

# 1-1 Matériel physique

## 00. Avant propos sur le réseau

Avant de plonger dans les aspects techniques des réseaux informatiques, il est essentiel de comprendre comment nous en sommes arrivés là. Cette histoire commence dans les années 1960, une période marquée par la guerre froide et une course technologique sans précédent.

### 00.1 Les débuts d'ARPANET (1960-1970)

Dans le contexte tendu de la guerre froide, les États-Unis cherchaient à maintenir leur supériorité technologique. En 1957, l'URSS avait lancé Spoutnik, créant une onde de choc dans le monde occidental. En réponse, le département de la Défense américain créa l'ARPA (Advanced Research Projects Agency) en 1958, qui allait devenir le berceau d'ARPANET. Le projet DARPA (rebaptisé ainsi plus tard) avait un objectif crucial : créer un réseau de communication qui pourrait survivre à une attaque nucléaire. La solution ? Un réseau décentralisé, où l'information pourrait emprunter différents chemins pour atteindre sa destination. Cette approche révolutionnaire s'opposait aux architectures centralisées traditionnelles de l'époque. Les premiers pas concrets d'ARPANET furent réalisés en 1969, lorsque quatre nœuds furent interconnectés :

L'université de Californie à Los Angeles (UCLA) Le Stanford Research Institute (SRI) L'université de Californie à Santa Barbara (UCSB) L'université de l'Utah

Ces connexions utilisaient des lignes téléphoniques louées et des ordinateurs spécialisés appelés IMPs (Interface Message Processors), les ancêtres de nos routeurs actuels. Le débit était de 50 kbit/s, une vitesse qui nous paraît dérisoire aujourd'hui mais qui était révolutionnaire à l'époque. Le protocole initial utilisé était le NCP (Network Control Protocol), qui permettait la communication entre les différents nœuds. Bien que rudimentaire comparé aux standards actuels, ce protocole a posé les bases de ce qui allait devenir le TCP/IP quelques années plus tard. Les premiers services développés sur ARPANET étaient :

Le transfert de fichiers L'accès à distance aux ordinateurs La messagerie électronique (qui fut inventée en 1971)

À la fin de l'année 1970, ARPANET comptait déjà 13 nœuds, démontrant le succès et le potentiel de cette nouvelle approche réseau.

## 00.2 L'évolution vers Internet (1970-1990)

La transformation d'ARPANET en ce que nous connaissons aujourd'hui comme Internet s'est faite progressivement, marquée par plusieurs innovations majeures. La naissance de TCP/IP : Au début des années 1970, les chercheurs Vinton Cerf et Bob Kahn ont identifié les limites du protocole NCP, notamment son incapacité à gérer les communications entre différents types de réseaux. En 1974, ils proposent alors le protocole TCP (Transmission Control Protocol), rapidement suivi de l'IP (Internet Protocol). Cette suite protocolaire TCP/IP apportait deux avancées majeures :

La possibilité d'interconnecter des réseaux hétérogènes Une meilleure fiabilité dans la transmission des données grâce au découpage en paquets

- La transition d'ARPANET vers Internet : Le 1er janvier 1983, marqua un tournant historique : ce fut le "flag day", jour où tous les ordinateurs d'ARPANET durent basculer de NCP vers TCP/IP. Cette migration obligatoire permit :
- L'interconnexion avec d'autres réseaux émergents La création des premiers backbones (épines dorsales du réseau) L'apparition des premiers fournisseurs d'accès commerciaux
- L'apparition du DNS : Face à la croissance du réseau, la mémorisation des adresses IP devint rapidement problématique. En 1984, Paul Mockapetris proposa le DNS (Domain Name System) qui :
  - Permettait d'associer des noms plus facilement mémorisables aux adresses IP
  - Introduisait une hiérarchie dans les noms de domaine (.com, .edu, .org, etc.)
  - Décentralisait la gestion des noms de domaine
- La démocratisation des réseaux locaux : Les années 1980 virent l'émergence des réseaux locaux (LAN) avec :
  - L'apparition d'Ethernet (standardisé en 1983)
  - Le développement des premiers hubs et switches
  - L'adoption massive du câblage en paire torsadée
  - La standardisation du protocole 802.3 par l'IEEE

Cette période fut également marquée par l'apparition des premiers ordinateurs personnels et la création des premières entreprises de networking comme Cisco (1984). Les réseaux sortaient progressivement du domaine militaire et universitaire pour entrer dans les entreprises et bientôt, les foyers. À la fin des années 1980, Internet comptait déjà plus de 100 000 ordinateurs

connectés, préfigurant l'explosion qui allait suivre dans les années 1990 avec l'apparition du World Wide Web.

- L'aube du World Wide Web : La fin des années 1980 et le début des années 1990 marquent un tournant décisif avec l'invention du World Wide Web par Tim Berners-Lee au CERN. En 1989, il propose un système révolutionnaire basé sur :
  - Le protocole HTTP (HyperText Transfer Protocol) pour le transfert des données
  - Le langage HTML pour la création de pages web
  - Le concept d'URL pour localiser les ressources

Le premier site web est mis en ligne en 1991, et le CERN rend la technologie publique en 1993. Cette décision historique, couplée à l'apparition des premiers navigateurs graphiques comme Mosaic, puis Netscape Navigator, marque le début de la démocratisation d'Internet tel que nous le connaissons aujourd'hui.

### 00.3 Les grandes évolutions des réseaux physiques

L'évolution des supports physiques a été déterminante dans le développement des réseaux, chaque innovation apportant son lot d'améliorations en termes de performances et de fiabilité.

Du câble coaxial à la paire torsadée :

Les premiers réseaux utilisaient le câble coaxial, hérité des technologies de télécommunication :

- Le câble coaxial épais (10BASE5) ou "thick ethernet"
- Le câble coaxial fin (10BASE2) ou "thin ethernet"

Ces câbles présentaient plusieurs inconvénients :

- Installation complexe et peu flexible
- Vulnérabilité aux ruptures physiques
- Coût élevé

L'arrivée de la paire torsadée dans les années 1990 a révolutionné le câblage réseau :

- Catégorie 3 (10 Mbps)
- Catégorie 5 (100 Mbps)
- Catégorie 5e, 6, 6a (1 Gbps et plus)

Avantages majeurs :

- Installation plus simple et moins coûteuse
- Meilleure résistance aux interférences électromagnétiques
- Facilité de maintenance et de dépannage

L'avènement de la fibre optique :

La fibre optique représente une révolution technologique majeure :

- Transmission par impulsions lumineuses
- Débits considérablement plus élevés (plusieurs Tbps possibles)
- Immunité aux interférences électromagnétiques
- Portée beaucoup plus importante (plusieurs dizaines de kilomètres)

Elle existe en deux variantes principales :

- Monomode (longue distance, télécommunications)
- Multimode (courte distance, réseaux locaux)

L'émergence des technologies sans fil :

Parallèlement, les technologies sans fil ont connu un développement fulgurant :

- Wi-Fi : De 802.11b (11 Mbps) au Wi-Fi 6 (plusieurs Gbps)
- Bluetooth : Communication courte portée
- Réseaux cellulaires : Du 1G au 5G
- Technologies émergentes : Li-Fi, WiGig, etc.

L'augmentation des débits au fil du temps montre une progression exponentielle :

- 1980 : 10 Mbps (Ethernet)
- 1995 : 100 Mbps (Fast Ethernet)
- 1999 : 1 Gbps (Gigabit Ethernet)
- 2002 : 10 Gbps
- 2010 : 100 Gbps

- Aujourd'hui : Plusieurs Tbps sur fibre optique

Cette évolution continue des supports physiques a permis :

- L'explosion des services en ligne
- Le développement du cloud computing
- L'émergence de nouvelles applications (streaming HD, réalité virtuelle, etc.)
- La démocratisation de l'accès à Internet haut débit

## 00.4 L'importance des réseaux aujourd'hui

L'interconnexion mondiale : En quelques décennies, les réseaux sont devenus l'épine dorsale de notre société moderne :

- Plus de 5 milliards d'utilisateurs Internet dans le monde
- Des millions de kilomètres de câbles sous-marins reliant les continents
- Des infrastructures critiques reposant sur les réseaux (banques, hôpitaux, énergie)
- Une connectivité omniprésente (mobiles, objets connectés, véhicules)

L'impact sur l'économie et la société : La transformation numérique a bouleversé tous les secteurs :

- Le e-commerce représente une part croissante des échanges commerciaux
- Le télétravail est devenu une réalité pour des millions de personnes
- L'éducation en ligne permet l'accès au savoir à l'échelle mondiale
- Les réseaux sociaux ont transformé nos modes de communication
- L'économie numérique génère des billions de dollars chaque année

Les nouveaux enjeux : L'évolution des réseaux fait face à de nouveaux défis :

- L'Internet des Objets (IoT) : Des milliards d'objets connectés à gérer
- Le Edge Computing : Rapprocher le traitement des données des utilisateurs
- La 5G et bientôt la 6G : Permettre de nouvelles applications (véhicules autonomes, chirurgie à distance)
- Le Green IT : Réduire l'impact environnemental des infrastructures réseau
- La cybersécurité : Protéger les données et les infrastructures

Les défis futurs : Les réseaux devront répondre à des exigences toujours plus importantes :

- La souveraineté numérique des nations

- La fracture numérique à combler
- La gestion de la confidentialité et de la vie privée
- L'explosion du volume de données (Big Data)
- L'adaptation aux nouvelles technologies (Quantum Computing, IA)

Cette révolution numérique continue de s'accélérer, rendant la compréhension des réseaux fondamentale pour :

- Les professionnels de l'IT
- Les décideurs et entrepreneurs
- Les citoyens qui doivent comprendre cet environnement numérique
- Les futures générations qui devront faire face à ces défis

Nous avons ainsi terminé notre voyage historique, des premiers pas d'ARPANET à l'omniprésence actuelle des réseaux. Cette base historique nous permet de mieux comprendre les enjeux techniques que nous allons aborder dans les prochaines parties du cours.

## 01. Les topologies réseau

---

### 01.1 Introduction aux topologies de base

La topologie réseau est l'arrangement physique ou logique des différents éléments d'un réseau informatique. C'est en quelque sorte la "carte routière" qui définit comment les différents équipements communiquent entre eux. Comprendre les topologies est fondamental car elles influencent directement les performances, la fiabilité et le coût d'un réseau.

Définition d'une topologie réseau :

Une topologie réseau définit :

- L'organisation des connexions entre les équipements, ce qui comprend non seulement l'agencement des liens de communication comme les câbles, fibres et ondes, mais aussi tous les points de connexion et les équipements d'interconnexion tels que les switches, routeurs et hubs qui forment l'infrastructure du réseau.
- Les chemins que peuvent emprunter les données en établissant clairement les routes principales et alternatives, les possibilités de redondance, ainsi que les points de passage obligatoires qui structurent la circulation de l'information.

- La manière dont les équipements communiquent en définissant précisément les méthodes d'accès au support, la gestion des priorités de transmission et les mécanismes de gestion des collisions qui garantissent une communication efficace.
- La structure physique qui englobe la disposition réelle des équipements, toutes les contraintes liées à l'installation et le respect des distances maximales imposées par les technologies utilisées.
- La structure logique qui détermine les flux de données, la sélection des protocoles et la manière dont le réseau est segmenté pour optimiser les communications.

L'importance du choix d'une topologie : Le choix d'une topologie impacte :

- La facilité d'installation et de maintenance qui englobe tous les aspects pratiques du réseau, depuis l'accessibilité des équipements pour la maintenance quotidienne jusqu'à la simplicité du câblage et de son organisation, en passant par la capacité à diagnostiquer rapidement les pannes et à intervenir sur le réseau sans nécessiter une interruption complète du service.
- La capacité d'évolution du réseau qui détermine la flexibilité de l'infrastructure, permettant d'ajouter de nouveaux équipements, de modifier la structure sans nécessiter une refonte complète, de s'adapter aux nouvelles technologies émergentes et de gérer efficacement l'augmentation progressive du trafic réseau.
- La résistance aux pannes qui constitue un élément crucial, englobant l'identification des points uniques de défaillance potentiels, la capacité du réseau à continuer de fonctionner en mode dégradé, l'estimation du temps nécessaire pour rétablir le service après un incident et l'évaluation de l'impact d'une panne sur l'ensemble de l'infrastructure.
- Les performances globales qui regroupent tous les aspects quantitatifs du réseau, notamment les débits maximaux possibles, la latence inhérente à l'architecture choisie, les mécanismes de gestion de la congestion et les possibilités de mise en place d'une qualité de service adaptée aux besoins.

Les critères de sélection doivent prendre en compte :

- Le budget disponible qui ne se limite pas au simple coût des équipements actifs, mais englobe l'ensemble des dépenses liées au câblage, à l'installation, à la maintenance régulière et aux évolutions futures prévisibles de l'infrastructure.
- Le niveau de fiabilité requis qui doit être évalué en fonction du taux de disponibilité attendu, de la tolérance aux pannes nécessaire pour les applications critiques, et des besoins spécifiques en matière de redondance pour garantir la continuité de service.
- La facilité de maintenance qui doit être analysée en tenant compte des compétences techniques disponibles en interne, des outils de supervision nécessaires pour assurer un

suivi efficace, de la fréquence prévue des interventions et des besoins en documentation et formation pour l'équipe technique.

Types de topologies :

- La topologie physique est celle qui se matérialise dans le monde réel. Elle représente l'agencement concret des équipements en prenant en compte la disposition des postes de travail, l'emplacement stratégique des équipements d'interconnexion et l'organisation des locaux techniques, tout en respectant les contraintes architecturales du bâtiment. Elle définit également le parcours physique des signaux à travers les chemins de câbles et les points de concentration, en tenant compte des distances maximales autorisées et des types de média utilisés. Cette topologie détermine enfin les contraintes matérielles incluant le respect des normes de câblage, la prise en compte des contraintes environnementales, la mise en place de la sécurité physique et la gestion des alimentations électriques.
- La topologie logique, quant à elle, décrit la manière dont les données circulent réellement dans le réseau, indépendamment de la disposition physique des équipements. Elle englobe la gestion des flux applicatifs, la définition des routes principales et alternatives, ainsi que la segmentation du trafic et les mécanismes de contrôle. Elle influence directement le choix des protocoles en définissant les méthodes d'accès au média, la gestion des collisions, les priorités de trafic et les mécanismes de routage. Cette topologie définit également l'organisation logique du réseau à travers la mise en place des VLANs, la délimitation des domaines de diffusion, l'établissement des zones de sécurité et l'implémentation des politiques de routage.

## 01.2 Les topologies fondamentales et leurs caractéristiques

Avant de détailler chaque topologie, il est important de comprendre que chacune répond à des besoins spécifiques et présente ses propres particularités. Nous allons examiner les quatre topologies fondamentales qui ont façonné l'histoire des réseaux et continuent d'influencer les architectures modernes.

### La topologie en bus

Cette topologie, une des plus anciennes, repose sur un principe simple mais efficace :

- Le principe de fonctionnement s'articule autour d'un câble principal (le bus) auquel tous les équipements sont connectés en série. Les données émises par un équipement se propagent sur toute la longueur du bus et sont "vues" par tous les autres équipements, mais seul le destinataire désigné par l'adresse les traite effectivement.

- La méthode d'accès au média utilise généralement le protocole CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), où chaque équipement doit écouter le bus avant d'émettre et être capable de détecter les collisions quand deux équipements émettent simultanément.
- Les avantages incluent la simplicité de mise en œuvre, le faible coût d'installation initial et la facilité à comprendre le fonctionnement du réseau, particulièrement utile pour la formation et le dépannage basique.
- Les inconvénients sont nombreux et expliquent son abandon progressif : une rupture du câble principal paralyse l'ensemble du réseau, les performances se dégradent rapidement avec l'augmentation du nombre d'équipements, et l'extensibilité est limitée par la longueur maximale du bus et le nombre de connexions possibles.

## La topologie en étoile

Cette topologie, devenue aujourd'hui un standard, se caractérise par sa structure centralisée :

- La structure repose sur un équipement central (switch ou hub) auquel chaque équipement du réseau est directement connecté via son propre câble. Cette organisation permet une gestion individualisée de chaque connexion et simplifie considérablement la détection des problèmes.
- L'équipement central joue un rôle crucial car il gère l'ensemble du trafic réseau. Dans le cas d'un switch moderne, il analyse les adresses de destination et ne transmet les données qu'aux ports concernés, optimisant ainsi l'utilisation de la bande passante et réduisant les risques de collision.
- Les forces de cette topologie sont nombreuses : la facilité d'ajout ou de retrait d'équipements sans perturber le reste du réseau, l'isolation des problèmes à une seule branche de l'étoile, et la possibilité d'utiliser des technologies différentes sur chaque branche.
- Les faiblesses se concentrent principalement sur la dépendance à l'équipement central, dont la panne peut paralyser l'ensemble du réseau, et sur le coût plus élevé en câblage puisque chaque équipement nécessite son propre câble jusqu'au point central.

## La topologie en anneau

Cette topologie, particulièrement utilisée dans les technologies comme Token Ring, présente une approche unique :

- La circulation des données suit un chemin circulaire unidirectionnel, chaque équipement recevant les données de son prédecesseur et les transmettant à son successeur. Ce système forme une boucle fermée où l'information circule de manière séquentielle.
- Les mécanismes de redondance peuvent être mis en place grâce à un double anneau fonctionnant en sens inverse, permettant de maintenir la connectivité même en cas de rupture d'un des anneaux.
- Les points forts incluent une gestion déterministe de l'accès au média (particulièrement avec le système du jeton), une égalité d'accès pour tous les équipements, et des performances prévisibles même en charge.
- Les limitations concernent principalement la complexité d'administration, le risque de paralysie en cas de défaillance d'un équipement si la redondance n'est pas implémentée, et la latence qui augmente avec le nombre d'équipements puisque chaque nœud doit relayer les données.

### La topologie maillée

Cette topologie, la plus complexe mais aussi la plus robuste, se caractérise par sa redondance maximale :

- Les connexions multiples permettent à chaque équipement d'être relié directement à plusieurs autres nœuds du réseau, créant ainsi de nombreux chemins possibles pour les données.
- La redondance et la résilience sont maximales car la perte d'une connexion n'isole pas les équipements, le trafic pouvant emprunter des chemins alternatifs.
- Les coûts sont généralement élevés en raison du nombre important de connexions nécessaires et de la complexité des équipements devant gérer plusieurs liens simultanés.
- La complexité de gestion nécessite des protocoles de routage sophistiqués pour déterminer le meilleur chemin à utiliser et gérer la redondance de manière efficace.

## 01.3 Les topologies hybrides modernes

Les réseaux modernes utilisent rarement une topologie pure, préférant combiner les avantages de différentes approches pour répondre aux besoins complexes des organisations actuelles.

### L'étoile étendue (Extended Star)

Cette évolution de la topologie en étoile est aujourd'hui la plus répandue dans les entreprises :

- Le principe repose sur une hiérarchie d'équipements centraux, chaque switch de niveau inférieur étant connecté à un ou plusieurs switches de niveau supérieur
- Cette organisation permet une segmentation logique du réseau, facilitant la gestion du trafic et la sécurisation des données
- Les avantages incluent une excellente scalabilité, une maintenance simplifiée et la possibilité d'implémenter facilement des technologies comme les VLANs
- La redondance peut être mise en place à chaque niveau, offrant une excellente tolérance aux pannes

### L'arbre hiérarchique (Hierarchical Tree)

Dérivée de l'étoile étendue, cette topologie structure le réseau en niveaux distincts :

- Le niveau cœur (Core) assure le routage rapide entre les différentes parties du réseau
- Le niveau distribution (Distribution) gère les politiques de routage et de sécurité
- Le niveau accès (Access) connecte les équipements finaux
- Cette séparation claire des fonctions permet une meilleure gestion des performances et de la sécurité

### L'anneau en étoile (Star-Ring)

Cette topologie hybride combine les avantages de l'anneau et de l'étoile :

- Les équipements sont connectés en étoile à des concentrateurs.
- Les concentrateurs sont eux-mêmes reliés en anneau.
- Cette configuration offre une bonne redondance tout en simplifiant la gestion des connexions utilisateurs.
- Elle est particulièrement adaptée aux réseaux métropolitains (MAN) et aux réseaux de campus.

### Le maillage partiel (Partial Mesh)

Version optimisée de la topologie maillée :

- Seuls les nœuds stratégiques sont interconnectés de manière redondante.
- Les autres équipements utilisent des connexions simples vers les nœuds principaux.
- Cette approche offre un bon compromis entre coût et résilience.
- Elle est couramment utilisée dans les réseaux WAN et les backbones d'entreprise.

### Les solutions mixtes

Les réseaux d'entreprise modernes combinent souvent plusieurs approches :

- Le cœur du réseau peut être maillé pour la résilience.
- La distribution utilise souvent une topologie en étoile étendue.
- L'accès peut être organisé en arbre ou en étoile simple.
- Les connexions redondantes sont établies aux points critiques uniquement.

Considérations pour le choix d'une topologie hybride :

- Les besoins en performance :
  - Débits nécessaires à chaque niveau
  - Latence acceptable
  - Points de congestion potentiels
- La tolérance aux pannes :
  - Identification des équipements critiques
  - Niveau de redondance nécessaire
  - Temps de basculement acceptable
- La facilité de gestion :
  - Complexité de la configuration
  - Outils de supervision nécessaires
  - Compétences requises
- L'évolutivité :
  - Capacité d'extension future
  - Compatibilité avec les nouvelles technologies
  - Facilité de mise à niveau

## 01.4 Cas d'usage et choix selon les besoins

Le choix d'une topologie réseau est une décision stratégique qui impacte durablement le fonctionnement de l'organisation. Il n'existe pas de solution universelle, mais une analyse méthodique des besoins permet d'identifier la meilleure approche.

### Critères de choix fondamentaux

La sélection d'une topologie réseau doit résulter d'une analyse approfondie des besoins organisationnels et techniques :

- Les contraintes budgétaires constituent souvent le premier facteur limitant. Au-delà du coût d'acquisition des équipements, il faut considérer l'ensemble du cycle de vie : installation, formation du personnel, maintenance préventive et corrective, mises à niveau futures, et coûts énergétiques. Une topologie apparemment économique à l'achat peut s'avérer coûteuse sur le long terme si elle nécessite une maintenance intensive
- Le niveau de disponibilité requis doit être évalué service par service. Certaines applications critiques peuvent nécessiter une disponibilité de 99,999% (soit moins de 5 minutes d'interruption par an), impliquant une redondance complète, tandis que d'autres services peuvent tolérer des interruptions occasionnelles. Cette analyse influencera directement le degré de redondance nécessaire dans la topologie
- Les compétences techniques disponibles en interne sont cruciales pour la maintenance quotidienne. Une topologie complexe avec de nombreuses redondances et des protocoles sophistiqués nécessite une équipe qualifiée et disponible. À l'inverse, une petite structure pourrait privilégier une topologie plus simple, quitte à sacrifier certaines fonctionnalités avancées
- Les perspectives d'évolution doivent être anticipées sur 5 à 10 ans : croissance prévisible de l'organisation, nouveaux usages, technologies émergentes. La topologie choisie doit pouvoir s'adapter sans nécessiter une refonte complète

## Exemples d'implémentation

### Réseaux d'entreprise

La topologie en étoile étendue s'est imposée comme un standard pour les entreprises de taille moyenne à grande. Son organisation hiérarchique répond parfaitement aux besoins de segmentation et de sécurité :

- Le cœur de réseau redondant assure une disponibilité maximale des services critiques. Généralement constitué de deux switches de niveau 3 en redondance active/active ou active/passive, il garantit la continuité de service même en cas de panne d'un équipement
- La distribution par étage ou par service permet une gestion granulaire du trafic. Chaque switch de distribution peut appliquer des politiques de QoS spécifiques, des règles de routage distinctes et des mécanismes de sécurité adaptés aux besoins du service qu'il dessert

- Les connexions utilisateurs en étoile simple offrent un excellent rapport coût/performance. La panne d'un port ou d'un câble n'affecte qu'un seul utilisateur, simplifiant le dépannage

## Réseaux domestiques

Les réseaux domestiques privilégient la simplicité et la facilité d'utilisation :

- La box Internet joue le rôle de point central, concentrant les fonctions de routeur, switch et point d'accès Wi-Fi. Cette approche tout-en-un simplifie la gestion mais crée un point unique de défaillance
- Les connexions filaires directes sont réservées aux équipements nécessitant une bande passante importante ou une latence minimale : Smart TV, console de jeux, NAS
- Le réseau Wi-Fi assure la mobilité mais doit être correctement dimensionné pour couvrir l'ensemble de l'habitat. L'utilisation de répéteurs ou de systèmes mesh peut être nécessaire dans les grandes surfaces

## Réseaux industriels

Les environnements industriels imposent des contraintes particulières qui influencent fortement le choix de la topologie :

- La topologie en anneau ou maillée pour les équipements critiques est privilégiée car la continuité de production est vitale. Un arrêt non planifié peut coûter des milliers d'euros par minute. Cette approche garantit qu'une panne unique ne pourra pas interrompre la communication :
  - La redondance des liens critiques permet un basculement automatique en quelques millisecondes
  - La séparation physique des réseaux de contrôle isole le trafic industriel sensible du trafic bureautique
  - Les chemins multiples assurent que les données critiques peuvent toujours atteindre leur destination
- Les équipements non-critiques (terminaux de supervision, stations de programmation) utilisent une topologie en étoile plus économique. La perte momentanée de ces équipements n'impacte pas directement la production
- La segmentation du trafic est cruciale dans l'industrie. Les communications temps réel des automates ne doivent jamais être perturbées par d'autres types de trafic. Cette séparation peut être physique ou logique (VLAN) selon le niveau de criticité

## Réseaux de campus

Les campus universitaires ou d'entreprise présentent des défis spécifiques liés à leur étendue géographique et à la diversité des usages :

- L'architecture hiérarchique à trois niveaux s'est imposée comme la solution la plus adaptée :
  - Le cœur maillé interconnecte les différents bâtiments via des liens haut débit, généralement en fibre optique. La redondance complète à ce niveau est standard
  - La distribution assure la connexion entre le cœur et les équipements d'accès de chaque bâtiment. Elle gère également les services réseau comme le routage inter-VLAN
  - L'accès connecte les utilisateurs finaux avec des technologies adaptées à leurs besoins : Wi-Fi pour la mobilité, Ethernet pour les postes fixes

## Évolution des topologies

L'évolution des technologies et des usages transforme progressivement les topologies traditionnelles :

- Le SDN (Software Defined Networking) révolutionne l'approche du réseau :
  - La séparation du plan de contrôle et du plan de données permet une gestion centralisée plus intelligente
  - Les modifications de configuration peuvent être déployées instantanément sur l'ensemble du réseau
  - L'automatisation réduit les erreurs humaines et accélère les déploiements
- Le cloud computing impose de nouvelles contraintes :
  - Les topologies doivent s'adapter à l'hybridation croissante des infrastructures
  - La connectivité multi-sites devient la norme plutôt que l'exception
  - La bande passante doit pouvoir évoluer dynamiquement selon les besoins

## Considérations de maintenance

La maintenance n'est plus une activité périphérique mais doit être intégrée dès la conception :

- La documentation devient un élément critique :
  - Les schémas des topologies physiques et logiques doivent être maintenus à jour en temps réel
  - L'inventaire des équipements doit inclure les informations de garantie et de support
  - Les procédures d'intervention doivent être détaillées et testées régulièrement

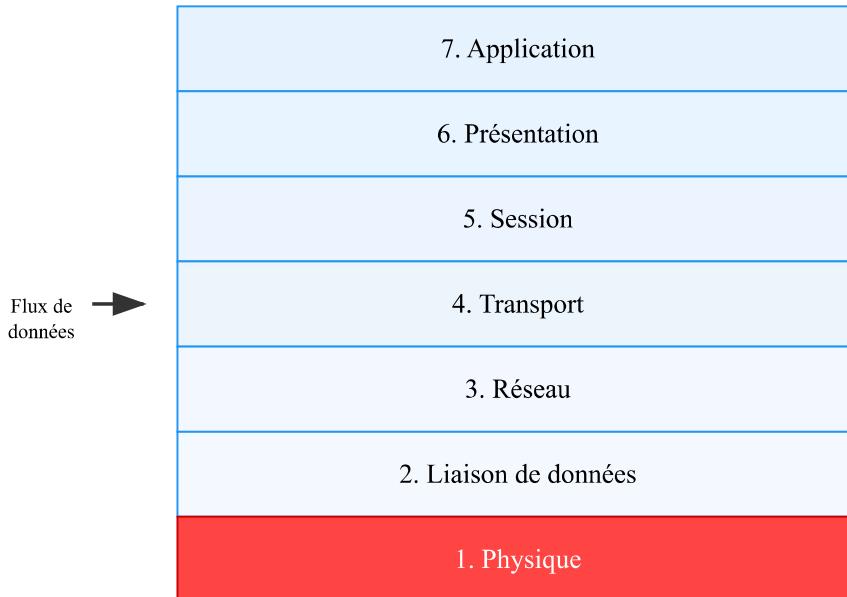
- La supervision proactive remplace la réaction aux incidents :
  - Les outils de monitoring permettent de détecter les problèmes avant qu'ils n'impactent les utilisateurs
  - Les alertes automatisées doivent être correctement calibrées pour éviter la fatigue d'alerte
  - Les tableaux de bord donnent une vision synthétique de l'état du réseau
- Le plan de reprise d'activité n'est plus une option :
  - Les procédures de basculement doivent être documentées et testées régulièrement
  - Le personnel doit être formé aux situations d'urgence
  - Les sauvegardes des configurations doivent être accessibles rapidement en cas de besoin

## 2. La couche physique du modèle OSI

---

### 2.1 Introduction au modèle OSI et la couche physique

La couche physique constitue le fondement même de toute communication réseau. C'est la première couche du modèle OSI, qui en compte sept au total. Pour bien comprendre son rôle, visualisons d'abord sa place dans l'architecture globale.



La couche physique est responsable de la transmission brute des bits sur un canal de communication. Elle définit :

- Les caractéristiques physiques des interfaces et des supports de transmission
- La représentation des bits (codage des données)
- La vitesse de transmission des données
- La synchronisation des bits
- La topologie physique du réseau
- Le mode de transmission (simplex, half-duplex, full-duplex)

### Principes fondamentaux

La couche physique transforme les données numériques en signaux qui peuvent être transmis sur le support physique. Cette transformation peut prendre plusieurs formes :

#### 1. Signaux électriques sur câbles en cuivre :

- Variations de tension
- Modulation d'amplitude
- Modulation de fréquence

## 2. Signaux lumineux dans la fibre optique :

- Présence ou absence de lumière
- Variations d'intensité lumineuse
- Différentes longueurs d'onde

## 3. Ondes électromagnétiques pour les communications sans fil :

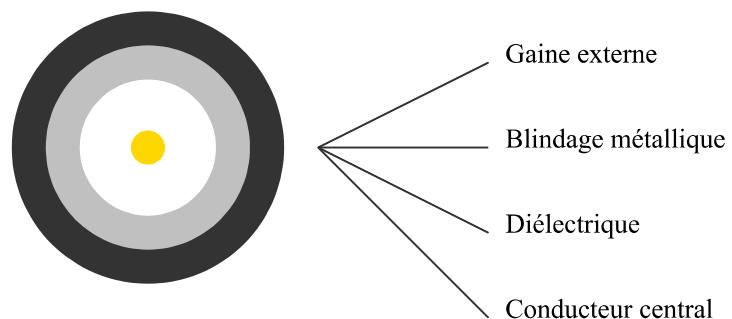
- Différentes fréquences radio
- Différentes techniques de modulation
- Diverses puissances d'émission

## 2.2 Les supports de transmission physiques

L'évolution des supports de transmission physiques reflète l'histoire des réseaux informatiques. Chaque type de support répond à des besoins spécifiques et présente ses propres caractéristiques en termes de performance, de coût et de facilité d'installation.

### Le câble coaxial : l'ancêtre robuste

Le câble coaxial, bien qu'aujourd'hui moins utilisé dans les réseaux informatiques, reste un exemple parfait pour comprendre la structure d'un support de transmission.



Le câble coaxial doit son nom à sa structure concentrique qui comprend plusieurs couches :

- Le conducteur central transporte le signal électrique
- Le diélectrique isole le conducteur central
- Le blindage métallique protège des interférences électromagnétiques
- La gaine externe assure la protection mécanique

Cette structure ingénieuse permet de :

1. Minimiser les interférences électromagnétiques
2. Transporter des signaux sur de plus longues distances
3. Maintenir une meilleure qualité de signal

### **La paire torsadée : le standard actuel**

La paire torsadée a révolutionné le câblage réseau en offrant un excellent compromis entre performance, coût et facilité d'installation. Son principe repose sur l'entrelacement de paires de fils qui permet de réduire naturellement les interférences.

Les catégories de paires torsadées se sont succédé, chacune apportant des améliorations :

#### **1. Catégorie 5 (Cat5)**

- o Premier standard largement adopté
- o Supporte le Fast Ethernet (100 Mbps)
- o Distance maximale de 100 mètres
- o Largement remplacée aujourd'hui

#### **2. Catégorie 5e (Cat5e)**

- o Amélioration de la Cat5
- o Supporte le Gigabit Ethernet
- o Meilleure immunité aux interférences
- o Encore très utilisée aujourd'hui

#### **3. Catégorie 6 (Cat6)**

- o Performances accrues
- o Bande passante de 250 MHz
- o Meilleur blindage
- o Standard actuel pour les nouvelles installations

#### **4. Catégorie 6a et supérieures**

- o Support du 10 Gigabit Ethernet
- o Bande passante de 500 MHz
- o Blindage renforcé
- o Utilisée dans les centres de données

## 2.3 La fibre optique : la révolution optique

La fibre optique représente une avancée majeure dans les technologies de transmission, utilisant la lumière plutôt que l'électricité pour transporter les données. Cette technologie a révolutionné les télécommunications en permettant des débits jusqu'alors inimaginables sur de très longues distances.



### Structure et principes de fonctionnement

La fibre optique est constituée de plusieurs couches concentriques, chacune ayant un rôle spécifique :

#### 1. Le cœur (Core)

- Filament de verre ou de plastique très pur
- Diamètre de 8 à 62,5 microns selon le type
- Support de propagation de la lumière
- Indice de réfraction précisément contrôlé

#### 2. La gaine optique (Cladding)

- Entoure le cœur
- Indice de réfraction légèrement inférieur
- Permet la réflexion totale interne
- Confine la lumière dans le cœur

### 3. La gaine externe (Coating)

- Protection mécanique
- Isolation contre l'humidité
- Identification par code couleur
- Facilite la manipulation

### Types de fibres optiques

Il existe deux grandes catégories de fibres optiques, chacune adaptée à des usages spécifiques :

#### La fibre monomode (SMF - Single Mode Fiber)

- Cœur très fin (8 à 10 microns)
- Un seul rayon lumineux
- Très longues distances (plusieurs dizaines de kilomètres)
- Utilisée pour :
  - Liaisons intercontinentales
  - Réseaux métropolitains
  - Connexions entre datacenters

#### La fibre multimode (MMF - Multi Mode Fiber)

- Cœur plus large (50 ou 62,5 microns)
- Plusieurs rayons lumineux simultanés
- Distances plus courtes (jusqu'à 2 km)
- Applications :
  - Câblage vertical des bâtiments
  - Réseaux locaux haute performance
  - Connexions courte distance en datacenter

### Avantages et limitations

La fibre optique présente de nombreux avantages :

- Très haut débit (plusieurs Térabits/seconde)
- Immunité aux interférences électromagnétiques
- Atténuation très faible sur de longues distances
- Sécurité accrue (difficile à intercepter)

- Légereté et faible encombrement

Mais elle comporte aussi quelques contraintes :

- Coût plus élevé que le cuivre
- Installation nécessitant une expertise spécifique
- Fragilité relative nécessitant des précautions
- Équipements actifs plus onéreux

## 2.4 Les technologies sans fil : la mobilité avant tout

Les technologies sans fil ont révolutionné notre façon d'utiliser les réseaux en supprimant la contrainte des câbles. Elles utilisent les ondes électromagnétiques pour transporter l'information à travers l'air.

### Les fondamentaux de la transmission sans fil

La transmission sans fil repose sur plusieurs concepts essentiels :

#### 1. Les ondes radio

- Porteuses du signal
- Différentes fréquences selon les usages
- Comportement variable selon l'environnement
- Puissance d'émission réglementée

#### 2. La modulation du signal

La modulation est la technique permettant d'encoder l'information numérique sur l'onde porteuse. Il existe plusieurs types :

- Modulation d'amplitude (AM)
- Modulation de fréquence (FM)
- Modulation de phase (PM)
- Modulations complexes combinant plusieurs techniques

### Les principales technologies

#### Le Wi-Fi (IEEE 802.11)

Le Wi-Fi est devenu incontournable dans nos vies quotidiennes. Son évolution montre l'amélioration constante des performances :

- **802.11b** (1999)

- Fréquence 2,4 GHz
- Débit théorique 11 Mbps
- Première version largement adoptée
- **802.11g** (2003)
  - Fréquence 2,4 GHz
  - Débit théorique 54 Mbps
  - Compatibilité ascendante avec 802.11b
- **802.11n** (2009)
  - Double bande 2,4/5 GHz
  - MIMO (Multiple Input Multiple Output)
  - Débits jusqu'à 600 Mbps
- **802.11ac** (2013)
  - Bande 5 GHz privilégiée
  - MU-MIMO
  - Débits supérieurs à 1 Gbps
- **802.11ax (Wi-Fi 6)** (2019)
  - Efficacité spectrale améliorée
  - OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
  - Optimisé pour les environnements denses

## Les autres technologies sans fil

### Le Bluetooth

Conçu pour les communications à courte portée, le Bluetooth est devenu essentiel pour les périphériques :

- Portée typique de 10 à 100 mètres selon la classe
- Faible consommation d'énergie
- Idéal pour les périphériques mobiles
- Bande de fréquence 2,4 GHz

### La 5G et les réseaux mobiles

L'évolution des réseaux mobiles illustre les progrès constants des technologies sans fil :

- Débits considérablement augmentés (jusqu'à 10 Gbps)
- Latence réduite (< 1ms)
- Support d'un grand nombre d'appareils connectés
- Utilisation de différentes bandes de fréquences selon les besoins

## 2.5 Les connecteurs et leurs caractéristiques

Les connecteurs sont souvent négligés mais sont pourtant cruciaux pour la qualité de la transmission.



RJ45



LC



SC

Spécifications :

RJ45 : Cat 5e/6/6a

LC : Monomode/Multimode

SC : Monomode/Multimode

### Principaux types de connecteurs

#### 1. Connecteurs cuivre

- RJ45 : le plus commun pour l'Ethernet
- RJ11 : utilisé pour la téléphonie
- BNC : ancien connecteur coaxial

#### 2. Connecteurs fibre optique

- LC (Lucent Connector) : compact, très utilisé
- SC (Subscriber Connector) : robuste et fiable
- ST (Straight Tip) : ancien mais encore présent

### 3. Caractéristiques importantes

- Qualité des contacts
- Facilité d'installation
- Résistance mécanique
- Protection contre les interférences

## 3. La transmission de l'information

---

### 3.1 Principes de base de la transmission des signaux

La transmission des données numériques n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît. Ce que nous percevons comme des "0" et des "1" doit être converti en signaux physiques qui peuvent voyager à travers différents supports de transmission.

#### Les bases de la transmission numérique

Une donnée numérique peut être transmise de plusieurs façons :

- **La transmission en tension**

- Une tension haute représente un "1"
- Une tension basse représente un "0"
- Simple à mettre en œuvre sur courte distance
- Sensible aux perturbations électromagnétiques
- Utilisée principalement en Ethernet sur cuivre

- **La transmission optique**

- La présence de lumière représente un "1"
- L'absence de lumière représente un "0"
- Immunisée aux perturbations électromagnétiques
- Nécessite une conversion électrique/optique
- Utilisée dans les fibres optiques

- **La transmission radio**

- Utilise des ondes électromagnétiques
- Nécessite une modulation du signal

- Peut utiliser différentes fréquences
- Sensible aux interférences et aux obstacles
- Base des technologies sans fil

## Les techniques de codage

Il existe plusieurs façons de coder l'information pour la rendre plus fiable lors de sa transmission :

### 1. Le codage NRZ (Non Return to Zero)

- Le plus simple et le plus direct
- Niveau haut maintenu pour un "1"
- Niveau bas maintenu pour un "0"
- Avantages :
  - Facile à implémenter
  - Utilisation efficace de la bande passante
- Inconvénients :
  - Perte de synchronisation sur longues séquences identiques
  - Présence d'une composante continue
  - Sensible aux distorsions

### 2. Le codage Manchester

- Transition au milieu de chaque bit
- Montante pour un "1"
- Descendante pour un "0"
- Avantages :
  - Auto-synchronisation (clock recovery)
  - Pas de composante continue
  - Détection d'erreurs facilitée
- Inconvénients :
  - Double bande passante nécessaire
  - Plus complexe à implémenter
  - Utilisé notamment dans l'ancien Ethernet 10BASE-T

### 3. Le codage MLT-3 (Multi-Level Transmission)

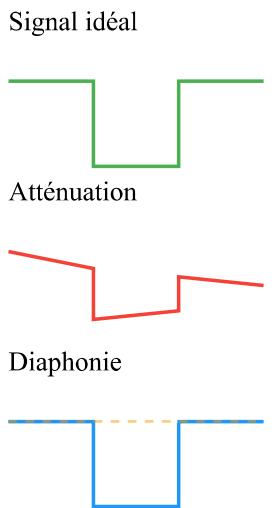
- Utilise trois niveaux de signal

- Change de niveau à chaque "1"
- Maintient le niveau pour les "0"
- Avantages :
  - Réduction des interférences électromagnétiques
  - Meilleure utilisation de la bande passante
  - Utilisé dans le Fast Ethernet
- Inconvénients :
  - Plus complexe à décoder
  - Nécessite une électronique plus sophistiquée

## 3.2 Gestion des perturbations et qualité du signal

La transmission de données numériques dans le monde réel fait face à de nombreux défis. Même le meilleur système de transmission doit composer avec différentes formes de perturbations qui peuvent dégrader la qualité du signal.

### Les types de perturbations fondamentales



L'atténuation représente le premier défi majeur de toute transmission. Imaginez une voix qui s'affaiblit avec la distance : c'est exactement ce qui se passe avec nos signaux numériques. Plus le signal parcourt une longue distance, plus il perd en puissance. Cette perte n'est pas uniforme : certaines fréquences sont plus affectées que d'autres, ce qui peut déformer le signal d'origine. Pour combattre ce phénomène, les réseaux modernes utilisent des amplificateurs ou des répéteurs, stratégiquement placés le long du parcours de transmission. Ces dispositifs

permettent de régénérer le signal avant qu'il ne devienne trop faible pour être correctement interprété.

La diaphonie constitue un second défi majeur, particulièrement présent dans les câbles multiconducteurs comme les câbles réseau. Ce phénomène se produit lorsqu'un signal transitant dans un conducteur interfère avec les signaux des conducteurs voisins. C'est un peu comme si vous entendiez la conversation de votre voisin sur votre propre ligne téléphonique. Dans les réseaux informatiques, la diaphonie peut sérieusement perturber la transmission de données. C'est pourquoi les câbles réseau modernes utilisent des paires torsadées : l'entrelacement des fils aide à annuler les interférences mutuelles. De plus, le blindage des câbles offre une protection supplémentaire contre ces perturbations.

Le bruit électromagnétique représente une troisième source majeure de perturbations. Notre environnement moderne est saturé d'ondes électromagnétiques provenant de diverses sources : téléphones mobiles, moteurs électriques, éclairages, et bien d'autres équipements. Ces perturbations peuvent s'introduire dans nos systèmes de transmission et altérer les signaux. Les effets peuvent aller d'une légère distorsion à une corruption complète des données. La lutte contre le bruit électromagnétique passe par plusieurs stratégies : le blindage des câbles, bien sûr, mais aussi une mise à la terre soignée des équipements et un routage intelligent des câbles pour éviter les sources de perturbations les plus importantes.

### Les solutions modernes

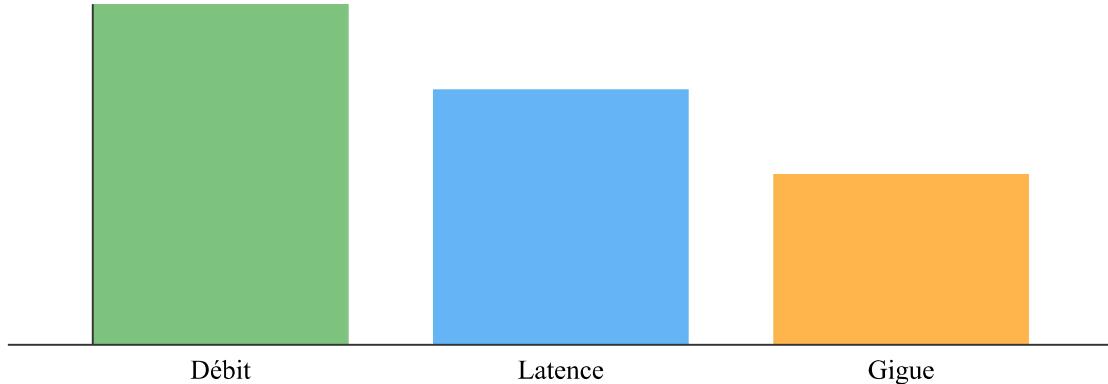
Face à ces défis, les technologies modernes de transmission ont développé des stratégies sophistiquées. L'égalisation du signal, par exemple, permet de compenser les distorsions en appliquant des corrections qui restaurent la forme originale du signal. C'est un peu comme un égaliseur audio qui ajusterait automatiquement différentes fréquences pour obtenir le meilleur son possible.

Le contrôle d'erreur joue également un rôle crucial. Les systèmes modernes ne se contentent pas de détecter les erreurs : ils peuvent souvent les corriger à la volée. Quand une correction directe n'est pas possible, des mécanismes de retransmission automatique entrent en jeu, garantissant l'intégrité des données même dans des conditions difficiles.

## 3.3 Performances et mesure de la qualité de transmission

---

En matière de réseaux, la performance n'est pas qu'une question de vitesse. Elle englobe plusieurs aspects qui, ensemble, déterminent la qualité globale d'une transmission.



Le débit représente la quantité d'informations pouvant transiter par unité de temps. C'est comme le débit d'eau dans un tuyau : plus le tuyau est large, plus le débit potentiel est important. Cependant, le débit réel dépend de nombreux facteurs : la qualité du support de transmission, les équipements utilisés, et même la distance à parcourir. Un câble en fibre optique moderne peut atteindre des débits de plusieurs térbits par seconde, tandis qu'une connexion sans fil sera généralement plus modeste.

La latence, quant à elle, représente le temps nécessaire à un paquet pour aller d'un point à un autre du réseau. Elle est cruciale pour les applications en temps réel comme la visioconférence ou les jeux en ligne. Une latence élevée se traduit par des délais perceptibles qui peuvent rendre ces applications inutilisables. La latence dépend non seulement de la distance physique à parcourir, mais aussi du nombre d'équipements traversés et de leur charge de travail.

La gigue, souvent négligée mais tout aussi importante, représente la variation de la latence dans le temps. Imaginez une conversation où les mots arrivent tantôt rapidement, tantôt avec retard : c'est exactement ce que provoque une gigue élevée sur une communication réseau. Les équipements modernes utilisent des tampons (buffers) pour compenser la gigue, mais cela se fait au prix d'un délai supplémentaire.

## Conclusion du module

Au terme de ce module sur le matériel physique, nous avons exploré les fondements mêmes des réseaux informatiques, depuis les premiers câbles coaxiaux jusqu'aux technologies sans fil

modernes. Cette compréhension des aspects physiques est essentielle car elle constitue la base sur laquelle reposent toutes les couches supérieures du modèle OSI.

La diversité des supports de transmission et des techniques utilisées reflète la complexité des besoins en communication moderne : haute performance pour les centres de données, fiabilité pour les infrastructures critiques, mobilité pour les utilisateurs finaux. Chaque technologie présente ses avantages et ses contraintes, et le choix de la solution appropriée dépend toujours du contexte spécifique de déploiement. Cette connaissance des fondamentaux permet non seulement de mieux concevoir les réseaux, mais aussi d'en assurer efficacement la maintenance et l'évolution.