

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

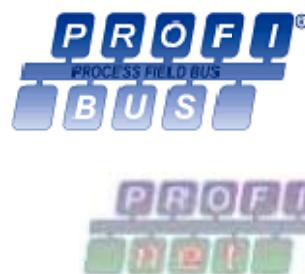


Polycopié support pédagogique au cours
Matière:
Bus de communications et réseaux industriels

3^{ième} Année Licence Automatique

Dr. GHELLAB Mohammed Zinelaabidine

E-mail : mohamedzinelaabidine.ghellab@univ-msila.dz



..... المسيلة في: 2021 ماي 5

الرقم 2021/114

مستخلص اجتماع اللجنة العلمية للقسم المنعقد بتاريخ: 2021-05-18
بخصوص مطبوعة الدروس للأستاذ: غلاب محمد زين العابدين

بخصوص مطبوعة الدروس المنجزة من طرف الأستاذ غلاب محمد زين العابدين أستاذ محاضر قسم "ب" بالقسم تحت عنوان: "Bus de communications et réseaux industriels" فقد اطلعت اللجنة على التقارير الواردة من طرف لجنة الخبراء المكونة من الأستاذ بوخنوفة نبيل أستاذ محاضر قسم "أ" بجامعة باتنة-2 ، الأستاذ بن يطو لطفي أستاذ محاضر قسم "أ" بجامعة المسيلة و الأستاذ لعجال محمد أستاذ محاضر قسم "أ" بجامعة المسيلة و التي كانت كلها ايجابية، لهذا فان اللجنة لا ترى مانعا أن تتخذ سندًا في تدريس طلبة السنة الثالثة ليسانس تخصص آلية و أن تعتمد في أي تقييم للمسار العلمي للأستاذ المعنى.

رئيس اللجنة العلمية بالنيابة



Ce cours a pour but de permettre à l'étudiant de se familiariser avec les notions de transmission de données numériques, plus particulièrement les différents types de réseaux existants dans le monde industriel. L'accent sera mis sur la compréhension des différentes topologies avec leurs avantages et inconvénients vis-à-vis d'une installation industrielle donnée.

Contenu de la matière

Chapitre 1. Architecture des réseaux (Pages : 1-22)

1. Généralité sur les réseaux
2. Classification des réseaux
3. Topologies des réseaux
4. Protocoles de communication
5. Techniques de transmission de données

Chapitre 2. Bus de terrain et réseaux locaux industriels RLI (Pages : 23-33)

1. Réseaux locaux industriels
2. Objectifs des bus de terrain
3. Classification des bus de terrain

Chapitre 3. Interface actionneurs capteurs (AS-I) (Pages : 34-43)

1. Architecture d'un bus de terrain AS-I
2. Protocoles de communication AS-I

Chapitre 4. Réseaux de terrain Modbus (Pages : 44-52)

1. Protocole Modbus
2. Modbus TCP

Chapitre 5. Réseaux de terrain PROFIBUS (Pages : 53-64)

1. Classification des réseaux ProFiBus
2. Protocoles de communication
3. Principe d'accès au bus dans un réseau profibus

Chapitre 6. Bus CAN (Controller Area Network) (Pages : 65-85)

1. Classification des bus CAN.
2. Protocoles de communication CAN
3. Représentation des trames CAN

Références bibliographiques (Page: 86)

Chapitre 1. Architecture des réseaux

1. Généralité sur les réseaux

Les réseaux industriels sont désormais incontournables dans le monde de l'automatisme pour bien exploiter une installation.

Les réseaux industriels apportent une grande souplesse aux systèmes de contrôle / commande, ils diminuent les coûts de câblage, ils offrent des possibilités nouvelles pour le contrôle et la supervision des installations, tant pour les équipes d'exploitation que de maintenance, de production ou de gestion.

Un réseau industriel fait communiquer entre eux non seulement des PC, mais aussi des automates, des interfaces d'entrée / sortie (capteurs, actionneurs, variateurs, affichage, supervision) et des systèmes complets (ascenseurs, process...).

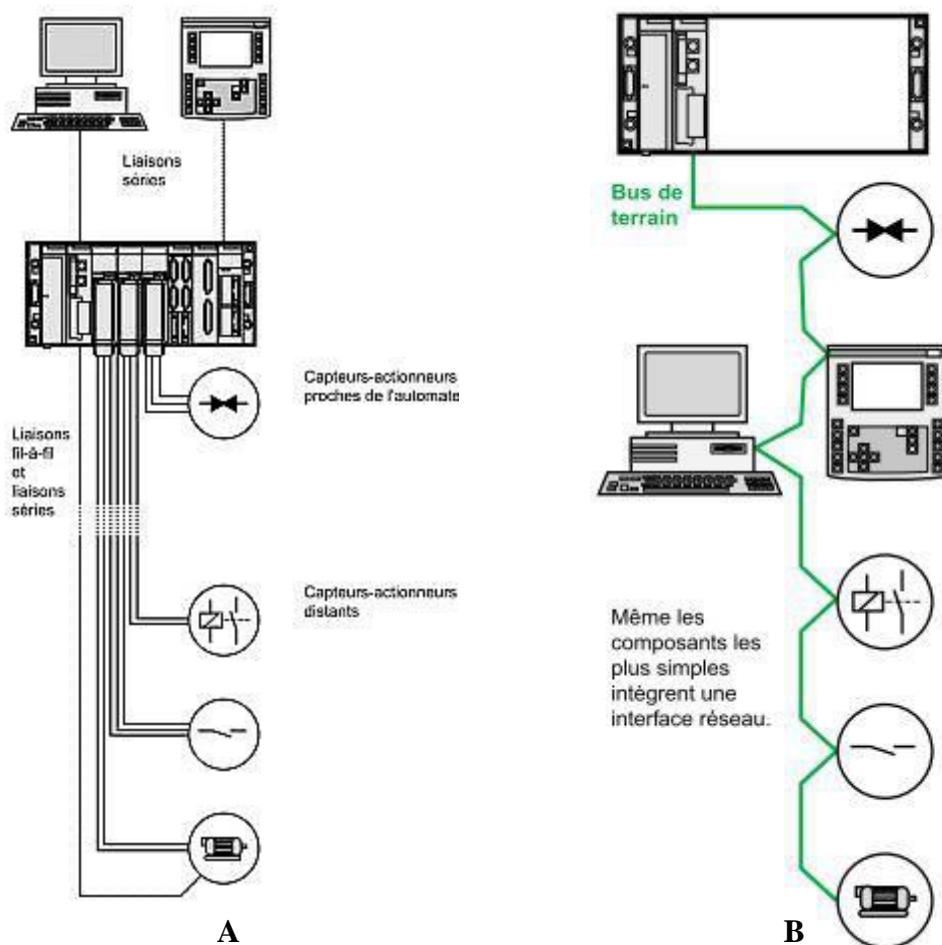


Fig.1.1 Communication industrielle

A: Câblage traditionnel Filair, **B:** câblage par bus.

1.1 L'internet et l'automatisation

Les technologies issues d'internet offre aujourd'hui une solution aux problèmes d'accès à distance aux systèmes d'automatisation.

Certaines installations comme les plateformes pétrolières, les centrales électriques, les cimenteries, raffineries nécessitent l'intervention de spécialiste lors de leurs mises en service.

Du fait que ces installations se situent généralement dans des endroits éloignés, ce genre d'intervention occasionne des retards de mise en service et des couts importants (déplacement de matériels).

Pour parer aux difficultés de gestion et d'exploitation des installations industrielles, parmi les solutions les plus utilisées dans la plupart des pays développés est l'intervention à distance et ce en assurant les fonctions suivantes :

- La télésurveillance.
- La télé contrôle et télé supervision.
- Le paramétrage des équipements à distance.
- Télé diagnostique et télé maintenance et télé configuration
- Supervision de l'ensemble des installations appartenant à l'entreprise.
- Sécurité d'information.

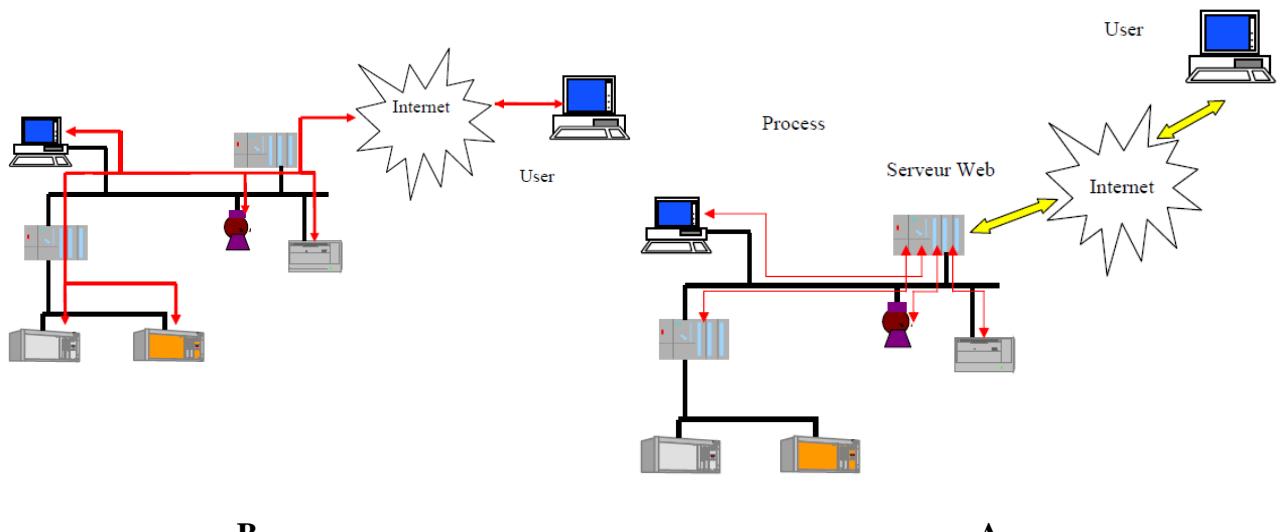


Fig.1.2 Utilisation de l'internet dans le domaine industriel

A : serveur web qui collecte des informations sur le processus.

B : serveur web enfouille dans les équipements de terrain.

2 Présentation de l'environnement industriel

L'environnement industriel englobe tous les équipements qui participent à la chaîne de production que ce soit pour la fabrication, le contrôle ou la maintenance. Ces équipements peuvent être des :

- machines à outils,
- robots,
- contrôleurs à logique programmée (PLC),
- Capteurs et actionneurs,
- stations de supervision, ...etc.

Ainsi que les moyens nécessaires à leur interconnexion tel que les câbles, les passerelles, les routeurs,... etc.

Dans les environnements industriels d'aujourd'hui, la plus part des tâches se font d'une façon automatique ce qui maximise les taux de production, garantit une meilleure sécurité du personnel, et augmente la rentabilité de l'industrie en générale.

L'automatisation de l'industrie permet d'atteindre des objectifs très intéressants :

- Commercialiser rapidement les nouveaux produits,
- Réagir à court terme et avec souplesse aux exigences du marché,
- Réduire le temps de mise sur marché,
- Produire de manière efficace et économique,
- Exploiter de façon optimale les capacités des machines,
- Minimiser les temps improductifs,...etc.

De telles objectifs ne sont parfaitement atteints que si toutes les machines d'une installation sont complètement automatisées et fonctionnent en parfaite interaction, ce qui peut-être atteint par :

- l'utilisation de machines automatisées,
- L'utilisation des PLC (contrôleurs à logique programmée) qui permettent d'automatiser l'utilisation de certains équipement non automatisés.
- L'utilisation des robots pour automatiser les tâches « intelligentes » telles que la soudure, le montage, assemblage, ... etc.

L'utilisation des réseaux informatiques industriels pour garantir l'interopérabilité des équipements automatisés.

Les installations industrielles, permettent de mettre en œuvre un grand nombre de fonctions qui sont largement interdépendantes et qui peuvent être organisées hiérarchiquement en quatre niveaux d'abstraction :

2.1 Le niveau Entreprise (niveau 3)

On trouve à ce niveau des services de gestion tel que :

La gestion commerciale, La gestion du personnel, La gestion financière, ...

2.2 Le niveau usine (niveau 2)

Ce niveau englobe des tâches de gestion de la production tel que :

La GPAO : gestion de production assistée par ordinateur, La CFAO : Contrôle de fabrication assisté par ordinateur, La CAO : Conception assistée par ordinateur, Des services de transport, Le contrôle de qualité,....

2.3 Le niveau atelier ou cellule (niveau 1)

Contient plusieurs flots de fabrication, de vision, de supervision, des robots, des automates, ...etc.

2.4 Le niveau terrain (niveau 0)

C'est le niveau le plus bas, qui contient les équipements de fabrication proprement dite tel que :

- Les machines automatisées de production qui sont des machines programmables qui peuvent selon le programme chargé exécuter des tâches complexes sans intervention humaine,
- Les capteurs qui sont des instruments de mesure qui peuvent fournir à des machines intelligentes (tel que les ordinateurs ou les contrôleurs) des informations telle que la température, la pression, la tension, la couleur, les variations, ...etc
- Les actionneurs qui sont des instruments qui peuvent être activés par des machines intelligentes tel que les vannes, les interrupteurs, les alarmes,...etc

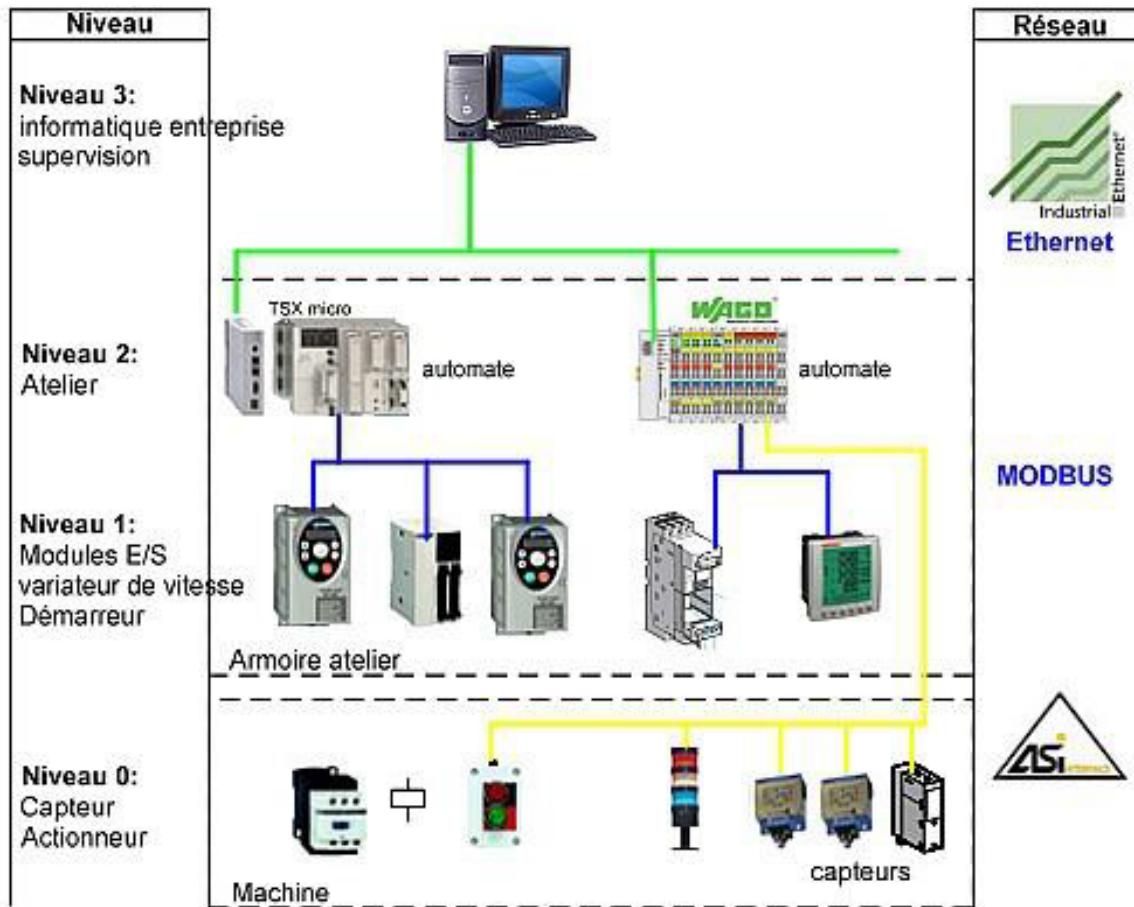


Fig.1.3 Le lien entre le monde informatique et l'automatisme.

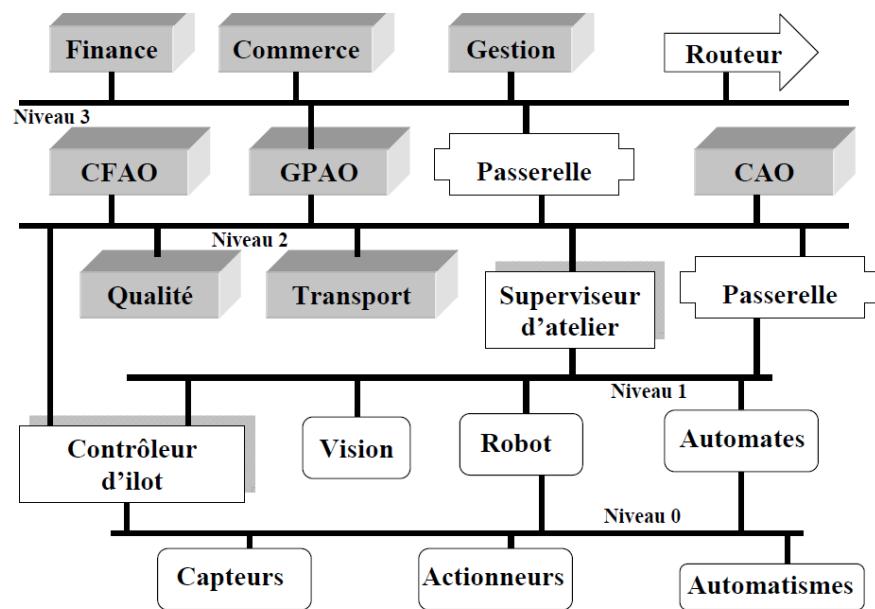


Fig.1.4 Les différents niveaux d'abstraction dans un environnement industriel intégré

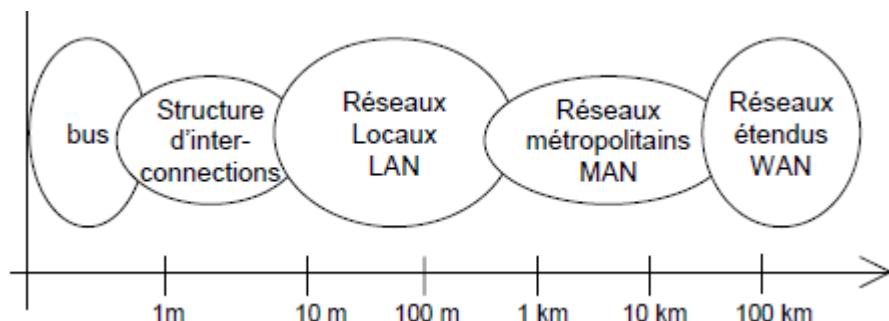
Parmi toutes les composantes d'une installation industrielle, les réseaux de communication jouent un rôle central dans les solutions automatisées, ils permettent essentiellement :

- un flux d'information continu depuis le niveau capteurs/actionneur jusqu'au niveau gestion de l'entreprise
- la disponibilité des informations en tout point de l'installation
- échange rapide des informations entre les différentes parties de l'installation
- un diagnostic, et une maintenance efficaces des fonction de sécurité intégrées empêchant les accès non autorisés ... etc.

2. Classification des réseaux

Classification des réseaux selon leur taille, c'est à dire au nombre de d'utilisateurs qui sont connectés au réseau. Le plus petit réseau est le réseau LAN ou Local Area Network, c'est un réseau local qui ne dépasse pas 100 ordinateurs situés le plus souvent dans un même bâtiment. Le réseau moyen est un réseau de type MAN ou Metropolitan Area Network dit métropolitain. Ce réseau MAN est constitué d'une série de réseaux locaux LAN où les ordinateurs sont situés dans une même région, ville. Enfin, le réseau WAN ou Wide Area Network ou encore réseau étendu. Ce réseau WAN est le plus important des réseaux, il est constitué de réseaux LAN et WAN. Internet est le plus grand réseau WAN.

sigle	distance	débit
BUS	Quelque mètre	Quelque Kb/s
LAN	Jusqu'à 2km	De 1Mb/s à 10 Mb/s
MAN	100 km	Environ 100M à 10Gb/s
WAN	1000km	Quelque Mb/s



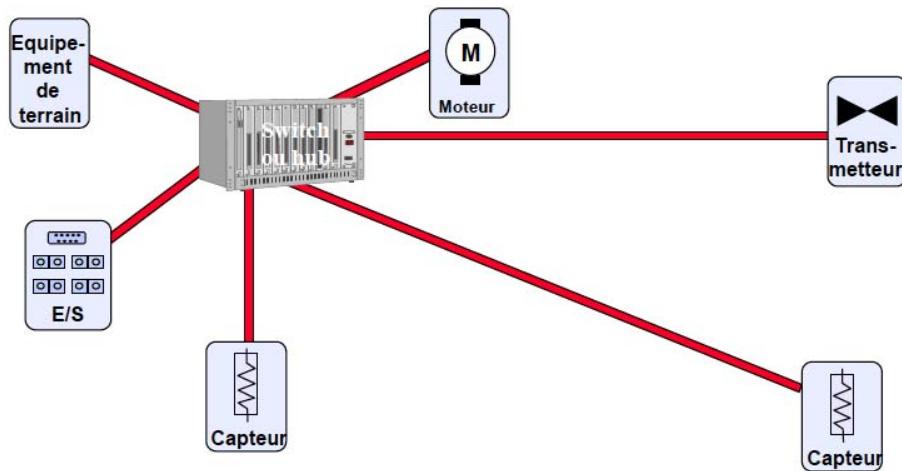
3. Topologies des réseaux

Nous pouvons dire pour résumer la structure des réseaux de communication qu'il existe deux types de conception :

- **Les canaux en mode point à point** : topologie en étoile ou maillée,
Liaisons de deux postes reliés physiquement par un support de communication.
Il s'agit d'un réseau commuté (switch), l'entête d'adresse permettant de définir un chemin unique de point à point...



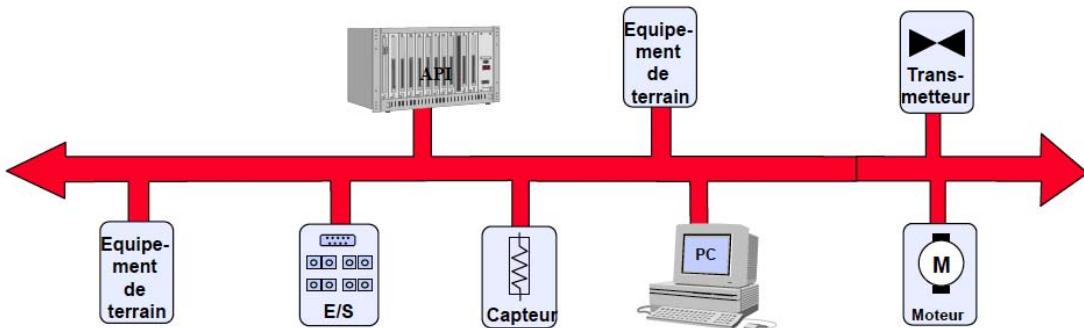
- **Etoile** : La **topologie en étoile** est une extension d'un réseau point à point entre 2 machines. L'équipement central est un commutateur (switch) qui constitue un noeud d'aiguillage en fonction de l'adresse du message. concentrateur ou un commutateur (hub).



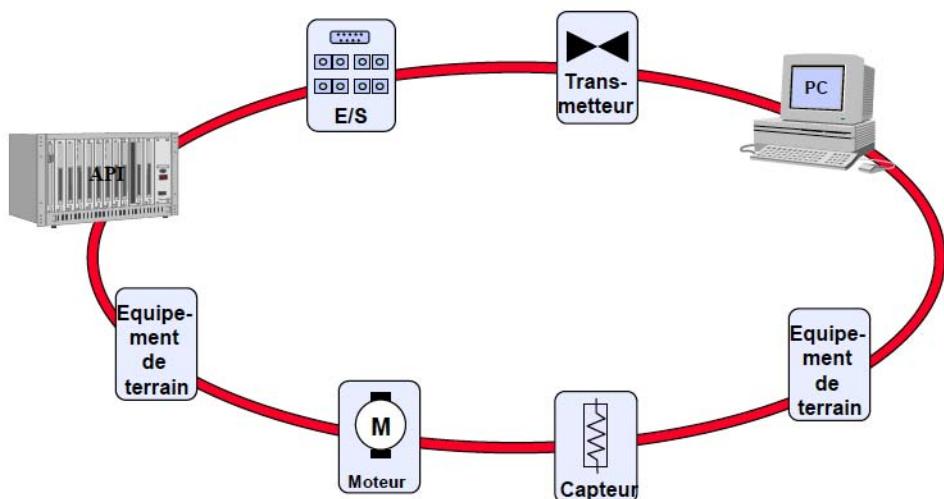
- **Les canaux de diffusion/multipoints**: topologie en bus ou en anneau, Liaisons dans les quelles le support physique de communication est partagé par plusieurs éléments. Dans le cadre d'une liaisons multipoint tous les messages mis sur le réseau sont percus par tous les équipements connectés.

- C'est l'adresse spécifique ou le contenu de message qui permettra à chaque nœud de déterminer si le message lui est adressé ou non.

• **Bus** : Dans une **topologie en bus** tous les ordinateurs sont reliés à une même ligne de transmission par l'intermédiaire de câble, généralement coaxial pour une liaison série. Le mot « bus » désigne la ligne physique qui relie les machines du réseau. Une **topologie en bus** est l'organisation la plus simple d'un réseau.



- **Anneau :** Dans un réseau possédant une **topologie en anneau**, les ordinateurs communiquent chacun à leur tour de proche en proche.



4. Technologie d'interconnexion de réseaux :

Les équipements mis en œuvres dans l'industrie ne communiquent pas forcément de la même manière. Pour pouvoir intégrer les différents équipements dans un système de communication, il faut qu'ils puissent communiquer entre eux. C'est pour cela que des équipements spécifiques sont mis en place tel que :

Répéteur : Il permet de régénérer / amplifie le signal reçu d'un côté et le retransmet tel quel de l'autre côté.

Le répéteur raccorde deux segments de réseau identiques. Il fonctionne au niveau 1 (couche physique) du modèle OSI. **Par exemple**, la longueur maximale d'un bus Ethernet est d'une centaine de mètres. Pour avoir un réseau plus long, on connectera plusieurs brins Ethernet au moyen de répéteurs.

Concentrateur (hub) : il permet de concentrer le trafic provenant de plusieurs hôtes et les diffuser sur l'ensemble des éléments qui lui sont connectés.

Les ponts (bridges) : ils permettent de relier les réseaux de même type.

Commutateur(Switch) : un commutateur est un pont multi port qui permet d'aiguillier les données vers leurs destinations.

Passerelle (Gateway): elles permettent de relier des réseaux d'architecture différents. Il opère au niveau 2 (couche liaison) du modèle OSI.

Routeur : le routeur est un ensemble de processus algorithmique. Ces processus sont destinés à prendre des décisions dispersées dans le temps et dans l'espace en fonction de la destination finale et de la table de routage (Table qui donne le choix de la route à prendre en fonction de la destination).

La figure suivante montre l'utilisation d'une passerelle pour interconnecter le réseau Profibus-DP et le réseau EIB (European Installation Bus Association).

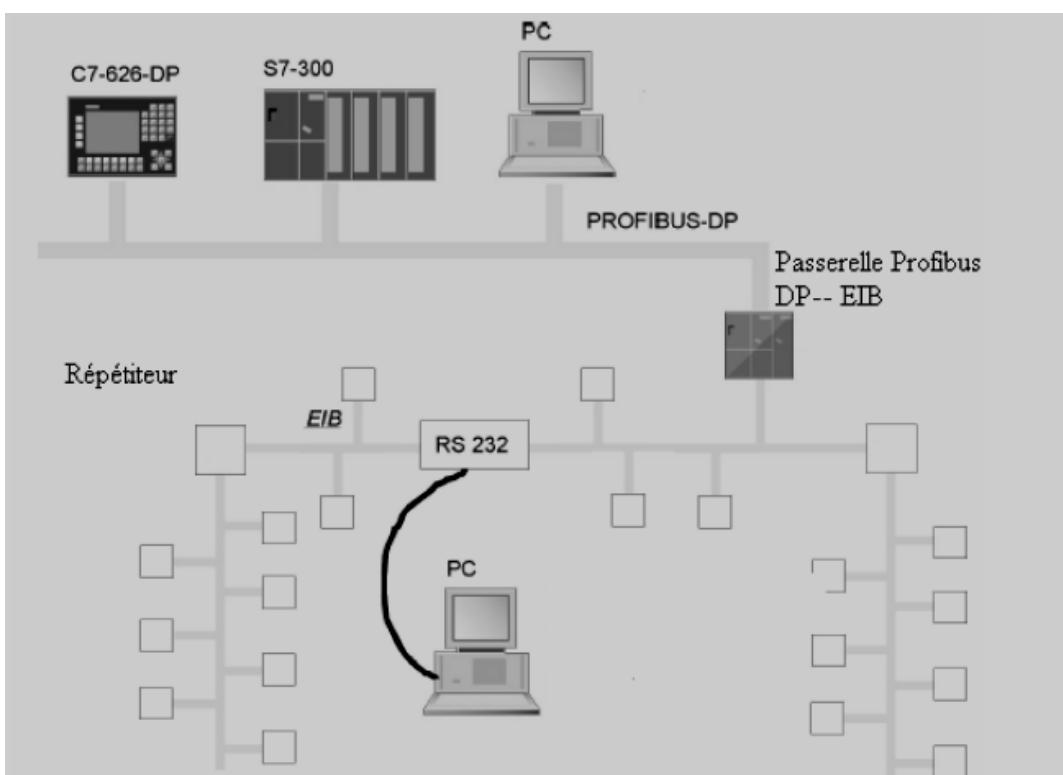


Fig.1.5 Utilisation d'une passerelle pour interconnecté la profibus DP et EIB

5. Le Support de transmission (partie passive)

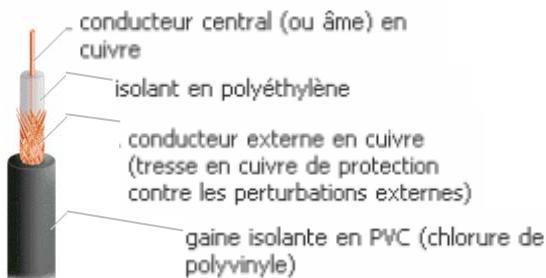
On peut utiliser plusieurs supports physiques de transmission pour relier les différents équipements du réseau. Il existe plusieurs types de câble comme support de transmission, les plus communs sont :

- Le câble coaxial.
- La paire torsadée.
- La fibre optique.
- Paire non torsadée non blinde.

Le câble coaxial : Un câble coaxial est constitué d'une partie centrale appelée âme. Elle accomplit la tâche de transmission de données et est généralement composée d'un brin de cuivre ou de plusieurs brins torsadés. La partie centrale est entourée d'un isolant qui permet d'éviter tout court avec le blindage. Le blindage entoure le câble et protège les données des différents parasites.

La gaine protège le câble de l'extérieur et fabriqué en caoutchouc ou en Chlorure de Polyvinyle (PVC).

On peut distinguer différents types de câbles coaxiaux :



Les différents composants d'un câble 10base2



Un câble 10base5

Certains types de paires torsadées peuvent également être envisagés. Il existe quatre types de câbles. UTP (Unshielded Twisted Pair) est une première catégorie non blindée. En milieu perturbé, son utilisation est bien évidemment à bannir. Deux blindages sont possibles.

Le premier, STP (Shielded Twisted Pair) consiste à insérer une tresse métallique. Le second, FTP (Foiled Twisted Pair), est constitué d'une mince feuille d'aluminium ou feuillard. La combinaison des deux, SFTP, donne un plus dans un environnement perturbé. Les principales catégories de câbles RJ45 sont :

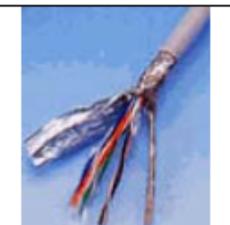
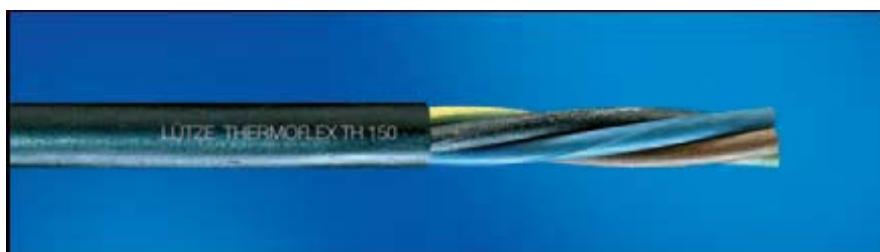
Paires torsadées			
UTP	Unshielded Twisted Pair	Câble non blindé	
FTP	Foiled Twisted Pair	Câble blindé avec une mince feuille d'aluminium ou feuillard	
SFTP	Shielded Foiled Twisted Pair	Câble reprenant les propriétés STP et FTP	
SSTP	Shielded Twisted Pair	Câble double blindé	

Tableau 1.1 Différents types de paires torsadées

Les câbles utilisés en industries sont renforcés selon le cas d'utilisation et les conditions à la quelles sont exposés tel que les températures basses et élevées les produits chimiques, les chocs, ... etc.

Exemples :

**Câble RJ45 résistant à la température + 150°**



Câble RJ45 résistant à la température + 180°



Câble RJ45 résistant aux perturbations



Câble industriel en fibre

Fig 1.6 Exemples des câbles industriels

Les connectiques associées doivent également être adaptées à l'environnement. Les prises RJ45 standards ont été améliorées pour assurer l'étanchéité et la robustesse mécanique nécessaires résistant aux perturbation et aux conditions difficiles de fonctionnement tel que les températures trop basses aux élevées et les chocs et aux différents produits chimiques qui peuvent exister dans une usine.

Les exigences techniques des interfaces sont beaucoup plus élevées dans un environnement industriel que dans un bureau. Les branchements doivent être protégés contre l'humidité, la poussière et la saleté afin d'assurer un échange de données impeccable et d'éviter une interruption de l'exploitation. Qu'il s'agisse d'activités de réglage ou de commande, de transmission d'images ou de l'entretien à distance d'une

machine, les tâches et les volumes de données à transmettre sont très divers. Des infrastructures différentes, de l'Ethernet par câbles en cuivre aux réseaux hyper performants par fibre optique, sont utilisées selon la quantité de données à transmettre et la vitesse de transmission désirées.

Exemples :

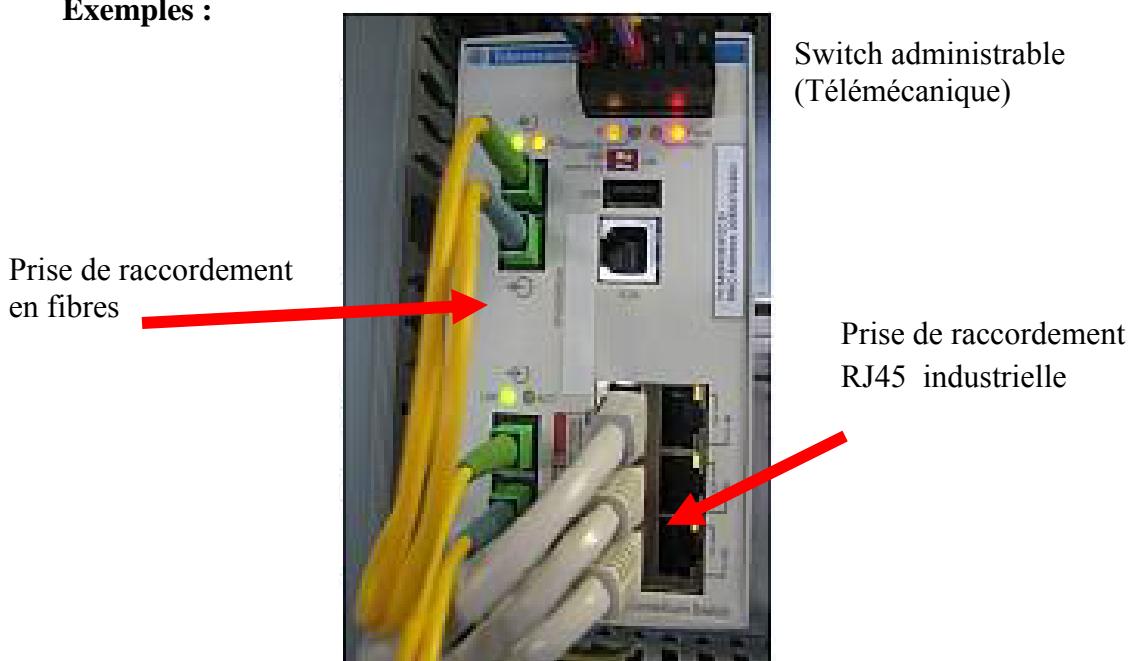


Fig 1.7 Prises de raccordement industrielles

6. Techniques de transmission de données

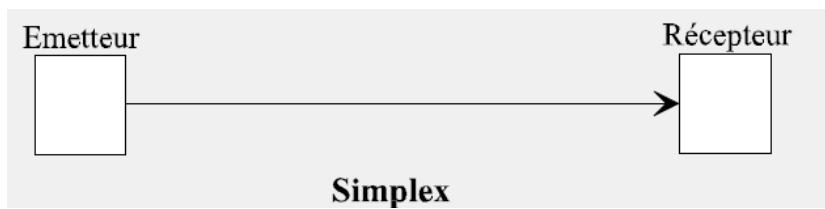
- Sens de transmission :**

Pour communiquer des informations entre deux points il existe différentes possibilités pour le sens de transmission :

- Liaisons unidirectionnelles,
- Liaisons bidirectionnelles,
- Liaisons bidirectionnelles simultanées.

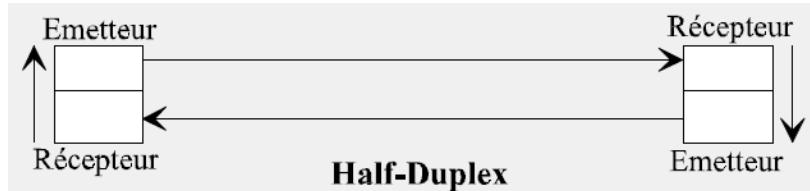
Simplex : les données circulent dans un seul sens : émetteur vers récepteur

Exemples : ordinateur imprimante, souris ordinateur, radio.



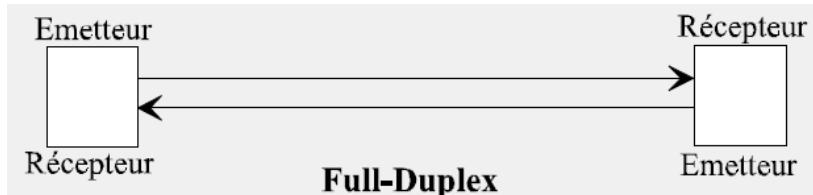
Half-duplex : les données circulent dans les 2 sens mais pas simultanément : la bande passante est utilisée en intégralité (aussi appelé alternatif ou semi-duplex).

Exemple : talkie/walkies, êtres humains (on ne coupe pas la parole).



Full-duplex : les données circulent de manière bidirectionnelle et simultanément : la bande passante est divisée par 2 pour chaque sens (duplex intégral).

Exemple : téléphone.



- **Transmission modulée**

On distingue :

- Modulation d'amplitude AM: chaque amplitude représente un 1/0
- Modulation en fréquence FM: chaque fréquence représente un 1/0
- Modulation en phase PM: chaque phase d'un signal représente un 1/0
- Modulation mixte : c'est un mélange de différentes modulations

La transmission modulée consiste à transformer un signal en bande de base en un signal sinusoïdal grâce à un MODEM (Modulateur-Démodulateur).

- **La Transmission bande de base**

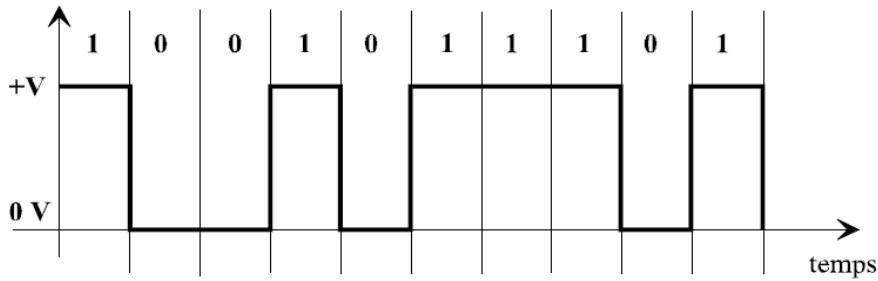
Le principe de la transmission en bande de base (BASEBAND) consiste à transmettre un **signal numérique** dans une bande de fréquence (codage en signal carré).

Remarque : la transmission en large de bande (BROADBAND) est analogique.

Exemple : transformation **numérique/numérique** avec la suite de bits suivante :

1001011101

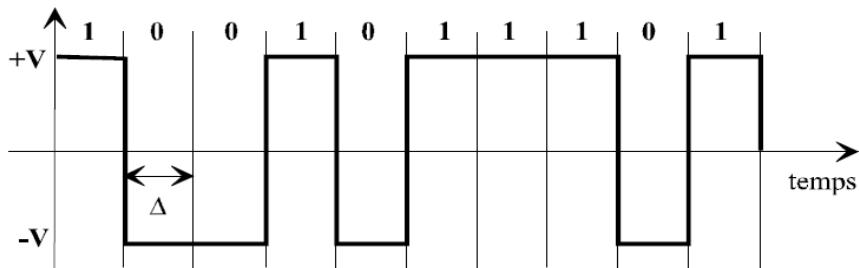
Dont la représentation sous la forme d'un signal électrique est donnée par la figure suivante :



Cette représentation est faite sous la forme de créneaux unipolaires avec une tension positive $+V$ pour les niveaux logique '1', et une tension nulle $0V$ pour les niveaux logique '0'.

Le code NRZ :

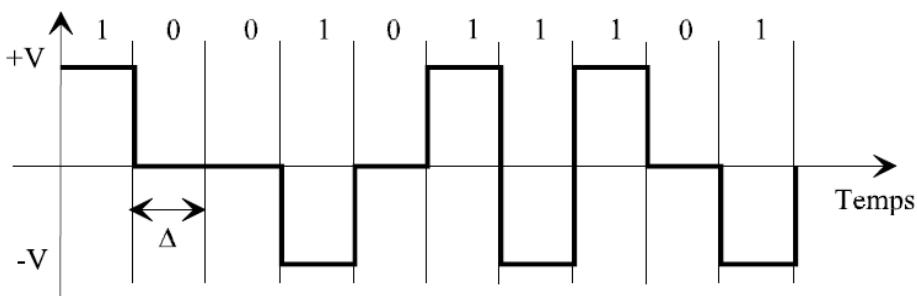
Les niveaux '0' sont codés par une tension $-V$, Les niveaux '1' sont codés par une tension $+V$



Le code Bipolaire :

Les niveaux '0' sont codés par une tension Nulle ($0V$),

Les niveaux '1' sont codés alternativement par un niveau $+V$ et $-V$



Codage Manchester

Son objectif est de garantir la synchronisation de l'émetteur et le récepteur en minimisant les silences (les longues séries de 1 ou de 0). C'est un code assez utilisé dans les réseaux industriels, son principe consiste à traduire chaque '0' en un front montant et chaque '1' en un front descendant. Pour ce faire, on utilise une fonction non ou exclusif entre l'horloge et la donnée.

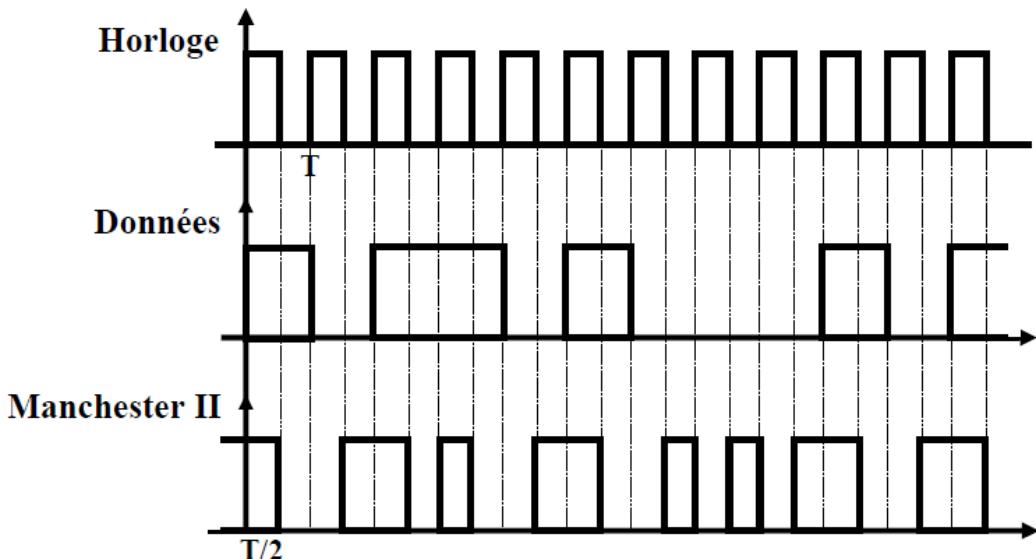


Fig 1.8 Codage Manchester

Codage adapté

Pour minimiser les erreurs dans les réseaux industriels, on commence premièrement par limiter la bande passante utilisée ce qui permet de minimiser les interférences. En plus les techniques de codage en bande de base permet de sécuriser les données en garantissant la synchronisation.

Bit stuffing

Afin de sécuriser la transmission des messages on utilise la méthode dite de Bit-Stuffing (bit de transparence). Cette méthode consiste, dès que l'on a émis 5 bits de même polarité sur le bus, à insérer un bit de polarité contraire pour casser des chaînes trop importantes de bits identiques. On obtient ainsi dans le message un plus grand nombre de transitions ce qui permet de faciliter la synchronisation en réception par les noeuds. Cette technique est uniquement active sur les champs de SOF, d'arbitrage, de

contrôle, de CRC (délimiteur exclu). Pour un fonctionnement correct de tout le réseau, cette technique doit être implémentée aussi bien à la réception qu'à l'émission.

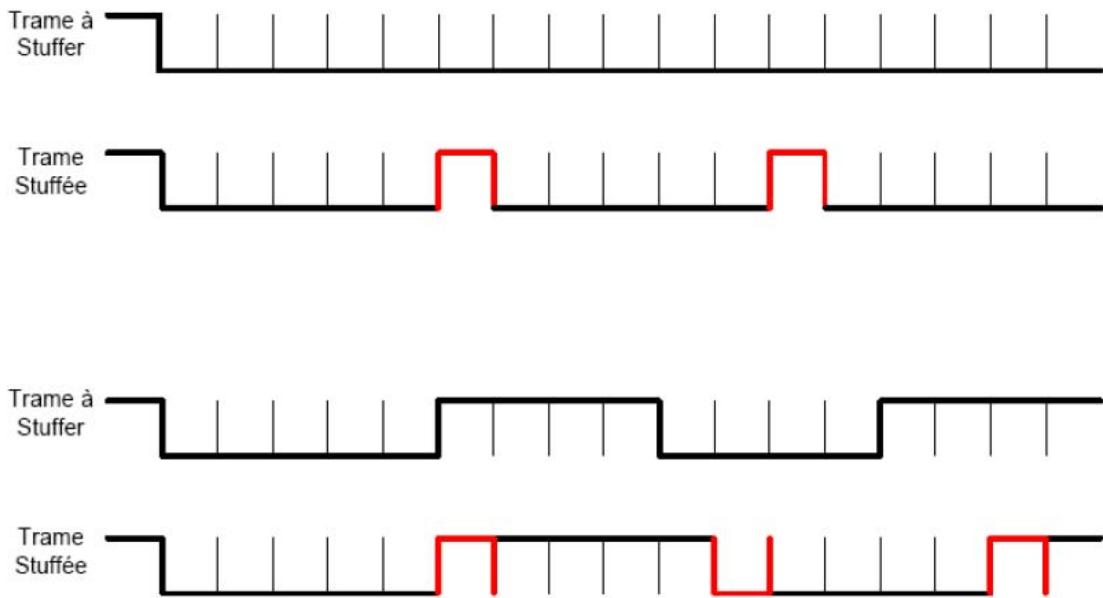


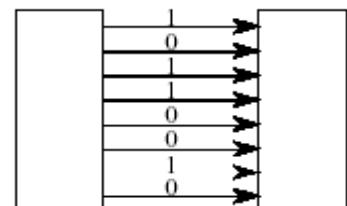
Fig 1.9 Technique Bit Stuffing

En général, un bon support physique, une installation correcte et une vitesse de transmission adaptée évitent une bonne partie des erreurs de trames.

- **Transmission Série / Parallèle**

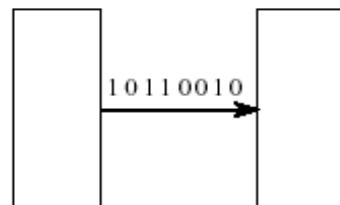
Parallèle : elle consiste à envoyer des données simultanément sur plusieurs canaux. La transmission est plus rapide qu'une transmission bit par bit. Or il existe un certain nombre de difficultés, limitant le débit et la distance de ces connexions :

- Les fils proches entraînent des perturbations importantes à haut débit.
- Le nombre de fils pose un problème de place et de coût.



Série : elle consiste à envoyer des données via un canal Unique de transmission.

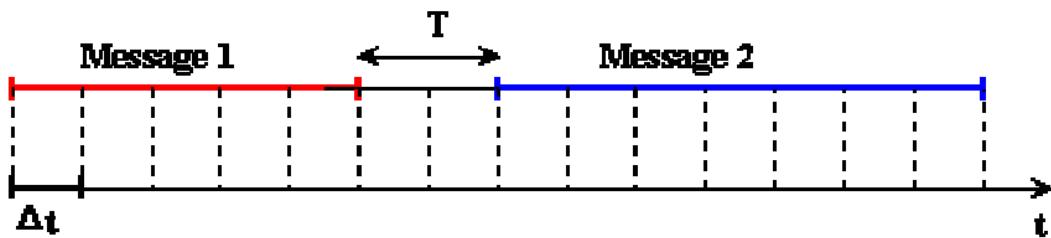
Cet échange plus lent que la communication parallèle et sur plus grandes distances.



- **Transmission Synchrone / Asynchrone**

Deux modes de transmission permettent gérer la communication entre émetteur et récepteur:

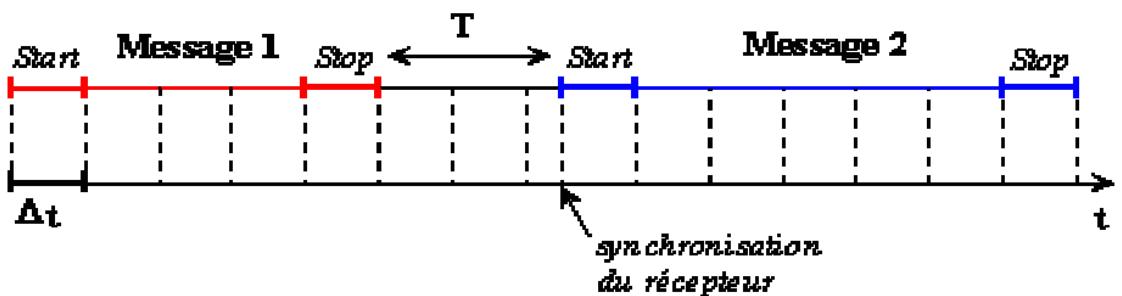
Mode synchrone : l'émetteur et le récepteur sont cadencés à la même fréquence d'horloge. L'horloge de réception et d'émission doit émettre le même signal (pour la synchronisation). Le matériel le plus lent impose donc le rythme des communications. Le temps qui sépare l'envoi de 2 messages doit être un multiple de Δt d'un bit.



Δt : temps nécessaire pour l'envoi d'un bit

T : temps entre l'envoi du message 1 et du message 2, multiple entier de Δt

Mode asynchrone : ce type de transmission ne nécessite pas un signal d'horloge mais elle utilise des caractères de contrôle **START** bit et un ou deux **STOP** bits. L'avantage des transmissions asynchrones réside dans la simplicité de la méthode. Le temps entre deux messages n'étant pas défini, le message est envoyé sans attendre la synchronisation.



Δt : temps nécessaire pour l'envoi d'un bit

T : temps quelconque entre l'envoi du message 1 et du message 2

7. Protocoles de communication

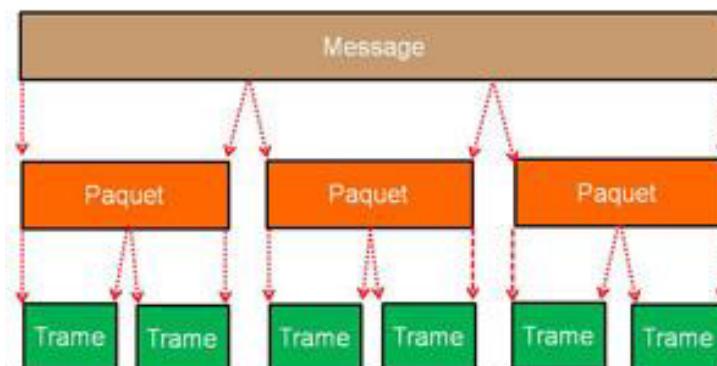
- **Protocole** : ensemble de règles pour effectuer un échange d'information (les règles de dialogue entre mêmes couches).

- **Trame** : Suite de bits ou caractères émis par un équipement sur le réseau et dont l'ensemble constitue une information cohérente interprétable par le ou les destinataires (messages, questions ou réponses, diffusion d'une valeur...).

La longueur des trames est toujours limitée.

- **Message** : Information échangée sur un réseau au travers de services définis dans un protocole de messagerie : lecture, écriture, téléchargement de zones mémoires, fichiers, etc....

- Découpage d'un message



Les mécanismes de transmission de données vont-ils procéder à un découpage de l'information à transporter.

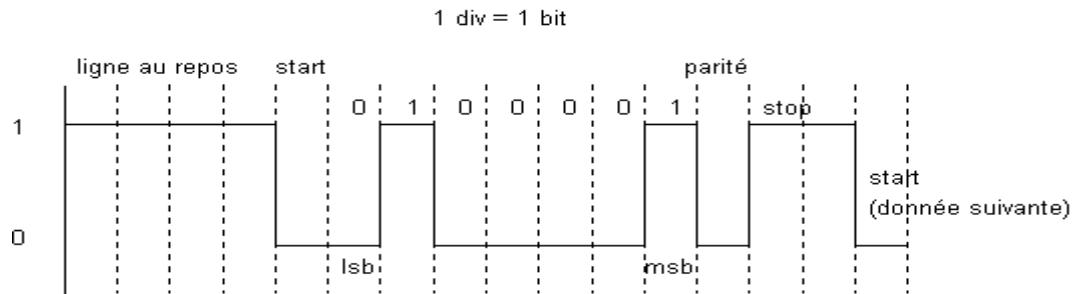
Au départ, on a le **message** par exemple un fichier, une image, une vidéo... est subdivisé en **paquets** dont le processus d'envoi est supervisé de bout en bout. Contrairement au message qui peut être très gros, le paquet est de taille raisonnable et fixe.

Le paquet est lui-même subdivisé en **trames** de longueur fixe dont la supervision se fait entre deux machines en vis à vis (c'est-à-dire liées directement sans transit).

- **Mise en oeuvre d'un protocole de communication**

Afin que les éléments communicants puissent se comprendre, il est nécessaire d'établir un protocole de transmission. Ce protocole devra être le même pour les deux éléments communiquants afin que la transmission fonctionne correctement.

- **Trame de communication :** Une trame est composée de 4 parties :
 - **1 bit de start** : la ligne au repos est à l'état logique 1, pour indiquer qu'un mot va être transmis la ligne passe à l'état bas avant de commencer le transfert. Ce bit permet de synchroniser l'horloge du récepteur.
 - **5 à 8 bits de données** : Les données effectives à transmettre, en commençant la transmission par les bits de poids faible vers les bits de poids fort.
 - **0 ou 1 bit de parité** : le mot transmis peut être suivi ou non d'un bit de parité qui sert à détecter les erreurs éventuelles de transmission.
 - **Bit(s) de stop** : après la transmission, la ligne est positionnée au repos.



Trame de transmission en parité paire, avec 2 bits de stop, du caractère B dont le codage ASCII est 10000102

- **Paramètres entrant en jeu :**

- **La vitesse de transmission** : Elles sont normalisées et les valeurs principales en bauds en sont les suivantes: 50, 75, 110, 150, 300, 600, 900, 1200, 2400, 3600.
- **Longueur des mots** : de 5 à 8 bits de données.
- **Nombre de bit de stop** : 1, 2 ou 1,5 bits de stop.
- **Control de flux** : Sans, Matériel, Logiciel (XON/XOFF)
- **Parité** : Ce bit peut être forcé à 1 (mark parity) ou à 0 (space parity). Sinon la parité peut être :

- **paire** : le bit ajouté à la donnée est positionné de telle façon que le nombre des états 1 soit pair sur l'ensemble donné + bit de parité.

ex : soit la donnée 11001011 contenant 5 état 1, le bit de parité paire est positionné à 1, ramenant ainsi le nombre de 1 à 6.

- **impaire** : le bit ajouté à la donnée est positionné de telle façon que le nombre des états 1 soit impair sur l'ensemble donné + bit de parité

ex : soit la donnée 11001001 contenant 5 état 1, le bit de parité paire est positionné à 0, laissant ainsi un nombre de 1 impaire.

8. LE MODÈLE OSI

Le modèle OSI (de l'anglais Open Systems Interconnection) est une norme de communication, en réseau, de tous les systèmes informatiques.

Les couches

Ce modèle a été proposé par l'ISO (Interconnexion des systèmes ouverts) pour interconnecter des ordinateurs et traite entre autres les trois niveaux trame, paquet, message vus ci-dessus.

Il est fondé sur une structure de sept couches ou niveaux :

Niveau 7	Application	Accès aux services du réseau (sémantique)
Niveau 6	Présentation	Mise en forme des données et de leur structure (syntaxe) Chiffrement
Niveau 5	Session	Gestion de sessions de dialogue entre les terminaisons
Niveau 4	Transport	Contrôle du transfert des messages de bout en bout Découpage en paquets
Niveau 3	Réseau	Acheminement des paquets Découpage en trame Routage/adressage/contrôle de flux
Niveau 2	Liaison	Transport des trames Établissement des connexions Détection d'erreurs
Niveau 1	Physique	Transfert des informations binaires sur le support (média)

Nous retrouvons dans ce modèle les notions précédentes :

- le niveau 4 manipule les messages,
- le niveau 3 manipule les paquets,
- le niveau 2 manipule les trames,

- le niveau 1, niveau physique, transporte des bits sur un support filaire ou radio.

Dans cette couche les raccordements peuvent être définis par :

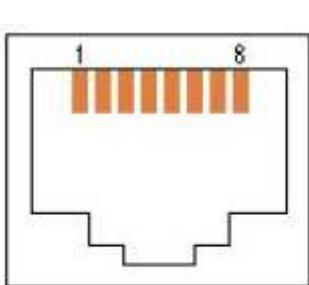
- Le type des connecteurs, par exemple : DB9, DB25, RJ45.
- Les niveaux électriques appliqués (unipolaire, différentiel).
- Le type de transmission.
- Le codage et le débit des signaux de données.



A : DB9 male femelle.



B : DB25 male femelle.



Connecteur RJ45 femelle



RJ45 male.

Les échanges : Les échanges entre deux machines sont gérés par un **protocole**.

Une couche ne peut dialoguer qu'avec une couche de même niveau. Une couche reçoit des services de la couche juste inférieure et fournit des services à la couche juste supérieure.

L'émission d'information se fait en descendant les couches une par une. Chaque niveau ajoute un niveau de découpage et d'encapsulation de l'information. L'opération inverse (concaténation, désencapsulation) est faite en réception en remontant les couches.

Chapitre 2.

Bus de terrain et réseaux locaux industriels (RLI)

1. Réseaux locaux industriels

Un réseau local industriel, en une première approximation, est un réseau local utilisé dans une usine ou tout système de production pour connecter diverses machines afin d'assurer la commande, la surveillance, la supervision, la conduite, la maintenance, le suivi de produit, la gestion, en un mot, l'exploitation de l'installation de production.

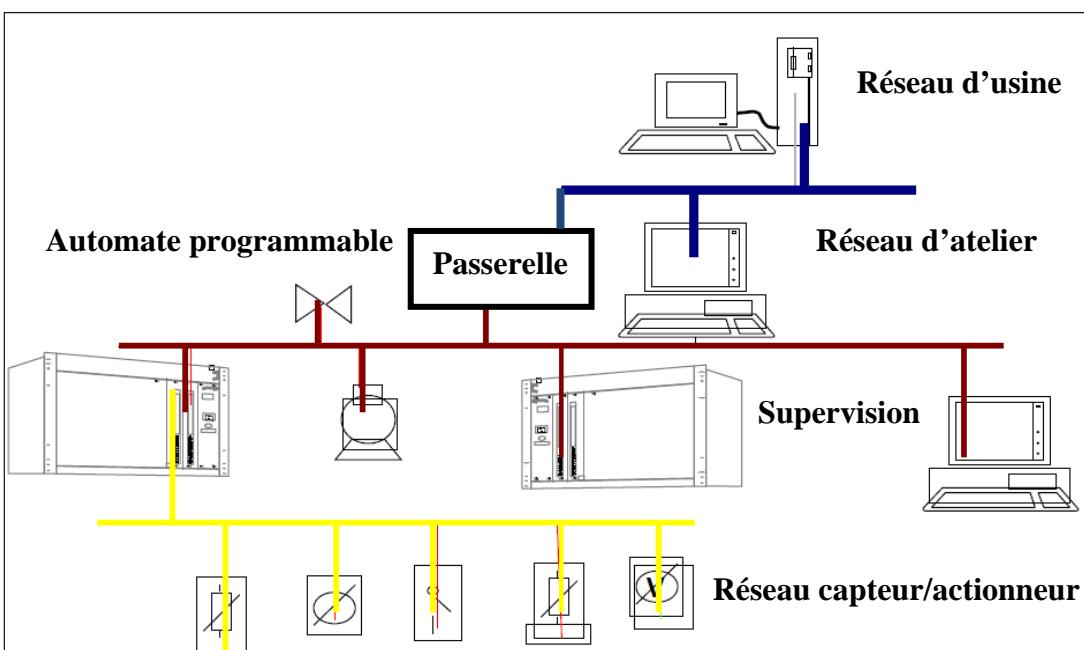


Fig.2.1 Architecture globale d'un RLI

Néanmoins, à chaque niveau d'abstraction, dans un environnement industriel, correspond un réseau permettant de relier ses différents éléments. Entre deux niveaux différents il doit y avoir une passerelle si les deux réseaux sont hétérogènes.

On distingue donc trois types de réseaux :

Les réseaux de terrain connectent les capteurs, les actionneurs et les dispositifs comme les automates, les régulateurs et plus généralement tout matériel supportant des processus d'application ayant besoin d'avoir accès aux équipements de terrain. Ils doivent offrir au minimum les mêmes services que les systèmes d'entrées/sorties industrielles, mais d'autres très importants (de synchronisation par exemple) seront aussi définis pour faciliter la distribution des applications.

Les réseaux d'atelier (ou de cellule) connectent, dans une cellule ou un atelier, les dispositifs de commande de robots, de machines-outils, de contrôle de la qualité (lasers, machines à mesurer). Ces réseaux se rencontrent essentiellement dans les industries manufacturières.

Les réseaux d'usine un réseau qui irrigue l'ensemble de l'usine, interconnectant des ateliers, des cellules avec des services de gestion, les bureaux d'études ou des méthodes.

2. Avantages des réseaux de terrain

Le but initial des bus de terrain était de remplacer les anciens systèmes centralisés en distribuant le contrôle, le traitement des alarmes, le diagnostic aux différents équipements qui sont devenus de plus en plus intelligents.

Fig.2.2 Système de contrôle direct (automatisme classique)

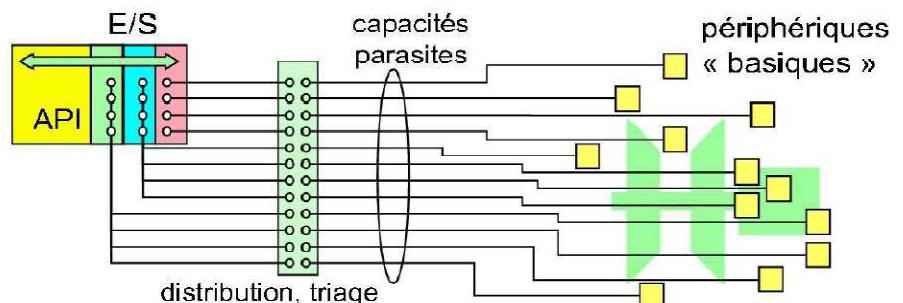
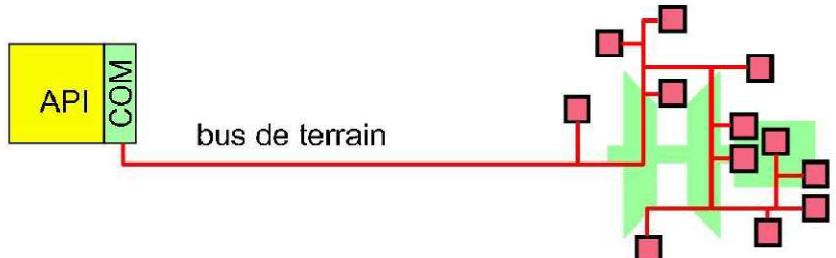
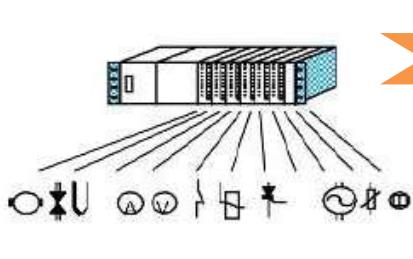


Fig.2.3 Bus de terrain



Economie de câbles



Distribution de l'intelligence

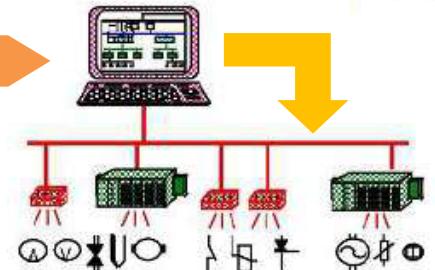


Fig.2.4 Système de contrôle décentralisé

Les anciens systèmes de communication industriels utilisaient la boucle de courant 4-20 mA, qui est un moyen de transmission analogique permettant de transmettre un signal analogique sur une grande distance sans perte ou modification, pour relier les équipements aux machines de contrôle :

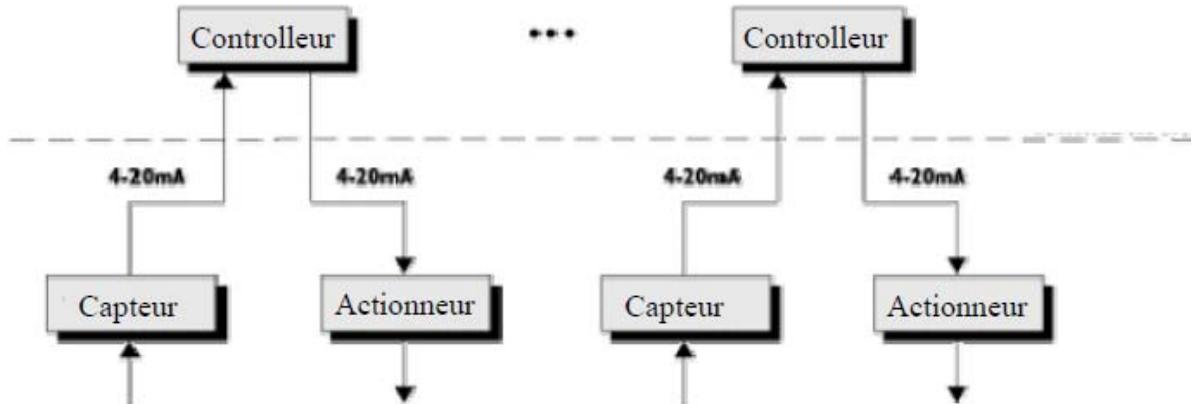


Fig.2.5 Boucle de courant 4-20 mA

Après l'apparition de la communication numérique, cette technique a été rapidement remplacée par les bus de terrain. Cela permet plusieurs avantages:

a. Réduction des coûts initiaux :

- Réduction massive du câblage : un seul câble en général pour tous les équipements au lieu d'un par équipement
- Possibilité de réutiliser le câblage analogique existant dans certains cas
- Réduction du temps d'installation
- Réduction du matériel nécessaire à l'installation

b. Réduire le coût d'exploitation en :

- Augmentant les performances de l'automatisme
- Réduisant les coûts des extensions futures.

c. Réduction du coût de maintenance :

- Complexité moindre donc moins de maintenance (fiabilité accrue)
- Maintenance plus aisée : temps de dépannage réduit, localisation des pannes possibles grâce à des diagnostics en ligne («on line») donc à distance
- Outils de test dédiés (programmes analyseurs...)

- Flexibilité pour l'extension du bus de terrain et pour les nouveaux raccordements. La distribution du contrôle et sa numérisation permettent d'atteindre des performances intéressantes dans les réseaux de terrain :
- Précision : communications numériques : la donnée numérique transférée est sans erreur de distorsion, de réflexion... contrairement à un signal analogique
- Les données et mesures sont généralement disponibles à tous les équipements de terrain
- Communications possibles entre deux équipements sans passer par le système de supervision
- La structure distribuée permet de faire résider des algorithmes de contrôle au niveau de chaque équipement de terrain (chaque nœud)
- Accès à des variables multiples pour un nœud

3. Classification

Généralement, on regroupe sous le terme «bus de terrain» tous les bus de communication industriels. On distingue néanmoins par complexité décroissante :

- Le bus d'usine : réseau local industriel basé sur Ethernet de type MAP ou TOP (se rapproche du réseau local IP)
- Le bus de terrain («Feld Bus»)
- Le bus de bas niveau («Sensor Aktor Bus») : bus capteur/actionneur
- Permet l'envoi de trames de quelques dizaines d'octets à 256 octets...
- Temps de réaction de quelques ms à quelques dizaines de ms
- Relie de unités intelligentes qui coopèrent dans l'exécution de travaux (coopération de tous les nœuds)
- Communications Maître/Eclave ou Multimaître
- Possibilité d'accès au niveau inférieur (capteur/actionneur)

Bus capteur/actionneur :

- Relie entre eux des nœuds à intelligence limitée ou nulle
- Temps de réaction primordial
- Limitation du nombre de données à faire circuler sur le bus (trame unique, fixe, cyclique (Interbus) ou trame avec protocole (CAN)).

Dans nos jours, il existe plus d'une cinquantaine de spécifications différentes de réseaux de terrain (CAN, LON, Profibus-FMS/PA, WorldFip, Interbus, Profibus-DP,

ASInterface, Bitbus, Arcnet, Sercos, Modbus Plus, P-net, FAIS, EIBus, VAN, PLAN, Sibus, Batibus, Hart, Modbus/Jbus, Bus DIN, etc.)

La figure suivante donne une classification de quelques réseaux de terrain selon la complexité de leurs équipements et le flot d'informations échangées.

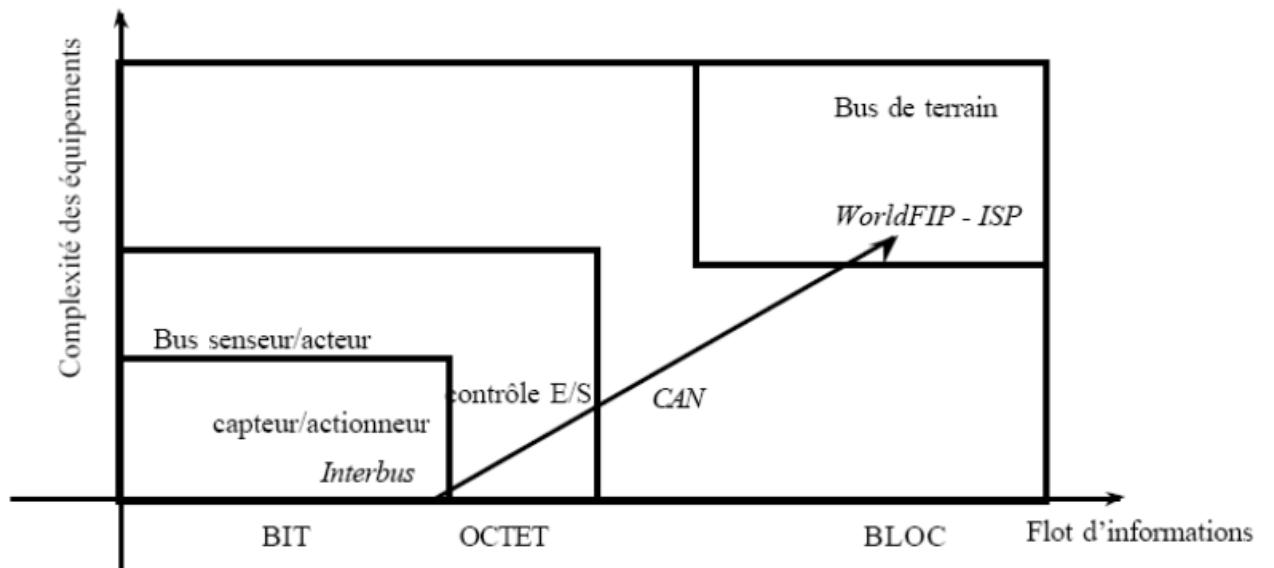


Fig.2.6 Classification des bus de terrain selon la complexité

La figure suivante donne une classification des réseaux de terrain selon le niveau de contrôle dans lequel ils sont utilisés, et selon les applications réalisées.

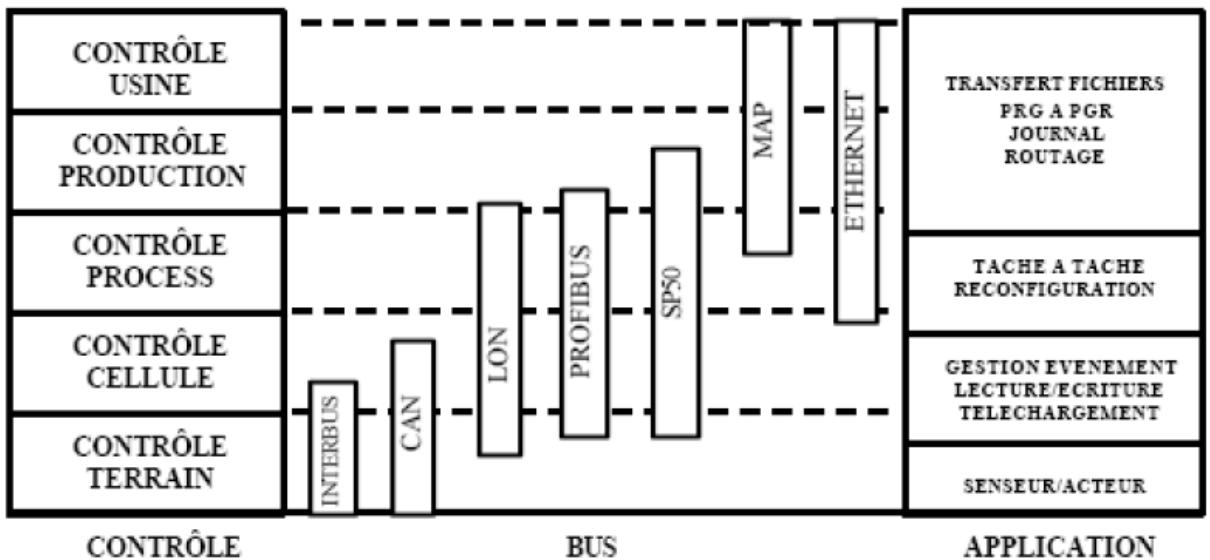


Fig.2.7 Classification des bus de terrain selon les fonction

Les réseaux de bas niveau sont très diverses aussi, la figure suivante montre les différents types de capteurs et d'actionneur et leur utilisation ainsi que les réseau capteurs/actionneurs qui les utilisent :

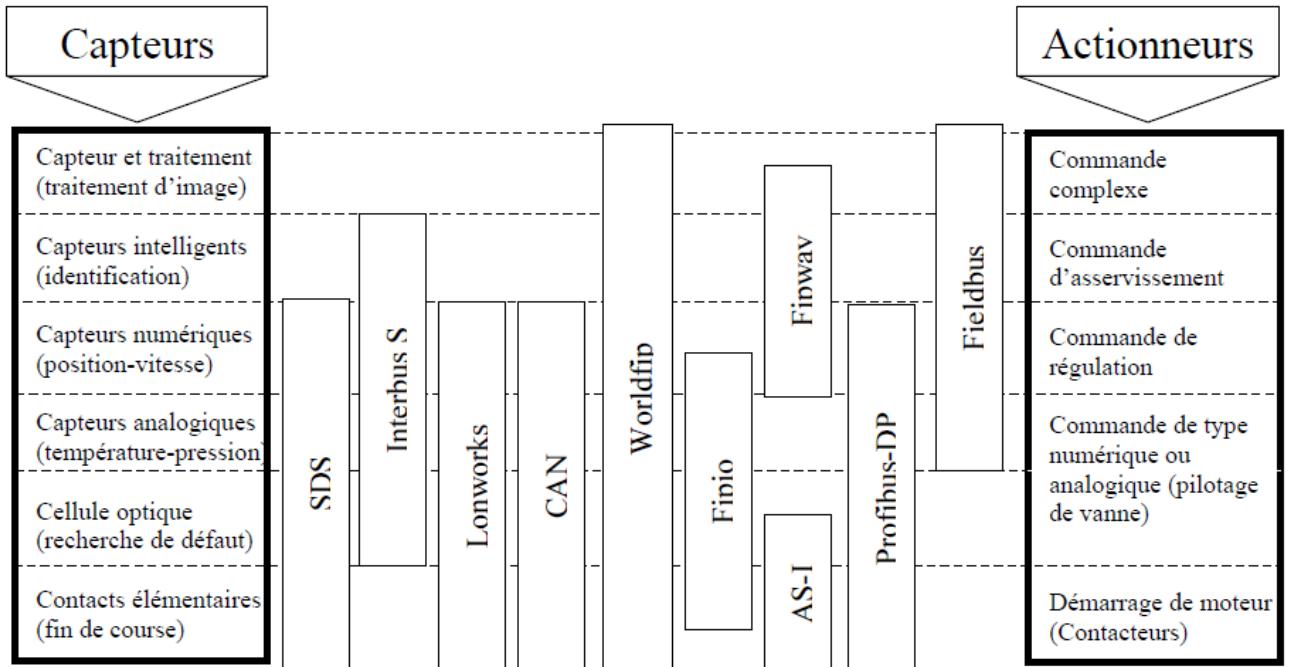


Fig.2.8 Champs d'application des réseaux capteurs/actionneurs

Aspects physiques

Les propriétés importantes de la couche physique sont:

- La topologie,
- Le support physique : cuivre, fibre optique, sans fil (radio, IR)
- Le taux de transmission,
- La longueur maximale, nombre de nœuds, alimentation,
- La résistance aux attaques, aux perturbations physiques.

4. La topologie

Les topologies connues dans les réseaux sont :

Tableau 1 Caractéristiques des différentes topologies réseaux

Topologie	Avantages	Inconvénients
Arbre Point à point (étoile)	Plusieurs communications en parallèle	- Routage - Chemins de longueurs différentes
Anneau Point à point	Câblage simple	Temps de parcours
Bus	Communication directe pas de routage.	Contrôle d'accès au medium.

Dans la topologie en étoile Les différentes machines sont connectées à un switch, qui est lui même relié à un commutateur central qui représente le cœur de réseau. Les différents LAN (réseaux locaux) sont interconnectés au travers de routeurs. Les câbles utilisés sont les paires torsadées et fibres optiques. Ce type d'architecture (dite "structurée") se rencontre en industrie avec quelques adaptations de façon à ce que sa gestion soit souple et décentralisée.

C'est par exemple le cas pour la connexion des automates à un serveur de supervision. Des stations peuvent servir de relais entre les automates et le PC central.

Cette architecture a pour inconvénient d'être plutôt lourde à mettre en œuvre (un câble pour chaque équipement, de nœud à nœud, etc.).

Les industriels préfèrent des topologies en bus ou en anneau. Pour les bus, le coaxial épais (style 10Base5) sera privilégié pour faire face aux perturbations électromagnétiques. Les réseaux en anneau peuvent être mis en œuvre avec n'importe quel support (cuivre, fibre ou coaxial).

Leur intérêt est la redondance naturelle des liens (si l'un "tombe", l'autre prendra le relais).

De façon plus générale, la redondance est aussi importante lors de la conception des appareils (alimentation, ventilateurs...) que pour la topologie du réseau. En étoile, il existe des techniques qui permettent de faire face aux ruptures de liaison en proposant des chemins alternatifs. Le temps de bifurcation est inférieur à la seconde. D'autres techniques considèrent deux liens redondants et même un maître (à défaut, un esclave) actif quand le maître ne répond pas.

5. Caractéristiques d'un RLI

L'aspect connexion de machines, même s'il est fondamental, n'est pas le seul à considérer. Ce sont surtout les processus d'application répartis sur les machines qui sont mis en relation par les réseaux. Et ce sont ces types de relations qui définissent les caractéristiques d'un réseau ou d'un autre. Les besoins en communication sont alors très diversifiés selon les matériels connectés et les applications qu'ils supportent, ce qui explique que les réseaux locaux industriels sont nombreux et variés. Il est évident que le trafic entre des capteurs, des actionneurs et des automates n'est pas le même qu'entre un système de CFAO et un contrôleur de cellule de fabrication. Les besoins diffèrent selon des critères tels que la taille des données à transmettre et les

contraintes de temps associées. Le schéma suivant représente les caractéristiques essentielles des réseaux des différents niveaux d'un système industriel.

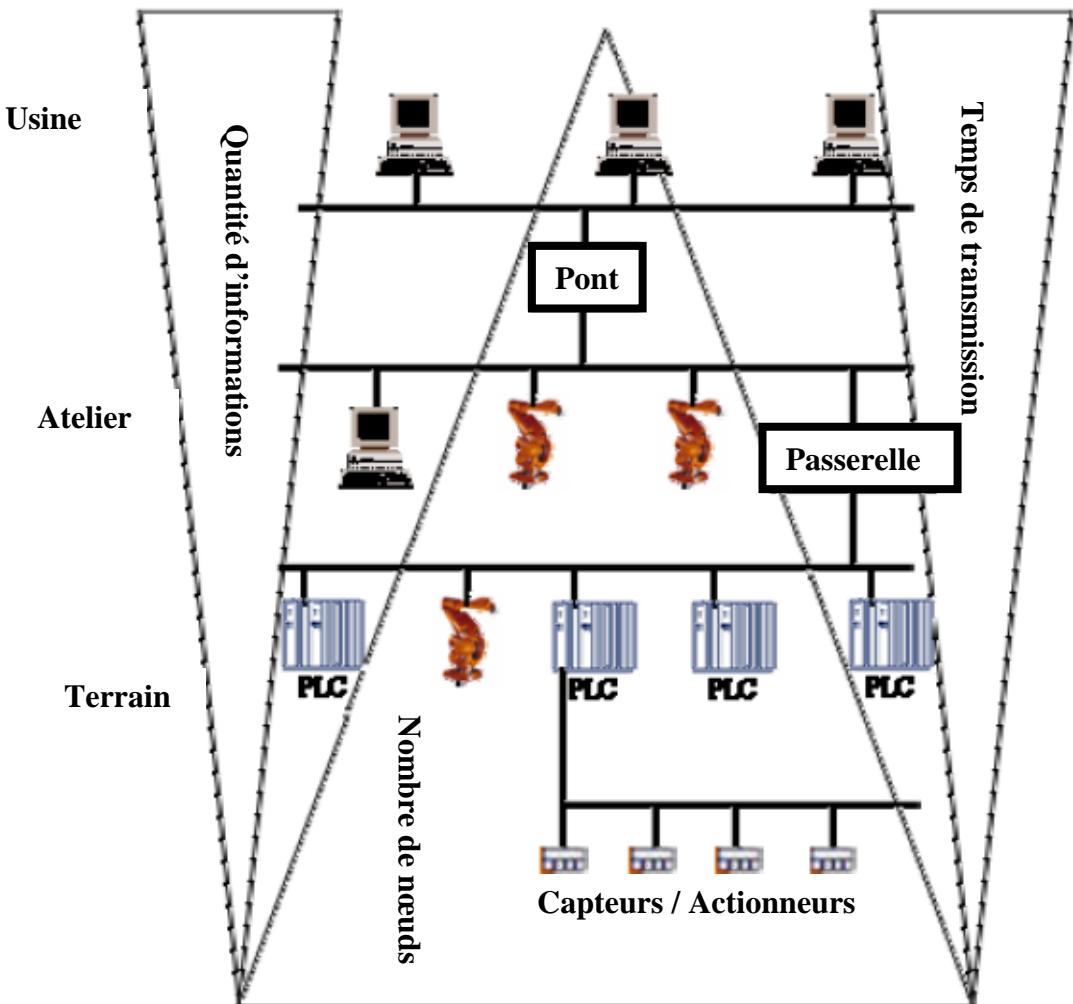


Fig.2.9 Caractéristiques des différents niveaux d'un RLI

Le triangle du milieu représente le nombre de noeuds reliés par le réseau de chaque niveau : ce nombre diminue en montant les niveaux : le niveau terrain comporte un nombre très important de noeuds tel que les capteurs les actionneurs, les machines, les robots, ...etc, qui peuvent être même reliés à travers plusieurs réseaux locaux. Le niveau atelier en comporte un nombre moins important, à savoir quelques stations de supervision et quelques robots. Le niveau usine quant à lui ne comporte que quelques stations de gestion de production et de conception.

Le triangle gauche représente la quantité d'information échangée dans chaque niveau. Cette quantité est très importante au niveau usine où on a besoin de transmettre des fichiers de données tel que les plans, les programmes,...etc. En descendant les

niveaux, la taille des données diminue pour arriver à quelques bits entre les capteurs et les actionneurs.

Le triangle droit représente la vitesse de transmission requise à chaque niveau.

Effectivement au niveau terrain la vitesse de transmission doit être très élevée pour pouvoir émettre les messages en temps réel. Cependant, au niveau usine le temps réel n'est pas fortement exigé : la perte de quelques secondes lors du transfert d'un fichier n'est pas vraiment catastrophique.

6. La pyramide du CIM (Computer Integrated Manufacturing)

La réalisation de chaque fonction de l'entreprise est liée à l'échange d'information entre le niveau inférieur et le niveau supérieur. Chaque niveau est défini par la taille de donnée échangée et par le temps d'échange des données.

Les niveaux de la CIM peuvent être définis comme suit :

- **Capteurs Actionneurs** : il permet l'acquisition des données et la réaction sur terrain.
- **Commande de processus** : il permet le pilotage du processus industriel
- **Cellule** : elle permet d'assurer la coordination, la gestion et le suivi des processus locaux)
- **Atelier** : il permet d'assurer la gestion de production des données
- **Usine** : elle permet d'assurer la gestion de l'entreprise.

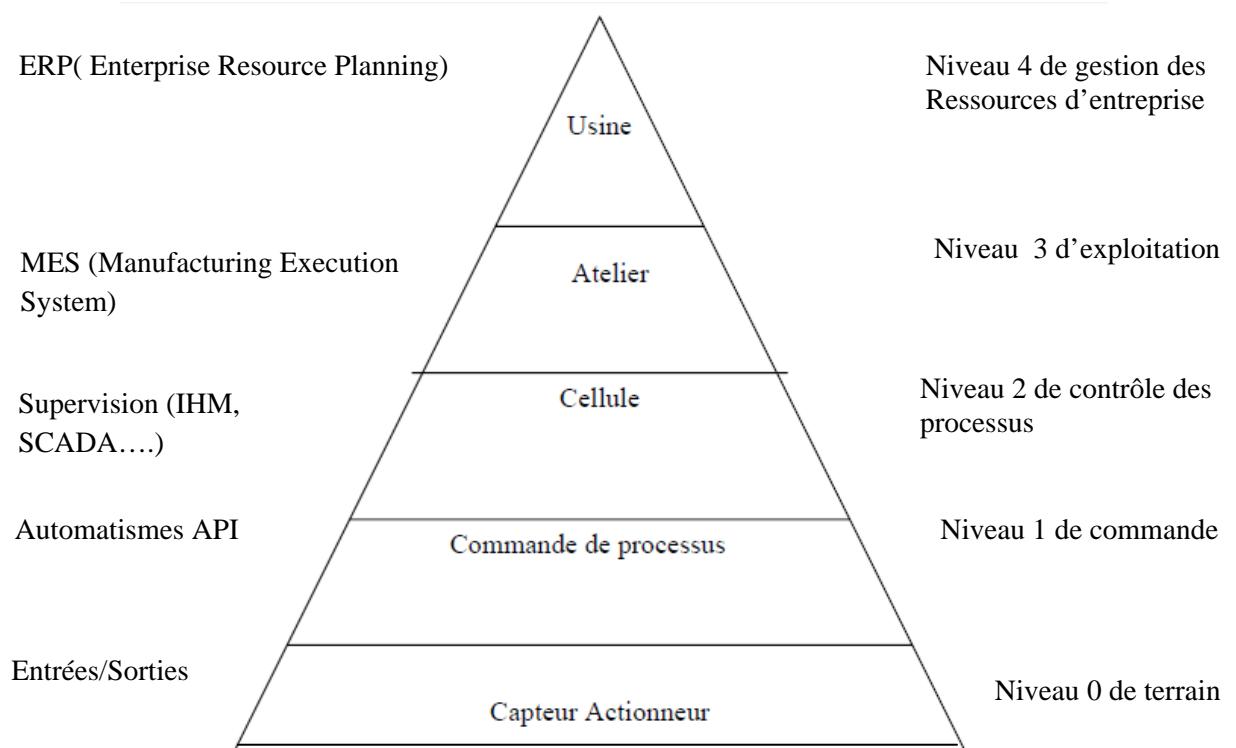


Fig.2.10 La pyramide du CIM

Est une méthode largement généralisée qui représente 4 niveaux auxquels correspondent des niveaux de décision. Plus on s'élève dans la pyramide du CIM, plus le niveau de décision est important et plus la visibilité est globale. Un niveau supérieur décide ce qu'un niveau inférieur exécute distingue généralement les niveaux suivants :

- au niveau 3 : la gestion des produits et des stocks, la gestion d'approvisionnements, la gestion des clients, des commandes et de la facturation (gérés par les ERP (Enterprise Resources Planning))
- au niveau 2 : la localisation des produits en stocks, les mouvements physiques et la gestion des lots (gérée par le système de gestion d'entrepôt)
- au niveau 1 : les automatismes
- au niveau 0 : les capteurs et actionneurs

7. Exigences globales

De tels besoins nécessitent d'être pris en charge que ce soit au niveau physique ou au niveau protocoles: liaison et application.

Au niveau physique les réseaux locaux industriels doivent être dotés de moyens résistant aux perturbations, aux chocs, à la chaleur, ...etc. tel que les câbles et les connecteurs blindés. Les moyens de communication utilisés à chaque niveau doivent répondre en terme de débit aux besoins de ce niveau.

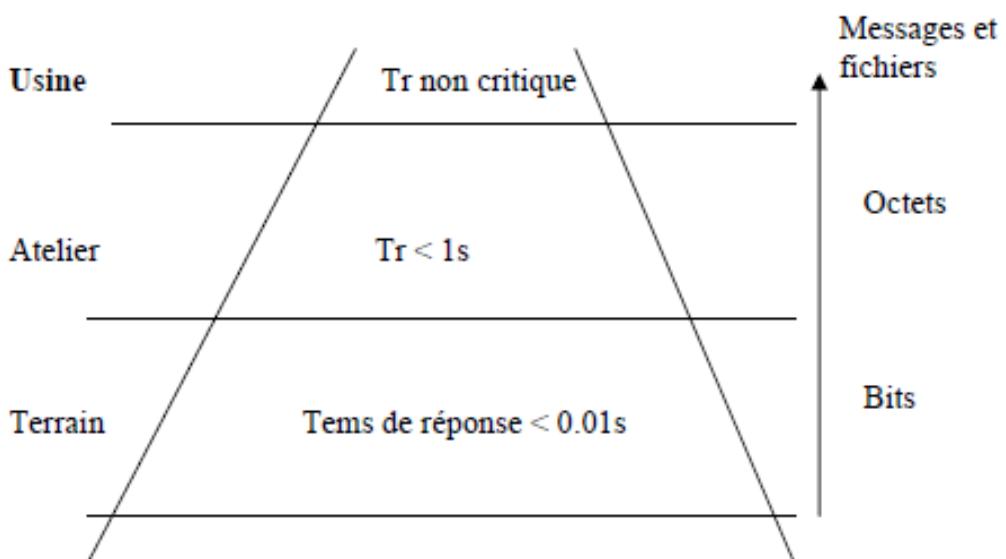
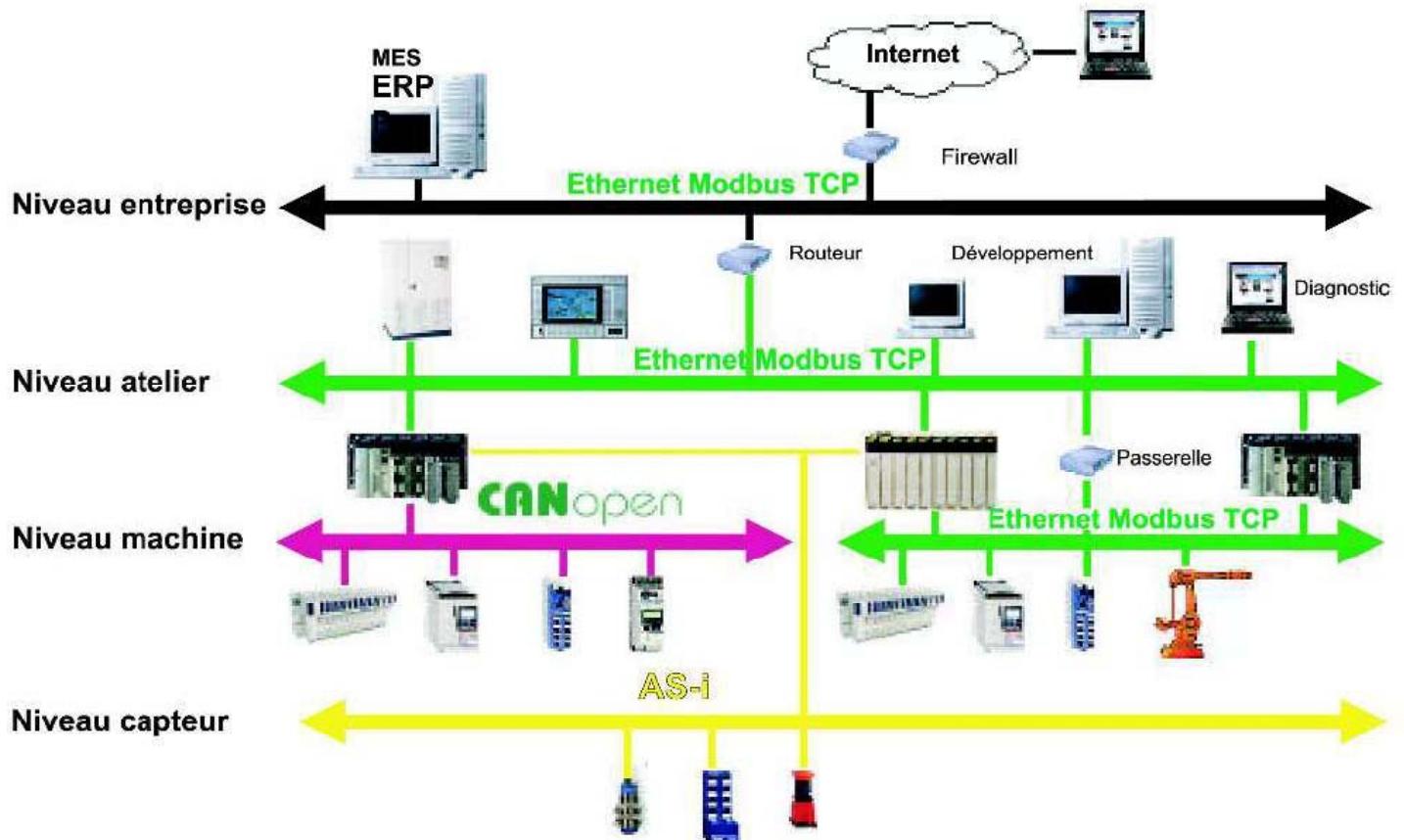


Fig.2.11 Exigences des différents niveaux d'abstraction dans un RLI

Au niveau des protocoles il faut opter pour les protocoles déterministes qui garantissent la livraison des données dans des délais connus pour pouvoir répondre aux exigences du temps réel.

Exemple d'une communication industrielle: Schneider Electric



Les niveaux de communication retenus par Schneider Electric.

Chapitre 3. Interface actionneurs capteurs (AS-I)

1. Architecture d'un bus de terrain AS-I

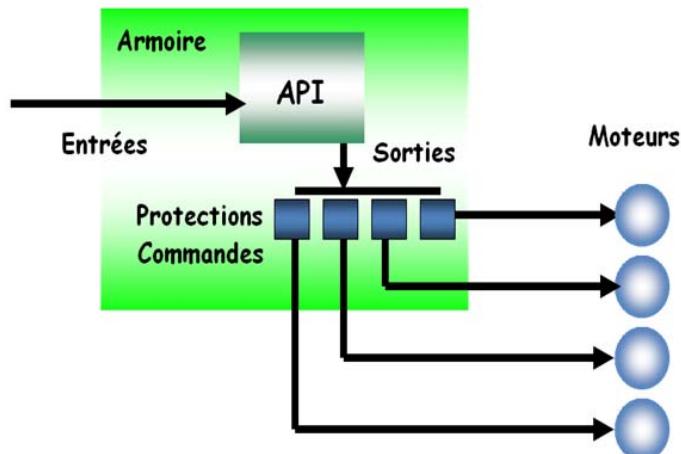
Les réseaux de capteurs/actionneurs sont des réseaux de bas niveau bien adaptés à l'automatisation d'un atelier, d'une ligne de production ou d'une machine.

Ces réseaux ont pour principaux objectifs de réduire les coûts de câblage, ainsi que de faciliter la mise en service, le réglage, l'exploitation et la maintenance des équipements d'automatisme industriel connectés.

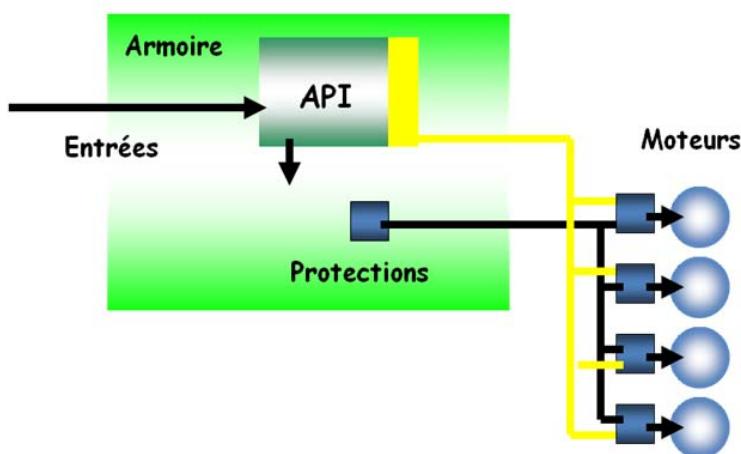
Certaines interfaces réseau spécifient tout à la fois l'infrastructure et les protocoles matériels autant que logiciels.

Exemples d'application :

Solution traditionnelle



Solution décentralisée



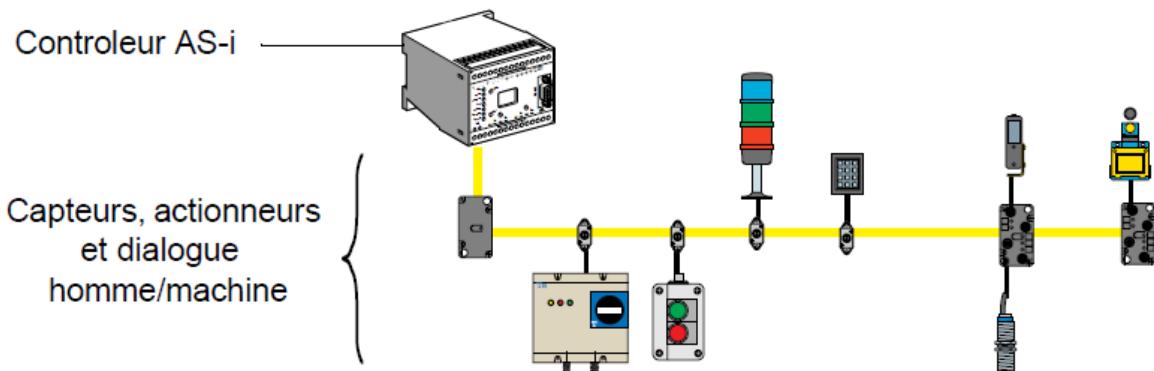
Le système AS-i (Actuators Sensors Interface) réalise de façon industrielle et normalisée le câblage des Capteurs et Actionneurs répartis sur une machine avec les organes de contrôle par raccordements standardisés.

Il s'inscrit dans le développement du concept « zéro armoire » par la déclinaison d'une offre étanche IP67 pour un raccordement au plus proche du capteur et de l'actionneur.

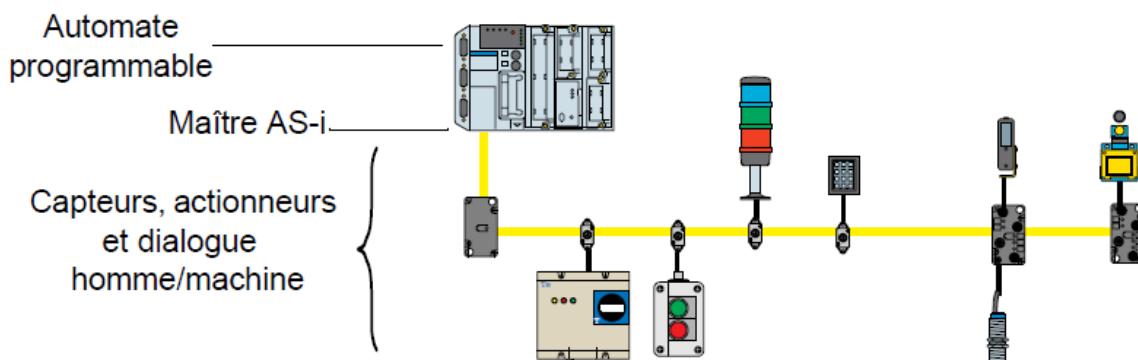
Ce bus de terrain simplifié et robuste permet un interfaçage facile et rapide des capteurs et actionneurs avec les fonctions de traitement logique de l'automatisme de la machine. En fonction des caractéristiques topologique et de la complexité de la machine différentes solutions ont été développées pour répondre au plus juste au critère économique. En moyenne, ce système permet par rapport à un câblage traditionnel de réduire le coût global des installations de vingt-cinq pour cent.

Il existe différents types d'intégration :

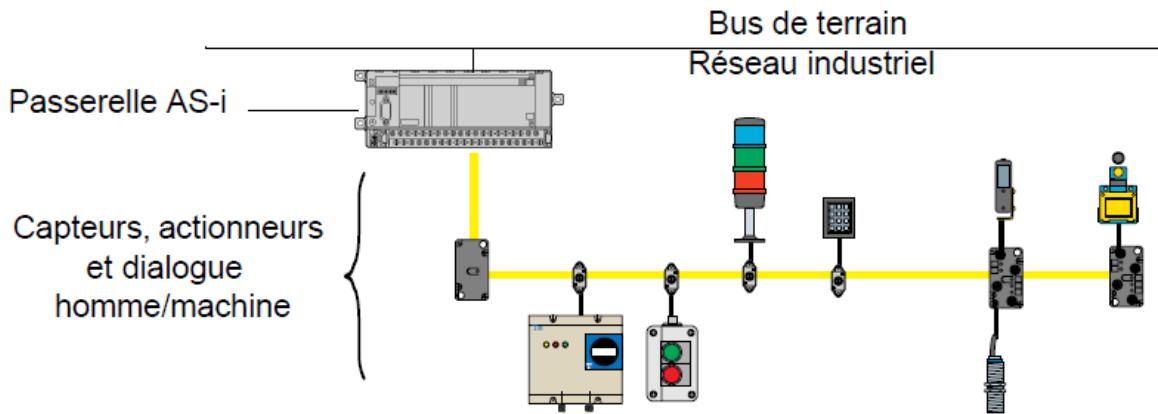
- Le système AS-i autonome pour machines simples à automatismes simplifiés.



- Le système AS-i avec coupleur intégré à l'automate.



- Le système AS-i avec interfaçage à un bus de terrain ou à un réseau industriel.



Les topologies supportent :

La topologie d'AS-i est libre, elle s'adapte parfaitement aux besoins des utilisateurs. Le bus AS-I est un réseau de capteurs et d'actionneurs économique basé sur une architecture maître-esclave qui supporte les topologies les plus courantes.

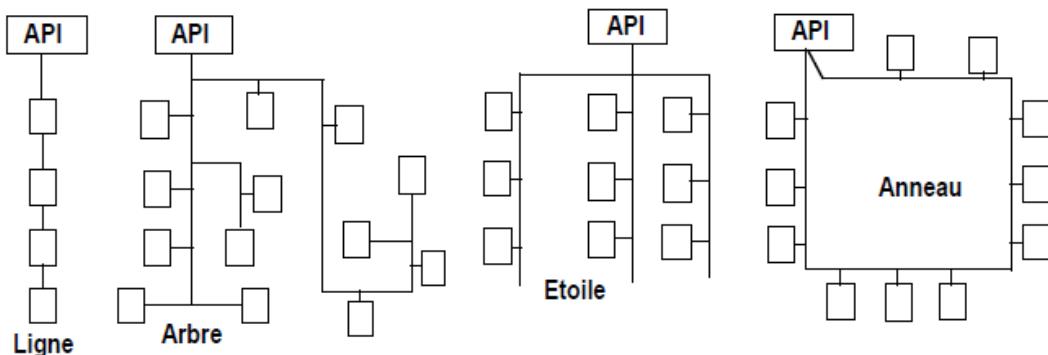


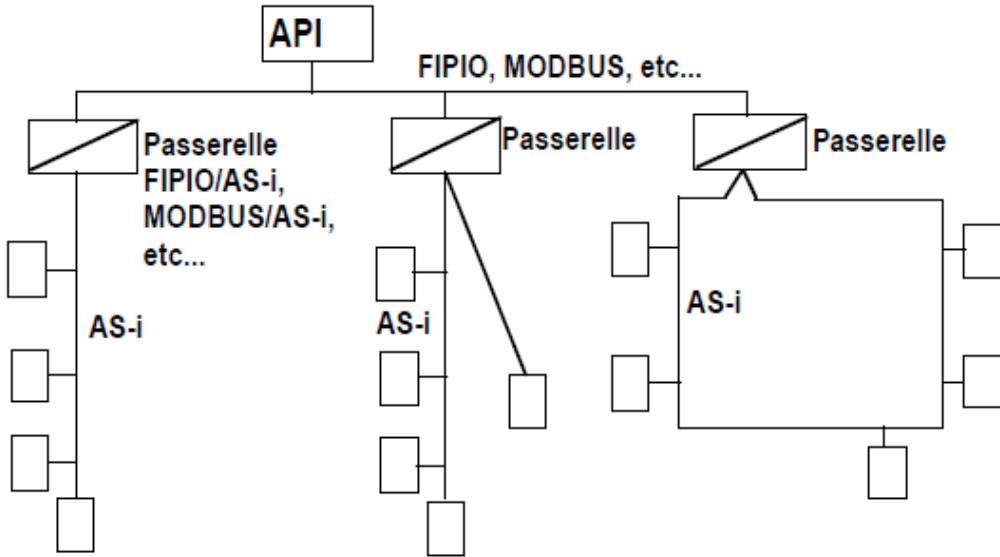
Fig.3.2 Le câble peut suivre toutes les topologies.

Topologie en arbre, généralement utilisée sur AS-i.

Dans le cas d'un système compact (ensemble de capteurs et actionneurs situés dans un périmètre limité), c'est la topologie en arbre qui est le plus souvent utilisée.

La topologie en anneau a l'avantage de conserver un fonctionnement correct en cas de coupure du câble. Elle est toutefois déconseillée dans le cas d'esclaves gros consommateurs de courant (risque de voir apparaître une chute de tension élevée en cas de coupure du câble).

Dans le cas d'un système étendu, les passerelles permettent de délocaliser des segments AS-i.



2. Protocole de communication AS-I

AS-i est un système maître- esclave. La gestion des esclaves est assurée par un seul maître, qui interroge successivement chaque esclave présent sur le câble et attend sa réponse.

2.1 Principe de fonctionnement Le maître / les esclaves:

- Le maître:** C'est l'entité intelligente qui gère les échanges sur le bus AS-i.
- Les esclaves :** Ce sont les entités "communicantes" reliées au bus (31 au maximum par segment AS-i). Ce sont des capteurs, des actionneurs, des répartiteurs ou des constituants de dialogue ou de signalisation. Ils échangent des tables d'entrées et/ou de sorties d'une longueur fixe de 4 bits avec le maître (un esclave = une adresse AS-i).

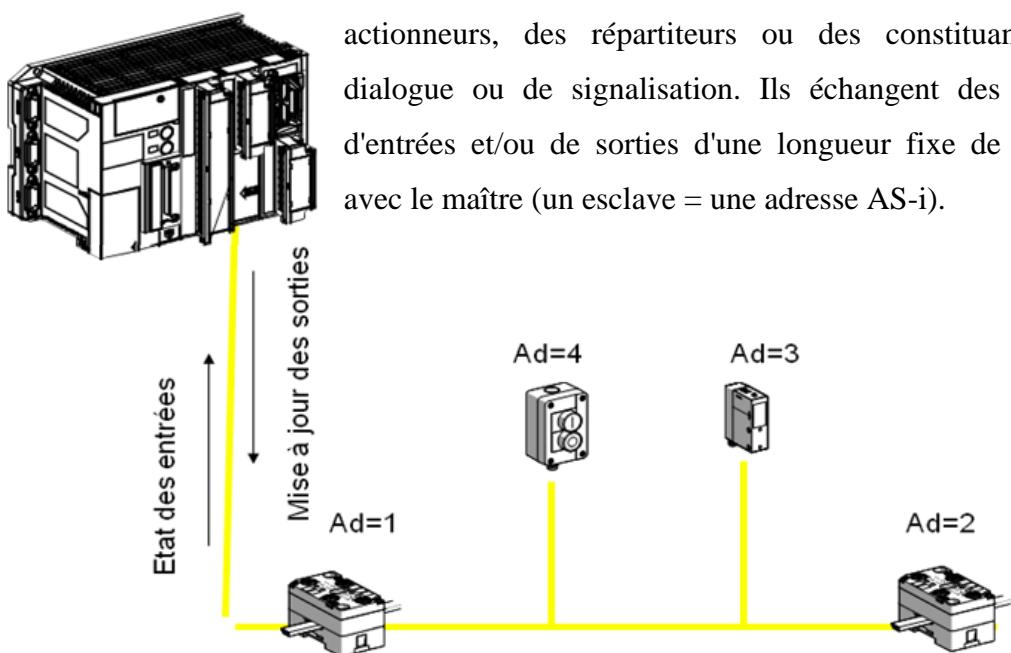


Fig.3.3 Exemple type Le maître / les esclaves.

Architectures d'automatismes avec AS-i :

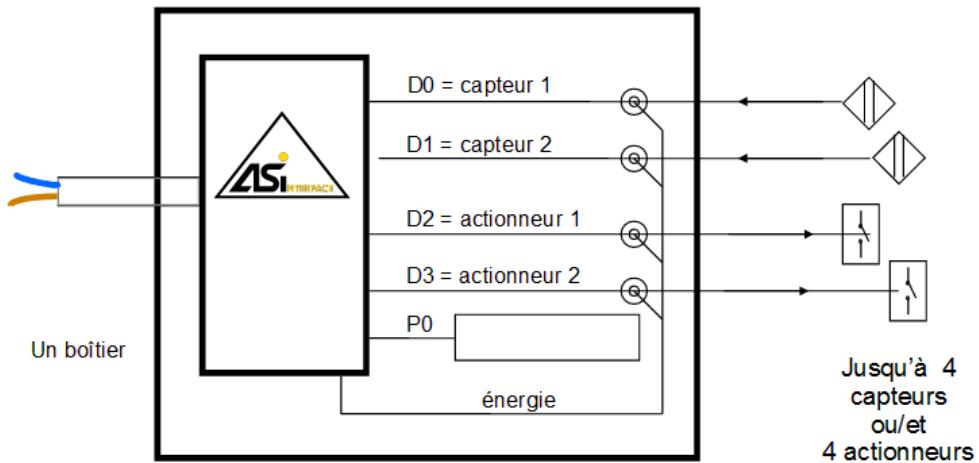


Fig.3.4 Interface AS-i pour capteur/actionneurs conventionnels

2.2 Câble pair non torsadée est non blindée :

Ce type de câble est utilisé dans l'interface AS-i comme support de transmission, il est constitué de deux fils entourés d'une gaine en caoutchouc auto cicatrisante. Ce câble peut atteindre une distance de 100m.

La figure 4.1 montre la structure d'un câble AS-i.

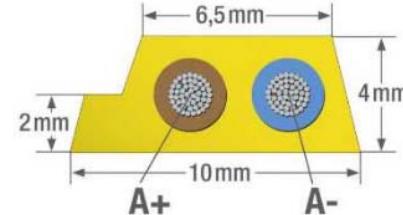


Fig.3.5 structure d'un câble AS-i



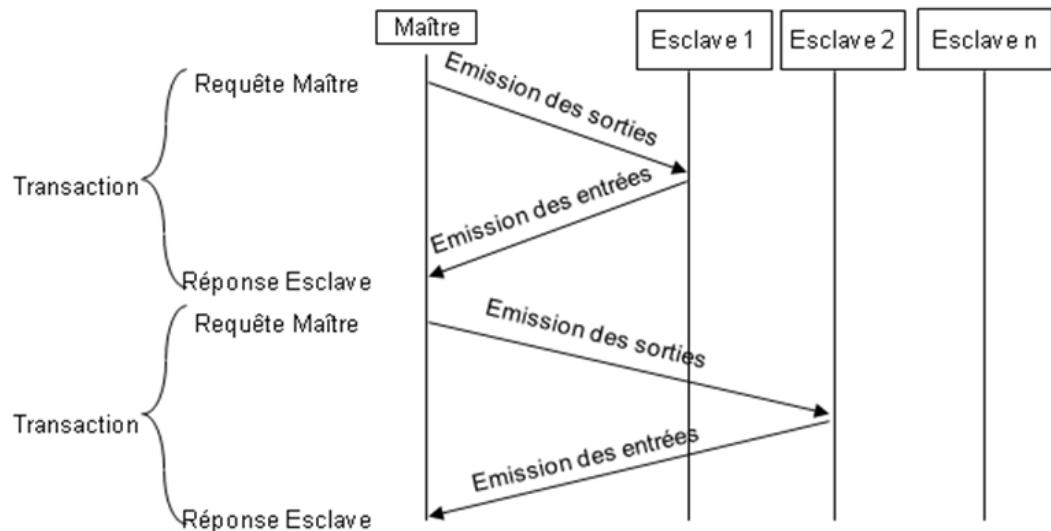
La première spécificité du bus ASI est qu'il n'a besoin que d'un seul câble de deux fils pour transporter à la fois l'alimentation électrique 24 VCC et les données.

Sa seconde spécificité est que vous pouvez rapidement et facilement ajouter un nouvel équipement esclave en utilisant des modules en cliques tables.

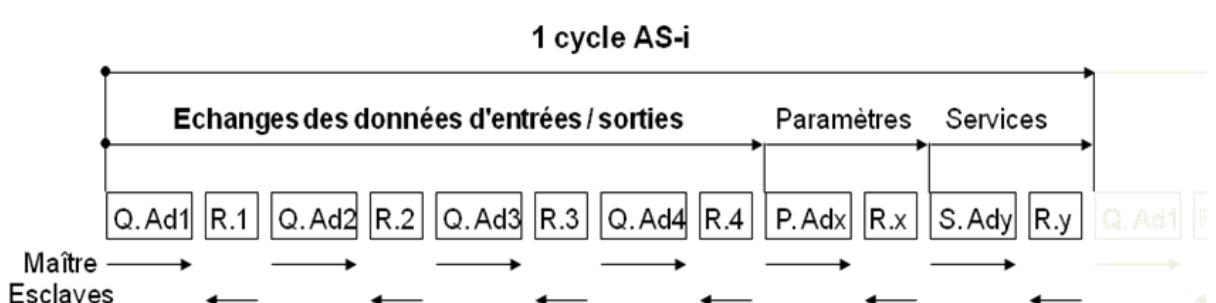
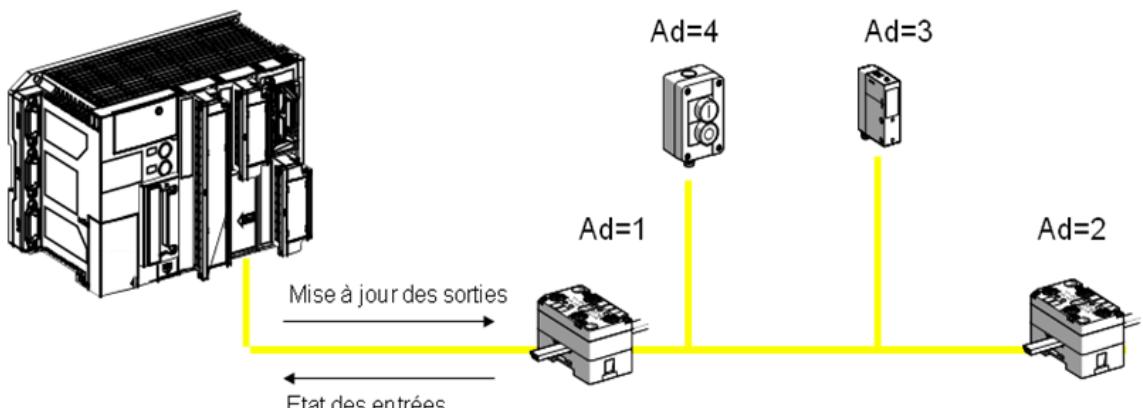
- **Principe des échanges cycliques de données**

Echange (bi-directionnels) de bits entre le maître et l'esclave :

- en entrées (Capteur, fin de course, cellule, bouton, etc..)
- en sorties (Electro-vannes, relais, voyants, etc ...)

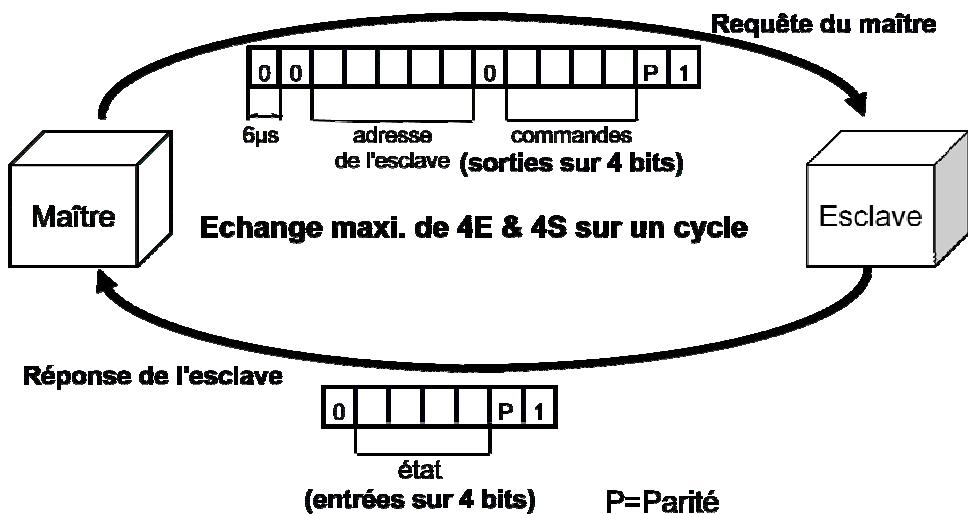


- **Les échanges entre maître & esclaves :**



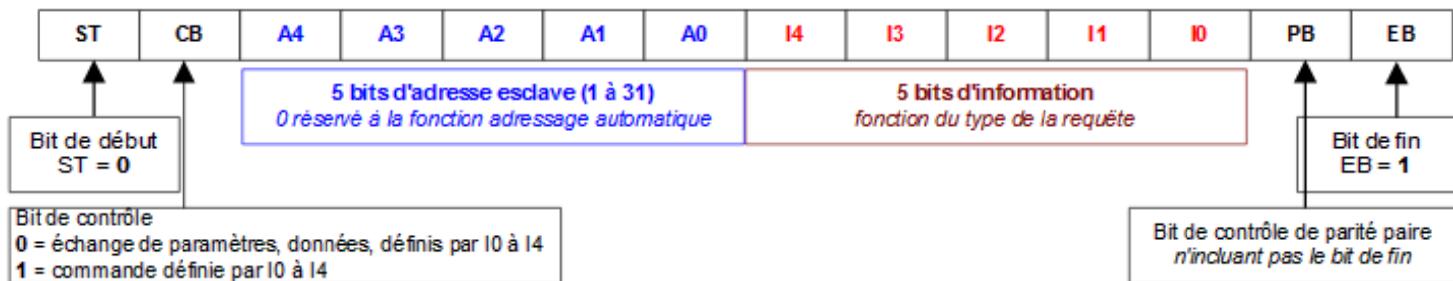
2.3 Composition de la trame :

Les données sont transmises par le biais de méthodes matérielles, premièrement en les encodant (codage de Manchester), puis en modulant l'alimentation électrique avec des pulsations alternatives pour transférer les données (méthode ATM)(Trame courte, efficace et de longueur constante).



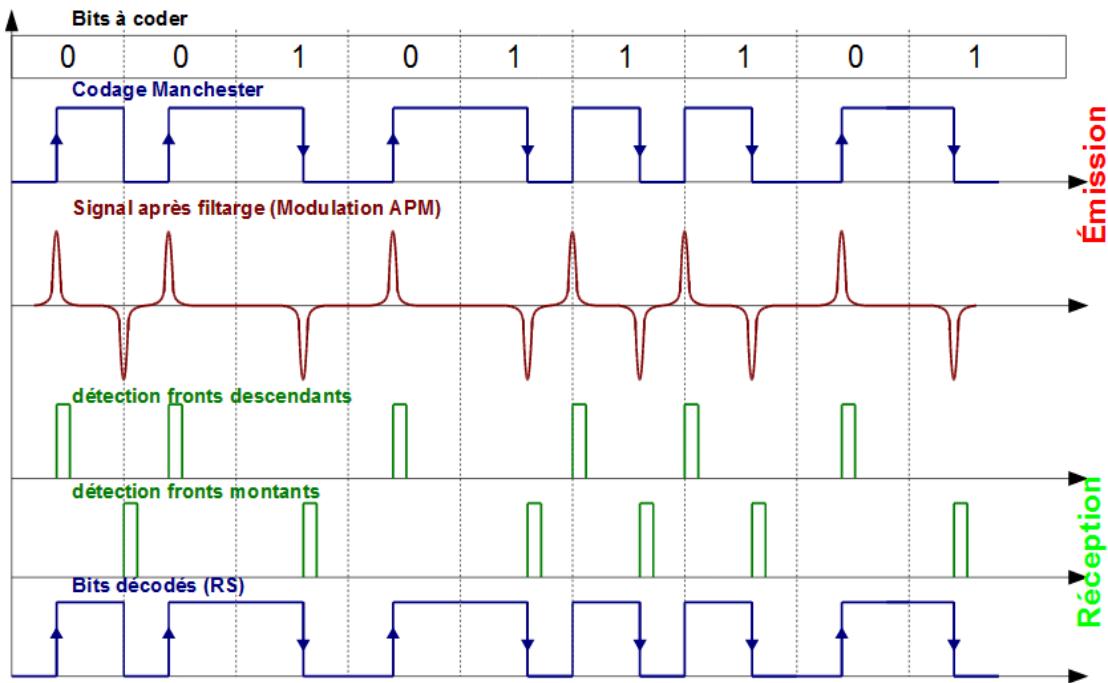
- Mise en trame :

Requête du maître :



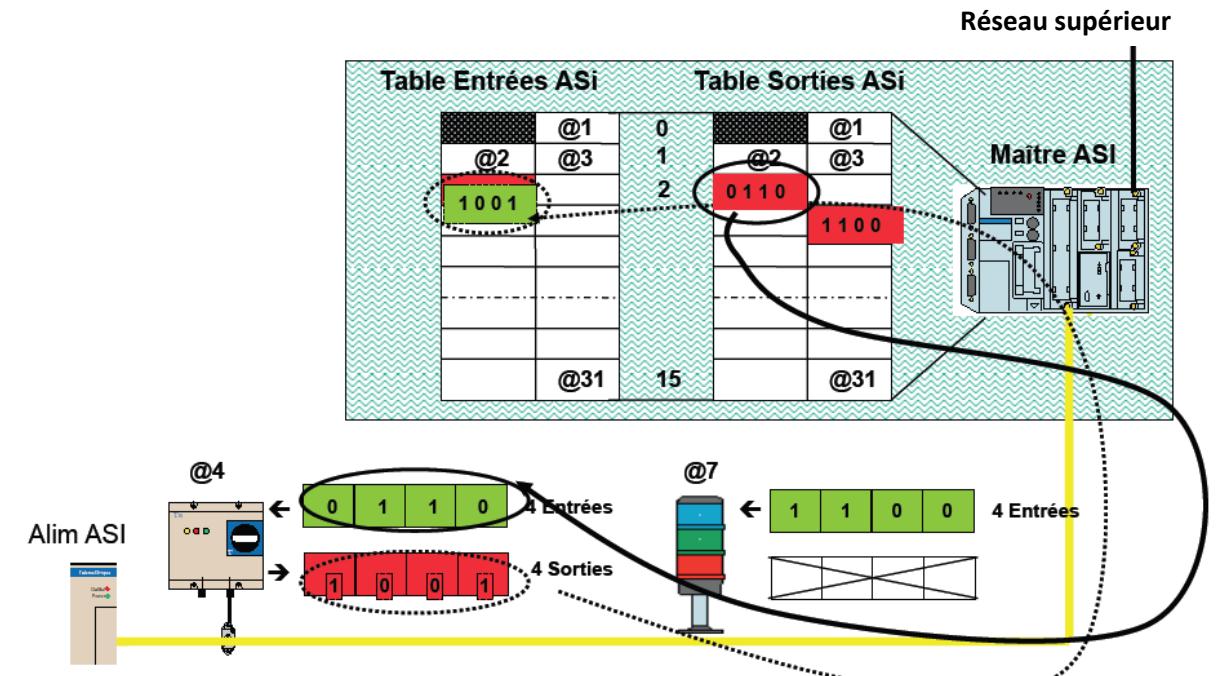
Réponse de l'esclave :





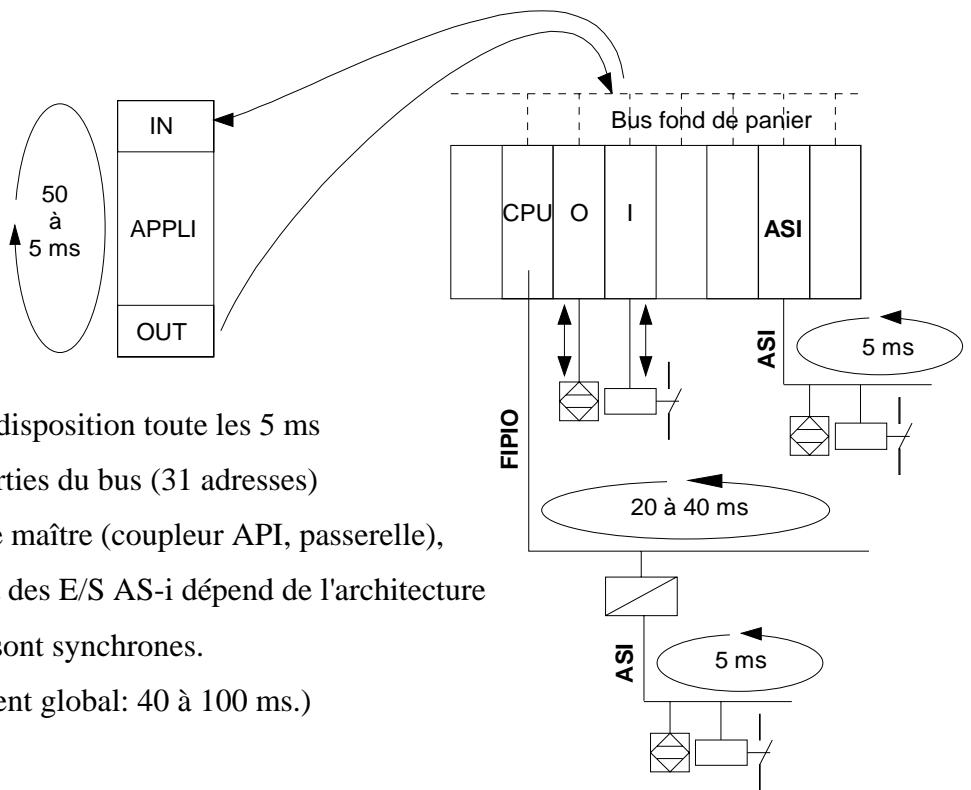
2.4 Tables d'Echanges E/S du Réseau ASi

Le maître AS-i possède deux tables de 16 octets contenant les images des E/S du réseau AS-i. Avec une seule requête, le maître AS-i écrit les 4 bits de sortie dans l'esclave, et reçoit en retour les 4 bits d'entrées.



2.5 Les performances d'une solution globale d'automatisme

Le maître AS-i met à disposition toute les 5 ms l'état des entrées et sorties du bus (31 adresses) en fonction du type de maître (coupleur API, passerelle), le temps de traitement des E/S AS-i dépend de l'architecture proposée. Les tâches sont synchrones.
 (Le Temps de traitement global: 40 à 100 ms.)



2.6 Cycle d'interrogation :

Ce temps est réduit si le nombre d'esclave est inférieur à 31. (5ms max. pour 31 esclaves TOR (Tout ou Rien)).

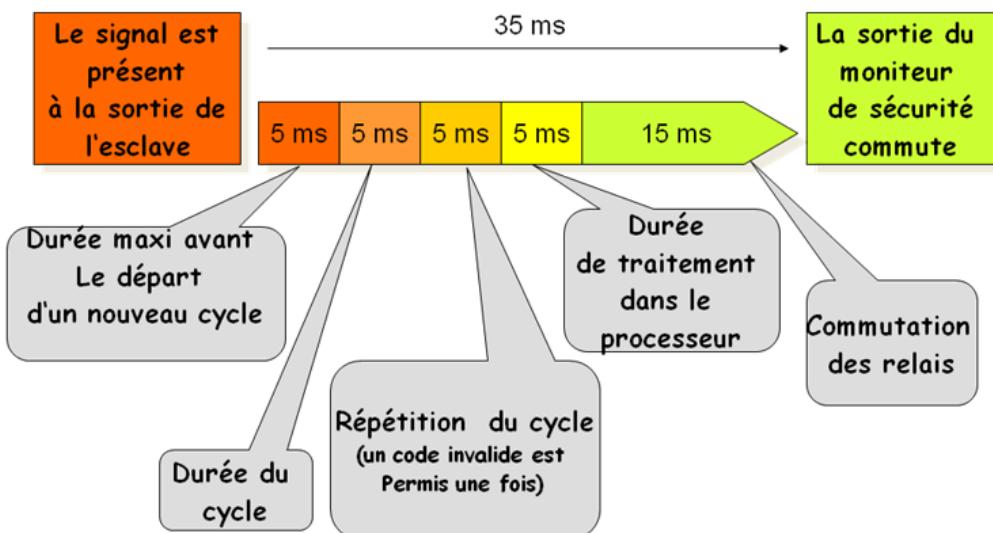
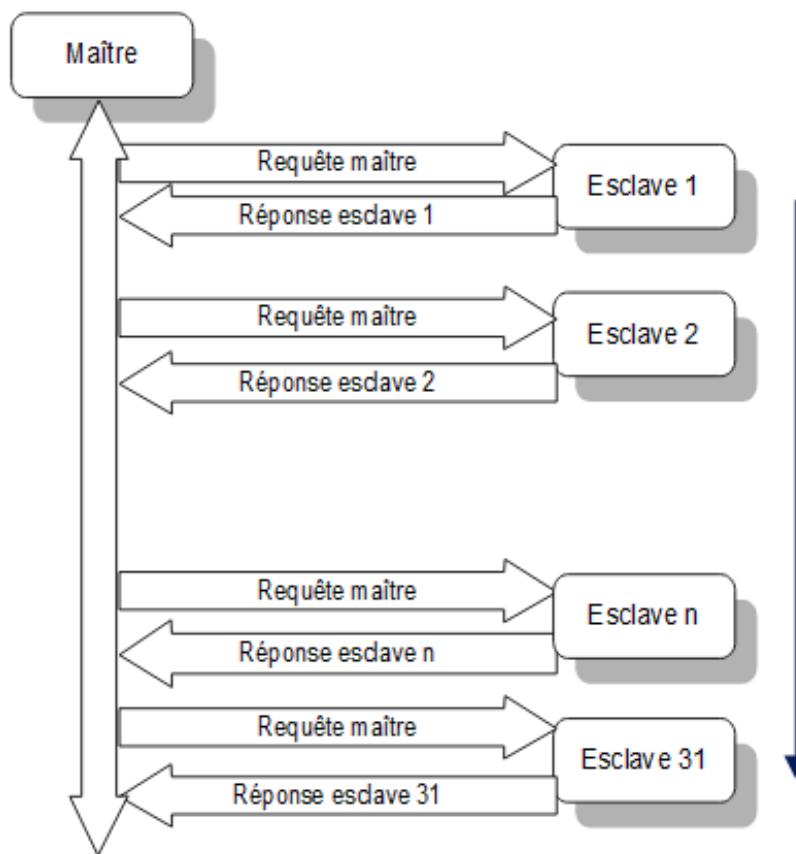


Fig.3.6 Temps de réponse

Un seul maître AS-i peut donc gérer jusqu'à $62 \times 8 = 496$ E/S TOR (en AS-i v2.0 ou supérieur et 248 E/S TOR pour AS-i version 1.0)



Chapitre 4. Réseaux de terrain Modbus

Introduction

Modbus (marque déposée par Modicon) est un protocole de communication utilisé pour des réseaux d'automates programmables (API). Il fonctionne sur le mode maître / esclave(s). Il est constitué de trames contenant l'adresse de l'automate concerné, la fonction à traiter (écriture, lecture), la donnée et le code de vérification d'erreur appelé contrôle de redondance cyclique sur 16 bits ou CRC16. Le protocole Modbus peut être implémenté :

- sur une liaison série asynchrone de type RS-422 ou RS-485 ou TTY (boucle de courant), avec des débits et sur des distances variables ;
- sur TCP/IP sur Ethernet ; on parle alors de Modbus TCP/IP ;
- sur Modbus Plus. Modbus Plus est un réseau à passage de jetons à 1 Mb/s, pouvant transporter les trames Modbus et d'autres services propre à ce réseau.

1. Protocole MODBUS

Le protocole MODBUS est un protocole de dialogue basé sur une structure hiérarchisée entre un maître et plusieurs esclaves.

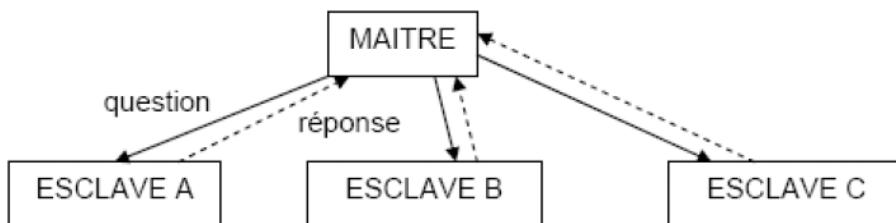


Fig.4.1 Le principe mono maître du protocole MODBUS

Le protocole MODBUS consiste en la définition de trames d'échange. Le maître envoie un message constitué de la façon suivante:

- Adresse de l'esclave concerné, pour établir la liaison avec lui,
- Instruction,

- Donnée,
- Contrôle, calcule sur l'ensemble du message et destine à assurer l'intégrité de l'échange. Un contrat d'échange doit être créé, et ceci pour définir la table de réception, dédiée à l'écriture du maître dans l'esclave, et une table d'émission pour la lecture du maître dans l'esclave.

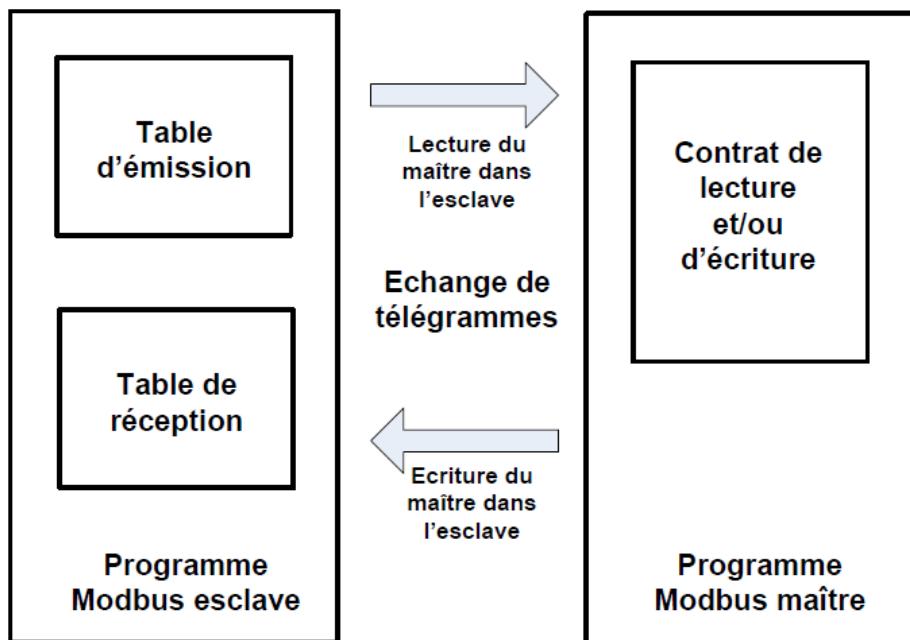


Fig.4.2 Principe des échanges MODBUS

Il existe deux types de dialogue possible en MODBUS :

- Echange maître vers l'esclave

Le maître envoie une demande et attend une réponse (Relation maître – esclave).

Le CP prend l'initiative de la transmission (= maître), puis attend, après avoir envoyé un télégramme de demande, un télégramme de réponse de l'esclave pendant la durée qui a été paramétrée comme temps de surveillance de la réponse, et c'est le type de dialogue utilisé dans l'application.

- Echange Maître vers tous les esclaves (Message Broadcast)

Le maître utilise l'adresse 0 pour s'adresser à tous les esclaves du bus. Il diffuse un message à tous les esclaves présents sur le réseau, ceux-ci exécutent l'ordre du message sans émettre une réponse.

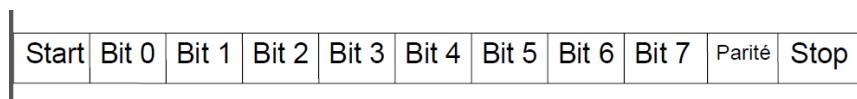
2.1 Format d'une trame Modbus RTU

Les trames sont de 2 types :

- mode RTU (Remote Terminal Unit) : les données sont sur 8 bits
- mode ASCII : les données sont codées en ASCII (il faut deux caractères pour représenter un octet, exemple 0x03 sera codé '0' et '3')

Les octets transportés par les trames Modbus RTU comportent par défaut 11 bits :

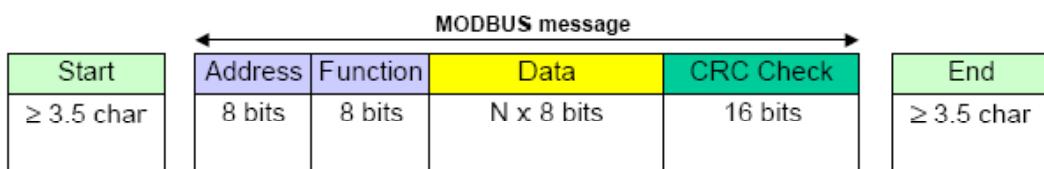
- 1 bit de START
- 8 bits de données
- 1 bit de parité
- 1 bit de STOP



La mise en trame des différents champs est la suivante :

Slave Address	Function Code	Data	CRC
1 byte	1 byte	0 up to 252 byte(s)	2 bytes CRC Low CRC Hi

Les trames sont séparées par des intervalles de « silence » de durée au moins égale à 3,5 caractères hexadécimaux (1 caractère hexa = 4 bits) :



2.2 Calcul du CRC :

Le dernier champ de la trame permet un contrôle des données émises. Le calcul CRC (« Cyclic Redundant Code ») est une méthode très efficace et permet de détecter jusqu'à erreurs situées n'importe où dans la trame.

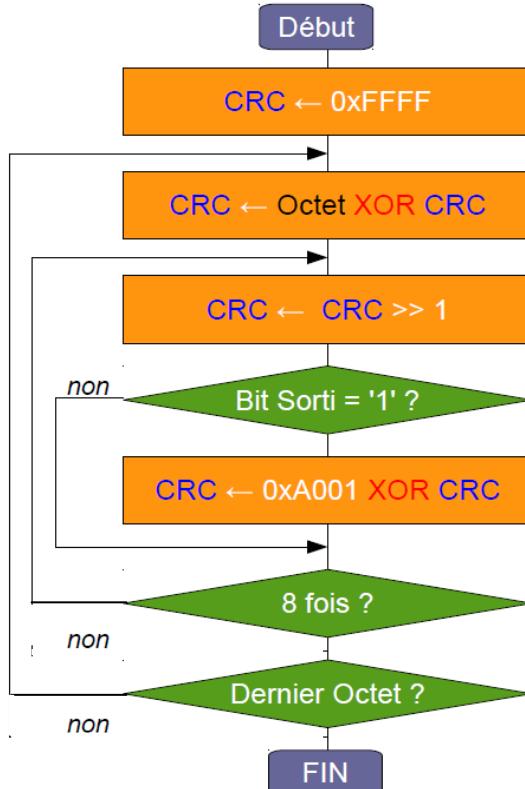
La théorie sur laquelle est basée le calcul de ce code fait appel aux fonctions polynomiales et à leur divisibilité par un polynôme particulier dit « générateur ».

Les données utiles de la trame (c'est à dire les octets de données, sans bit de START STOP et Parité) sont utilisées pour générer un polynôme dont la divisibilité est vérifiée à l'émission et à la réception.

Si les résultats ne concordent pas, c'est qu'une erreur est survenue durant la transmission.

Le format du CRC utilisé dans Modbus RTU est 16 bits; l'octet de poids faible est transmis en 1^o dans la trame (!).

- **Algorithme de Calcul du CRC :**



3. La couche physique :

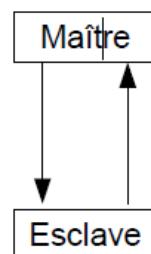
La couche physique de Modbus série obéit à l'une des 2 normes RS232 ou RS485 :

- **RS232 :**

Echanges entre 1 Maître & 1 esclave : POINT à POINT & Courtes

Transmission NRZ, niveaux de tension +/-12V référencés par rapport à la masse.

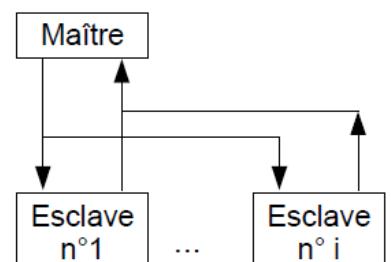
Ce mode est réservé aux liaisons point à point pour des distances <20m.

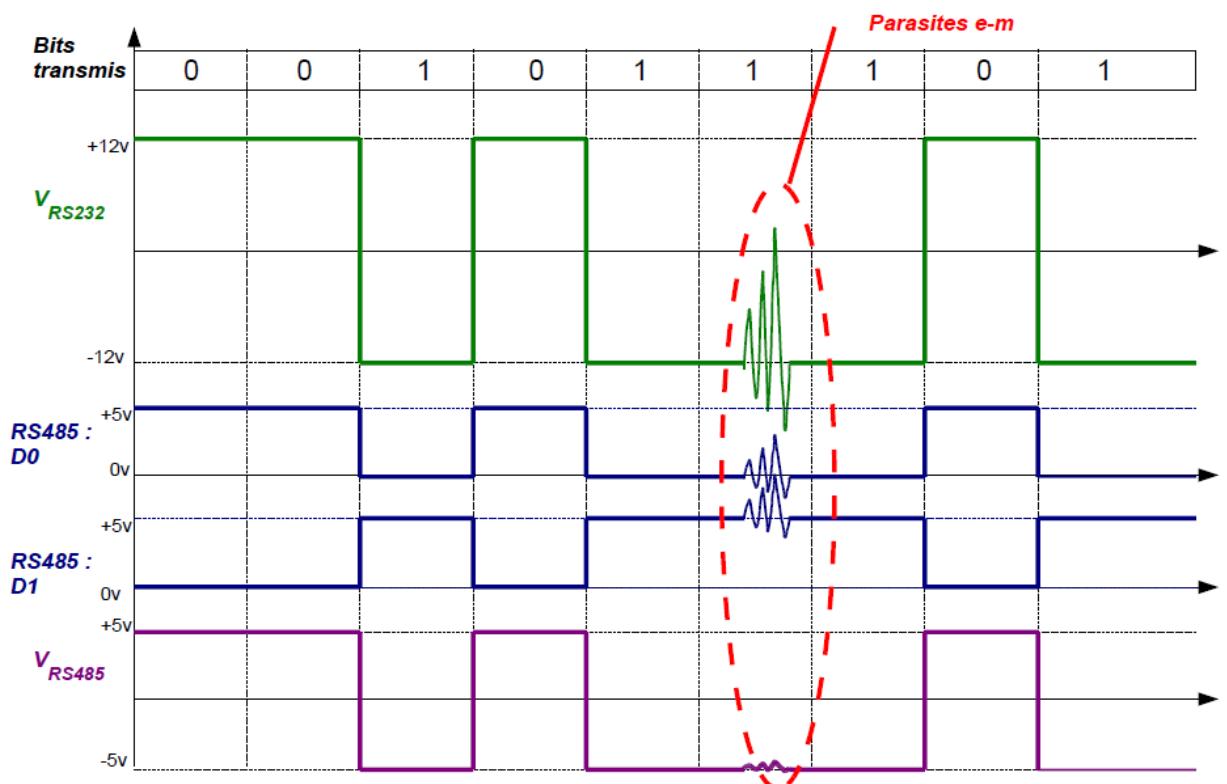


- **RS485 :**

Echanges entre 1 Maître & plusieurs esclaves : MULTIPONT

Transmission différentielle sur paire torsadée, niveaux de tension entre 0 et 5 Volt.



**Fig.4.3 RS232 VS RS485.****Equipements mis en jeu : passerelle TCP/RTU**

Elle permet de convertir les couches physiques Ethernet / RS485, et d'encapsuler/Désencapsuler les trames entre les protocoles Modbus RTU et Modbus TCP.



Utilisation de passerelles Modbus TCP/RTU et de Switches ETHERNET :

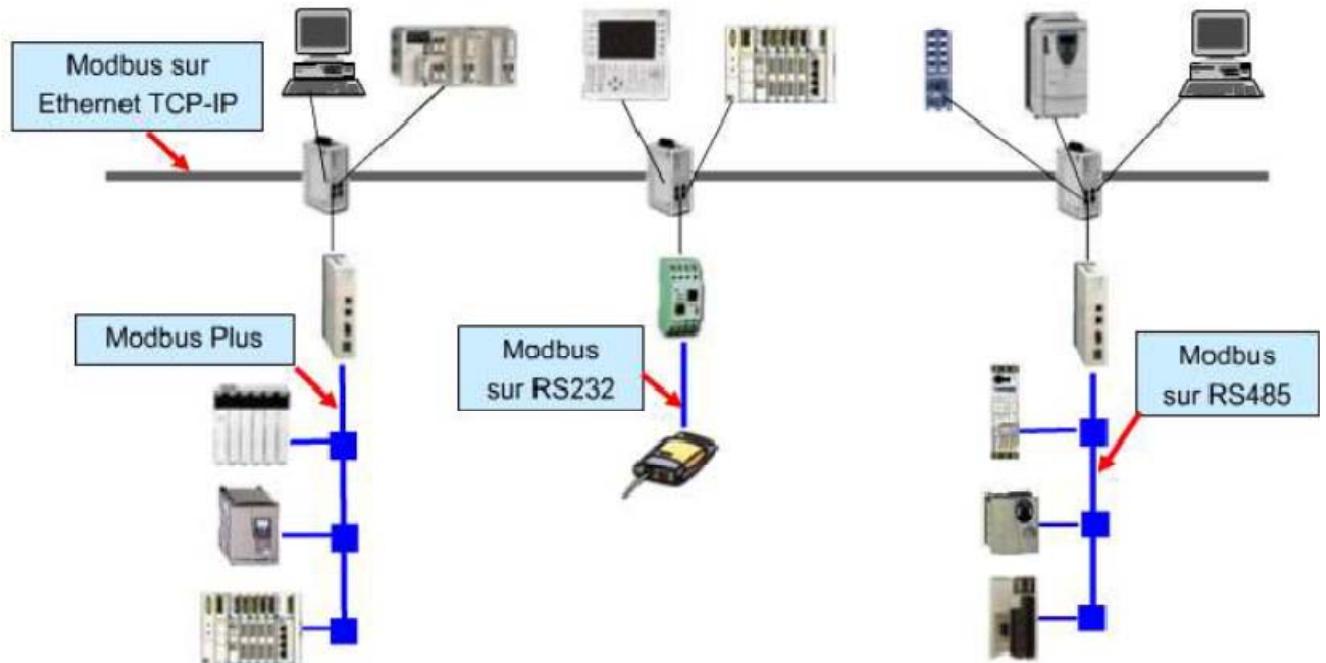
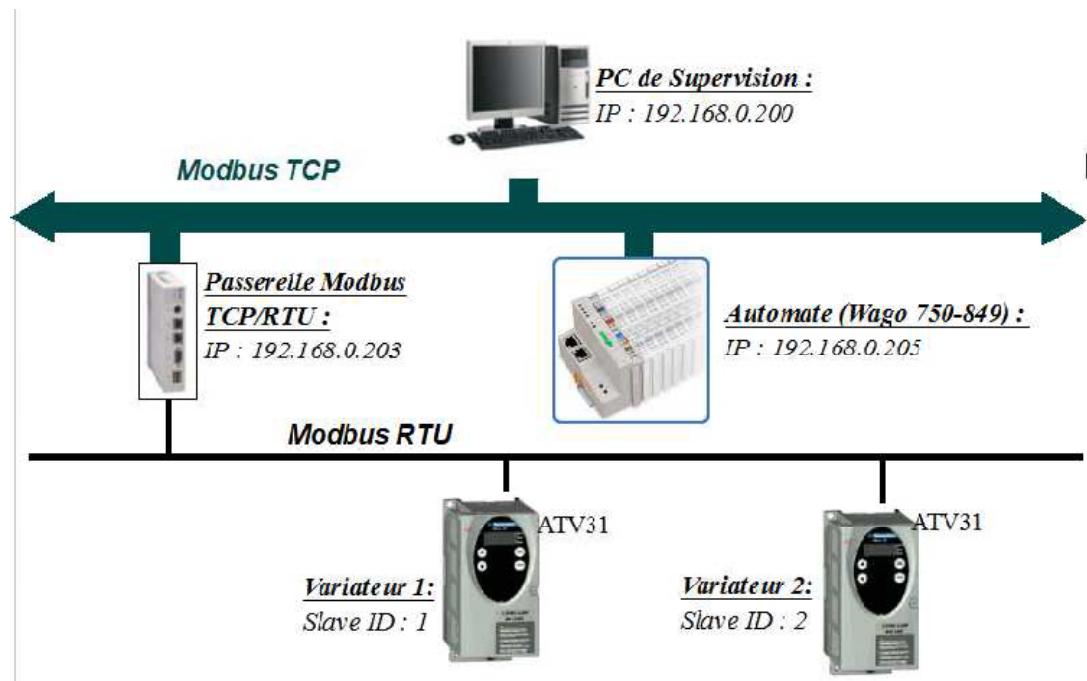


Fig.4.4 Synoptique du système de communication Modbus.

4. Exemple de la télétransmission industriel

Un système de télétransmission est basé sur un automate maître, relié à un modem pour la transmission de données via un support de communication choisi selon les conditions géographique et technologiques imposées, et permettant une intelligence sur les sites industriels en assurant une communication entre le maître et ses esclaves.

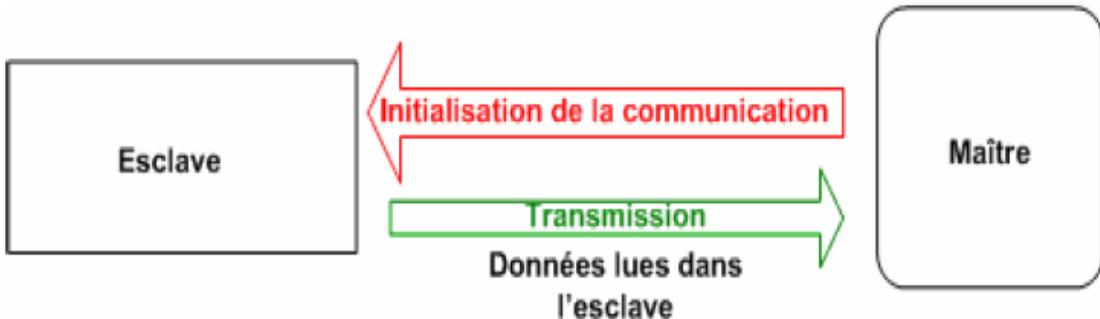


Fig.4.5 Principe d'accès du maître vers l'esclave

Le protocole MAITRE-ESCLAVE est de type MODBUS, qui se fait via une technique de transmission sans fil par le biais de deux modems SATEL. Le signal est de type RADIO, à une fréquence de 411,05 Mhz, et une portée de 35 Km avec une puissance de 10Watt.

Le processeur de communication CP 341 permet de réaliser un échange de données entre l'automate S300 et d'autres systèmes d'automatisations ou calculateurs, et ceci en intégrant des principaux protocoles de transmission dans le firmware du module. Il comporte une interface série intégrée RS 485, avec une vitesse de transmission atteignant 19,2 K Bauds.



Fig.4.6 Le module de communication CP341

Un système de Télétransmission permet le transport de signaux situés à des endroits distants, généralement dispersés géographiquement et nécessitent d'échanger les informations à travers un réseau de communication.

N'importe quelle situation anormale est immédiatement détectée et une séquence d'alarmes peut être envoyée vers divers destinataires pour qu'une décision puisse être prise en compte, en vue de corriger l'anomalie.

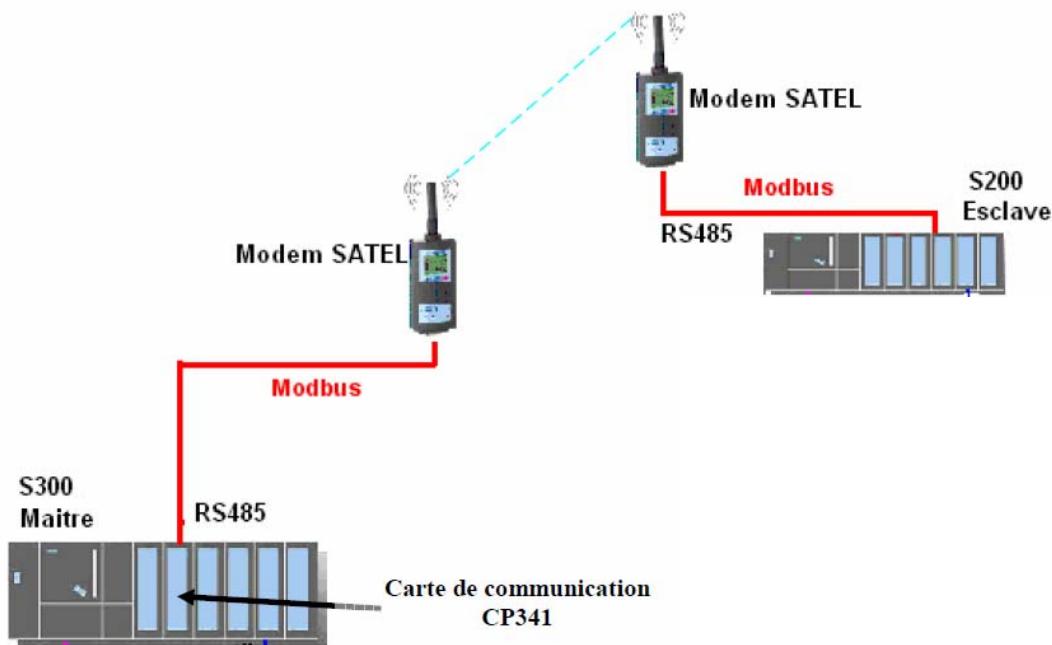
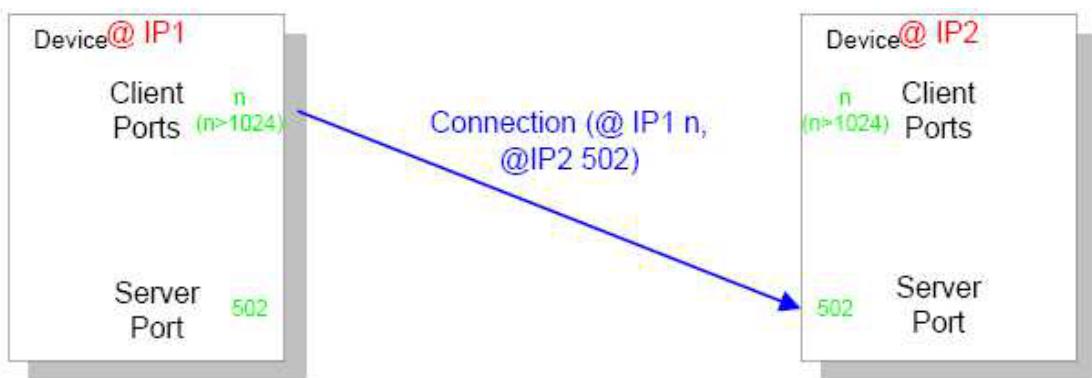


Fig.4.7 Synoptique de télétransmission

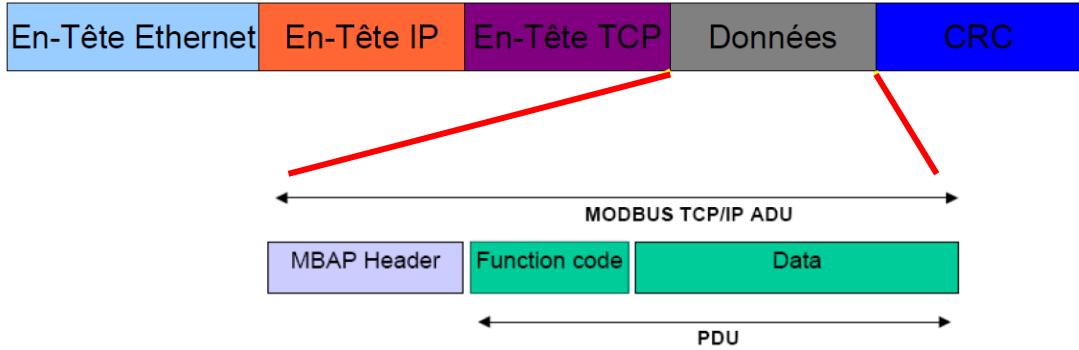
5. Modbus TCP :

- **Port Modbus TCP:** Le port 502 est réservé aux communications Modbus. L'équipement serveur « écoute » donc sur ce port pour recevoir les requêtes émises par le client. Celles-ci sont émises par le client sur un port >1024 :

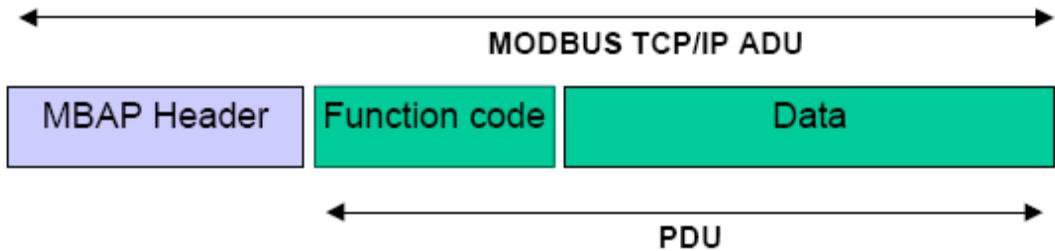


- Encapsulation des trames :**

Le protocole Modbus TCP permet d'*encapsuler* des trames Modbus PDU dans des *trames Ethernet*, et ainsi offrir les *services Modbus* ce type de réseau :



La trame Modbus TCP est constituée d'une trame Modbus-TCP précédée d'une *en-tête* baptisée « *MBAP Header* » :



L'absence de champ de contrôle propre à la trame Modbus-TCP s'explique par le fait que celui-ci est déjà réalisé par la couche 2 d'Ethernet (*CRC 32 bits*). L'*en-tête MBAP Header* comporte 4 champs :

- **Transaction Identifier (2 octets)** : Ce champ est utilisé pour identifier les transactions circulant sur le réseau, afin que le client puisse faire le lien entre une *requête* qu'il a émise et une *confirmation* qu'il reçoit.
- **Protocol Identifier (2 octets)** : Ce champ permet d'utiliser plusieurs variantes de protocoles et de les distinguer; pour Modbus, ce champ est à *0x00*.
- **Length (2 octets)** : Ce champ indique la taille (en octets) de la trame Modbus à (partir du champ suivant).
- **Unit Identifier (1 octet)** : Ce champ est utilisé lorsque la trame est adressée à une passerelle Modbus-TCP / Modbus-série, afin d'identifier l'adresse Modbus de l'esclave.

Chapitre 5.

Réseaux de terrain PROFIBUS

1. Définition et normalisations PROFIBUS :

PROFIBUS (Process Field Bus) est un réseau de terrain ouvert, permettant de répondre à un large éventail d'applications dans les domaines concernant :

- les procédés manufacturiers (conduite des procédures séquentielles, procédés discontinus par lots «<batch>»)
- les procédés continus (conduite, régulation)
- la gestion des bâtiments (gestion technique centralisée, gestion technique du bâtiment).

PROFIBUS est issu de travaux initiés en 1987 par le ministère fédéral allemand pour la Recherche technologique, comprenant un regroupement de sociétés industrielles et d'instituts de recherche allemands, orchestré par Siemens AG.

La norme allemande DIN 19245 a été créée en 1991, normalisée EN 50170 par le Cenelle en 1996, comme norme européenne.

Depuis 1999, le réseau PROFIBUS est reconnu dans la norme internationale CEI 61158, avec les autres réseaux ControlNet, P-Net, Fieldbus Foundation High-Speed-Ethernet, SwiftNet, WorldFip, Interbus-S.

PROFIBUS, étant un réseau adhérent à la norme internationale ISO, adopte le modèle OSI (Open Systems Interconnections), qui définit un langage commun aux échanges de données entre stations d'un réseau fondé sur des règles d'interconnexion et des interfaces de transfert désignant un protocole de communication. Ce protocole, construit en sept couches, définit les éléments, structures et tâches nécessaires à toute communication. Chaque couche remplit une fonction bien précise dans l'architecture OSI. Toutefois, à défaut d'être utiles, certaines couches peuvent en être exclues, c'est ainsi que PROFIBUS se cantonne aux couches 1,2 et 7.

Emetteur	Récepteur	Désignation et rôle des différentes couches de l'édifice OSI	
7	7	Application	Véritable interface entre le réseau et le programme d'application, dotée de commandes applicatives (lecture, écriture)
6	6	Présentation	Représentation (codage) des données en vue de permettre leur analyse et interprétation par la couche suivante
5	5	Session	Établissement et libération de liaisons temporaires entre stations ; synchronisation des communications
4	4	Transport	Gestion de la transmission pour la couche 5 (erreurs d'acheminement, découpage en paquets)
3	3	Réseau	Établissement et libération de liaisons, mise en œuvre de mécanismes pour éviter la congestion du réseau
2	2	Liaison de données	Gestion des règles d'accès au bus (<i>Medium Access Control</i> , MAC) et de sécurisation des échanges
1	1	Physique	Caractéristiques mécaniques, électriques et fonctionnelles de la liaison (connectique, codage et débit des signaux)
Support de transmission			

Fig.5.1 Les sept couches du modèle OSI

2. Présentation :

Profibus est un protocole de communication basé sur les profils d'équipements. A son origine, Siemens, un des leaders mondiaux de l'automatisme - Profibus demeure néanmoins un réseau ouvert regroupant un grand nombre de fabricants membre de l'association

Exemple d'architecture Profibus :

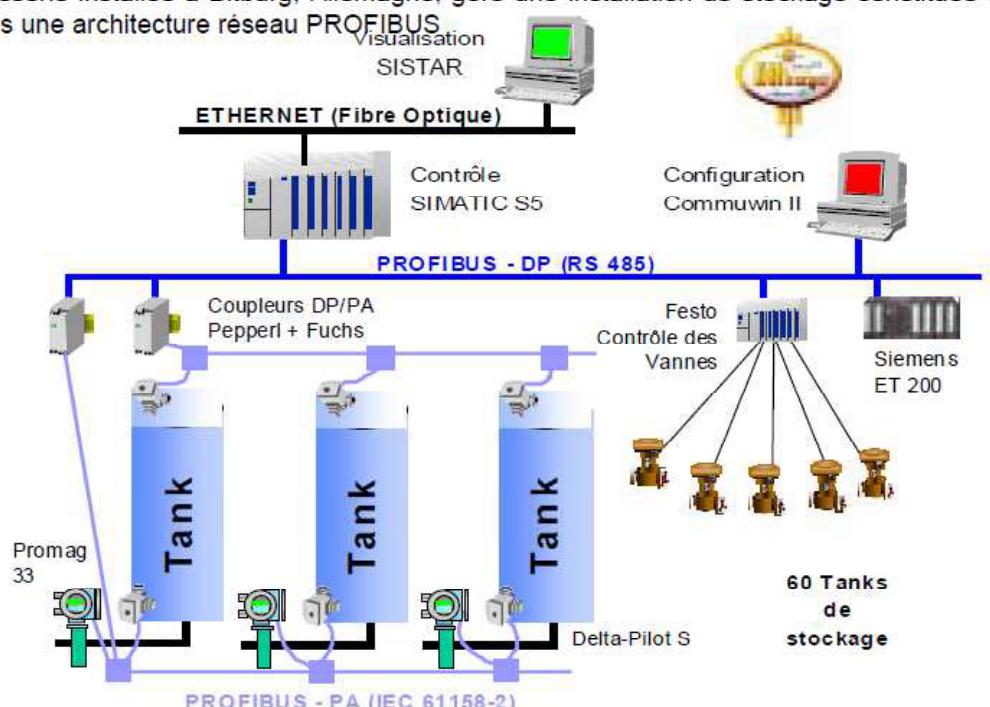
La société Bitburger, brasserie installée à Bitburg, Allemagne, gère une installation de stockage constituée de plus de 60 réservoirs dans une architecture réseau PROFIBUS.

Cette application s'appuie sur une architecture réseau à trois niveaux :

Profibus-PA pour l'instrumentation de terrain ;

Profibus-DP pour le niveau contrôle/commande de process ;

Ethernet pour la supervision de l'installation.



3. Classification des réseaux PROFIBUS :

Plusieurs déclinaisons de ces protocoles co-éexistent (Profibus DP, profibus PA, Profibus FMS, Profinet) sur différents supports (RS485, FO, Ethernet...)

PROFIBUS se décline en trois variantes de protocoles, répondant chacune à des finalités métiers et applicatives spécifiques :

a. PROFIBUS-DP (Decentralized Peripheral) :

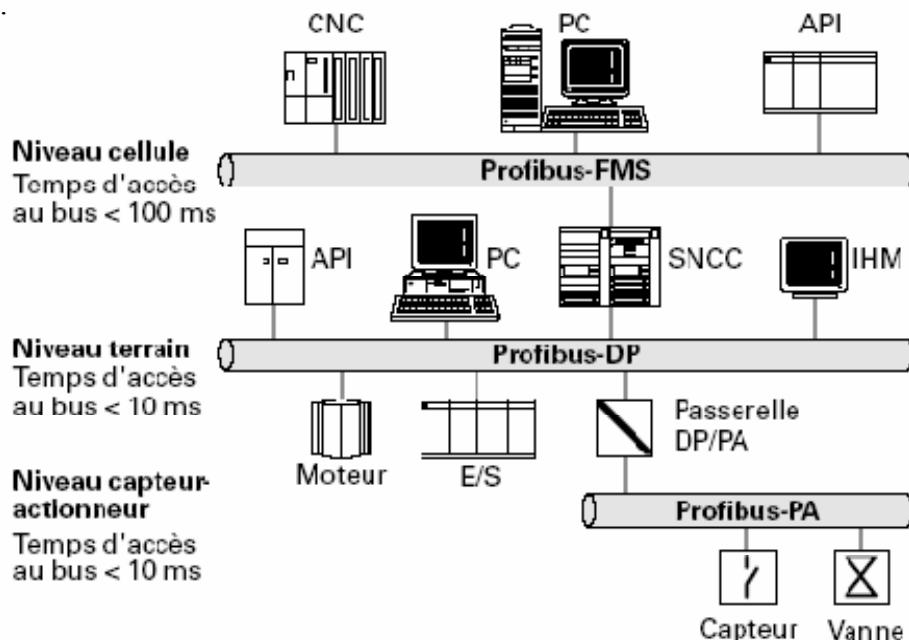
Destiné aux applications de type maître-esclave en mono-maître pour la gestion des équipements d'entrées-sorties déportées avec des temps d'accès extrêmement courts. Le fonctionnement multi-maître est possible ;

b. PROFIBUS-FMS (Fieldbus Message Specification) :

Destiné aux applications nécessitant l'échange entre maîtres pour la synchronisation d'activités de contrôle-commande, basé sur la messagerie MMS (Manufacturing Message Specification) ;

c. PROFIBUS-PA (Process Automation) :

Destiné aux applications de contrôle de processus nécessitant la communication avec des équipements de terrain (capteurs, actionneurs) permettant une telle alimentation des équipements et un fonctionnement avec sécurité intrinsèque en ambiance explosive.



CNC : Computerized Numerical Control

IHM : interface homme-machine

SNCC : système numérique de contrôle-commande

Fig.5.2 Classification des réseaux PROFIBUS

4. Protocoles de communication :

4.1 Les techniques de transmissions :

Rappelons que la couche 1 du modèle OSI assure la transmission physique des données. Elle en définit donc les caractéristiques électriques et mécaniques : type de codage et d'interface normalisée.

PROFIBUS spécifie plusieurs versions de couches physique, selon la technique de transmission, qui est toutes conformes aux normes internationales CEI 61158 et la CEI 61784.

4.2 Transmission RS 485

RS 485 est une technique de transmission simple et économique convenant surtout aux tâches exigeant des débits élevés. Son support de transmission est la paire torsadée blindée.

La structure du bus permet l'ajout ou le retrait de stations ou la mise en service par étapes du réseau sans répercussion sur les autres stations.

Les extensions futures (dans des limites définies) ne pénalisent pas les stations en exploitation.

A cela s'ajoute la possibilité d'exploiter cette liaison en zone à sécurité intrinsèque.

4.3 Câble Torsadé blindées :

Le câble est constitué d'un pair torsadé entouré d'une tresse de blindage. Ce câble est le plus utilisé dans les réseaux de terrain. Par exemple : Profibus DP de Siemens avec l'interface RS 485, Lonworks (Local operating Network d'Echelon), DeviceNet (Allen Bradley), SDS (Smart Distributed System de Honeywell).

La figure suivante montre un câble torsadé blindé standard utilisé dans l'industrie avec l'interface RS 485 pour Profibus DP.

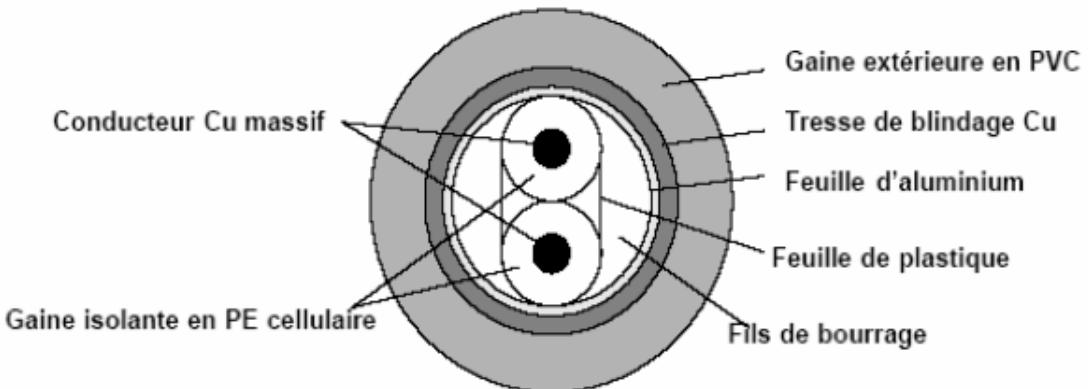


Fig.5.3 structure d'un câble torsadé standard utilisé dans l'industrie avec l'interface RS 485 pour PROFIBUS DP.

4.4 Câble de pair torsadé

Le pair torsadé (Twisted Pair) est constitué de deux brins de cuivre entrelacés en torsade et recouverts d'isolants. On distingue plusieurs types de pairs torsadés:

Le câble UTP (Unshielded Twisted Pair): Ce câble est utilisé pour le réseau 10baseT. C'est le type de pair le plus utilisé dans les réseaux locaux. Il est conforme à la norme commercial Building Wiring Standard 568 de EIA/TIA (Electronic Industries Association / Telecommunication Industries Association).

Le câble STP (Shielded Twisted Pair) : ce câble assure une meilleure protection contre les perturbations. Le STP est beaucoup plus utilisé dans l'industrie par les réseaux Ethernet et prend l'appellation Industriel Twisted Paie (ITP).

La figure suivante montre la structure d'un câble ITP utilisé dans le réseau Ethernet de Siemens

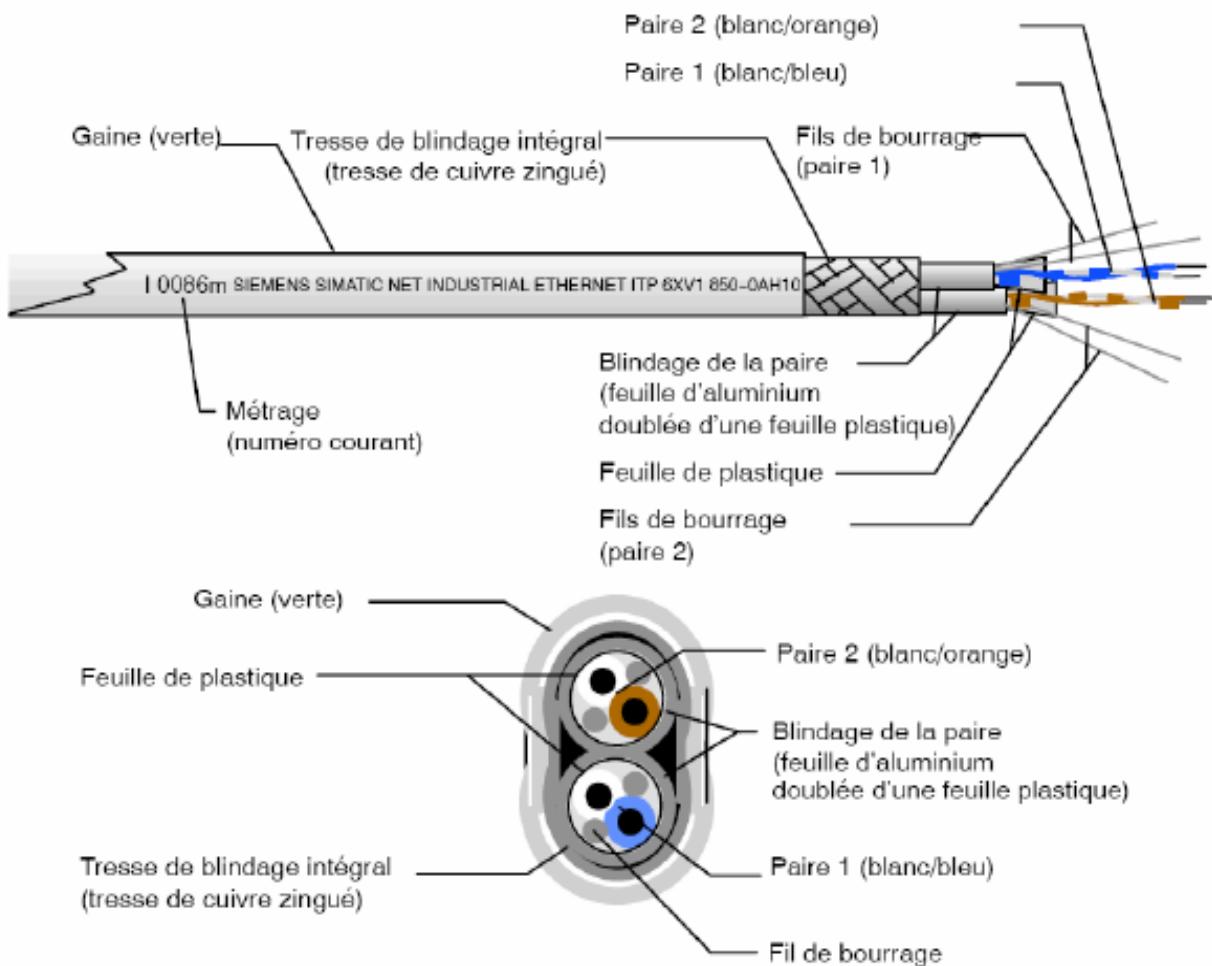


Fig.5.4 structure d'un câble torsadé utilisé dans le réseau Ethernet de Siemens

4.5 Transmission optique

Certaines applications de bus s'acquittent mal de la transmission filaire. C'est le cas des milieux industriels à forte pollution électromagnétique ou des réseaux à longue portée, des contraintes auxquelles reméde parfaitement la fibre optique [10].

Fibre optique

La fibre optique possède les avantages suivants :

Immunité au bruit.

Faible atténuation sur de très grande distance.

Largeur de bande qui peut atteindre jusqu'à plusieurs GHz.

Difficulté d'écouter contrairement au câble électrique.

Les câblages optiques sont constitués d'un cœur qui peut être du verre, du plastique ou en PCF, entouré d'une gaine de silice de quelques μm recouvert d'un isolant.

Les fibres optiques en verre sont utilisées pour les liaisons inter bâtiment. Ces liaisons sont appelées Backbone (épine dorsale) et elles permettent d'atteindre des distances de 60 Km. Tandis que les fibres optiques de plastiques sont utilisées pour de courte distance de 50 m à 80 m.

Les fibres optiques en PCF sont plus robustes que les fibres en plastique et peuvent atteindre des distances de 300 m à 400 m.

La figure suivante montre les constituants de la fibre optique.

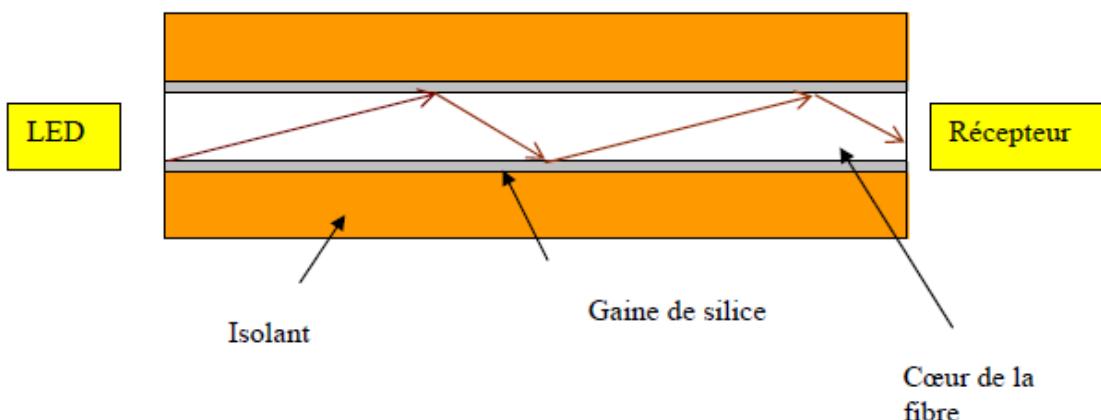
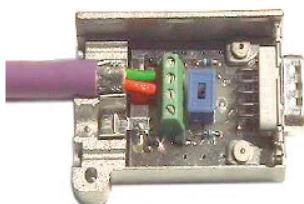


Fig.5.5 Les constituants de la fibre optique.

<u>Broche</u>	<u>Signal</u>	<u>Désignation</u>
1	Terre	Terre de protection blindage
2	M24	Masse 24 V
3 Rouge	TX+/RX+ (A)	Ligne émission/Réception positif
4	CNTR-P	Signal de contrôle pour répéteur
5	DGND	Masse Données 5V
6	VP	Signal sortie 5V pour polarisation
7	P24	Signal sortie 24 V
8 Vert	TX- /RX- (B)	Ligne émission/Réception négatif
9	CNTR-N	Signal de contrôle pour répéteur



Rouge A (TX+/RX+)

Vert B (TX-/RX-)

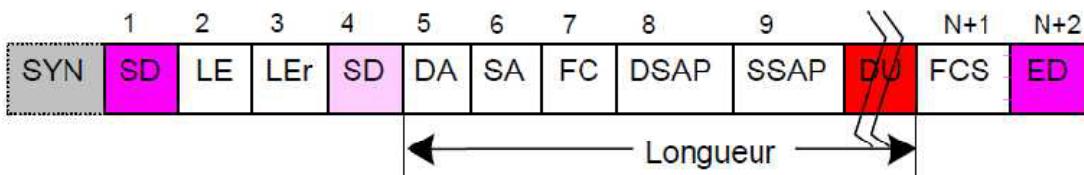
Fig.5.6 Brochage normalisé RS485- 2 fils (connecteur Sub D 9).

5. Structure des télégrammes :

Les informations sont transmises sur les réseaux PROFIBUS par des séquences d'octets appelées télégrammes, constituées d'une série d'octets contrôles par un bit de parité paire et transmis en mode asynchrone, encadres d'un bit START (niveau logique 0) et stop (niveau logique 1).

5.1 Format général d'un télégramme Profibus :

Trame maximum 255 octet, transmission asynchrone, caractère sur 11bits : 1 Start, 1 Stop, 8 Data bits, 1 Bit de parité paire.



SYN Temps de synchronisation (33 Tbits)
SD Délimiteur de début de trame
LE Longueur de la trame de DA à FCS
LER Répétition de la longueur de la trame
DA Adresse Destination
SA Adresse Source

DSAP Point d'accès du service de destination
SSAP Point d'accès du service de la source
DU **Données (244 octets Maximum)**
FC Contrôle (Requête/Réponse/Accusé)
FCS Clef de contrôle (Checksum)
ED Délimiteur de fin (16H)

5.2 Exemples de télégrammes particuliers :

1) Passage du Jeton



DA	= Adresse Destination
SA	= Adresse source
FC	= Code Fonction
DU	= Données
DSAP	= SAP Destination
SSAP	= SAP Source
LE	= Longueur
L _E R	= Longueur répétée
FCS	= Checksum (Mod 256 hors délimiteurs)
DCH, 10H, A2H, 68H	= Délimiteur début
16H	= Délimiteur de fin

2) Longueur fixe sans Données (FDL Status Req)



3) Longueur fixe avec Données (8 Octets)



4) Longueur variable avec Données (4 à 249 octets)



5) Acquittement court

E5H

ACK : pour des requêtes en SDA

NACK : pour des requêtes en SRD (No data available)

6. Principe d'accès au BUS dans un réseau profibus

PROFIBUS met en œuvre un modèle de communication de type Maître-esclave selon un mode d'accès au bus de nature hybride, comme le montre la (figure 3).

Les équipements maîtres, appelés stations actives, dirigent la transmission de données sur le bus et émettent librement des messages, sous réserve d'obtenir le droit d'accès au medium, déterminé par le passage d'un jeton.

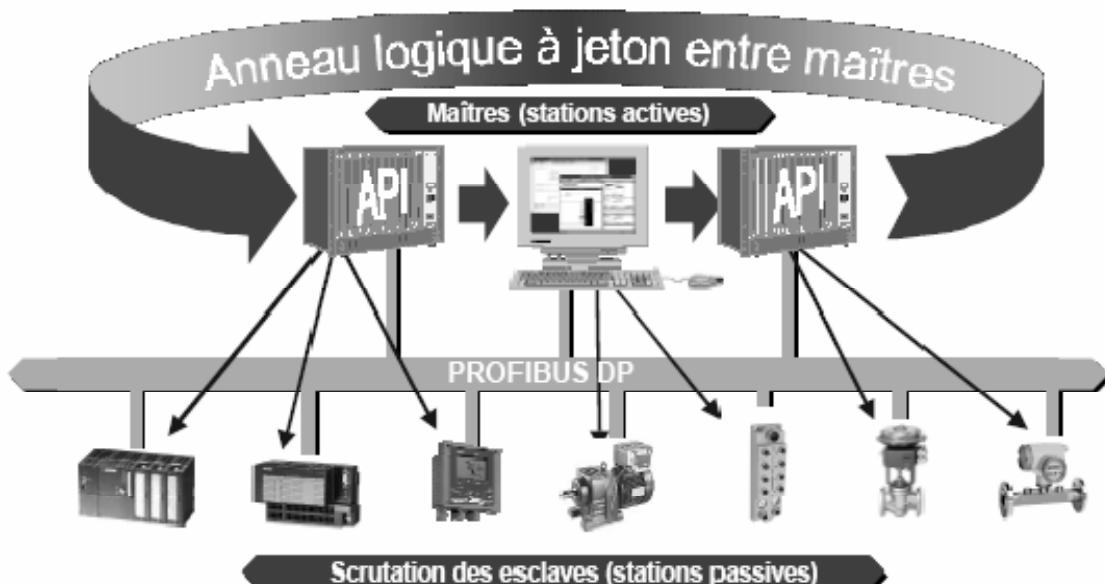


Fig.5.7 Principe d'accès au BUS.

Les équipements esclaves, appelés stations passives, sont des équipements périphériques (blocs d'entrées-sorties, vannes, entraînements et transmetteurs de mesure, etc.) qui n'ont pas le droit d'accès au bus. Leur action se limite à l'acquittement des messages reçus des maîtres ou à la transmission de messages en réponse à une demande des maîtres.

La nature hybride du principe d'accès au réseau implémenté par PROFIBUS permet :

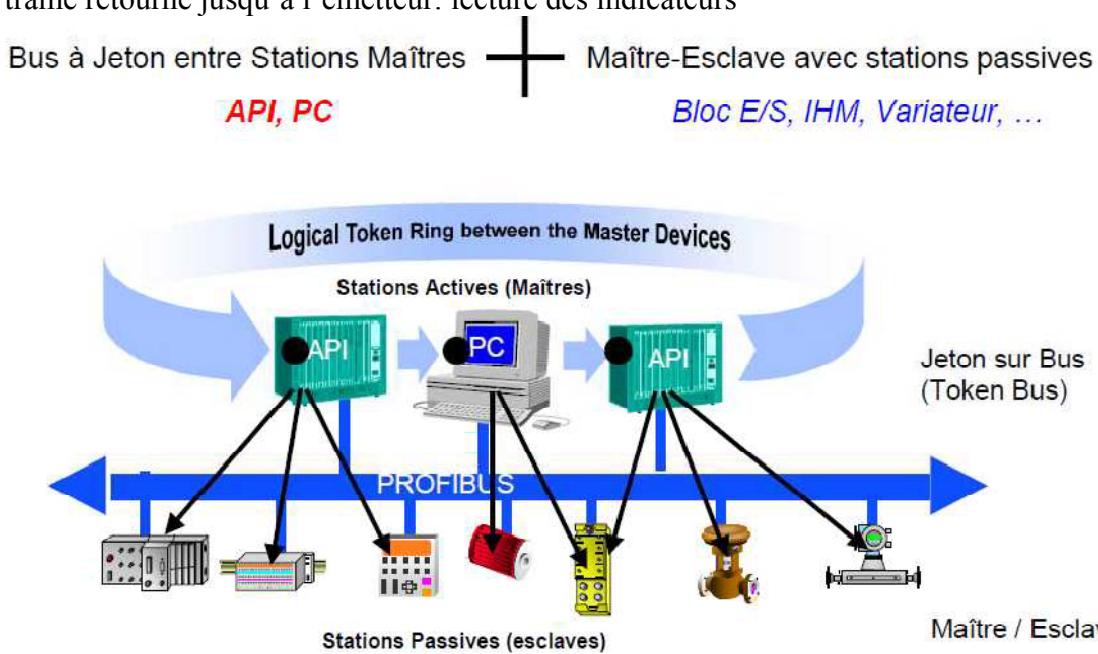
- d'une part une communication entre les stations maîtres par un mécanisme de passage de jeton sur bus, déterministe et adaptatif. La circulation du jeton est effectuée selon un anneau logique, indépendamment de la topologie bus du réseau ;
 - d'autre part une communication simple de type maître-esclave entre une station maître et les équipements esclaves auxquels elle veut s'adresser.

Chaque station maître (station active) disposant du droit d'accès au bus figure par le passage du jeton, qui est constitué d'une trame spéciale, est libre d'accéder à tout esclave (station passive) connecté au réseau.

7. Gestion du jeton :

Cette technique peut-être utilisé dans une topologie en anneau ou en bus.

- Un jeton circule sur le réseau, inclus dans la trame
 - La trame passe de station en station (régénérée)
 - Le jeton est libre ou occupé (droit d'émettre)
 - Trame = jeton + adresse + message
 - La trame retourne jusqu'à l'émetteur: lecture des indicateurs



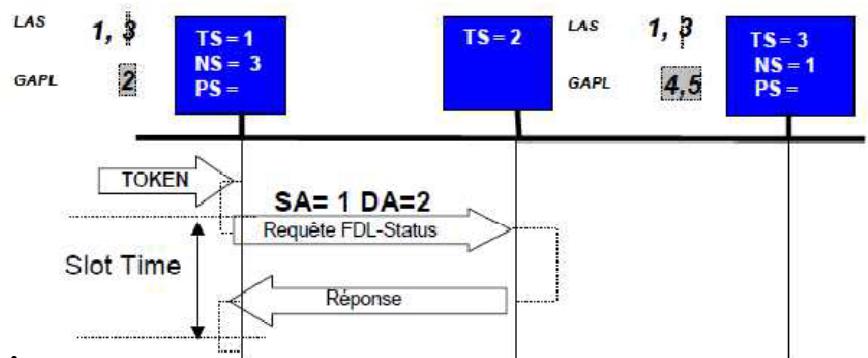
Cette technique est déterministe puisqu'on connaît le temps de rotation maximum du jeton, et ce temps est fixe même dans les cas de trafic élevé. Mais le fait de tourner le jeton même sans demande de transmission alourdit la technique.

Un autre point faible de cette technique est sa fragilité dans le cas de défaillance d'une station. Viennent s'ajouter aussi les problèmes classiques du jeton tels que sa duplication et sa perte.

Requête FDL-Status

3 Réponses possibles :

- Station active Prête à entrer dans l'anneau
- Station active Non Prête
- Station Mise à jour de l'anneau :



Pour la gestion de l'anneau logique, chaque station active, mémorise trois paramètres :

- **TS (This Station)** : @ station locale active
- **PS (Previous Station)** : @ station active précédente dans l'anneau logique
- **NS (Next Station)** : @ station active suivante dans l'anneau logique

Et gère trois tables internes :

LAS : List of Active Station

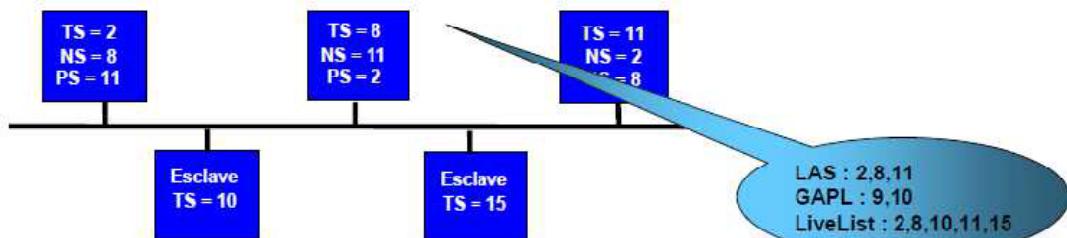
Liste (commune) de toutes les adresses des stations actives sur le réseau, constituée pendant l'état d'écoute du jeton (« Listen Token ») après mise sous tension

GAPL : Gap List

Liste spécifique à chaque station active, contenant les adresses manquantes entre cette station et la prochaine dans l'anneau.

Live List

Liste (commune) des adresses de toutes les stations présentes sur le réseau actives et passives.



8. Exemple de communication industriel

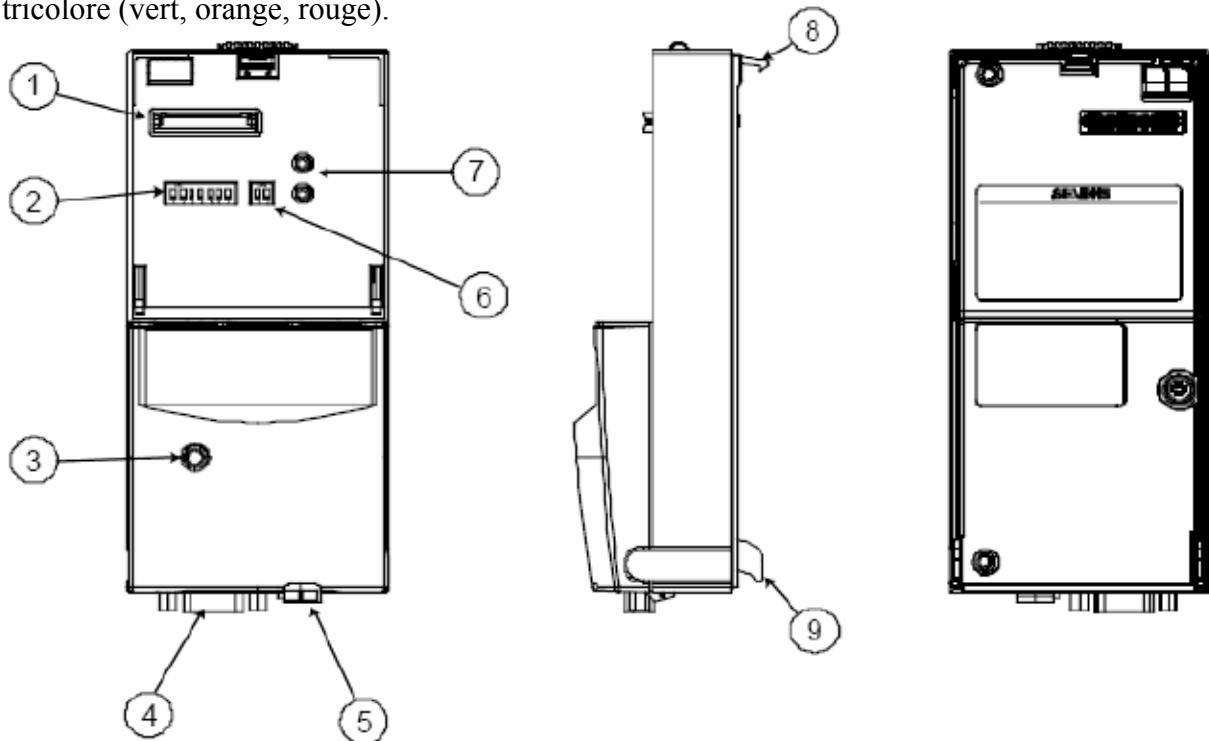
8.1 Description : Le module de communication PROFIBUS-DP (module optionnel PROFIBUS) sert à relier des variateurs de la gamme SIMOVERT MICROMASTER 440 aux systèmes d'automatisation de niveau supérieur par le biais du bus de terrain PROFIBUS-DP.



Fig.5.8 Carte CB pour la communication PROFIBUS-DP

8.2 Caractéristiques techniques

A fin de nous informer sur son état, le module de communication comporte une LED tricolore (vert, orange, rouge).

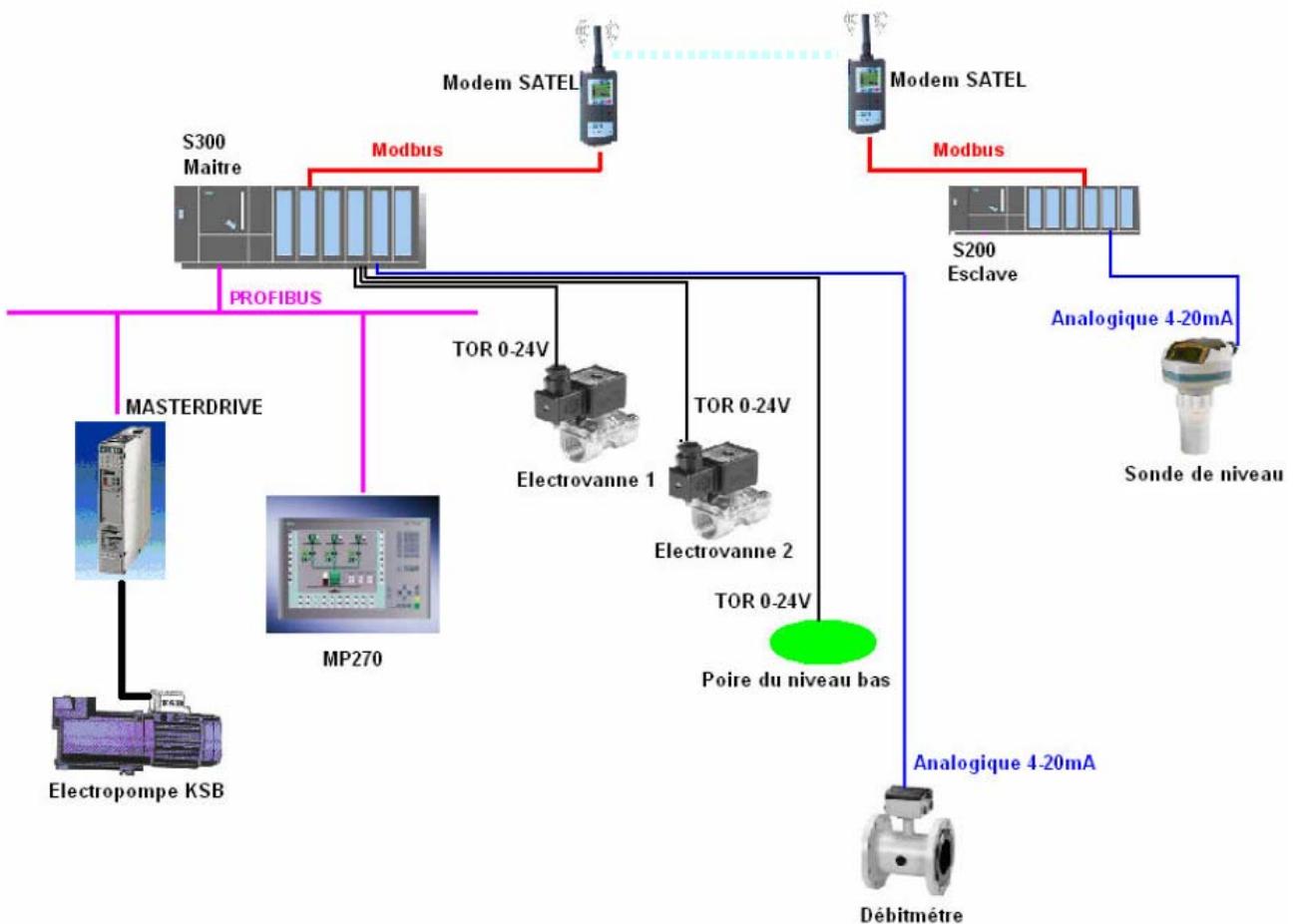


- | | | | |
|---|--|---|--|
| 1 | Connecteur pour panneau de commande | 6 | (pour usage interne Siemens seulement) |
| 2 | Commutateur pour adresse PROFIBUS | 7 | Témoin d'état du MICROMASTER 4 |
| 3 | Témoin d'état PROFIBUS | 8 | Fixation par encliquetage |
| 4 | Connecteur PROFIBUS | 9 | Crochet |
| 5 | Bornes d'alim. externe en 24 V
Borne 1: +24V
Borne 2: 0V | | |

Fig.5.9 Vue du module de communication

La tension d'alimentation est assurée par le connecteur système du variateur. Une source externe de 24 V fournit la tension d'alimentation du module optionnel PROFIBUS et de l'électronique du variateur.

Le raccordement au bus PROFIBUS s'effectue par un connecteur Sub-D 9 points à la norme PROFIBUS. Toutes les connexions de cette interface RS485 sont protégées contre les courts circuits et sont à séparation galvanique.



Chapitre 6. Bus CAN (Controller Area Network)

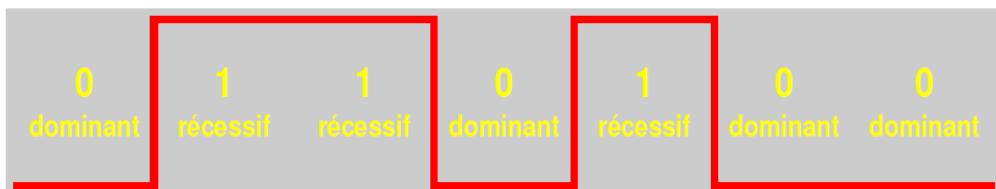
1. Généralités sur le réseau Bus CAN

En 1983, le bus CAN (Controller Area Network) a été conçu par la société allemande Robert BOSCH GmbH pour répondre aux besoins de communication interne dans les automobiles : multiplexage de commandes électriques, fiabilité, diagnostic, compatibilité électromagnétique, commandes d'organes (suspension, frein, contrôle moteur). Son exploitation ne commence qu'à partir de 1985 où une convention entre BOSCH et Intel a permis d'implanter le protocole CAN dans des circuits Intel. En 1986, la première standardisation du bus par l'ISO (International Standard Organization) a vu le jour. En 1987, Intel produit le premier contrôleur CAN, le 82526. La première voiture multiplexée à utiliser le bus CAN comme support de transmission a été réalisée en 1991 (avec un débit de 500 kbit/s).

- Définitions

Nœud : sous ensemble relié à un réseau de communication et capable de communiquer sur le réseau selon un protocole de communication (ici le protocole CAN). Chaque nœud peut détecter des erreurs sur un message qui ne lui est pas destiné et en informer les autres nœuds.

Valeurs du bus : le bus peut avoir l'une des deux valeurs logiques complémentaires définies, non pas en 0 et 1 comme d'habitude, mais sous la forme de bit nommé dominant ou récessif.



Message : chaque information est véhiculée sur le bus à l'aide d'un message (trame de bits) de format défini mais de longueur variable et limitée. Dès que le bus est libre, n'importe quel nœud relié au réseau peut émettre un nouveau message.

Routage des informations : des nœuds peuvent être ajoutés au réseau sans qu'il n'y ait rien à modifier tant au niveau logiciel que matériel. Chaque message possède un identificateur (*identifier*) qui n'indique pas la destination du message mais la

signification des données du message. Ainsi tous les nœuds reçoivent le message, et chacun est capable de savoir grâce au système de filtrage de message si ce dernier lui est destiné ou non.

Trame de données et de requête : une trame de données transporte, comme son nom l'indique, des données. Une trame de requête est émise par un nœud désirant recevoir une trame de données (dans ce cas l'identificateur est le même pour les deux trames).

Débit (bit/s) : le débit peut varier entre différents systèmes, mais il doit être fixe et uniforme au sein d'un même système.

Priorités : en cas de demandes de prise du bus simultanées les identificateurs de chaque message permettent aussi de définir quel message est prioritaire sur tel autre.

Fonctionnement multi maître : lorsque le bus est libre, chaque nœud peut décider d'envoyer un message. Seul le message de plus haute priorité prend possession du bus.

Arbitrage : le problème de l'arbitrage résulte du fonctionnement multi maître. Si deux nœuds ou plus tentent d'émettre un message sur un bus libre il faut régler les conflits d'accès. On effectue alors un arbitrage bit à bit non destructif tout au long du contenu de l'identificateur. Ce mécanisme garantit qu'il n'y aura ni perte de temps, ni perte d'informations. Dans le cas de deux identificateurs des trames de requête et de données identiques, la trame de données gagne le bus. Lorsqu'un bit récessif est envoyé et qu'un bit dominant est observé sur le bus, l'unité considérée perd l'arbitrage, doit se taire et ne plus envoyer aucun bit.

Canal de liaison simple : le bus consiste en un simple canal bidirectionnel qui transporte les bits. A partir des données transportées, il est possible de récupérer des informations de resynchronisation.

Acquittement : tous les récepteurs vérifient la validité d'un message reçu, et dans le cas d'un message correct ils doivent acquitter en émettant un flag.

Sécurité de transmission : dans le but d'obtenir la plus grande sécurité lors de transferts sur le bus, des dispositifs de signalisation, de détection d'erreurs, et d'autotests ont été implémentés sur chaque noeud d'un réseau CAN. On dispose ainsi d'un *monitoring bus* (vérification du bit émis sur le bus), d'un CRC (*Cyclic Redundancy Check*), d'une procédure de contrôle de l'architecture du message et d'une méthode de *BitStuffing*.

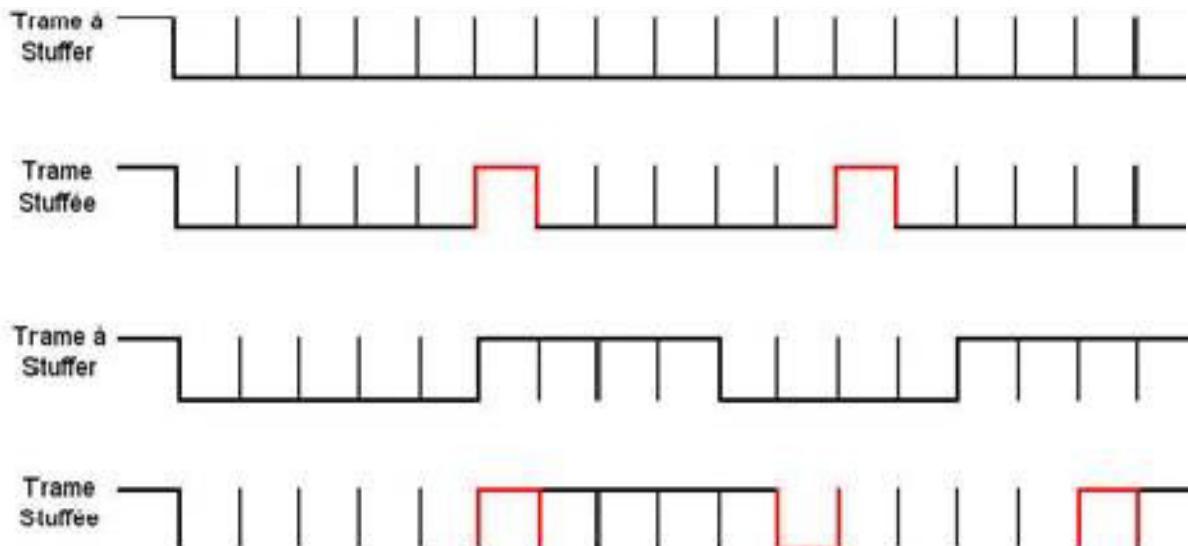
Signalement des erreurs et temps de recouvrement des erreurs : tous les messages entachés d'erreur(s) sont signalés au niveau de chaque noeud par un *flag*. Les messages erronés ne sont pas pris en compte, et sont retransmis automatiquement.

Erreurs de confinement : un nœud CAN doit être capable de faire les distinctions entre des perturbations de courtes durées et des dysfonctionnements permanents. Les nœuds considérés comme défectueux doivent passer en mode *switched off* en se déconnectant (électriquement)

du réseau.

Mode Sleep (sommeil) et Mode Wakeup (réveil) : afin de réduire la consommation d'énergie, chaque élément CAN peut se mettre en *Sleep mode*. Dans ce mode il n'y a aucune activité interne au noeud CAN considéré et ses drivers sont déconnectés du bus. La reprise de fonctionnement (mode *Wakeup*) s'effectue lorsqu'il y a une activité sur le bus ou par décision interne à l'élément CAN.

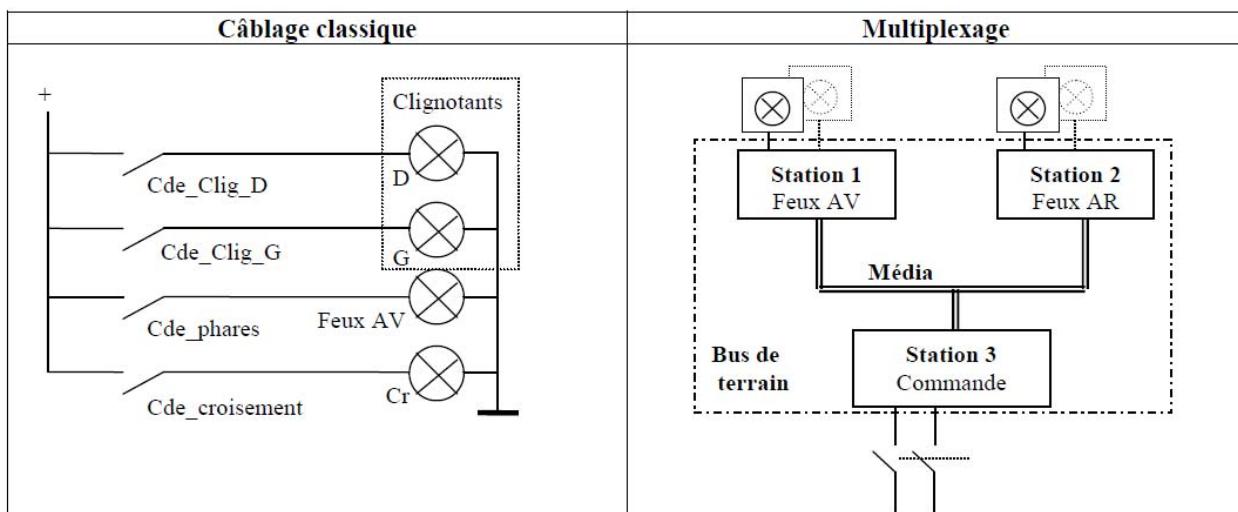
Méthode de BitStuffing: Cette méthode consiste, dès que l'on a émis 5 bits de même polarité sur le bus, à insérer un bit de polarité contraire pour casser des chaînes trop importantes de bits identiques. On obtient ainsi dans le message un plus grand nombre de transitions ce qui permet de faciliter la synchronisation en réception par les nœuds. Cette technique est uniquement active sur les champs de SOF, d'arbitrage, de contrôle, de CRC (délimiteur exclu). Pour un fonctionnement correct de tout le réseau, cette technique doit être implémentée aussi bien à la réception qu'à l'émission.



1.2. Bus CAN d'une automobile et multiplexage

En diminuant l'encombrement et le poids du câblage dans les automobiles, les bus de communication ont permis de réduire les coûts de fabrication, d'améliorer la fiabilité des systèmes électriques et d'assurer leur évolutivité.

Le remplacement du câblage classique (un capteur, un fil, un récepteur) par un bus (comprenant peu de fils) auquel se connectent les équipements du véhicule nécessite la mise en place d'une technique de transmission des informations appelée multiplexage.



Si le schéma de gauche est relativement simple (des connaissances élémentaires sur les circuits électriques et leur représentation schématique suffisent pour comprendre que l'action sur le commutateur « Cde_phares » établira un courant électrique dans l'ampoule « Feux AV » et donc son éclairage), le schéma de droite n'est pas aussi explicite.

En effet, il n'y a plus une liaison directe entre le capteur et le récepteur mais des interfaces, appelées stations (ou noeuds) qui se chargent de collecter les informations délivrées par les capteurs (commutateur, etc...) et de les transmettre sur un média à d'autres stations chargées de commander les récepteurs (ampoule de phare, etc...).

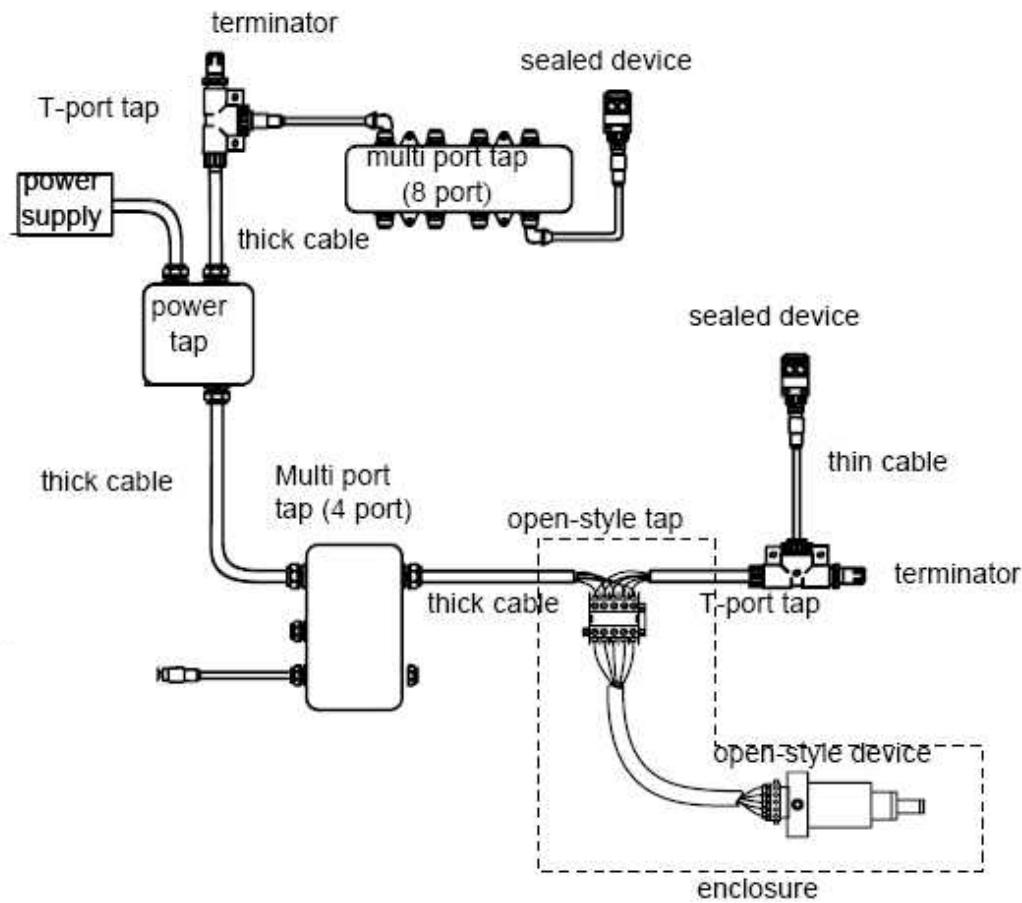
Lorsque toutes les stations sont connectées à une même voie de communication comme ci-dessus, on parle de topologie de type bus.

3.2 Topologie du BUS CAN

La topologie du réseau CAN fait que par nature, les informations émises par un nœud sont *physiquement diffusées* vers l'ensemble des autres nœuds, CAN open n'est pas un réseau de type maître esclave, donc *plusieurs nœuds* peuvent prendre la parole *simultanément*. Un mécanisme d'*arbitrage* est donc nécessaire. Cette fonction va être remplie par une méthode d'accès au médium de type *CSMA/CA* : « *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoided* ».

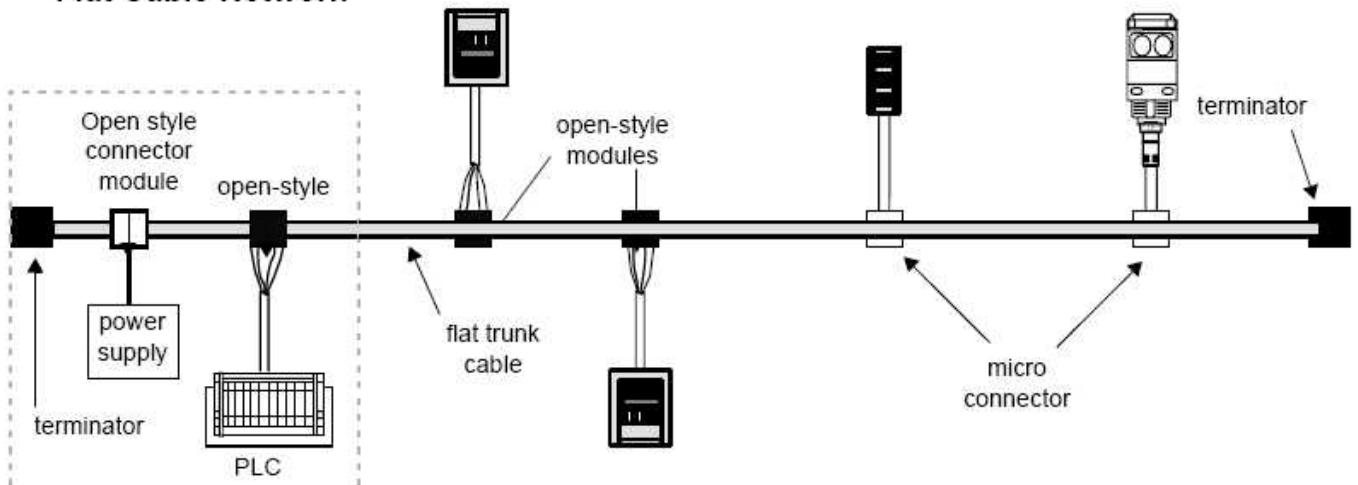
Topologie : Toutes les topologies sont envisageables pour CANopen, attention cependant à respecter les longueurs de segments admissibles, et à ne pas oublier les résistances de terminaison (120Ω) :

a- Topologie Arborescente sur câble blindé :



b- Topologie Bus sur câble plat :

Flat Cable Network



Codage : Le codage des bits est de type **NRZ** avec un système de bits **dominants ('0')** et **récessifs ('1')** :

Note : La transmission des données est différentielle.

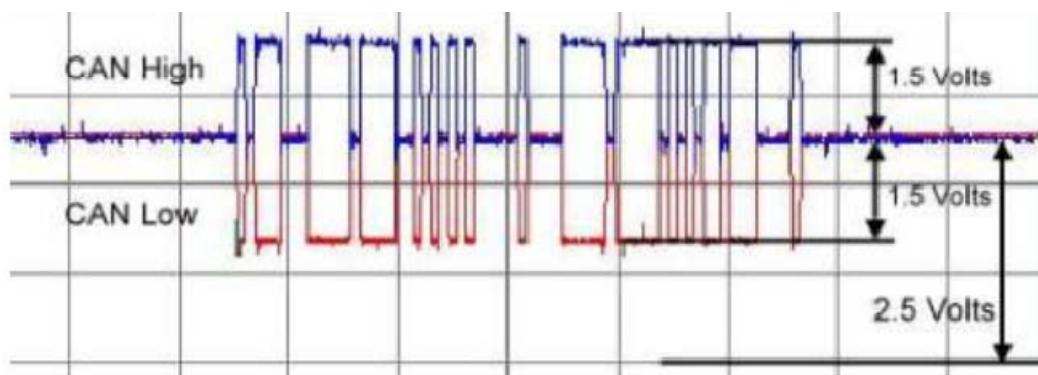
3.3 Niveaux de tension et états logiques du bus CAN

Le bus CAN utilise 4 fils :

- Alimentation (V+ et V-)
- Données (CAN_L et CAN_H)

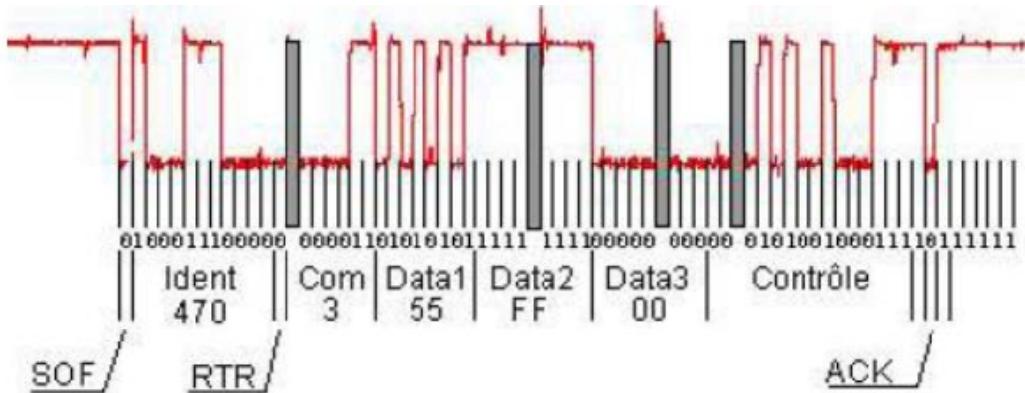
Les niveaux utilisés entre les deux lignes de la paire pour le « **CAN LOW-SPEED** » sont définis par rapport à 2,5V.

Niveau	CANH <> masse	CANL <> masse	CANH <> CANL
Récessif ou « 1 »	1,75 V	3,25 V	-1,5 V
Dominant ou « 0 »	4 V	1 V	3 V



Pour un bus « CAN HIGH SPEED » les niveaux sont toujours définis par rapport à 2,5V sont :

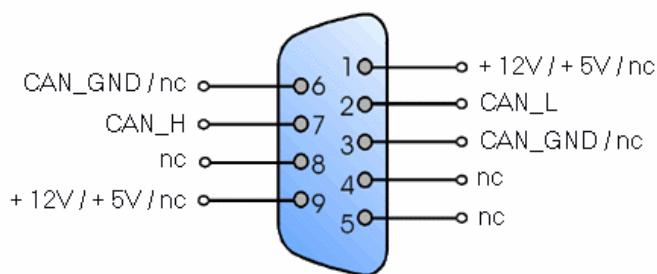
Niveau	CANH <> masse	CANL <> masse	CANH <> CANL
Récessif ou « 1 »	1,75 V	3,25 V	-1,5 V
Dominant ou « 0 »	4 V	1 V	3 V



La Couche Physique :

Le bus DeviceNET utilise 4 fils :

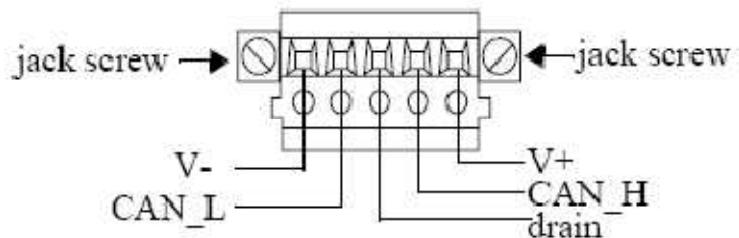
- Alimentation (V+ et V-)
- Données (CAN_L et CAN_H)



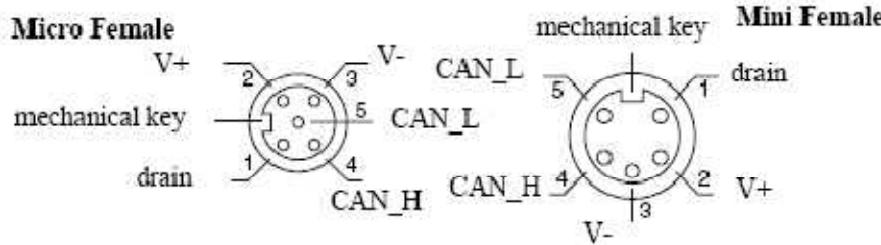
- Connectique :** Les 3 types de connecteurs suivants sont utilisables :



Screw-terminal and Hard-wired Connectors (IP20)



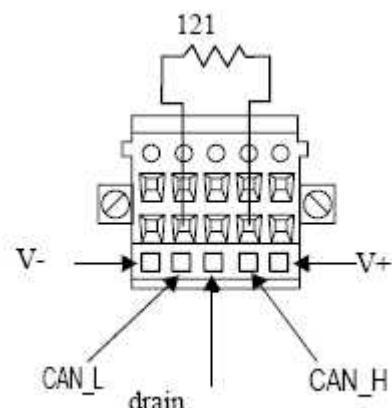
5-pin linear plug



Mini and Micro-style Pluggable Connectors (IP67)



Flat Cable with Flat Trunk Connectors (IP67)



2. Classification des bus CAN :

Le bus CAN est un réseau à part entière respectant le modèle d'interconnexion des systèmes ouverts (modèle OSI) de l'ISO et il est classé dans la catégorie des réseaux de terrain utilisés dans l'industrie pour remplacer la boucle analogique 4/20mA.

La première spécification du bus CAN était propre aux applications dans l'automobile. Une **classification** simple et pragmatique a été établie par ISO en retenant deux classes d'applications :

- vitesse de transmission lente définie comme étant inférieure à **125 kbit/s** ;
- vitesse de transmission élevée considérée comme étant supérieure à **125 kbit/s**.

Le CAN est un système de communication, en temps réel, par **liaison série** conçu pour relier des composants intelligents ainsi que des capteurs et des actionneurs dans une machine ou un procédé. Il possède des propriétés multi maîtres, c'est-à-dire que plusieurs nœuds peuvent simultanément demander l'accès au bus. Le CAN ne possède pas de système d'adressage mais plutôt un système d'allocation de priorités aux messages basé sur l'identificateur attribué à chaque message. Un émetteur transmet un message sans indication de destinataire ; sur la base de l'identificateur associé à ce message, chaque nœud décide de traiter ou d'ignorer ce message.

3. Protocoles de communication CAN:

Le protocole CAN (*Control Area Network*) est un protocole de communication série qui supporte des systèmes temps réel avec un haut niveau de fiabilité.

La norme ISO 11898 spécifie un débit maximum de 1Mbits/s. La longueur maximum du bus est déterminée par la charge capacitive et le débit (de 20 kbps sur 1 km à 1Mbps sur 40 m).

La structure du protocole du bus CAN possède implicitement les principales propriétés suivantes :

- souplesse de configuration
- fonctionnement multi maître
- détections et signalisations d'erreurs
- retransmission automatique des messages altérés
- déconnexion automatique des nœuds défectueux

Le protocole CAN ne couvre que 2 (ou 3) des 7 couches du modèle OSI : les couches PHYSIQUE et LIAISON et éventuellement la couche APPLICATION.

La couche 7 (APPLICATION) peut être implémentée sous forme d'un protocole supplémentaire (CAN Open par exemple). Elles ignorent simplement les autres.

Le protocole est basé sur le principe de diffusion générale : lors de transmission, aucune station n'est adressée en particulier, mais le contenu de chaque message est explicité par une identification reçue par tous les abonnés. Grâce à cet identificateur, les noeuds, qui sont en permanence à l'écoute du réseau, reconnaissent et traitent les messages qui les concernent.

3.1 Notion de bus de communication

Structure de trame

Début : symbole indiquant le début d'une trame ; les horloges internes des récepteurs se « calent » sur celle de l'émetteur

Identificateur : champ d'identification de la trame qui sert à identifier le contenu du message (ex : régime moteur) et parfois les destinataires Com. : champ de commande qui annonce la nature du message (données ou requête)

pour le VAN, qui annonce le nbre d'octets du champ de données pour le CAN

Informations : champ contenant les données à transmettre (exemple :

INFORMATION REGIME MOTEUR envoyée par le boîtier gestion moteur)

Contrôle : champ de contrôle de la cohérence de la trame (l'émetteur calcule un code en fonction des données transmises ; les récepteurs font le même calcul et comparent si il y a une différence, la trame ne sera pas acquittée)

Ack : champ accusé de réception si aucune erreur détectée en contrôle Fin : symbole indiquant la fin de la trame

Séparateur de trame : un certain nombre de bits constituent un espace entre 2 Trames

Début	Identificateur	Com.	Informations	Contrôle	Ack	Fin
-------	----------------	------	--------------	----------	-----	-----

3.2 Niveau Trame (Couche2)

Le transfert des messages se réalise à l'aide de quatre types de trames spécifiques et d'un intervalle de temps les séparant :

- Les trames de données : ces trames transportent des données d'un producteur vers des consommateurs.

- Les trames de requête : ces trames de *polling* sont émises par un maître vers des esclaves pour requérir la transmission d'une trame de données.
- Les trames d'erreurs : ces trames sont transmises lorsqu'une station détecte une erreur de transmission sur le bus.
- Les trames de surcharge (*overload*) : ces trames sont émises pour demander un laps de temps supplémentaire entre des trames (de données ou de requête) successives.

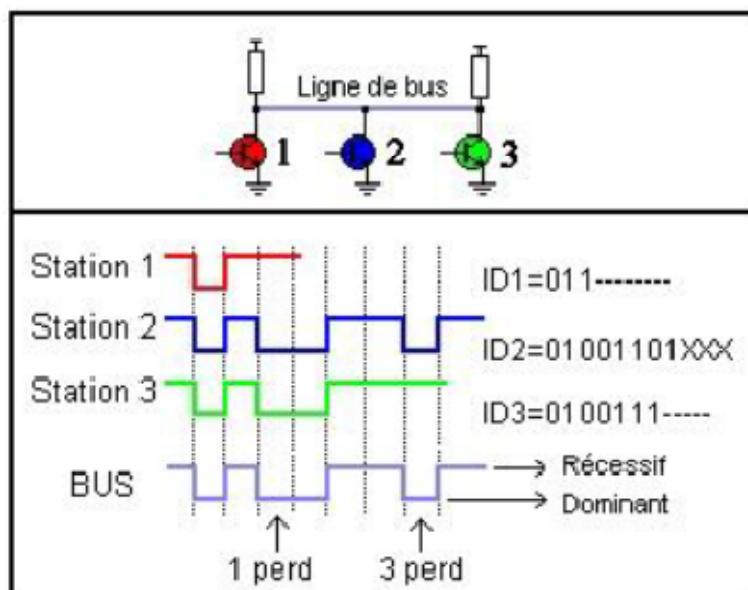
Il existe un espace inter trame de 3 bits récessifs entre les trames de données et de requête. Par ailleurs, il existe deux types de format de trames :

- La trame standard (format standard CAN 2.0A) possède un identificateur de 11 bits
- La trame étendue (format étendu CAN 2.0B) possède un identificateur 29 bits
Ce format étendu permet d'obtenir un plus grand nombre de messages et/ou de priorités.

Remarque : Le bus CAN2.0B est compatible avec le CAN2.0A.

3.3 Règles d'arbitrage du bus CAN :

En cas d'émission simultanée de plusieurs stations, l'attribution du bus suit le principe d'arbitrage suivant. Les stations émettant simultanément sur le bus, comparent bit à bit l'identificateur de leur message (ID) avec celui des messages concurrents. Les ID de priorités moins élevée perdent la compétition face à celle qui a la priorité la plus élevée, pour cela les stations sont câblées sur le bus par le principe du "ET câblé". En cas de conflit, c'est à dire émission simultanée, la valeur 0 écrase la valeur 1.



On appelle donc "**état dominant**" l'état logique 0, et "**état récessif**" l'état logique 1. Lors de l'arbitrage bit à bit, dès qu'une station émettrice se trouve en état récessif et détecte un état dominant, « elle perd » et arrête d'émettre.

Tous les perdants deviennent automatiquement des récepteurs du message, et ne tentent à nouveau d'émettre que lorsque le bus se libère. Dans l'exemple ci-dessus, trois stations émettent simultanément, la station 1 perd la compétition puis la station 3. Seule la station 2 pourra transmettre.

Remarque :

Sur le VAN, la priorité d'une trame peut-être déterminée sur toute sa longueur. Sur le CAN, la priorité est déterminée sur le seul champ d'identification.

Le bus CAN est utilisé dans de nombreux domaines : automobile, agricole, industriel et médical. Ce bus de terrain est connu pour être une solution de communication économique et efficace, sa vitesse de transmission peut atteindre 1 Mbit/s.

- **Méthode d'arbitrage :**

Les échanges sur le réseau ne peuvent débuter qu'à des *instants précis* matérialisés par le bit **SOF** qui débute la trame. La **gestion du temps** est une fonction primordiale implantée dans les équipements CAN.

Le premier champ de la trame est un **champ d'arbitrage** dans lequel tous les nœuds qui souhaitent prendre la parole vont émettre un **identificateur** (unique sur le réseau). Chacun va alors « *écouter* » sur le bus et *comparer* ce qu'il émet et ce qu'il écoute :

- **Rôle des bits dans le champ d'arbitrage:**

- **Le bit SOF** (“*Start Of Frame*”) est dominant il signale à toutes les stations le début d'un échange. Cet échange ne peut démarrer que si le bus était précédemment au repos. *Toutes les stations doivent se synchroniser* sur le front montant de ce bit.

- **Identificateur** : La longueur de l'identificateur est de *11 bits*, les bits sont transmis MSB en tête. Les 7 bits les plus significatifs (de ID_10 à ID_4) ne doivent pas être tous récessifs. (donc les valeurs interdites sont : ID = 1111111XXXX soit 2¹¹ – 2⁴ = 2032 combinaisons.) Il *détermine le niveau de priorité* du nœud qui émet.

- **Le bit RTR** : il permet de *distinguer les échanges implicites des échanges explicites* (trames de requêtes).

- Groupes de champs d'arbitrage :**

Les identifiants de connexion sont répartis en 4 groupes, en fonction des niveaux de priorité des messages. Un identifiant peut comporter :

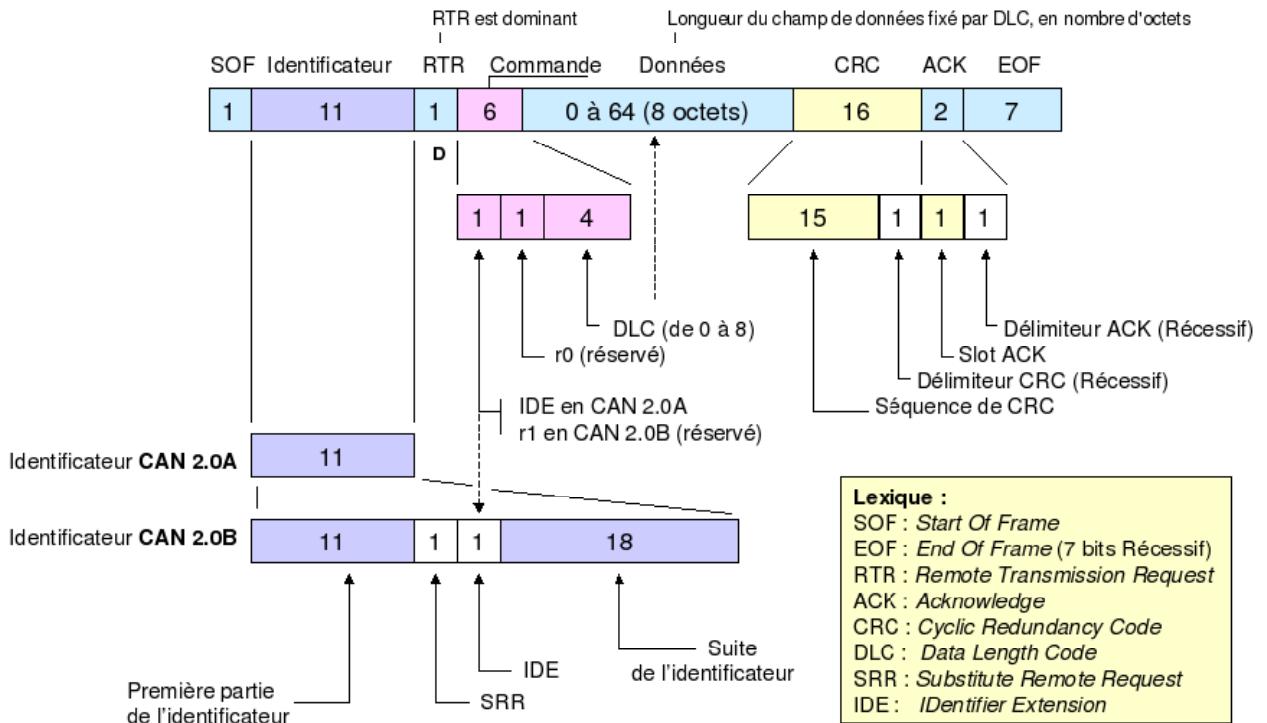
- **Un « message ID »** représentant le niveau de priorité du message porté sur le bus;
- **Un « MAC ID »** indiquant le numéro du noeud initiant la connexion.

Connection ID = CAN Identifier (bits 10:0)											Used for		
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0			
0	Message ID						Source MAC ID					Message Group 1	
1	0	MAC ID						Message ID				Message Group 2	
1	1	Message ID			Source MAC ID						Message Group 3		
1	1	1	1	1	Message ID						Message Group 4		
1	1	1	1	1	1	1	x	x	x	x	Invalid CAN Identifiers		

4. Représentations des trames CAN :

Trame de données

Le début de trame (SOF) n'est effectif que si le bus était précédemment au repos (*bus idle*). Tous les nœuds du réseau se resynchronisent sur le bit de SOF.



Une trame de données se décompose en 7 champs différents :

- le début de trame SOF (*Start Of Frame*) : 1 bit dominant

- le champ d'arbitrage : 11 bits (ID) + 1 bit (RTR) en standard et, 29 bits (ID) + 2 bits (SRR/IDE) + 1 bit (RTR) en étendu
- le champ de commande : 6 bits
- le champ de données : 0 à 64 bits
- le champ de CRC (*Cyclic Redundancy Code*) : 15 bits + 1 bit
- le champ d'acquittement (*Acknowledge*) : 2 bits
- le champ de fin de trame EOF (*End Of Frame*) : 7 bits récessifs

La signification de certains bits :

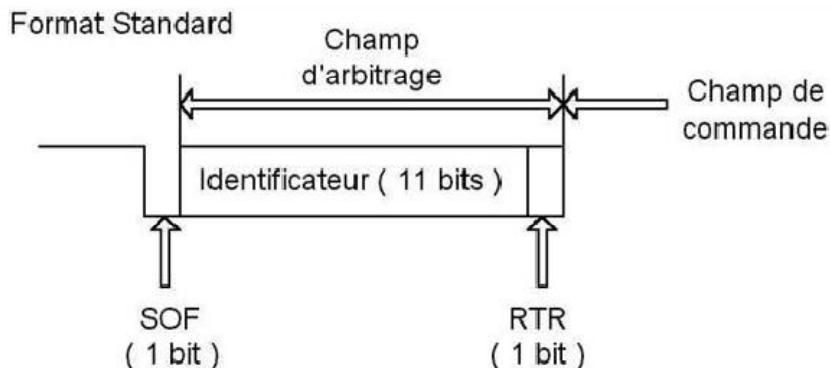
- RTR : *Remote Transmission Request* bit,
- SRR : *Substitute Remote Request* bit,
- IDE : *Identifier Extension* bit.

Le bit RTR (*Remote Transmission Request*) permet de déterminer le type de trame :

- RTR = état dominant : trame de données
- RTR = état récessif : trame de requête

Arbitrage

Dans une trame standard, le champ d'arbitrage est composé des 11 bits de l'identificateur plus un bit de RTR (*Remote Transmission Request*) qui est dominant pour une trame de données et récessif pour une trame de requête.



Comme nous l'avons vu précédemment, l'identificateur permet de router le message vers le bon nœud mais il indique aussi la priorité du message, qui détermine l'assignation du bus lorsque plusieurs stations émettrices sont en concurrences. Dans sa version standard, l'identificateur est codé sur 11 bits.

Les priorités sont attribuées statiquement lors de l'analyse conceptuelle du réseau, au moyen de valeur binaire, et ne peuvent donner lieu à aucune modification dynamique.

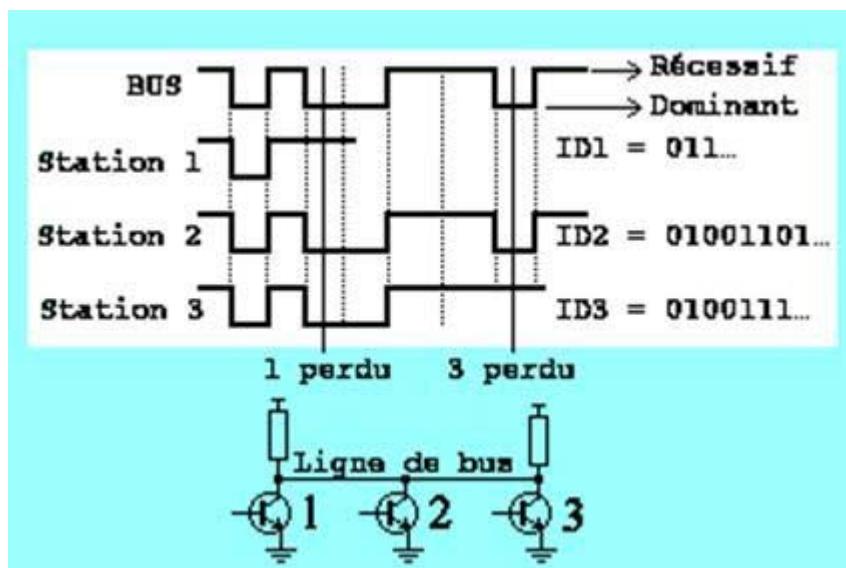
Les bits de l'identificateur sont numérotés de ID_10 à ID_0 (du MSB vers LSB). Par

ailleurs les 7 bits les plus significatifs (de ID_10 à ID_4) ne doivent pas tous être récessifs, ce qui réduit le nombre de combinaisons possibles. Le procédé d'attribution du bus est basé sur le principe de l'arbitrage bit à bit, selon lequel les nœuds en compétition, émettant simultanément sur le bus, comparent bit à bit l'identificateur de leur message avec celui des messages concurrents. Les stations de priorité moins élevées perdront la compétition face à celle qui a la priorité la plus élevée.

Les stations sont câblées sur le bus par le principe du "ET câblé", en cas de conflit c'est à dire émission simultanée, la valeur 0 écrase la valeur 1.

On appelle donc l'état dominant l'état logique 0, et l'état récessif l'état logique 1. Les bits de l'identificateur sont transmis dans l'ordre, de ID_10 à ID_0 (du MSB vers LSB).

Exemple :



Dans l'exemple ci-dessus, les stations 1, 2 et 3 demandent le bus en même temps. Pour les départager, on applique la méthode d'arbitrage et les premières stations à émettre un bit récessif sont exclues et devront attendre que la station qui a pris le bus (la station avec la priorité la plus haute) libère la ligne. Dans l'exemple la station 1 est exclue en premier puis la station 3. La station 2 a donc la plus haute priorité.

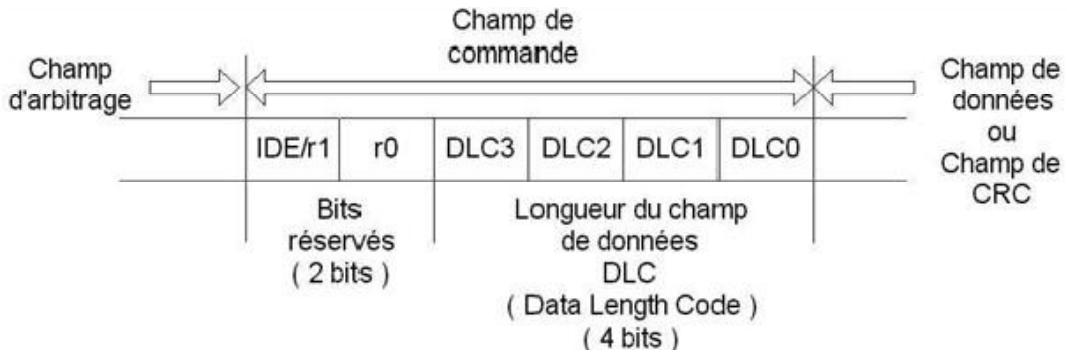
Le bus CAN utilise la méthode d'accès CSMA/CR (*Carrier Sense Multiple Access /Collision Resolution*) dont les principes généraux sont les suivants :

- Toutes les stations sont égales
- Chaque station émet quand elle veut (bus libre)
- Les collisions sont acceptées

- Les collisions sont détectées par les stations
- Les collisions sont gérées par le protocole
- Il y a une stratégie d'arbitrage des collisions
- La station qui remporte l'arbitrage continue sa transmission

Champ de contrôle

Le champ de contrôle est composé de 6 bits. Les deux premiers sont des bits de réserve et leur rôle est d'assurer des compatibilités futures ascendantes.



Les quatre derniers bits permettent de déterminer le nombre d'octets de données contenus dans le champ de données. Le nombre d'octets de données ne peut pas excéder la valeur de 8 (soit 64 bits).

Codage des bits DLC suivant la taille des données en octets (D : bit Dominant et R : bit Récessif) :

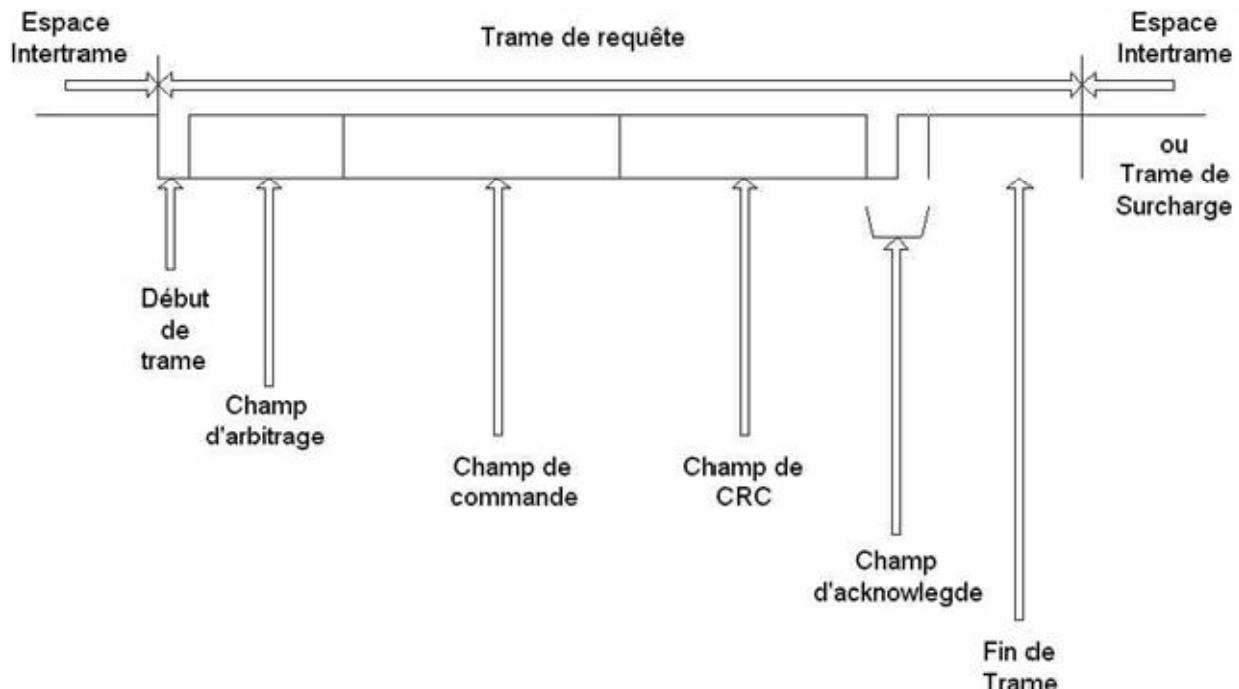
Taille des données en octets	DLC (<i>Data Length Code</i>)			
	DLC3	DLC2	DLC1	DLC0
0	D	D	D	D
1	D	D	D	R
2	D	D	R	D
3	D	D	R	R
4	D	R	D	D
5	D	R	D	R
6	D	R	R	D
7	D	R	R	R
8	R	D	D	D

Trame de requêtes

Une trame de requête est constituée de la même manière qu'une trame à deux différences près :

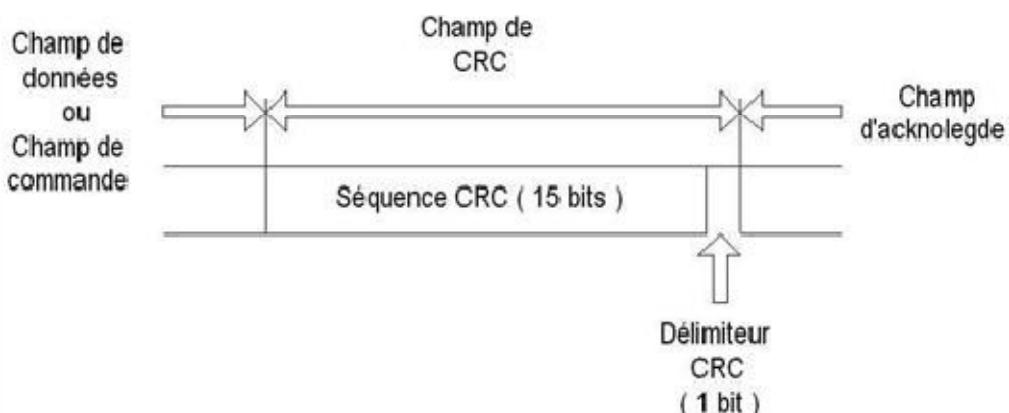
- Le champ de données est vide.
- Dans le champ d'arbitrage, le bit de RTR est récessif.

Si un nœud a besoin d'un certain nombre de données, il va émettre une trame de requête dès que le bus sera libre en prenant soin d'indiquer dans le champ de contrôle (DLC) le nombre d'octets de données dont il a besoin.



Champ CRC

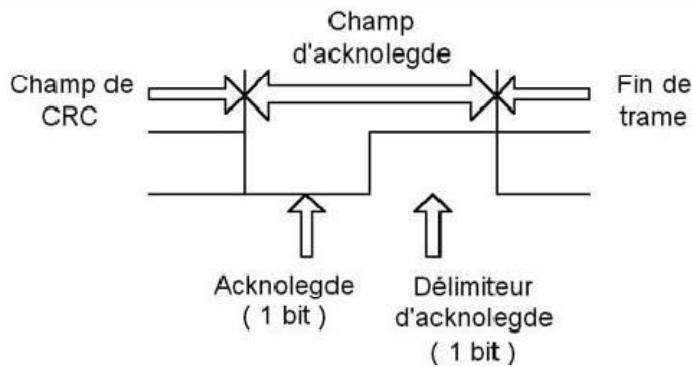
le champ de CRC est composé de 16 bits. La séquence CRC calculée est contenue dans les 15 premiers bits tandis que le dernier bit est un délimiteur de fin de champ de CRC (bit toujours récessif).



Ce champ de CRC permet de s'assurer de la validité du message transmis, et tous les récepteurs doivent s'astreindre à ce procédé de vérification. Seuls les champs de SOF, d'arbitrage, de contrôle et de données sont utilisés pour le calcul de la séquence de CRC.

Champ d'acquittement

Le champ d'acquittement possède 2 bits.



Si aucune erreur n'a été détectée par un nœud, ce dernier émet un bit dominant sinon il émet une trame d'erreur. La station émettrice du message originel doit alors être capable de réagir en fonction de l'émission d'un bit dominant ou non par les autres stations sur le premier bit du champ d'acquittement.

Le second bit est un bit délimiteur d'acquittement qui doit toujours être récessif.

Champ de fin de trame

Ce champ de fin de trame est constitué de 7 bits récessifs, ce qui déroge à la règle de *BitStuffing*.

Traitement des erreurs

Lors de l'émission d'une trame sur le bus, des erreurs de transmission peuvent venir perturber le bon fonctionnement des différents utilisateurs du bus. L'erreur peut venir d'un nœud, et empêcher le réseau de fonctionner correctement. Pour cela, des méthodes de détection d'erreurs de transmissions sont prévues par le protocole CAN.

Différents types d'erreur

Le Bit Error : Chaque fois qu'un émetteur envoie un bit sur le bus, il vérifie en même temps si le niveau émis sur le bus correspond à celui qu'il désire envoyer en faisant une surveillance du bus. Si le niveau ne correspond pas, il le signale par un *Bit Error*.

Sauf si :

- Un bit dominant est envoyé dans le champ d'arbitrage à la place d'un bit récessif.

Dans ce cas, le bit dominant signifie simplement une perte d'arbitrage.

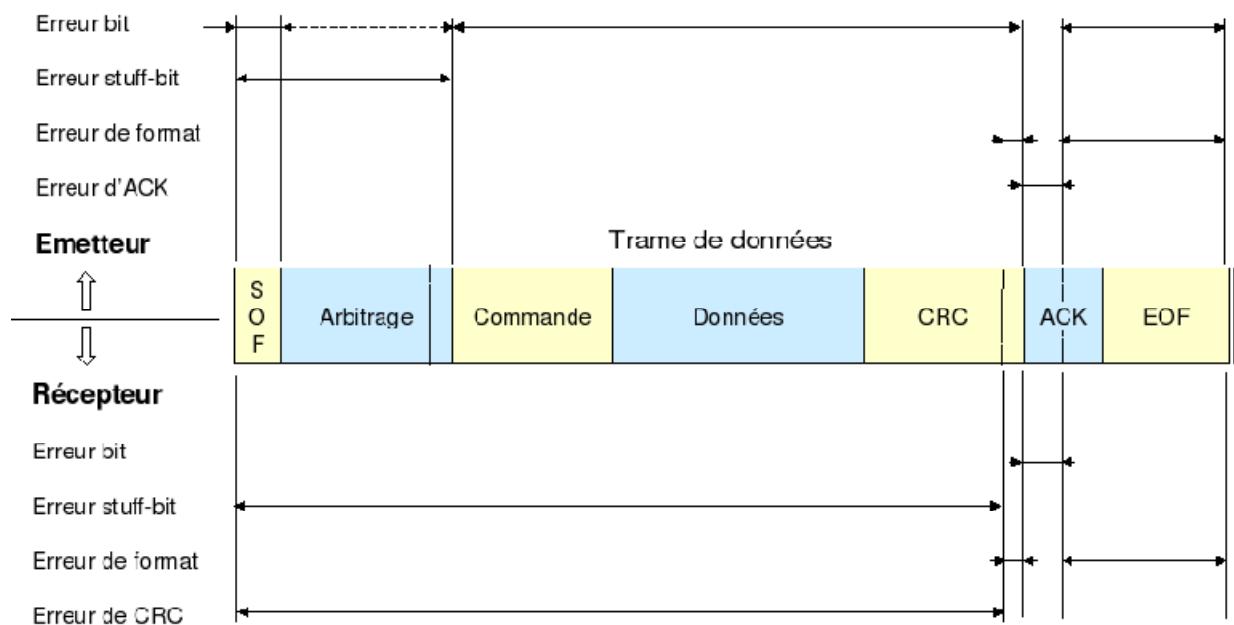
- Un bit dominant est envoyé lors de l'*acknowledge slot*, à la place d'un bit récessif.
- Un émetteur envoyant un flag d'erreur passive (bit récessif) et recevant un bit dominant, ne doit pas signaler un *Bit Error*. L'erreur de *Stuffing* (*Stuff Error*) : Une erreur de *Stuffing* est détectée à chaque fois qu'il y a 6 bits ou plus consécutifs de même signe sur le bus.

L'erreur de CRC (CRC Error) : Si la valeur du CRC calculée par le récepteur est différente de celle envoyée par l'émetteur, il y a erreur de CRC.

L'erreur d'Acknowledge Delimiter : Une erreur d'*Acknowledge Delimiter* est signalée lorsque le récepteur n'observe pas un bit récessif lors du champ de *Acknowledge Delimiter*. Il en est de même pour le CRC Delimiter.

L'erreur de Slot Acknowledge (Acknowledgment Error) : Une erreur de *Slot Acknowledge* est signalée par l'émetteur s'il ne lit pas un bit dominant lors du champ de *slot acknowledge*.

La gestion des erreurs s'applique sur certains champs, selon les cas :

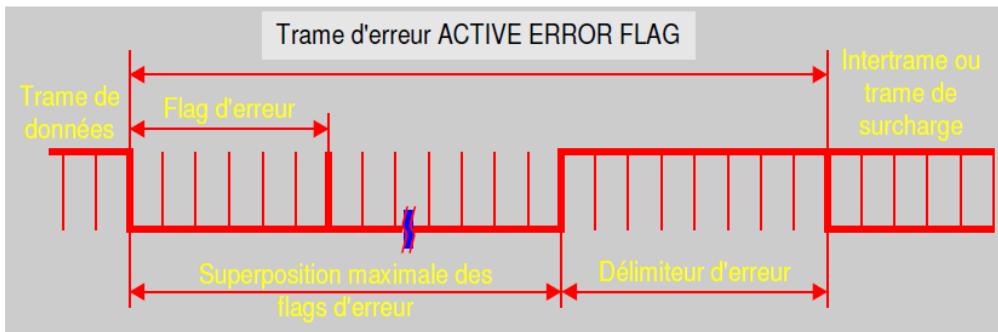


Trame d'erreur (Error Frame)

Si la station détecte une erreur, elle renvoie une trame d'erreur constituée de

- 6 bits à l'état dominant (*Error Flag*) suivie de
- 8 bits délimiteurs à l'état récessif (*Error Delimiter*).

Plusieurs stations peuvent détecter l'erreur et envoyer elles aussi une trame d'erreur : il y aura superposition de bits d'erreur (un maximum de 6 bits supplémentaires soit 12 bits max pour l'*Error Flag* afin de ne pas bloquer indéfiniment le bus). Les bits formant l'*Error Flag* sont dominants et écrasent donc les données contenues dans la trame de données. Ils provoqueront donc la retransmission de cette dernière.



A l'issue de 8 bits délimiteurs, le bus est libéré (3 bits inter trame) et les communications peuvent reprendre. Le nœud essaiera à nouveau de transmettre le message.

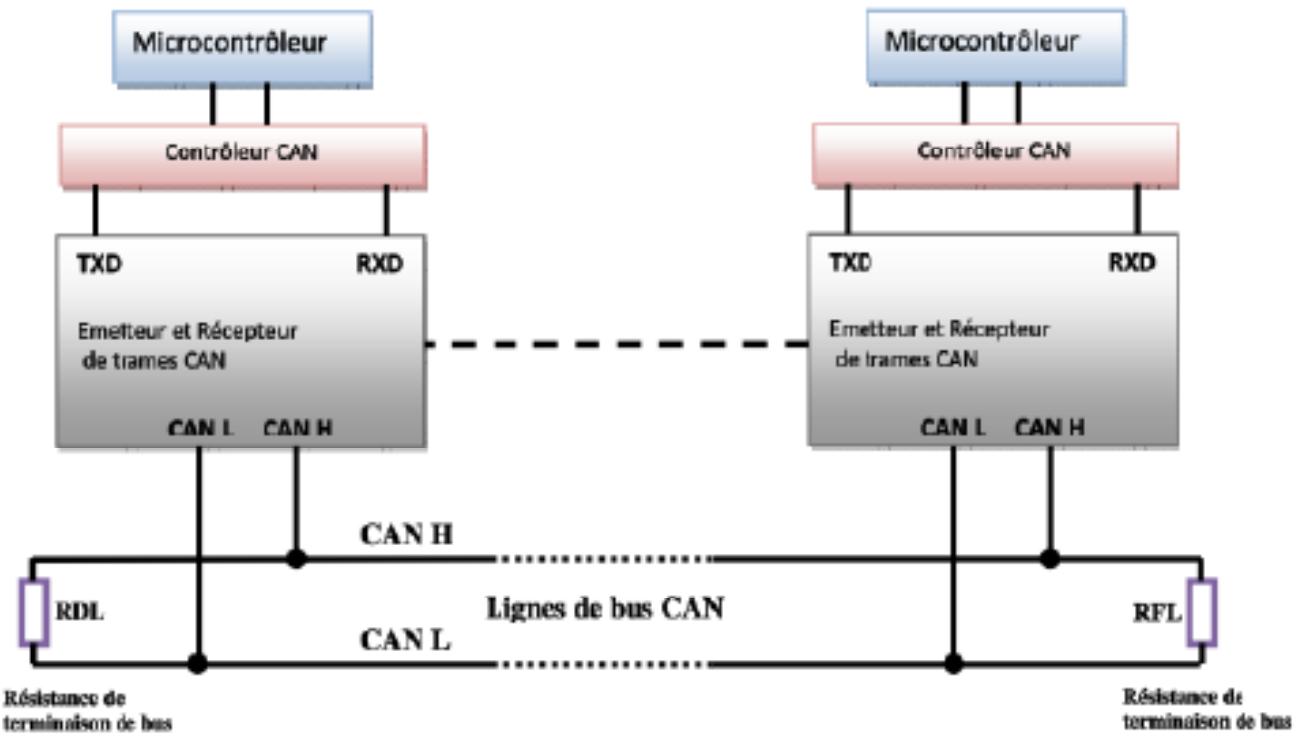
Synchronisation des horloges

- Sur le réseau, la durée de transmission d'un bit peut varier d'un nœud à l'autre ; les boîtiers doivent donc effectuer une synchronisation pour une bonne réception : c'est la synchronisation des horloges.

Ce sont les horloges des récepteurs qui se calent sur l'horloge de l'émetteur :

- En début d'émission de trame sur le bus (: le bus passe de l'état de repos à celui d'activité)
- Pendant l'émission de la trame : Le récepteur compare sa durée de transmission d'un bit avec celle de la trame en cours de lecture.

La synchronisation consiste à allonger ou raccourcir la durée de transmission d'un bit du boîtier récepteur, pour l'ajuster avec celle d'un bit du boîtier émetteur



Chaque équipement connecté, ou « nœud », peut communiquer avec tous les autres. L'accès au bus CAN suit la technique (écoute de chaque station avant de parler mais pas de tour de parole, résolution des collisions par priorité).

Références Bibliographiques

Manuels:

1. Schneider Electric, Système de câblage AS-i, Manuel de référence, Janvier 2000.
2. SIEMENS, PROFIBUS Spécification. Normative parts of Profibus-FMS, DP, PA according to the european Standard EN 50170, Vol. 2, édition 1.0, PNO, 1998.

Bibliographie :

1. Communication industrielle pour l'automatisation, Brochure Simatic Net, Siemens, Avril 2006.
2. N.BOUAYED, La télégestion, projet de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
3. G. PUJOLLES, Les réseaux, Edition Eyrolles, 1997.
4. Réseaux locaux industriels, Zoubir Mammeri et Jean-Pierre Thomesse, Edition Eyrolles, 1994.
5. Réseaux locaux Industriels, Team – Pierre Thomesse, Techniques de l'ingénieur R7574, 1994
6. Spécification des réseaux locaux industriels, Cours de G. Beuchot, INSA 2004.
7. Introduction aux Réseaux Locaux Industriels, P. Hoppenot, Université d'Evry Val d'Essonne 1999.
8. Les réseaux locaux industriels, Hugues Angelis , IUT de Cachan 2004.
9. Introduction aux bus et réseaux temps réel, Bertrand Dupouy, ENST 2007.
10. LES RESEAUX DE TERRAIN, Patrice KADIONIK, ENSEIRB, 2003.
11. Bus de terrain : une approche utilisateur, J.-C. Orsini, Cahier Technique Schneider Electric n° 197, mars 2000
12. Réseaux et bus de terrain, Frank Singhoff, Université de Bretagne occidentale, 2002
13. E.BAJIC et B.BOUARD, Réseau PROFIBUS, Techniques de l'ingénieur, Vol. S 8 190.
14. Réseau Profibus, Eddy BAJIC & Bruno BOUARD, Techniques de l'ingénieur S8140.
15. Le BUS CAN, Patrice KADIONIK, ENSEIRB, 2001.
16. Bus CAN, Ahmed RACHID & Frédéric COLLET, Techniques de l'ingénieur S8140.

Liens Internet:

- www.wikipedia.com
www.siemens.com