image, la possibilité de diffuser des chaînes en haute définition (HD), et l'efficacité de la bande passante.

**8. Réception** : Les moyens de réception des signaux TNT, tels que les antennes et les décodeurs, sont également abordés.

**9. Impact sur les Consommateurs** : L'analyse des systèmes de télévision, comme la TNT, examine comment ces systèmes affectent les téléspectateurs, y compris les options de visionnage, la qualité des signaux, et l'accès à une plus grande variété de chaînes.

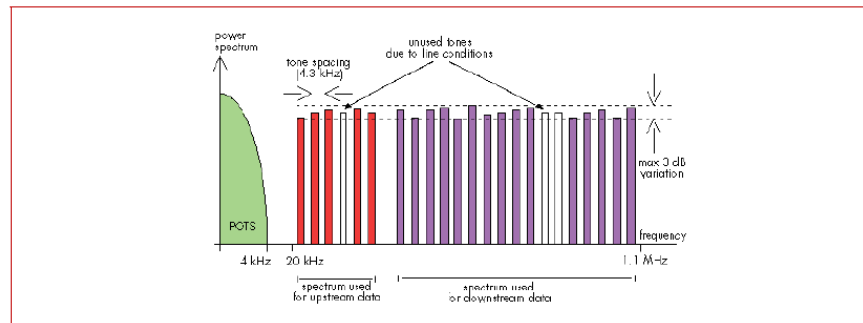
#### 4.4.Exploration des systèmes Internet, en se concentrant sur l'ADSL

L'exploration des systèmes Internet, en se concentrant sur l'ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), est une étape importante pour comprendre comment les données sont transmises sur Internet, en particulier via les connexions haut débit.

L'ADSL est une technologie qui a révolutionné la manière dont les gens accèdent et utilisent Internet, et elle continue d'être pertinente même à l'ère des connexions à fibre optique et 5G.

**1. Introduction à l'ADSL** : L'ADSL est une technologie de communication qui permet de transmettre des données à haut débit sur des lignes téléphoniques existantes. Elle est couramment utilisée pour fournir des connexions Internet à domicile et dans les petites entreprises.

Bande passante entre 0 et 1.1 MHz, divisée en 256 canaux séparés de 4312.5 [Hz] ayant chacun une largeur de bande de 4 [kHz]



- Canal 1 (entre 0 et 4 kHz) : téléphone classique
- Canaux 7 à 31 (entre 26 et 133 kHz) : upload
- Canaux 33 à 256 (entre 138 et 1100 kHz) : download

**2. Asymétrie** : L'ADSL est « **asymétrique** » car la vitesse de téléchargement (réception de données) est généralement beaucoup plus élevée que la vitesse de téléversement (envoi de données). Cela convient bien aux besoins typiques des utilisateurs qui téléchargent souvent plus de données qu'ils n'en envoient.

**3. Utilisation de la Ligne Téléphonique** : L'ADSL utilise la ligne téléphonique en modulant les signaux numériques sur une bande de fréquences spécifique. Cela permet de transmettre simultanément des appels téléphoniques et des données Internet sur la même ligne.

**4. Système de Fréquences :** L'ADSL utilise une large gamme de fréquences pour la transmission des données. Les fréquences inférieures sont réservées aux appels téléphoniques, tandis que les fréquences plus élevées sont utilisées pour les données Internet. Cette division en fréquences permet de multiplexer les signaux.

**5. Débit de Données :** L'ADSL offre des débits de données variables en fonction de la distance entre l'utilisateur et le commutateur téléphonique. Plus la distance est courte, plus le débit est élevé. Les débits de téléchargement sont généralement compris entre quelques mégabits par seconde (Mbps) et jusqu'à 24 Mbps ou plus.

**6. Modem DSL :** Pour utiliser l'ADSL, les utilisateurs ont besoin d'un modem DSL spécifique qui se connecte à leur ligne téléphonique et à leur ordinateur. Le modem décode les signaux ADSL pour permettre une connexion Internet.

**7. Applications :** L'ADSL est utilisée pour un large éventail d'applications, notamment la navigation sur Internet, le streaming vidéo, la voix sur IP (VoIP), le télétravail, le jeu en ligne, et bien d'autres.

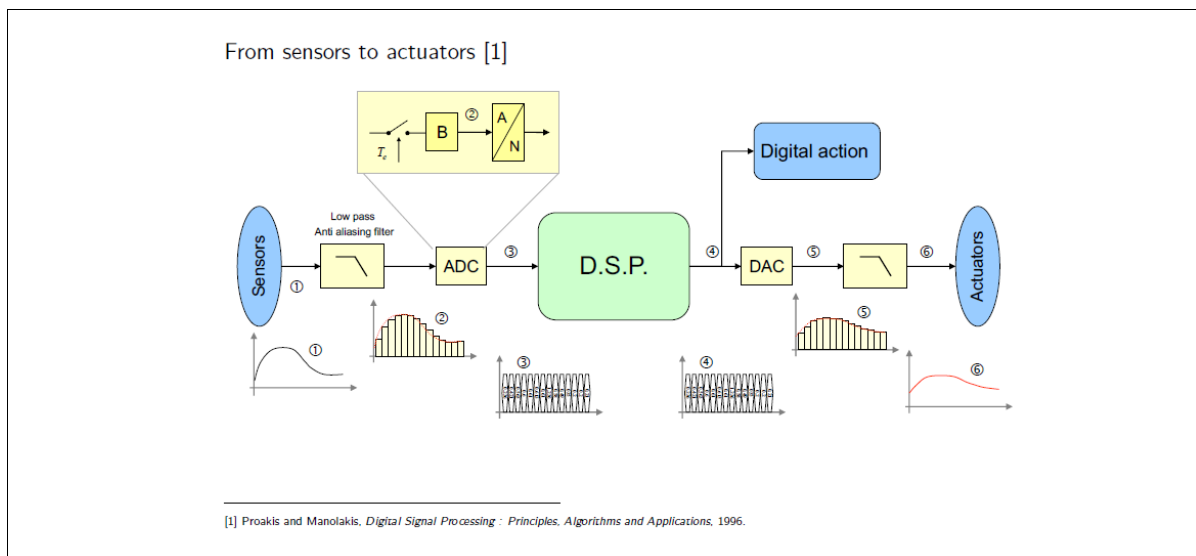
**8. Limitations :** Bien que l'ADSL soit une technologie populaire, sa vitesse de téléchargement diminue avec la distance par rapport au commutateur téléphonique. De plus, elle peut être sensible à la qualité de la ligne téléphonique.

## 5. Part 5 : Traitement du Signal Numérique (Optionnel)

Cette partie du cours sur les Communications Numériques, consacrée au « Traitement du Signal Numérique » est optionnelle et explore des concepts avancés liés au traitement des signaux numériques. Cette partie du cours offre une compréhension approfondie des techniques de traitement du signal et de leur application dans les communications numériques.

### 5.1. Implémentation d'algorithmes de traitement du signal numérique

Cette section se penche sur la mise en œuvre pratique des algorithmes de traitement du signal numérique (DSP). Les étudiants apprennent à concevoir, coder et exécuter des algorithmes DSP pour diverses applications, y compris la suppression du bruit, la démodulation, et la correction d'erreurs.



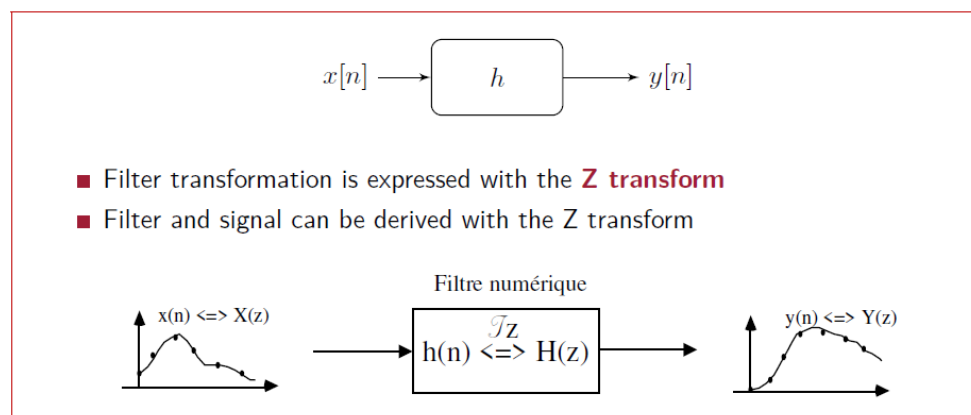
## 5.2.Traitement en temps réel ("Real-time processing")

Le traitement en temps réel est crucial dans les systèmes de communication, car il garantit que les signaux sont traités en temps réel sans retard perceptible. Les étudiants étudient les défis liés au traitement en temps réel et explorent des techniques pour les surmonter.

## 5.3.Filtrage numérique ("Digital Filtering")

Le filtrage numérique est essentiel pour la manipulation des signaux numériques. Les étudiants examinent les concepts de filtrage numérique, y compris les filtres passe-bas, passe-haut, et passe-bande, ainsi que les techniques de conception de filtres numériques.

### Introducing Z transform



## 5.4.Transformation de Fourier ("Fourier Transform")

La transformation de Fourier est un outil fondamental pour l'analyse des signaux. Les étudiants étudient la transformation de Fourier discrète (DFT) et la transformation de Fourier rapide (FFT), ainsi que leur utilisation dans la décomposition spectrale des signaux.

---

Let's go back to the initial Fourier transform

- The signal  $x(n)$  is sampled at its sampling frequency  $F_c$
- If we consider a FT of size  $N$  we have

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-2j\pi \frac{nk}{N}}, k = 0, 1, \dots, N-1$$

- And its inverse Fourier transform is defined as

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{2j\pi \frac{nk}{N}}, n = 0, 1, \dots, N-1$$

Note that in practise both time domain and frequency domain signal are complex  $\rightarrow$   
*Computational complexity?*

---

---

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-2j\pi \frac{nk}{N}}, k = 0, 1, \dots, N-1$$

*Discrete Fourier Transform (DFT) with matrix*

$$\begin{pmatrix} X(0) \\ X(1) \\ \vdots \\ X(N-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W_N^1 & W_N^2 & \dots & W_N^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W_N^2 & W_N^4 & \dots & W_N^{2(N-1)} \\ 1 & W_N^{N-1} & W_N^{2(N-1)} & \dots & W_N^{(N-1)^2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{pmatrix}$$

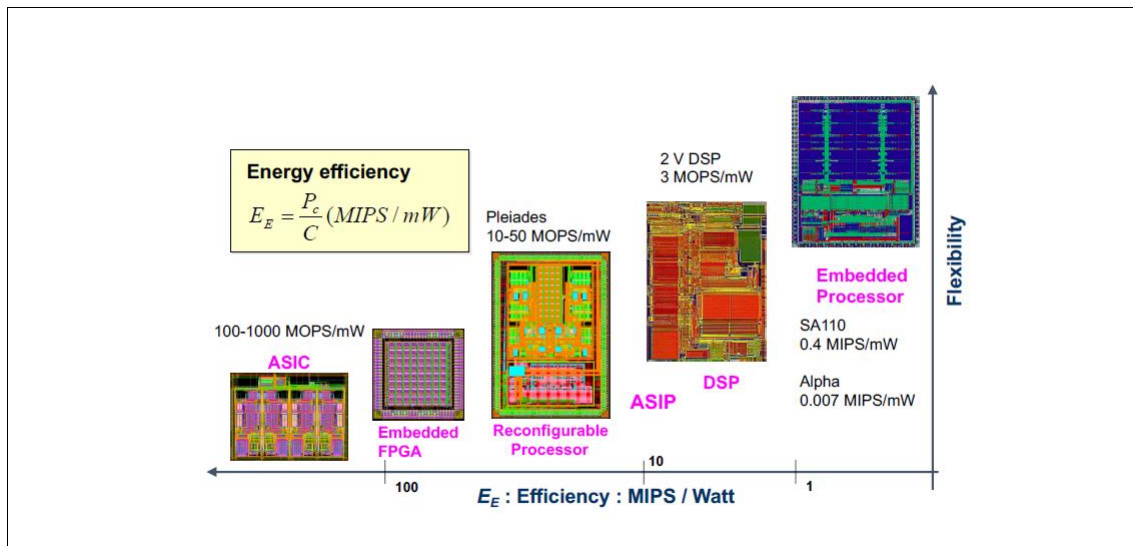
with  $W_N$  is called *twiddle factor* and is equal to  $e^{-2j\pi \frac{1}{N}}$ .

---

## 5.5. Processeur de Signal Numérique ("Digital Signal Processor")

Cette section se concentre sur l'utilisation des processeurs de signal numérique (DSP) dans le domaine des communications. Les étudiants explorent les architectures DSP, leur programmation, et leurs applications dans la mise en œuvre de systèmes de communication avancés.





## QCM sur les Prérequis du cours- Communications Numériques

Voici une liste de questions à choix multiple (QCM) sur les Prérequis du cours - Communications Numériques.

### Transmission en bande de base (Questions 1-5)

1. Qu'est-ce que la transmission en bande de base ?
  - a) La transmission de signaux analogiques
  - b) La transmission de signaux numériques sur une large bande passante
  - c) La transmission de signaux numériques sur une bande passante minimale
2. Qu'est-ce qui caractérise une transmission à bande passante infinie en absence de bruit ?
  - a) Une large bande passante
  - b) Un signal fort
  - c) Aucune distorsion
3. Quelle est la différence entre un canal BBAG à bande passante infinie et un canal BBAG à bande passante limitée ?
  - a) Le canal à bande passante limitée n'a pas de bruit.
  - b) Le canal à bande passante limitée a une largeur de bande limitée.
  - c) Le canal à bande passante infinie a un signal plus fort.
4. Quel concept est lié à la modulation numérique en bande de base ?
  - a) Emission d'un signal analogique
  - b) Transmission d'un signal à haute fréquence
  - c) Modulation d'un signal numérique sur une porteuse
5. Dans la transmission en bande de base, qu'est-ce que la transmission à bande passante infinie implique généralement ?
  - a) Pas de limite de bande passante
  - b) Transmission de signaux très faibles
  - c) Utilisation de signaux analogiques

### Modulations numériques (Questions 6-10)

6. Qu'est-ce que l'ASK (Amplitude Shift Keying) en modulation numérique ?
  - a) Une modulation de phase
  - b) Une modulation d'amplitude
  - c) Une modulation de fréquence
7. Dans la modulation PSK (Phase Shift Keying), combien de valeurs de phase distinctes sont utilisées pour représenter les données ?
  - a) 1

- b) 2
  - c) 3
8. Quelle modulation combine à la fois le déplacement d'amplitude et de phase ?
- a) ASK
  - b) FSK
  - c) APSK
9. Quelle modulation numérique est généralement utilisée pour la transmission de signaux numériques via la modulation de fréquence ?
- a) ASK
  - b) FSK
  - c) PSK
10. En modulation numérique, quel est l'objectif principal de la modulation ?
- a) Augmenter la consommation d'énergie
  - b) Améliorer la sécurité de la transmission
  - c) Faciliter la transmission des données sur un canal donné

**Quelques systèmes de communications (Questions 11-15)**

11. Qu'est-ce que le multiplexage dans le contexte des communications ?
- a) La transmission de signaux numériques sur un seul canal
  - b) La transmission de plusieurs signaux sur un même support de transmission
  - c) La modulation des signaux analogiques
12. Le système de téléphonie GSM est principalement utilisé pour :
- a) La transmission de signaux de télévision
  - b) La transmission de signaux numériques à haute fréquence
  - c) Les communications mobiles
13. Quel est le principal avantage de la télévision TNT (Télévision Numérique Terrestre) par rapport à la télévision analogique ?
- a) Qualité d'image inférieure
  - b) Plus de canaux disponibles
  - c) Meilleure qualité d'image et de son
14. Quel type de communication est principalement pris en charge par la technologie ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) ?
- a) Téléphonie mobile
  - b) Transmission de données à haut débit sur une ligne téléphonique
  - c) Télévision par satellite
15. Dans un système de télévision par câble, comment sont transmises les données numériques ?
- a) Sous forme de signaux analogiques

- b) Sous forme de signaux numériques
- c) À l'aide de signaux de téléphonie mobile

### **Digital Signal Processing (Questions 16-20)**

16. Quel est l'objectif de l'implémentation d'algorithmes DSP (Digital Signal Processing) ?

- a) Améliorer la qualité des signaux analogiques
- b) Transformer des signaux numériques en signaux analogiques
- c) Traiter et manipuler des signaux numériques

17. Quelle caractéristique distingue le traitement en temps réel (Real-time processing) du traitement hors ligne ?

- a) Le traitement en temps réel se produit en temps différé.
- b) Le traitement en temps réel nécessite des calculs plus lents.
- c) Le traitement en temps réel traite les données au fur et à mesure de leur arrivée.

18. Quelle est la principale application du filtrage numérique (Digital Filtering) ?

- a) Augmenter la consommation d'énergie
- b) Améliorer la qualité sonore des signaux
- c) Modifier le contenu fréquentiel d'un signal numérique

19. Quel est l'objectif principal de la transformation de Fourier (Fourier Transform) en traitement du signal numérique ?

- a) Analyser le contenu fréquentiel d'un signal
- b) Réduire la complexité des signaux
- c) Convertir les signaux numériques en signaux analogiques

20. Quel composant matériel est couramment utilisé pour effectuer des opérations de traitement du signal numérique ?

- a) Processeur de signal analogique (ASP)
- b) Processeur de signal numérique (DSP)
- c) Unité centrale de traitement (CPU)

# Installation Matlab & Prise en Main

L'installation de MATLAB R2023a avec une licence étudiante nécessite de suivre quelques étapes. Voici la liste des instructions pour installer MATLAB R2023a avec les boîtes à outils spécifiques que vous avez mentionnées (Signal Processing Toolbox, Communications Toolbox, DSP System Toolbox) :

## Étape 1 : Préparation des Prérequis

Assurez-vous d'avoir les éléments suivants :

- Votre licence étudiante MATLAB valide.
- Un compte MathWorks (si vous n'en avez pas, vous devrez en créer un sur le site de MathWorks).
- Accès à Internet pour télécharger le logiciel.

## Étape 2 : Connexion à votre Compte MathWorks

1. Rendez-vous sur le site Web de MathWorks :  
[<https://www.mathworks.com/>](<https://www.mathworks.com/>)
2. Connectez-vous à votre compte MathWorks en utilisant vos identifiants.

## Étape 3 : Téléchargement de MATLAB R2023a

1. Une fois connecté, accédez à la section de téléchargement de MATLAB.
2. Sélectionnez la version R2023a à télécharger.
3. Choisissez votre système d'exploitation (Windows, macOS, Linux) et la version (32 bits ou 64 bits) en fonction de votre configuration.
4. Téléchargez le fichier d'installation de MATLAB R2023a.

**NB : Vous pouvez également télécharger des versions antérieures de MATLAB R2023a.**

## Étape 4 : Installation de MATLAB R2023a

1. Exécutez le fichier d'installation téléchargé.
2. Suivez les instructions de l'assistant d'installation.
3. Lorsque vous arrivez à l'étape de la sélection des produits à installer, assurez-vous de cocher les produits suivants :
  - MATLAB
  - Signal Processing Toolbox
  - Communications Toolbox
  - DSP System Toolbox
4. Terminez le processus d'installation en suivant les étapes restantes de l'assistant.

## Étape 5 : Activation avec la Licence Étudiante

1. Au cours du processus d'installation, vous serez invité à entrer la clé de licence étudiante que vous avez reçue de MathWorks.
2. Saisissez la clé de licence dans les champs prévus à cet effet.

3. Suivez les instructions pour activer votre licence.

## Étape 6 : Finalisation de l'Installation

1. Une fois l'installation terminée, vous pouvez lancer MATLAB R2023a.
2. Assurez-vous que les boîtes à outils que vous avez sélectionnées (Signal Processing Toolbox, Communications Toolbox, DSP System Toolbox) sont disponibles et fonctionnent correctement.

## Étape 7 : Prise en main de Matlab

Les étapes 1 à 6 devraient vous permettre d'installer MATLAB R2023a avec une licence étudiante, ainsi que les boîtes à outils spécifiques (Toolbox). Assurez-vous de suivre attentivement les instructions fournies lors du processus d'installation et d'activation de la licence.

Voici trois (03) exemples de code MATLAB pour la mise en œuvre de fonctions de communication numérique. Ces exemples vous permettront de vous familiariser avec les concepts de base de la communication numérique en utilisant MATLAB.

### Exemple 1 : Modulation d'Amplitude (AM)

L'exemple 1 illustre la modulation d'amplitude (AM) en utilisant MATLAB. L'AM est une technique de modulation dans laquelle l'amplitude du signal porteur est modulée en fonction du signal modulant (message). Le code MATLAB est donné ci-dessous.

Dans cet exemple :

1. Nous définissons les paramètres de base tels que la fréquence de la porteuse ( $f_c$ ), la fréquence d'échantillonnage ( $f_s$ ), et nous créons une séquence temporelle ( $t$ ).
2. Le signal modulant (message) est créé en tant que sinusoïde de 5 Hz.
3. Le signal modulé en AM est obtenu en multipliant la porteuse par une version modulée du message. Dans cet exemple, nous utilisons une modulation AM simple avec un indice de modulation de 0.5.
4. Les signaux sont tracés pour visualiser le signal modulant, la porteuse, et le signal modulé.

Vous pouvez exécuter ce code dans MATLAB pour voir comment la modulation d'amplitude fonctionne et comment les signaux sont affectés. Cela vous aidera à mieux comprendre ce concept fondamental de la communication numérique.

```
% Paramètres de base
fc = 1000; % Fréquence de la porteuse
fs = 10000; % Fréquence d'échantillonnage
t = 0:1/fs:1; % Création d'une séquence temporelle

% Signal modulant (message)
message = sin(2*pi*5*t); % Un signal sinusoïdal de 5 Hz

% Signal modulé en AM
signal_module = (1 + 0.5*message) .* cos(2*pi*fc*t);

% Tracé des signaux
subplot(3,1,1);
```

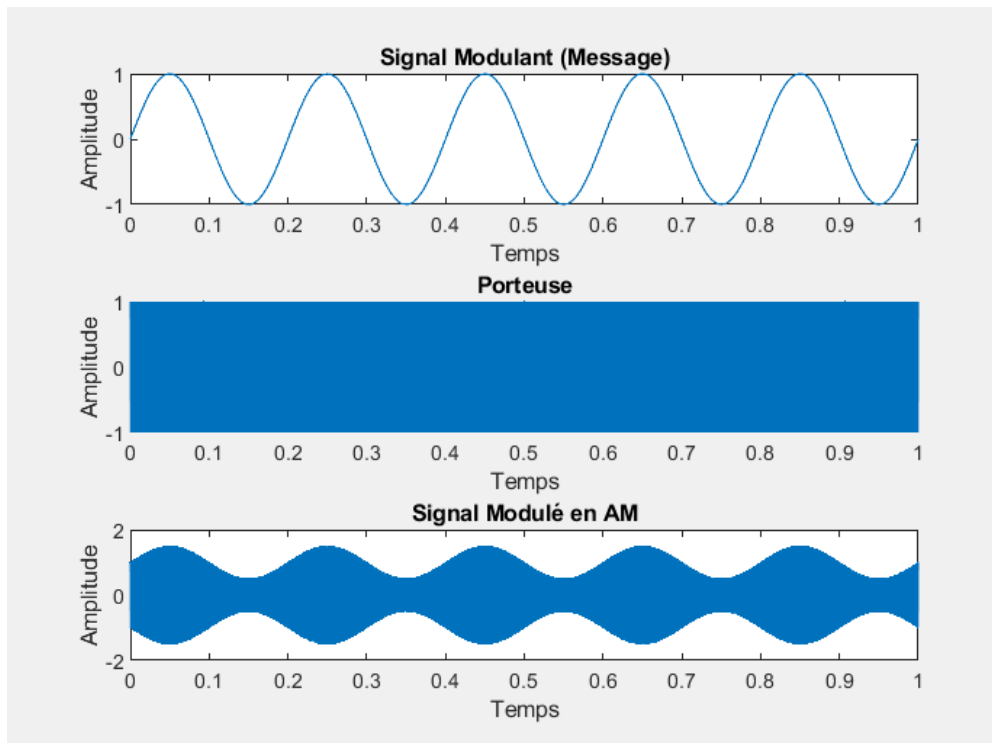
```

plot(t, message);
title('Signal Modulant (Message)');
xlabel('Temps');
ylabel('Amplitude');

subplot(3,1,2);
plot(t, cos(2*pi*fc*t));
title('Porteuse');
xlabel('Temps');
ylabel('Amplitude');

subplot(3,1,3);
plot(t, signal_module);
title('Signal Modulé en AM');
xlabel('Temps');
ylabel('Amplitude');

```



### Exemple 2 : Modulation de Phase (PSK)

L'exemple 2 concerne la modulation de phase (PSK) en utilisant MATLAB. La modulation de phase est un processus où la phase d'une onde porteuse est modifiée en fonction des données binaires d'entrée pour transmettre de l'information. Le code MATLAB pour illustrer la modulation de phase (PSK) est donné ci-dessous.

Dans cet exemple, nous générons un signal binaire aléatoire représentant les données d'entrée (0 ou 1). Les valeurs de phase (0 et  $\pi$ ) sont associées à ces données binaires. Le signal modulé en PSK est obtenu en modifiant la phase de l'onde porteuse en fonction des valeurs binaires.

**Vous pouvez exécuter ce code dans MATLAB pour voir comment la modulation de phase (PSK) fonctionne et comment les signaux modulés en PSK sont générés en fonction des données binaires. Vous observerez que le signal modulé varie en phase selon les valeurs binaires du message.**

```
% Paramètres de base
fs = 10000; % Fréquence d'échantillonnage
t = 0:1/fs:1; % Création d'une séquence temporelle

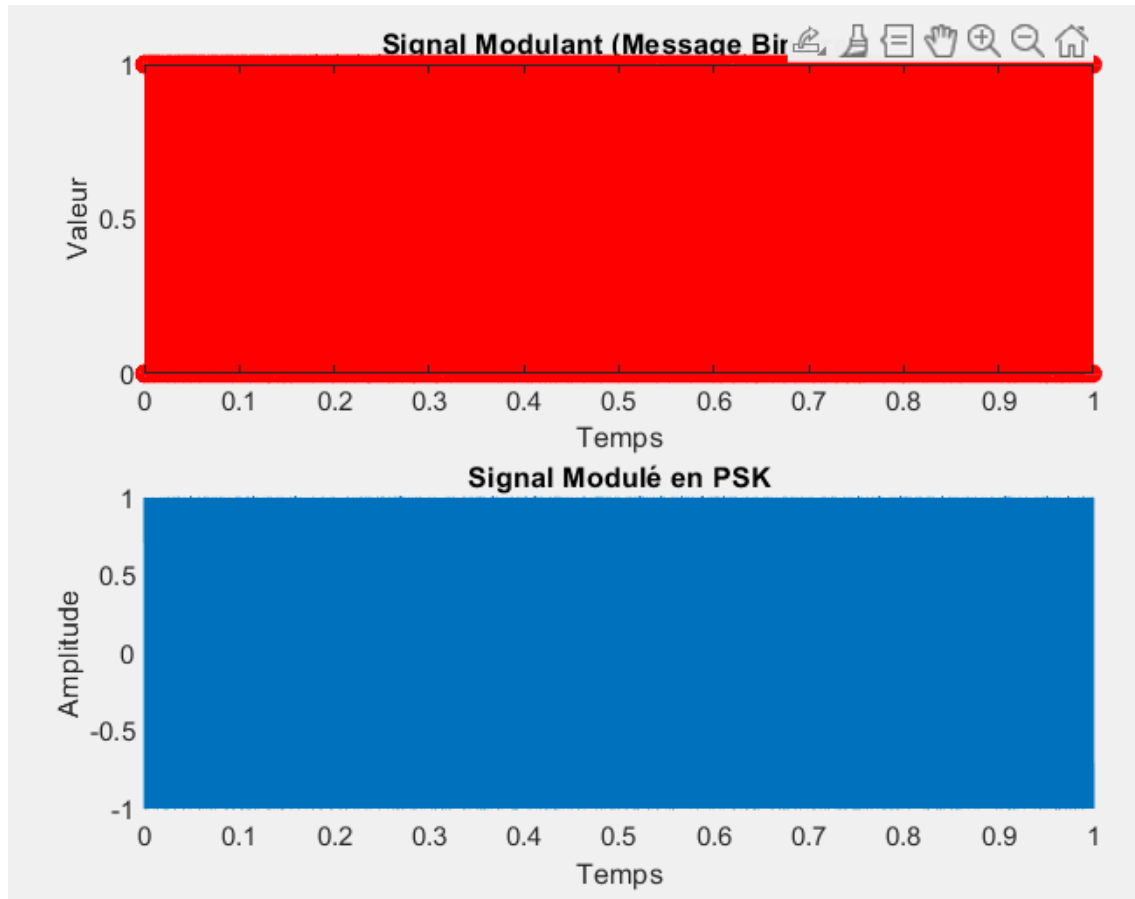
% Signal modulant (message)
message = randi([0,1], 1, length(t)); % Signal binaire aléatoire

% Signal modulé en PSK
signal_module = cos(2*pi*fs*t + pi*message);

% Tracé des signaux
subplot(2,1,1);
stem(t, message, 'r');
title('Signal Modulant (Message Binaire)');
xlabel('Temps');
ylabel('Valeur');

subplot(2,1,2);
plot(t, signal_module);
title('Signal Modulé en PSK');
xlabel('Temps');
ylabel('Amplitude');
```





### Exemple 3 : Modulation de Fréquence (FM)

Pour l'exemple de modulation de fréquence (FM) en MATLAB. Le code qui génère un signal modulé en FM à partir d'un signal modulant sinusoïdal est donné ci-dessous.

Ce code génère un signal modulant (message) sinusoïdal de 5 Hz, puis le module en utilisant la modulation de fréquence (FM). La constante de modulation 'kf' contrôle l'ampleur de la modulation. Vous pouvez exécuter ce code dans l'environnement MATLAB pour visualiser le signal modulant, la porteuse et le signal modulé en FM.

L'exemple illustre comment la fréquence de la porteuse est modulée en fonction du signal modulant. La modulation de fréquence est couramment utilisée dans les communications radio, notamment dans les émissions FM.

```
% Paramètres de base
fs = 10000; % Fréquence d'échantillonnage
t = 0:1/fs:1; % Création d'une séquence temporelle

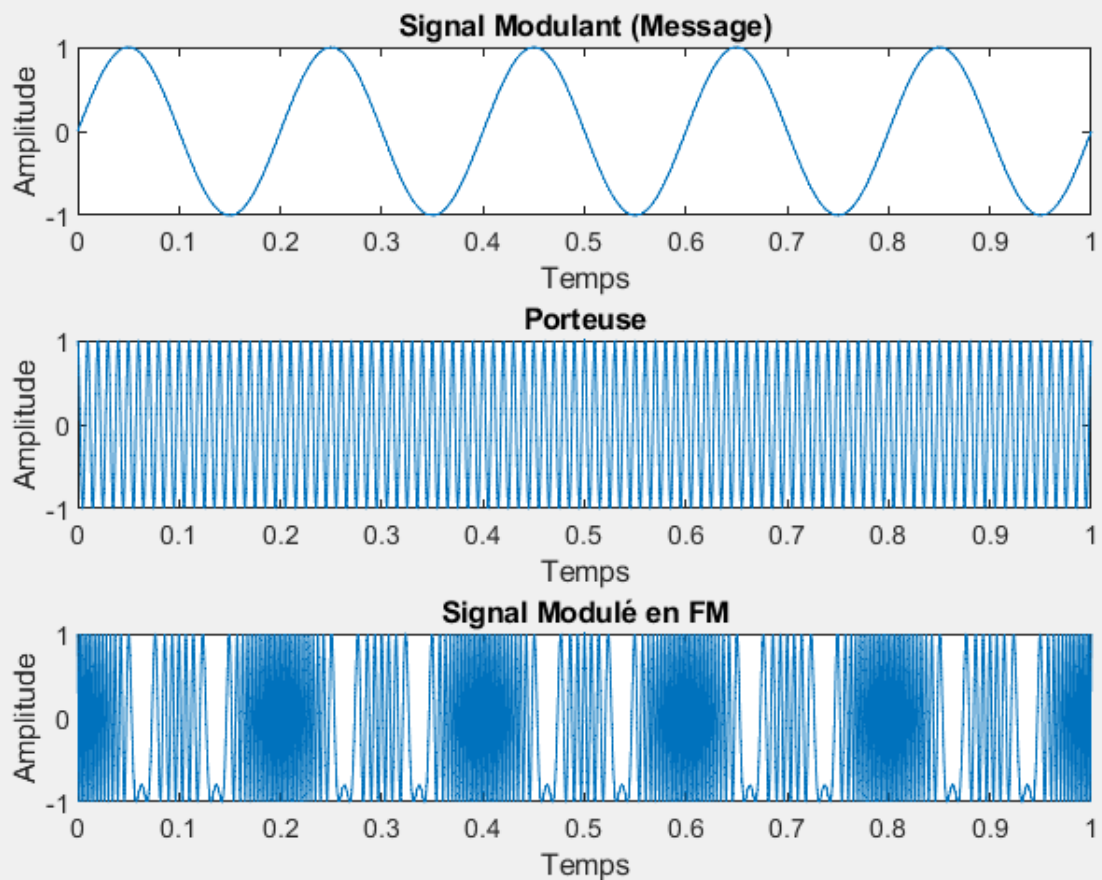
% Signal modulant (message)
message = sin(2*pi*5*t); % Signal sinusoïdal de 5 Hz

% Signal modulé en FM
kf = 50; % Sensibilité de la fréquence (constante de modulation)
signal_module = cos(2*pi*100*t + kf*message);
```

```
% Tracé des signaux
subplot(3,1,1);
plot(t, message);
title('Signal Modulant (Message)');
xlabel('Temps');
ylabel('Amplitude');

subplot(3,1,2);
plot(t, cos(2*pi*100*t));
title('Porteuse');
xlabel('Temps');
ylabel('Amplitude');

subplot(3,1,3);
plot(t, signal_module);
title('Signal Modulé en FM');
xlabel('Temps');
ylabel('Amplitude');
```



# Titre du Projet : Simulation de Modulation Numérique et Démodulation en MATLAB

## Objectif du Projet :

Comprendre, simuler et analyser les techniques de modulation numérique, ainsi que la démodulation, pour évaluer les performances du système de communication.

Ce projet permettra aux étudiants de se familiariser avec les techniques de modulation numérique, de comprendre les défis liés à la démodulation, et d'analyser les performances des systèmes de communication numérique en présence de bruit.

## Étape 1 : Modulation Numérique

### 1.1. Génération du Signal Modulant :

- Créez un signal modulant, qui peut être un signal binaire aléatoire ou un signal sinusoïdal.
- Choisissez la fréquence et la durée du signal modulant.

### 1.2. Modulation ASK :

- Implémentez la modulation par déplacement d'amplitude (ASK) en modulant le signal modulant.
- Choisissez une fréquence porteuse appropriée.
- Créez le signal modulé en ASK.

### 1.3. Modulation PSK :

- Implémentez la modulation par déplacement de phase (PSK) en utilisant le même signal modulant.
- Choisissez le nombre de phases (par exemple, BPSK, QPSK, 8PSK, etc.).
- Générez le signal modulé en PSK.

### 1.4. Simulation :

- Créez un canal de transmission en ajoutant un bruit gaussien blanc au signal modulé.
- Transmettez le signal modulé à travers le canal.

## Étape 2 : Démodulation

### 2.1. Démodulation ASK :

- Implémentez la démodulation ASK en détectant le seuil (décision) pour récupérer le signal modulant.
- Calculez le taux d'erreur de bit (BER) en comparant le signal modulant original et le signal récupéré.

### 2.2. Démodulation PSK :

- Implémentez la démodulation PSK en utilisant une détection de phase pour récupérer le signal modulant.

- Évaluez le taux d'erreur de bit (BER) pour le PSK.

### Étape 3 : Analyse des Performances

#### 3.1. Évaluez le BER :

- Comparez les performances de la modulation ASK et PSK en fonction du SNR (rapport signal/bruit).
- Tracez des courbes BER vs. SNR pour chaque modulation.

#### 3.2. Analysez les résultats :

- Comparez les avantages et les inconvénients de l'ASK et du PSK en termes de robustesse au bruit.
- Identifiez les applications potentielles pour chaque type de modulation.

### Étape 4 : Rapport Final

#### 4.1. Préparez un rapport détaillé :

- Présentez les objectifs du projet, les étapes de mise en œuvre et les résultats obtenus.
- Incluez des graphiques de performances (courbes BER vs. SNR).
- Analysez les résultats et tirez des conclusions sur les avantages et les limites des techniques de modulation numérique.
- Discutez des applications pratiques de l'ASK et du PSK.