

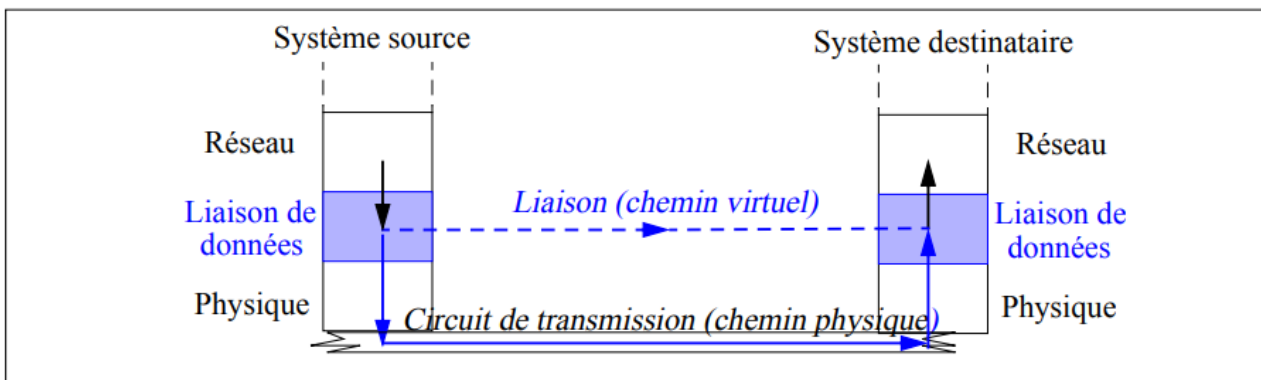
Chapitre 3

Couche Liaison de Données

1. Introduction

La couche liaison de données fournit les moyens fonctionnels et procéduraux nécessaires à l'établissement, au maintien et à la libération des connexions de liaison de données entre entités du réseau. Elle détecte et corrige, si possible, les erreurs dues au support physique et signale à la couche réseau les erreurs irrécupérables. Elle supervise le fonctionnement de la transmission et définit la structure syntaxique des messages, la manière d'enchaîner les échanges selon un protocole normalisé ou non.

Une connexion de liaison de données est réalisée à l'aide d'une ou plusieurs liaisons physiques entre deux machines adjacentes dans le réseau donc sans nœuds intermédiaires entre elles.

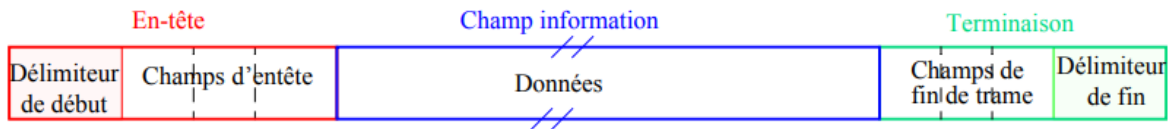


2. Rôle de la couche liaison de données

- Découpage des données en trames (délimitation des unités de données par identification du début et de fin).
- Contrôle d'erreurs (assurer le transfert sans erreurs des données).
- Contrôle de flux (assurer un transfert fiable des données).
- Contrôle d'accès au média de transmission (quelle machine a le droit d'utiliser le support pour envoyer les données).

3. Délimitation de trames

La trame est l'unité de donnée du protocole de niveau liaison (**L_PDU**). Une trame est une suite d'éléments binaires qui ont été rassemblés pour former un bloc. Ce bloc doit être transmis de l'émetteur vers le récepteur de telle sorte que ce dernier soit capable de reconnaître son début et sa fin. Une trame a le format général suivant :



Remarque : Il y a des trames avec des délimiteurs de début (SD : Starting Delimiter) et de fin (ED : Ending Delimiter) et il y a d'autres avec délimiteurs de début uniquement.

- **Délimiteurs de trames**

Un délimiteur peut être :

- Soit une séquence particulière de caractère. Exemple : les séquences **(DLE) STX** et **(DLE) ETX** du protocole BSC d'IBM.
- Soit une suite particulière de bits. Exemple : le fanion **01111110** du protocole HDLC.
- Soit un codage particulier : des séquences, non-utilisées pour coder les éléments binaires, servent à délimiter les trames.

- **Utilisation d'un compteur de caractères**

L'en-tête de trame contient un champ indiquant la longueur de la trame. Il est inapplicable puisque l'on ne sait pas où commence la trame !

4. Contrôle d'erreurs

Les protocoles de la couche physique ne sont pas parfaits mais subissent des erreurs bit. Les phénomènes perturbateurs peuvent entraîner des erreurs de transmission en inversant les bits de l'information transmise.

Une liaison est caractérisée par son taux d'erreurs T_e appelé **BER** (Bit Error Rate).

Exemple :

Info. transmise : 1110001100111100 → Info. reçue : 1110101100101100

$$T_e = 2/16 = 12,5\%$$

Le taux d'erreur bit dépend surtout du média de transmission par exemple :

fibres optiques : $\sim 10^{-12}$, Canal radio: $\sim 10^{-5}$

4.1. Critères d'efficacité d'un contrôle d'erreur

- La capacité de détecter / corriger des erreurs multiples.
- La capacité de détecter / corriger des rafales d'erreurs d'une certaine longueur.
- La probabilité d'accepter une trame erronée comme correcte.
- Le Rendement : rapport entre les bits de données et la longueur totale des paquets.

4.2. Mécanismes de détection et de correction d'erreurs

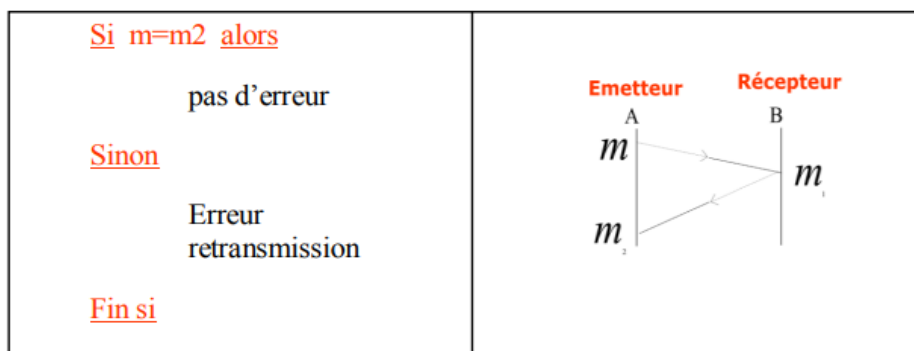
On a deux types de stratégies de protection contre les erreurs de transmission :

- Stratégies de détection seulement.
- Stratégies de détection et correction. La correction peut être :
 - Automatique.
 - Par retransmission.

4.2.1. Techniques de détection d'erreurs

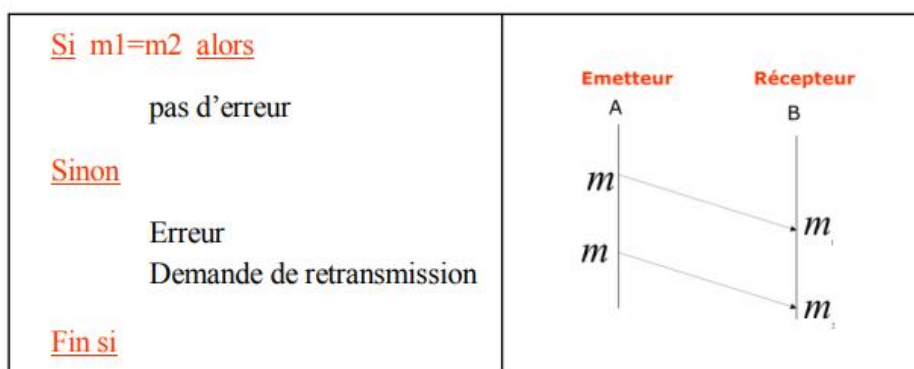
4.2.1.1. La détection par écho

Le récepteur renvoie le message reçu, si le message est différent de celui émis alors il y a une erreur et le message doit être retransmis.



4.2.1.2. La détection par répétition

Chaque message émis est suivi par sa réplique si les deux messages sont différents le récepteur demande une retransmission.



4.2.1.3. La détection d'erreurs par code

Consiste à ajouter à l'information initiale (bits de données) une information supplémentaire (bits de contrôle) qui munit l'information initiale à envoyer d'une caractéristique qui sera vérifiée à la réception, et ainsi de détecter l'erreur. Exemples : code de parité, code polynomial CRC.

- **La détection d'erreurs par parité**

C'est un des systèmes de contrôle les plus simples. Il consiste à ajouter un bit supplémentaire (appelé bit de parité) à un certain nombre de bits de données telle que le nombre total de bits à 1 soit pair ou impair :

- Parité paire : Rendre le nombre des 1 pair. Ajouter un **1** si le nombre de bits 1 est impair, **0** sinon.

Exemples : 10110111

01001000

- Parité impaire : Rendre le nombre des 1 impaire. Ajouter un **1** si le nombre de bits 1 est pair, **0** sinon.

Exemples : 11011100

00110001

On a deux types de contrôle de parité :

- Contrôle de parité sur un caractère : Utilisé dans le cas de la transmission asynchrone, la parité utilisée est appelée VRC. VRC : Vertical Redundancy Check (vérification par redondance verticale).

Remarques :

- Dans ce code toutes les erreurs bit sur un nombre impair de bits sont détectables pour une longueur de données quelconque.
- En pratique, seulement la moitié des erreurs bit sont détectées : La plupart des erreurs bit apparaissent en rafale, donc un nombre pair d'erreurs est aussi probable qu'un nombre impair.

- Contrôle de parité sur un bloc : Dans le cas des transmissions synchrones le VRC ne suffit pas, il est complété par le LRC. LRC: Longitudinal Redundancy Check (vérification par redondance Longitudinale).

Caractère transmis	VRC	Caractère transmis	VRC	LRC	VRC
--------------------	-----	--------------------	-----	-------	-----	-----

Exemple : Soit à transmettre le mot **HELLO** en mode synchrone (parité paire).

	H	E	L	L	O	LRC
Bit7	1	1	1	1	1	1
Bit6	0	0	0	0	0	0
Bit5	0	0	0	0	0	0
Bit4	1	0	1	1	1	0
Bit3	0	1	1	1	1	0
Bit2	0	0	0	0	1	1
Bit1	0	1	0	0	1	0
VRC	0	1	1	1	1	0

La suite à transmettre est :

100100001000101110011001100110011001111110000100

Remarques :

- Les parités verticales et horizontales permettent de **corriger** toutes les erreurs simples.
- Ils permettent de détecter toutes les erreurs sur 2 ou 3 bits.
- Ils permettent de détecter toutes les rafales plus courtes que la longueur d'une ligne.

Exemple : Déjà 4 erreurs bit peuvent passer sans être détectées :

1	0	0	1	0	1	0	1	Parités horizontales
0	1	1	1	0	1	0	0	
1	1	0	0	1	0	1	0	
1	0	0	0	1	1	1	0	
0	0	0	1	1	0	1	1	
1	0	1	1	1	1	1	0	

Parités verticales

• **La détection d'erreurs par CRC**

CRC : Cyclic Redundancy Check (vérification par redondance cyclique) consiste à utiliser un polynôme commun entre émetteur / récepteur appelé polynôme générateur. La forme de base utilisée est la forme polynomiale et pour faciliter les calculs on peut passer à une forme binaire.

➤ **Principe**

- Un bloc de m bits est vu comme un polynôme **M(x)** de degré **m-1** avec des coefficients binaires :

Exemple : 110001 → $M(x) = x^5 + x^4 + x^0$

- Utiliser un polynôme commun entre émetteur / récepteur appelé polynôme générateur **G(x)** de degré **r**.

Exemple : $G(x) = x^2 + 1$, en binaire est : G = 101.

- Le mot de code correspond à un polynôme **T(x)** de degré **m-1+r** avec : $T(x) / G(x) = 0$

Remarque : Un code polynomial est un code dans lequel tous les mots de code, représentés par des polynômes $T(x)$, sont des multiples d'un polynôme générateur $G(x)$.

- **A l'émission** : On applique trois opérations sur le message à transmettre : la multiplication, le calcul du reste et la soustraction.
 - Multiplication : $x^r * M(x) \rightarrow$ en binaire se traduit par l'ajout de r zéros à la fin de M (r est le degré de $G(x)$) (ajouter r bits zéros après le bit de poids faible du bloc de m bits). On aura donc une suite de $m+r$ bits.
 - Calcul du reste : $R(x) = \text{Reste}(x^r * M(x) / G(x)) \rightarrow$ la division est modulo 2.
 - Soustraction : $M'(x) = x^r * M(x) - R(x) \rightarrow$ La soustraction est modulo 2. Elle est équivalente à l'addition modulo 2 (et équivalente à un OU EXCLUSIF). Ceci revient à ajouter les r bits de R à la fin de M pour avoir M' . Le résultat de cette opération est la trame à transmettre.

Remarque : La division modulo 2 est basée sur la soustraction modulo 2. Le principe de la soustraction modulo 2 est le suivant : $0011 - 0101 = 0110$ (On fait un Ou Exclusif).

- **A la réception** : On applique deux opérations sur le message reçu : une division par le polynôme générateur et un test sur le reste de la division.
 - Division : $M'(x) / G(x) \rightarrow M' / G$ (division modulo 2).
 - Test du reste :

Si reste = 0 alors
Transmission sans erreurs
Sinon
Erreurs de transmission
Fin si

Remarques :

- En cas de transmission sans erreurs l'information initiale est obtenue au niveau du récepteur en enlevant les r bits situés à droite de la suite reçue.
- Les bits ajoutés associés à R sont appelés bits de redondance et R représente une information redondante.
- Les polynômes générateurs les plus utilisés sont :
 - CRC – 12 : $x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + 1$
 - CRC – 16 : $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$
 - CRC – CCITT : $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$
 - CRC-32 : $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x^1 + 1$

Exemple 1 :

Soit à transmettre la suite $F = 101100111010001$. La méthode utilisée est le CRC avec le polynôme générateur $G(x) = x^6 + x^4 + x + 1$

Quelle est la suite réellement transmise ?

Solution :

L'information initiale est : $F = 101100111010001$

Le polynôme générateur est : $G(x) = x^6 + x^4 + x + 1 \rightarrow G = 1010011$

A l'mission :

- Multiplication:

$$x^r * F \rightarrow 101100111010001000000$$

- Division :

Pour avoir le reste R (sur $r = 6$ bits)

$$\begin{array}{r}
 101100111010001000000 \\
 \underline{1010011} \\
 0001010110 \\
 \underline{1010011} \\
 00001011000 \\
 \underline{1010011} \\
 0001011100 \\
 \underline{1010011} \\
 0001111000 \\
 \underline{1010011} \\
 01010110 \\
 \underline{1010011} \\
 0000101 \rightarrow R
 \end{array}$$

La suite réellement transmise est :

$$F' = 101100111010001000101$$

Exemple 2 :

On suppose la réception de la suite binaire suivante :

$F' = 1011001110010100$, et que la méthode utilisée est CRC avec le même polynôme générateur précédant.

Est-ce que la transmission de la suite est faite sans erreurs ?

Solution :

L'information reçue est $F' = 1011001110010100$

Le polynôme générateur est : $G(x) = x^6 + x^4 + x + 1 \rightarrow G = 1010011$

A la réception :

- Division :

$$\begin{array}{r}
 1011001110010100 \\
 \underline{1010011} \\
 0001010110 \\
 \underline{1010011} \\
 00001010101 \\
 \underline{1010011} \\
 000011000
 \end{array}$$

- Test du reste : $\text{Reste } (F'/G) \neq 0$ alors : Erreur de transmission.

4.2.2. Contrôle d'erreurs par code

En utilisant des codes dits auto correcteurs (Exemple : code de Hamming).

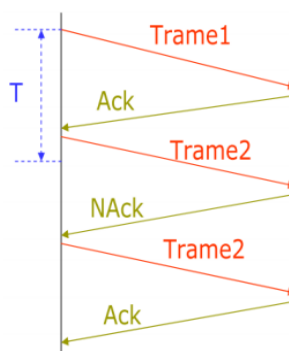
4.2.3. Stratégies de retransmission

Il existe deux classes de méthodes de retransmission ARQ (Automatic Repeat reQuest) :

- Send & Wait ARQ (« Envoyer et attendre » ou « Stop-and-Go »)
- Continuous ARQ (Fenêtre glissante) :
 - a. « Go-back-n ».
 - b. « Rejet sélectif ».

4.2.3.1. Send & Wait (envoyer et attendre)

- Consiste à l'envoi d'une seule trame à la fois et attendre son acquittement : Soit positif (**Ack**) s'il n'y a pas d'erreurs ou négatif (**Nack**) sinon.
- La copie de la trame est sauvegardée au niveau de l'émetteur jusqu'à l'arrivée de l'acquiescement positif (**Ack**) (pour la retransmettre en cas d'erreur).
- En cas d'un acquiescement négatif (**NACK**), la trame est retransmise par l'émetteur.
- Une horloge est armée à l'envoi de la trame au niveau de l'émetteur et si au bout d'un temps de temporisation **T** (Time out) aucune réponse n'est parvenue l'émetteur procède l'émission de la même trame.



Remarques :

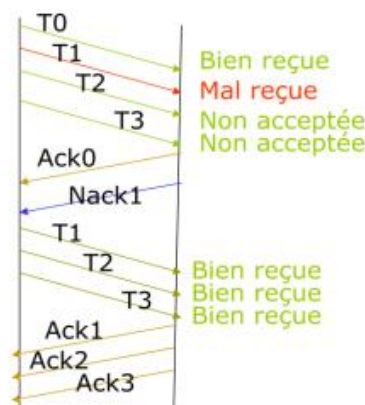
- Impossible d'arriver à une transmission continue avec la méthode send & wait.
- Le protocole send & wait est adapté à des liaisons half duplex.

4.2.3.2. Continuous ARQ

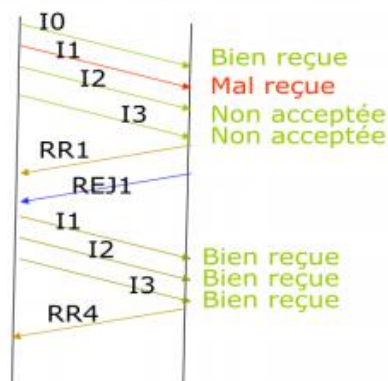
Consiste à la transmission de plusieurs trames avant d'attendre leurs acquittements (accusés de réception), deux méthodes sont disponibles :

- **Méthode du rejet Systématique (Go Back N)**

Cette méthode consiste à la transmission de N trames avant d'attendre leurs acquittements. A la réception d'un NACK ou à l'expiration du time d'une trame, la transmission est reprise depuis la trame en question.



Une amélioration du principe précédent consiste à utiliser la notion d'acquiescement groupé. Un acquiescement de la trame s acquiesce la réception même des s-1 trames précédentes reçues.



Pour éviter le problème de dédoublement de trame on utilise la méthode de numérotation de celles-ci.

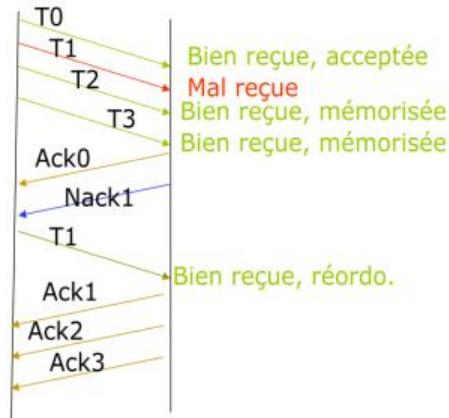
Remarque : Un avantage pour ce type de méthode (Go Back N) réside dans la possibilité de rattraper un acquiescement positif perdu par les acquiescements positifs suivants.

➤ Problèmes de Go-back-n :

- Une erreur dans un paquet provoque la retransmission de tous les paquets à partir du paquet erroné.
- Le récepteur n'accepte pas de paquet hors séquence.

• **Méthode du rejet Sélectif (Selective reject)**

- Dans cette méthode, seules les trames erronées ou perdues sont retransmises individuellement.
- Le récepteur gère un tampon de réception dans lequel il place les paquets reçus hors séquence.
- Un nouveau type d'acquittement négatif **SREJ** permet d'indiquer le paquet rejeté.
- Le récepteur envoie un acquittement pour chaque paquet correctement reçu.
- Lorsqu'un paquet erroné est reçu, le récepteur renvoie un **SREJ** avec le numéro de séquence du paquet erroné.
- Les paquets reçus hors séquence sont placés dans une fenêtre de réception, avec la même taille que la fenêtre d'émission.
- L'émetteur retransmet uniquement les paquets pour lesquels il a reçu un **SREJ**.



4.2.3.3. Principe de la fenêtre coulissante (glissante)

C'est un système d'anticipation utilisant la notion d'acquittements groupés. En effet un numéro d'acquittement acquitte toutes les trames dont le numéro est inférieur au numéro d'acquittement modulo $2^{(\text{taille du champ de numérotation})}$.

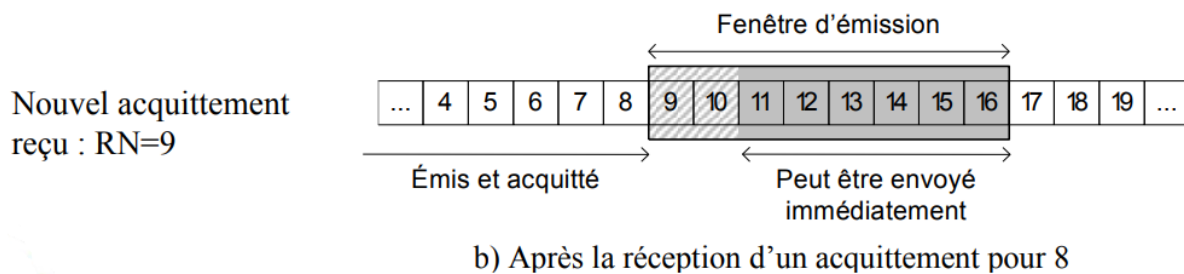
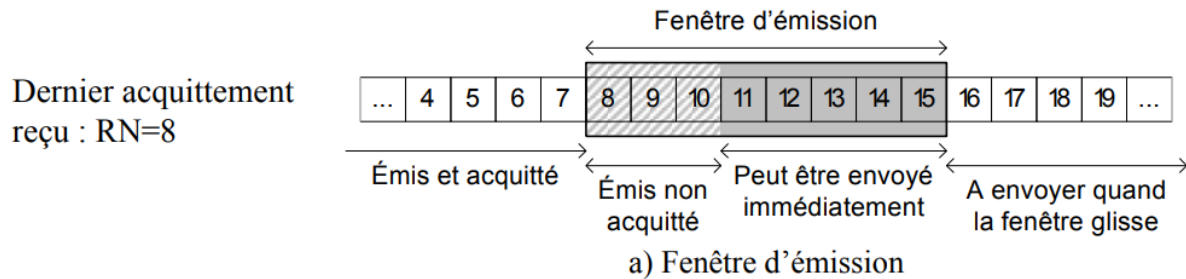
Exemple : taille du champ de numérotation = 3 → capacité de numérotation = 8

La fenêtre contient les n paquets après le dernier paquet acquitté $s-1$. Les numéros de séquence SN autorisés à l'expédition sont :

$$s \leq SN < s + n$$

Après l'acquittement d'un paquet transmis, la fenêtre glisse à droite et autorise la transmission d'un nouveau paquet.

Exemple :

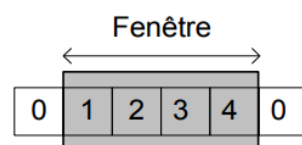


- **Numéros de séquence**

Un champ avec une longueur fixe doit être prévu dans l'entête des paquets pour le numéro de séquence → Numérotation modulo M .

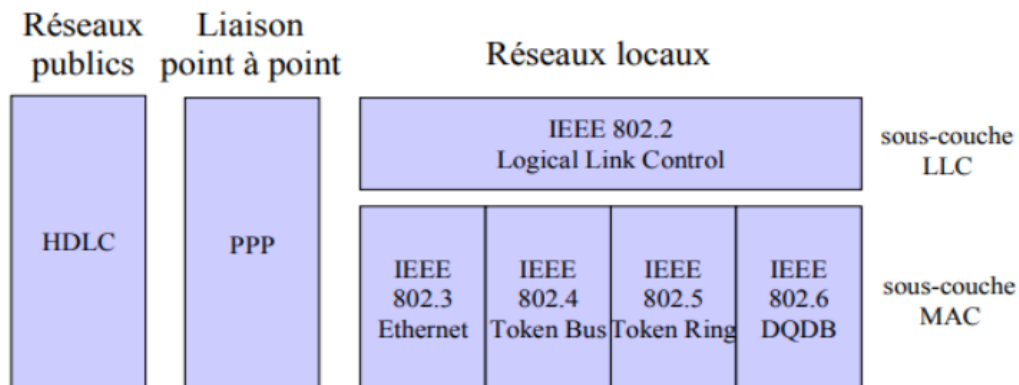
Dans le cas de l'utilisation d'une fenêtre coulissante, au cours d'une même connexion, le même numéro va être utilisé pour identifier plusieurs trames différentes. Pour éviter l'ambiguïté il faut que : $n < M$ (n : Taille de la fenêtre d'anticipation, M : capacité de numérotation).

A chaque instant, au maximum n paquets peuvent être en attente d'un acquittement. Au maximum $n+1$ acquittements différents sont possibles → $M = n + 1$ est suffisant.



5. Protocoles de la couche liaison

Le schéma suivant montre quelques protocoles de la couche liaison :



5.1. HDLC (High level Data Link Control)

5.1.1. Présentation

C'est un protocole orienté bit (indépendant d'un codage ou d'un alphabet particulier), il offre un service de transfert de données fiable et efficace entre deux systèmes adjacents. Il est défini pour une transmission synchrone en half-duplex ou duplex sur des liaison point à point ou multipoints.

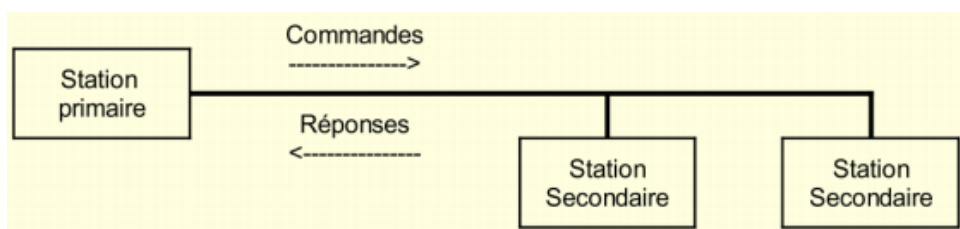
Le protocole HDLC constitue la norme de base des protocoles de liaison. Plusieurs protocoles dérivés lui sont associés comme LAP-B, LAP-D, PPP, etc.

5.1.2. Modes de liaison

Le mode de liaison peut être :

a) Non équilibré LAP (Link Access Procedure)

- Liaison point à point ou multipoints.
- On a deux types de stations :
 - Station primaire (maître) : Unique (une seule station). Elle envoie des trames de commande (assure la gestion de la transmission).
 - Des stations secondaires (esclaves) : Envoyent des trames de réponse. Elles émettent sur sollicitation de la station primaire.



b) Equilibré (Balanced Link Access Procedure)

- Liaison point à point.
- Chaque station peut émettre des trames de commande et d'information, elle possède une fonction primaire et une fonction secondaire (responsabilités égales).



5.1.3. Les modes opératoires de HDLC

Le protocole HDLC peut fonctionner selon trois modes différents :

a) NRM (Normal Response Mode)

- Mode de liaison non équilibré : une station primaire et une ou plusieurs stations secondaires.
- Station primaire : Responsable de l'ouverture et la supervision de la liaison.
- Stations secondaires : Répondent aux commandes de la station primaire. Ne peuvent transmettre que sur invitation.

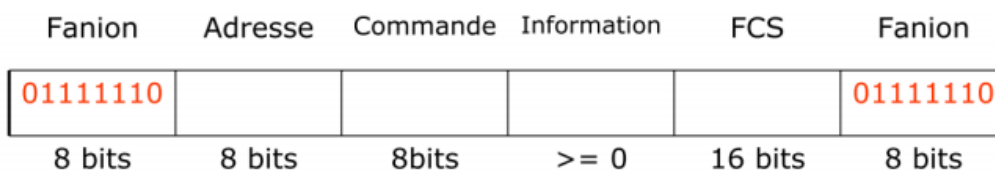
b) ARM (Asynchronous Response Mode)

- Mode de liaison non équilibré : une station primaire et une ou plusieurs stations secondaires.
- Les stations secondaires peuvent transmettre librement, sans attendre d'invitation.
- Des transmissions simultanées provoquent une collision.

c) ABM (Asynchronous Balanced Mode)

- Mode de liaison équilibré : des stations combinées, à la fois primaire et secondaire.
- Chaque station peut initialiser et terminer la liaison.
- Chaque station peut émettre librement.

5.1.4. Format général d'une trame HDLC



a) Fanion (8 bits)

- Un protocole de liaison de données doit définir un mécanisme pour délimiter les trames.
- Une solution est l'utilisation d'un fanion. Il permet de reconnaître le début et la fin de la trame. Exemple de fanion : la suite **01111110**.
- Un problème peut être rencontré est que les données peuvent contenir cette combinaison. Il faut assurer l'unicité du fanion, pour cela on utilise une opération de **transcodage** des champs de la trame (sauf les fanions).
- L'opération de **Transcodage** consiste à utiliser des bits de bourrage, on insère un **0** dès qu'il y a une suite de 5 bits à 1 consécutifs. Les bits de 0 d'ajoutés sont appelées bits de **transparence (bits stuffing)**.

Exemple : la suite 1111111111 est transcodée à la suite 11111**0**111110.

- Pour restituer le format original des données, on fait l'opération inverse à la réception.
- Le transcodage provoque une augmentation de la longueur (taille) de la trame.
- La taille de la trame transcodée n'est pas obligatoirement un multiple d'octet.

b) Adresse (8 bits extensible à 16 bits)

- Identifie le destinataire dans une configuration multipoint.
- Permet de distinguer commandes et réponses dans une configuration point-à point.

c) Contrôle ou Commande (8 bits extensible à 16 bits)

C'est le champ le plus important il définit le type de la trame. Ils existent trois types de trames :

➤ **Les trames d'Information (I : Information)**

Utilisées pour le transfert de données (Transport des informations). Elles possèdent le champ «Données».

Le format du champ Commande est :

1bit	3 bits	1bit	3 bits
0	N(S)	P/F	N(R)

Avec :

N(S) : Numéro de séquence de trames en émission (indique le numéro de la trame émise).

N(R) : Numéro de séquence de trames en réception (indique le numéro de la trame attendue).

P (Poll) : invitation à émettre dans le cas d'une commande.

F(Final) : fin dans le cas d'une réponse.

➤ **Les trames de Supervision (S : Supervisory)**

Utilisées pour la supervision séquentielle, le contrôle d'erreurs et flux.

Le format du champ Commande est :

1bit	1bit	2 bits	1bit	3 bits
1	0	SS	P/F	N(R)

Il existe quatre types de trames S : **RR, RNR, REJ, SREJ**.

- **SS = 00** → **RR** (Received & Ready) : trame d'acquittement. Elle confirme la réception des trames d'information de $N^{\circ} < N(R)$ et demande la transmission des trames suivantes.
- **SS = 10** → **RNR** (Received & Not Ready) : contrôle de flux. Elle confirme la réception des trames d'information de $N^{\circ} < N(R)$ et interdit la transmission des trames suivantes.
- **SS = 01** → **REJ** (Reject) : protection contre les erreurs (ACK négatif dans Go-back n). Confirme la réception des trames d'information de $N^{\circ} < N(R)$ et demande la retransmission des trames à partir de $N(R)$ ($N^{\circ} \geq N(R)$).
- **SS = 11** → **SREJ** : (Selective Reject) : Confirme la réception des trames d'information de $N^{\circ} < N(R)$ et demande la retransmission de la trame de $N^{\circ} = N(R)$.

➤ **Les trames non numérotées (U : Unnumbered)**

Utilisées pour la gestion de la liaison: supervision non séquentielle, connexion, libération, données non séquentielles (datagrammes), etc.

Le format du champ Commande est :

1bit	1bit	2 bits	1bit	3 bits
1	1	MM	P/F	MMM

Les bits M permettent de coder 32 types de trames non numérotées. Exemples :

SABM (Set asynchronous balanced mode) : Etablissement de la connexion [11110]

DISC (Disconnection) : Libération de la connexion [11010]

UA (Unnumbered acknowledgment) : Confirmation de la connexion [00110]

FRMR (Frame reject) : Récupération des erreurs [11011]

DM (Disconnected mode) : Trame d'indication de connexion libérée [10001]

Remarque : Pour le champ commande, le format étendu (16 bits) est négocié lors de l'établissement de la connexion pour effectuer la numérotation modulo 128.

Le tableau suivant récapitule le format du champ commande pour les trois types de trames, I, S et U :

Types de trame	Champ Commande							
I	0	N(S)			P/F	N(R)		
S	1	0	Type		P/F	N(R)		
U	1	1	M	M	P/F	M	M	M

Type : indique le type de la trame.

d) Information

Constitué d'une suite de bits formant un nombre entier d'octets. Il contient les informations à transmettre.

e) FCS (Frame Check Sequence)

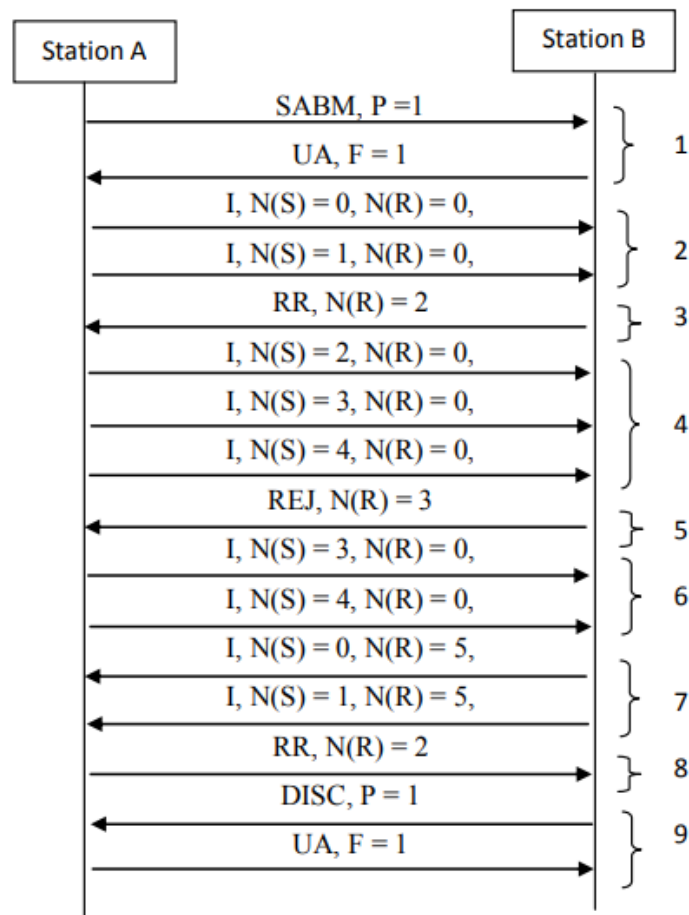
C'est le champ de détection des erreurs, il est constitué d'une séquence de contrôle de trames, et égale au reste de la division de trame sur un polynôme générateur normalisé, il sert à détecter les erreurs de transmission (selon la méthode CRC).

Utilise un code CRC à 16 bits pour la détection d'erreurs :

CRC-CCITT : polynôme générateur $G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$

5.1.5. Description des échanges

Le schéma suivant montre les phases d'un échange HDLC bidirectionnel. Pour chaque trame, sont indiqués le type (SABM, UA, RR ou I pour une trame d'information) et la valeur des variables N(S), N(R) et P/F.



- 1 → Etablissement d'une liaison en mode ABM.
- 2 → Transfert de deux trames d'information.
- 3 → Acquiescement des trames 0 et 1.
- 4 → Transfert des trames 2,3 et 4.
- 5 → Rejet des trames 3 et 4.
- 6 → Retransmission des trames 3 et 4.
- 7 → Acquiescement des trames 3 et 4, transfert des trames 0 et 1.
- 8 → Acquiescement des trames 0 et 1.
- 9 → Libération.

Les étapes sont les suivantes :

a) Etablissement de la liaison

L'établissement de la liaison se fait par l'émission des trames non numérotées **SABM** et **UA**. Le bit P/F est positionné à 1 dans la trame de commande SABM invitant la station B à répondre, celle-ci émet tout de suite un acquiescement UA avec le bit F à 1.

b) Transmission des informations

La transmission des trames d'information s'effectue avec gestion des numéros de séquence $N(R)$ et $N(S)$. L'acquittement des trames I émises jusqu'au numéro $N(S) = x$ est réalisé par renvoi dans une trame **RR** ou I de $N(R) = x+1$, avec $x+1$ est le numéro de la trame attendue.

La trame **REJ** avec $N(R) = x$ signifie le rejet des trames $N(S) \geq x$.

c) Libération de la liaison

La libération de la liaison s'effectue par émission des trames non numérotées **DISC** et **UA**.

5.2. Les protocoles dérivés de HDLC

Il existe plusieurs protocoles dérivés du protocole HDLC, on peut citer :

a) LAP-B (Link Access Protocol Balanced)

- Protocole d'accès à un réseau X.25 (couche 2 de X.25).
- Liaison point à point équilibrée.
- Fonctionne selon le mode ABM du protocole HDLC (Asynchrone, Full duplex).
- Utilise le champ « Adresse » pour distinguer commandes et réponses.

b) LAP-D (Link Access Protocol on D channel)

- Utilisé par le canal D de signalisation du RNIS (Réseau Numérique à Intégration de Service).

c) PPP (Point to Point Protocol)

- Liaison point à point.
- Utilisé pour la gestion de connexion à Internet.
- Utilise un format de trame très proche de celui de HDLC, cependant, HDLC est orienté bit tandis que PPP est un protocole orienté caractère.

6. Normalisation des réseaux LAN

Les réseaux locaux couvrent les deux premières couches du modèle OSI, la couche physique et la couche liaison.

Pour les réseaux locaux, la norme IEEE divise la couche liaison en 2 sous-couches :

- La sous-couche MAC (Medium Access Control) qui définit la méthode d'accès au support de transmission.
- La sous-couche LLC (Logical Link Control) qui rend transparentes à la couche Réseau les différences de la sous-couche MAC.

LLC, IEEE 802.2			
MAC			
IEEE 802.3 CSMA/CD Ethernet	IEEE 802.4 Token bus	IEEE 802.5 Token ring	ANSI X3.139 Fiber Distributed Data Interface

6.1. La couche MAC (Medium Access Control)

6.1.1. Rôle

- Contrôle d'accès au médium physique, souvent par diffusion sur un réseau multipoint (déterminer qui a le droit d'émettre sur un médium partagé).
- Structurer le flot de bits de la couche 1 en trames (ajout d'en-têtes et d'en-queues avec des séquences de bits spécifiques).

6.1.2. Méthodes d'accès au médium

D'une façon générale trois méthodes sont utilisées :

a) Méthodes déterministes (accès sans conflit)

- TDMA (Time Division Method Access) : Qui consiste à un accès multiple dans le temps, c-à-d. découpage généralement équitable du temps en périodes attribuées cycliquement aux stations.
- Conteneur (Slot) : Dans ce cas un conteneur de taille finie circule sur le réseau. Un bit d'entête indique son occupation, s'il est vide une station peut le remplir au vol, la station destinatrice le vide.
- Jeton (Token) : C'est la méthode déterministe de base, le droit d'émettre des données durant une période bornée est lié à la possession d'un jeton. Quand une station a terminé son émission ou a épuisé son délai, elle cède le jeton à la station suivante.

Remarque : les méthodes déterministes sont utilisées par des réseaux de type Token Ring et FDDI.

b) Méthodes à compétition (à conflit d'accès)

Dans ce cas chaque station essaye de prendre le contrôle du réseau sans liaison avec les autres stations. La technique la plus utilisée pour ce type de méthode est appelée CSMA/CD.

- CSMA/CD (Carrier Sens Method Access/Collision Detection) : Méthode d'accès multiple au support avec détection de collision. Dans cette méthode le principe est celui du "premier arrivé, premier servi ". L'équipement qui veut transmettre guette l'absence de signal sur le média, puis commence à transmettre. Si deux nœuds transmettent simultanément, une collision se produit, les deux stations arrêtent la transmission et attendent un temps aléatoire avant de reprendre.

Remarque : les méthodes à compétition sont utilisées par des réseaux de type Ethernet.

c) Méthodes mixtes

Avec les méthodes mixtes, on aura un démarrage en compétition puis une résolution déterministe. L'exemple type des méthodes mixtes est la méthode CSMA/DCR (Carrier Sens Method Access/Determinist Collision Resolution), en français : Méthode d'accès multiple au support avec résolution déterministe de collisions.

6.2. La couche LLC (Logical Link Control)

6.2.1. Rôle

- Transformation du moyen physique de transmission en une liaison exempte d'erreurs de transmission.
- Transmission de trames et d'acquittements entre deux nœuds adjacents.
- Contrôle d'erreurs et retransmission.
- Élimination de trames dupliquées.
- Contrôle de la vitesse d'émission.

6.2.2. Méthodes utilisées

La couche LLC contrôle logiquement la liaison de données, généralement elle représente un sous ensemble de HDLC avec la possibilité d'utiliser trois modes :

a) LLC1 (unacknowledged connectionless service)

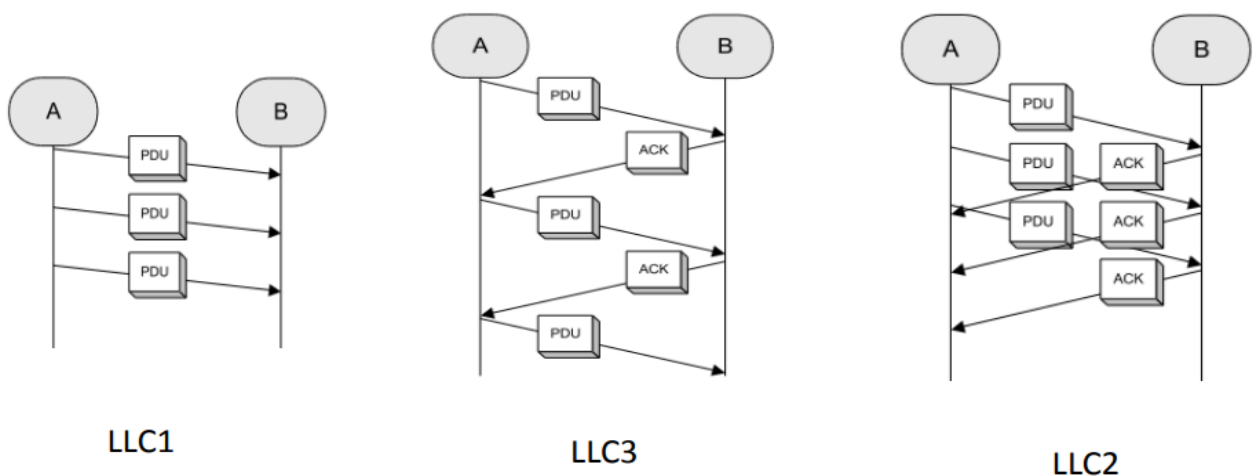
- Souvent appelé LLC (le plus utilisé).
- Utilisée dans les réseaux Ethernet.
- Tient compte du faible taux d'erreur du support physique :
 - Transmission de blocs isolés sans connexion (mode non connecté).
 - Sans acquittement.
 - Sans contrôle de l'ordre des trames.
- Suppression de trames erronées.
- Retransmission initiée par les couches supérieures.

b) LLC2

- Service orienté connexion (mode connecté) :
 - Utilisation d’acquittements.
 - Retransmission de trames erronées.
 - Élimination de trames dupliquées.
 - Contrôle de l’ordre des trames.
- Service fiable réalisé à la couche 2 au lieu des couches supérieures comme dans LLC1.

c) LLC3

- Service sans connexion (mode non connecté).
- Utilisation d’acquittement.
- Contrôle de flux : « envoyer et attendre » (stop and go): Transmission d’une trame après la réception de l’acquittement de la trame précédente.



6.3. La technologie Ethernet

6.3.1. Introduction

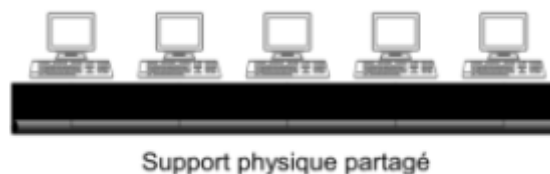
- Ethernet n’est pas une technologie de réseau mais une famille de technologies qui inclut : Ethernet (thicknet, etc.), Fast Ethernet et Gigabit Ethernet.
- Les vitesses d’Ethernet s’échelonnent entre 10, 100, 1000 ou 10 000 Mbits/s.
- Le format de trame de base et les sous-couches IEEE des couches OSI 1 et 2 restent cohérents quelle que soit la forme d’Ethernet.
- Initialement conçu par Xerox sur un canal partagé.
- Normalisé en 1981 comme IEEE 802.3 et en 1989 comme ISO8802-3
- Deux variantes : Ethernet-II et IEEE 802.3
- La technologie LAN la plus importante (dominante). Elle a évolué pour répondre à la demande accrue en réseaux locaux haut débit.

- Elle s'est adaptée même avec la technologie des médias à fibre, pour tirer parti de la bande passante et du faible taux d'erreur qu'offre cette technologie.
- À présent, le même protocole qui transportait les données à 3 Mbits/s en 1973 assure des transmissions à 10 Gbits/s.

Remarque : Ethernet est une technologie de broadcast à média partagé. La méthode d'accès utilisée par le réseau Ethernet est CSMA/CD.

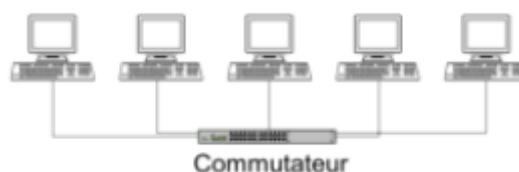
6.3.2. Les modes d'un réseau Ethernet

a) Mode partagé



- Possibilité de collisions.
- Mauvaises performances en cas de charge élevée.
- Temps de transmission non déterministe.
- Contraintes de la taille maximale du réseau.

b) Mode commuté



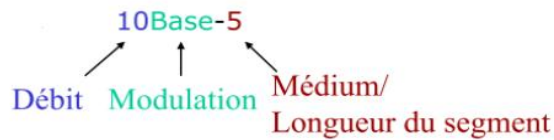
- Chaque terminal est directement connecté à un commutateur (switch).
- Transmission full-duplex :
 - Sans collisions.
 - Débit de transmission dédié.
 - Temps de transmission déterministe.
- Transmission half-duplex :
 - Collisions entre terminal et switch sont possibles.
 - Nécessité de mémoriser les trames dans le switch (contrôle de flux).
- Plus cher.

6.3.3. Nommage des technologies Ethernet

Un nom d'une norme Ethernet comporte les éléments suivants:

- Un chiffre indiquant le débit (Mbits/s).
- Des lettres indiquant la signalisation utilisée (généralement c'est la bande de base).
- Une ou plusieurs lettres de l'alphabet indiquant le type de média utilisé (ex. F = câble à fibre optique et T = paire torsadée non blindée).

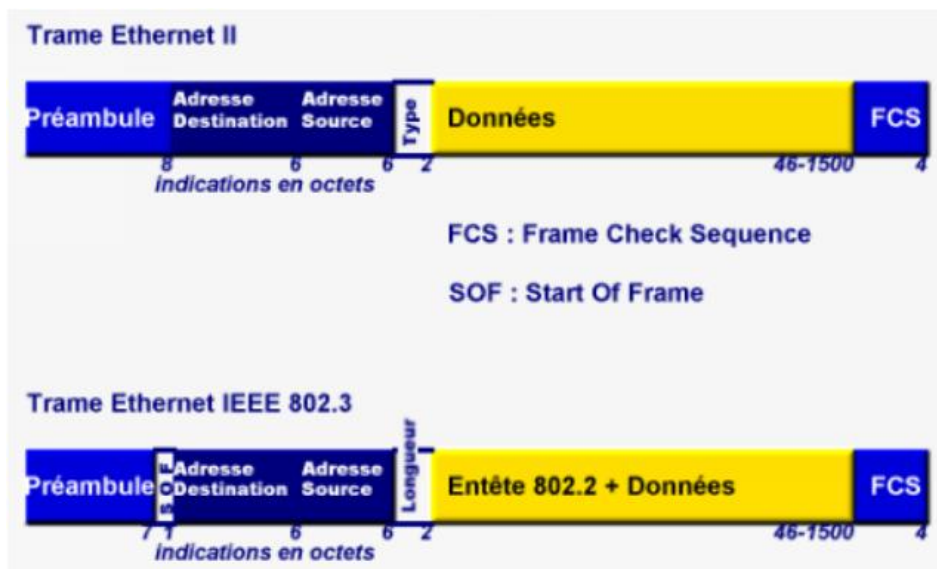
Exemples :



Type	Débit	Codage	Longueur max. d'un segment	Média	Topologie
10Base-5	10 Mb/s	Bande de base	500 m	Câble coax. épais	Bus
10Base-2	10 Mb/s	Bande de base	185 m	Câble coax. fin	Bus
10Base-T	10 Mb/s	Bande de base	100 m	UTP cat. 3, 2 paires	Étoile
100Base-TX	100 Mb/s	Bande de base	100 m	UTP cat. 5, 2 paires	Étoile
100Base-FX	100 Mb/s	Bande de base	2000 m	2 fibres multimodes	Étoile
1000Base-T	1 Gb/s	Bande de base	100 m	UTP cat. 5 e, 4 paires	Étoile
1000Base-X (plusieurs normes)	1 Gb/s	Bande de base	275-5000 m	2 fibres optiques	Étoile

6.3.4. Structure d'une trame Ethernet

La structure des deux trames Ethernet reconnues est la suivante :



- Le préambule : Le préambule est une suite de 0 et de 1 alternés. Il permet à l'horloge du récepteur de se synchroniser sur celle de l'émetteur. Comme la transmission est asynchrone, il est possible qu'une partie du préambule soit perdue. Même si la norme IEEE 802.3 a spécifié un champ spécifique en fin de préambule : SOF (Start of Frame) avec 2 bits à 1, il n'y a aucune différence avec le standard Ethernet v2.0 pour lequel les 2 derniers bits du préambule sont aussi à 1.
- L'adresse de destination : contient l'adresse physique (MAC) du destinataire. Peut être une adresse d'unicast, une adresse de multicast ou une adresse de broadcast.
- L'adresse source : contient l'adresse physique (MAC) du nœud qui a transmis la trame.
- Le champ longueur/type : Ce champ de 2 octets a été défini dans le standard Ethernet II pour indiquer le type de protocole de niveau 3 employé pour transmettre le message. Avec la normalisation originale IEEE 802.3 ce champ a été redéfini pour contenir la longueur en octets du champ des données.
- Les données :
 - **Ethernet II** : D'après la définition d'origine, la couche 2 est complète avec ce format. Les données sont directement transmises au niveau réseau identifié par le champ type. Aucune «séquence de bourrage» ou **padding** n'est prévue bien que le nombre minimum de données attendues soit de 46 octets.
 - **IEEE 802.3** : Le champ de données contient l'entête de la sous-couche LLC en plus des données. Au niveau MAC ce champ est vu comme une suite de 46 à 1500 octets que l'on n'interprète pas. Si le nombre de données n'atteint pas 46 octets, le champ est complété par une séquence de **bourrage (padding)**.
- La séquence de contrôle FCS (*Frame Check Sequence*) : contient un code de redondance cyclique (CRC) de 4 octets créé par l'unité émettrice et recalculé par l'unité réceptrice afin de s'assurer qu'aucune trame n'a été endommagée.

6.3.5. Adresse physique (adresse MAC)

Un système d'adressage est nécessaire pour identifier de façon unique les ordinateurs et les interfaces permettant la distribution des trames sur Ethernet.

Une adresse MAC ou physique est utilisée par Ethernet, cette adresse est :

- Unique : Toutes les cartes de réseaux ont une adresse différente.
- Fixe: configurée dans la mémoire ROM de la carte (elle est copiée en mémoire vive (RAM) lors de l'initialisation de la carte réseau).
- De longueur de 48 bits (6 octets) exprimées en douze chiffres hexadécimaux :

- Les 3 premiers octets (Les six premiers chiffres hexadécimaux) : Identifient le constructeur (OUI : Organization Unique Identifier), ils sont définis et administrés par IEEE.

Exemples :

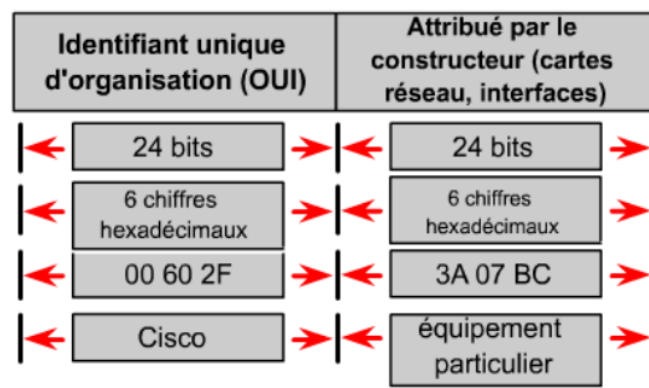
00-60-2F-xx-xx-xx: Cisco

08-00-20-xx-xx-xx: Sun

08-00-09-xx-xx-xx: HP

- Les 3 derniers octets (six derniers chiffres hexadécimaux) : Identifient la carte (le numéro de série d'interface), ils sont gérés par le constructeur.

Exemple : soit l'adresse MAC suivante : 00-60-2F-3A-07-BC



6.3.6. Identification par adresse physique

- Sur un réseau local, l'équipement qui envoie des données attache un en-tête avec l'adresse MAC de l'équipement de destination, et envoie des données sur le réseau.
- Les données sont reçues par les équipements du réseau, la carte réseau de chaque équipement vérifie si son adresse MAC correspond à l'adresse physique de destination transportée par la trame (sur un réseau Ethernet, tous les nœuds reçoivent la trame et doivent examiner l'en-tête MAC).
- En l'absence de correspondance, la carte réseau ignore la trame de données.
- Lorsque les données atteignent le nœud de destination, la carte réseau fait une copie et transmet la trame aux couches OSI.

Remarque : Tous les équipements qui sont connectés à un réseau local possèdent des interfaces adressées MAC (stations de travail, imprimantes, routeurs, etc.).

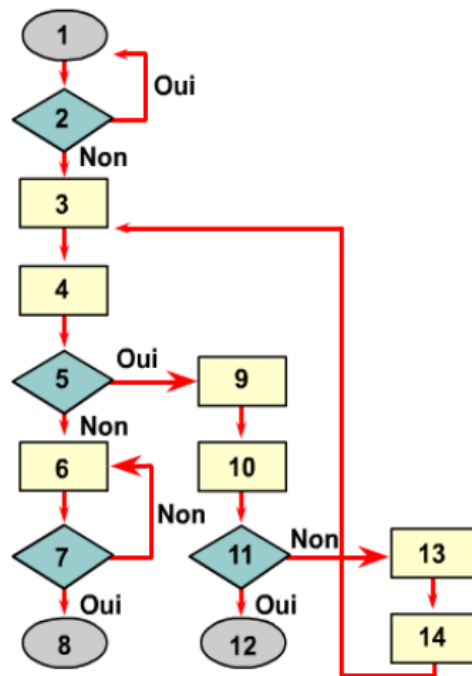
7.3.6. La méthode CSMA/CD

- **Domaine de collision**

- Un domaine de collision est un ensemble des stations et systèmes intermédiaires d'un LAN dont les transmissions peuvent entrer en collision.
- Toutes les stations du même domaine de collision voient le trafic passant de données.
- Un domaine de collision est un domaine partagé. Les problèmes qui proviennent d'une partie d'un domaine de collision auront en principe un impact sur le domaine de collision tout entier.

- **La méthode CSMA/CD**

1. Lorsqu'un nœud souhaite transmettre des données, il doit d'abord s'assurer que le média réseau est libre (écoute de porteuse).
2. Si le nœud détermine que le réseau est occupé, il attendra pendant une durée aléatoire avant de réessayer.
3. Si le nœud détermine que le média est libre, il commence la transmission et l'écoute.
4. Le nœud se met à l'écoute pour s'assurer qu'aucune autre station ne transmet en même temps.
5. Une fois la transmission de données terminée, l'équipement se remet en mode d'écoute.
6. Lorsque l'amplitude du signal augmente sur le média, les nœuds déduisent qu'une collision s'est produite.
7. Lorsqu'une collision se produit, chaque nœud émetteur continue à transmettre des données pendant une courte période (transmettent un signal de "**bourrage**" sur 32 bits afin que toute donnée transmise soit complètement corrompue) pour signaler la collision et s'assurer que tous les nœuds la détectent.
8. Lorsque tous les nœuds ont détecté la collision, l'algorithme de réémission temporisée est appelé et la transmission s'arrête.
9. Les nœuds arrêtent de transmettre et attendent pendant une période aléatoire, déterminée par l'algorithme de réémission temporisée en utilisant un générateur de nombre aléatoire (cette étape est appelée **Back off**).
10. À l'expiration du délai, chaque nœud peut tenter d'accéder à nouveau au média réseau (les équipements impliqués dans la collision ne sont pas prioritaires pour la transmission des données).



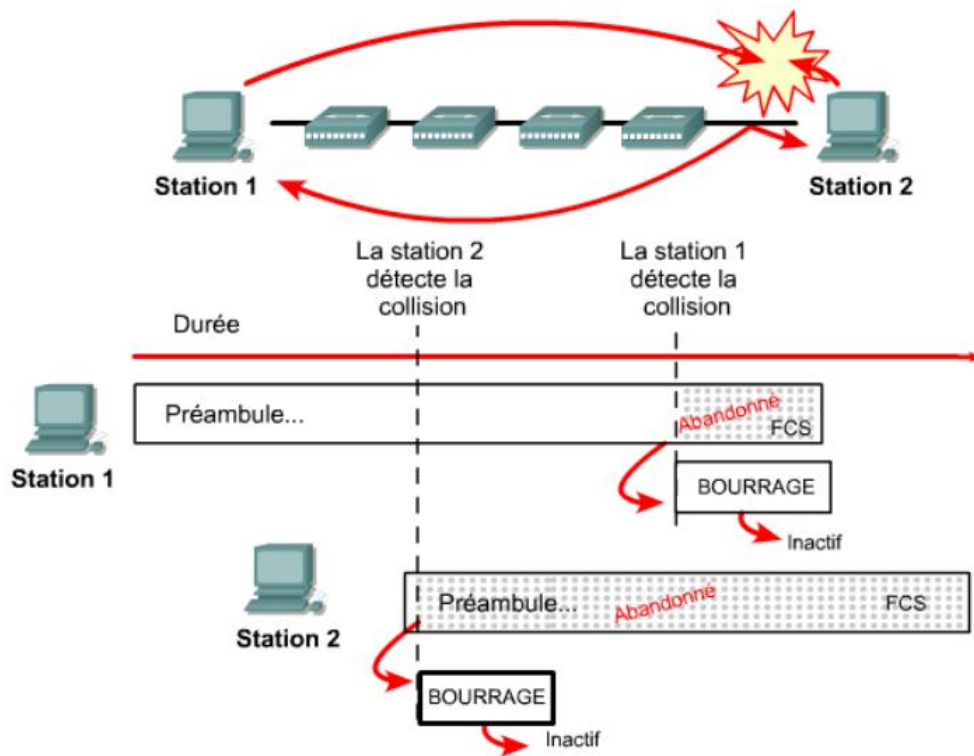
1. L'hôte veut transmettre.
2. La porteuse est-elle détectée ?
3. Mise en trame.
4. Début de la transmission.
5. Une collision est-elle détectée ?
6. Poursuite de la transmission.
7. La transmission est-elle terminée ?
8. Transmission terminée.
9. Signal d'un bourrage de broadcast.
10. Tentatives = tentatives + 1.
11. Tentatives > trop nombreuses ?
12. Trop de collisions ; abandon de la transmission.
13. L'algorithme calcule de la réémission temporisée.
14. Attente pendant t microsecondes.

Remarques :

- Le câble comme médium partagé permet de vérifier si le canal est libre et de détecter une collision.
- L'émetteur écoute le canal même pendant sa transmission.
- Une collision se manifeste par une différence entre le signal transmis et le signal vu sur le canal.

Exemple :

Dans la figure suivante, deux stations écoutent pour s'assurer que le câble est inactif, puis elles transmettent.



Il peut arriver que :

- La station 1 transmet une grande partie de la trame avant que le signal n'atteigne le dernier segment du câble.
- La station 2 commence sa propre transmission avant de recevoir le premier bit, ainsi, elle envoie plusieurs bits avant que sa carte réseau ne détecte la collision.
- La station 2 tronque immédiatement la transmission en cours, remplace le signal de bourrage 32 bits et mis fin à toutes les transmissions.
- Au cours de la collision et de l'événement de bourrage subi par la station 2, les fragments de collision ont tenté de retourner à la station 1 en traversant le domaine de collision répété.
- La station 2 a terminé la transmission du signal de bourrage 32 bits et s'est tue avant que la collision ne se propage vers la station 1 qui ignorait encore la collision et continuait de transmettre.
- Lorsque les fragments de collision ont finalement atteint la station 1, elle tronque également la transmission en cours et substitue un signal de bourrage 32 bits au reste de la trame qu'elle était en train de transmettre.
- Dès l'envoi du signal de bourrage 32 bits, la station 1 a cessé toute transmission.

➤ **Calcul de la longueur d'un domaine de collision**

Pour que l'Ethernet CSMA/CD puisse fonctionner, la station émettrice doit avoir connaissance d'une collision avant d'avoir terminé la transmission d'une trame de taille minimum.

Ainsi, la durée théorique requise est égale à un **slot** : le temps pour aller jusqu'aux points les plus éloignés du domaine de collision, entrer en collision avec une autre transmission au dernier moment possible, retourner les fragments de collision à la station émettrice et les détecter. Ainsi, pour que la collision soit détectée, il faut que :

$$\text{Le temps d'aller retour (RTT)} < \text{Le temps de transmission}$$

Exemple :

Soit un réseau Ethernet 10Mb/s. La vitesse de propagation du signal est environ 200000Km/s.

La taille minimale d'une trame Ethernet est de 64 octets = 512 bits.

Débit = 10 Mb/s.

$$T_t = 51,2 \mu\text{s}$$

Le temps de propagation aller-retour maximal $< 51,2 \mu\text{s}$

$$\rightarrow (2*L)/200000000 < 51,2 \mu\text{s} \rightarrow L < 5 \text{ Km.}$$

La longueur maximale du réseau ne doit pas dépasser 5 Km.