

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie électrique

Spécialité : Automatique

Polycopié de cours

**Module : Bus de communication
et réseaux industriels**

Réalisé par :

ADDA BENATTIA Abderrahmane, MCB

Niveau : Licence 3ème Année (S6)

Expertisé par :

• **BENDAOUD Mebarek, Pr**

• **MOSTEFAOUI Sid Ahmed Mokhtar, MCA**

Année universitaire : 2023/ 2024

Sommaire

Sommaire.....	i
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Architecture des réseaux.....	3
1. Généralité sur les réseaux.....	3
1.1 Définition.....	3
1.2 Objectifs des réseaux.....	3
1.3 Principe de fonctionnement.....	3
2. Classification des réseaux.....	4
2.1 Classification des réseaux par échelle.....	4
2.1.1 WAN : Wide Area Network.....	4
2.1.2 MAN : Metropolitan Area Network.....	4
2.1.3 LAN : Local Area Network.....	5
2.2 Classification des réseaux par topologie.....	5
2.3 Classification des réseaux par mode de transmission.....	5
2.3.1 Réseaux à Transmission par diffusion.....	5
2.3.2 Réseaux à Transmission point à point.....	6
3. Topologies des réseaux.....	6
3.1 Composants.....	6
3.2 Connexions.....	7
3.3 Architectures des réseaux.....	7
3.4 Le bus.....	7
3.5 L'étoile.....	7
3.6 L'anneau.....	8
3.7 L'arbre.....	8
3.8 Le graphe.....	9
3.9 La topologie complète.....	9

4.	Protocoles de communication	10
4.1	Modèle OSI.....	10
4.1.1	Couche 1 : couche physique	10
4.1.2	Couche 2 : couche liaison.....	13
4.1.3	Couche3 : couche réseau	15
4.1.4	Couche 4 : couche transport	15
4.1.5	Couche 6 : la couche session	16
4.1.6	Couche 6 : la couche présentation	16
4.1.7	Couche 7 : couche application.....	16
5.	Techniques de transmission de données	17
5.1	Caractéristiques des supports de transmission :.....	17
5.2	EQUIPEMENT DE TRANSMISSION : Circuit de Données	17
5.3	TRANSMISSION EN BANDE DE BASE	17
5.4	TRANSMISSION PAR MODULATION	17
5.5	Modes de transmission de données.....	18
5.6	Liaison synchrone, asynchrone	19
5.7	Codage de ligne : Conversion numérique-numérique	20
5.8	Débit binaire et rapidité de modulation	20
6.	Conclusion	21
	Chapitre II : Bus de terrain et réseaux locaux industriels.....	22
1.	Introduction	22
2.	Réseaux locaux industriels.....	22
2.1	Les avantages des bus de communication industrielle	22
2.2	Les domaines industriels d'application.....	23
2.3	Contraintes et défis	23
3.	Objectifs des bus de terrain	24
4.	Classification des bus de terrain	25
5.	Conclusion	27

Chapitre 3 : Bus CAN (Controller Area Network)	28
1. Introduction	28
2. Classification des bus CAN.....	28
2.1 CAN 2.0A Standard	29
2.2 CAN 2.0B Etendu	29
3. Protocoles de communication CAN (architecture de liaison de données).....	30
3.1 Couche physique	30
• Notion de bit dominant et bit récessif	32
3.2 Protocole de niveau Liaison (sous couche MAC).....	32
3.2.1 Identificateurs	32
3.2.2 La méthode d'arbitrage.....	33
3.2.3 Types d'échanges d'objets identifiés.....	34
4. Représentation des trames CAN	34
4.1 Introduction.....	34
4.1.1 Protocoles 2.0A et 2.0B	34
4.1.2 Types de trames ou messages	35
4.2 Le format de la trame DATA FRAME (trame de données)	35
4.3 Le format de la trame REMOTE FRAME (trame de requête)	37
4.4 Bit-Stuffing	38
4.5 Détection et contrôle des erreurs.....	38
4.5.1 Types d'erreurs	39
4.5.2 Gestion et isolation des erreurs.....	39
4.5.3 Trame d'erreur	42
4.6 Trames de surcharge	42
5. Mise en œuvre du bus CAN	43
5.1 Architectures autour de CAN.....	43
5.2 Composants utilisés dans le bus CAN	43
5.2.1 Canbus shield.....	43

5.2.2	Anatomie de la carte Shield CAN	44
5.2.3	Interconnexion du Shield avec la carte Arduino	44
5.2.4	Connexion du Shield	46
5.2.5	Canbus module : Présentation de la carte module CAN mcp2515.....	46
5.2.6	Anatomie du module CAN MCP2515.....	47
5.2.7	Interconnexion du module CAN avec la carte Arduino	47
5.3	Implémentation avec Arduino : Librairie « MCP-CAN »	48
5.3.1	Création de la liaison CAN.....	48
5.3.2	Initialisation du Bus CAN :	48
5.3.3	Envoi d'une trame	49
5.4	Format du trame CAN : allure du signal CAN_H et CAN_L.....	49
6.	Conclusion	50
Chapitre 4 : Interface actionneurs capteurs (AS-I)		51
1.	Introduction	51
2.	Architecture d'un bus de terrain AS-I	51
2.1	Maître AS-I :	52
2.2	Esclaves AS-I :	53
2.3	Câblage	53
2.4	Alimentation	54
2.5	Topologie en ligne	55
3.	Caractéristiques Bus AS-i.....	55
4.	Protocoles de communication AS-I.....	56
4.1	Codage APM (Alternate Pulse Modulation).....	56
4.2	Adressage des stations	57
4.3	Adressage étendu	57
4.4	Trames AS-i.....	57
4.4.1	Structure d'une requête maître	58
4.4.2	Structure d'une réponse esclave	59

4.4.3	Catalogue des requêtes et réponses	59
4.4.4	Intégration.....	59
5.	AS-i Sécurisé	60
5.1	ASI-safe	60
5.2	Gestion de la sécurité	60
5.3	Principes de base	61
5.4	Moniteur de sécurité	61
5.5	Temps de réponse	61
6.	Conclusion	62
	Chapitre V : Réseaux de terrain ProfiBus	63
1.	Introduction	63
2.	Classification des réseaux ProFiBus	63
2.1	Profibus DP (Decentralized Peripherals)	63
2.2	Profibus PA (Process Automation) :.....	64
2.3	Profisafe	65
2.4	Topologie du réseau	65
2.5	Supports physiques	65
3.	Profibus et modèles OSI (protocole de communication).....	66
3.1	Couche physique	67
3.1.1	PROFIBUS en fil de cuivre	67
3.1.2	Transmissions optiques.....	67
3.1.3	Transmissions sans fil.....	67
3.2	Couche Liaison de données	68
3.3	Couche application.....	69
3.3.1	PROFIBUS DP (Decentralized Peripherals)	69
3.3.2	PROFIBUS PA (Process Automation).....	69
3.3.3	PROFIBUS FMS (Fieldbus Message Specification).....	69
4.	Principe d'accès au bus dans un réseau profibus	69

4.1	Technique Maître-Esclave	70
4.2	Cycle de communication.....	70
4.3	Accès déterministe	71
4.4	Protocole de communication.....	71
4.5	Flexibilité et performances	71
5.	Mode d'accès hybride.....	71
6.	Formats de trame	73
6.1	Format de caractères de données ProfiBus DP (Acromag, 2002)	73
6.2	Contrôle des erreurs de données ProfiBus	73
6.3	Structure d'une trame ProfiBus	74
6.4	Séquence d'échange de trames	76
7.	Conclusion	77
	Bibliographie.....	78

Liste des figures

Figure 1.	Classification des réseaux	4
Figure 2	Topologie en bus.....	7
Figure 3	Topologie en étoile.....	8
Figure 4	Topologie en étoile.....	8
Figure 5	Topologie en arbre	9
Figure 6	Topologie en graphe.....	9
Figure 7	Topologie complètement maillée	9
Figure 8	Couches du modèle OSI.....	11
Figure 9	Equipements de la couche physique	12
Figure 10.	Switch.....	14
Figure 11.	Pont réseau	15
Figure 12	Connexions point à point vs. Bus de communication industrielle.....	24
Figure 13.	Topologie en bus du réseau CAN	31
Figure 14.	Niveaux physiques des bits dominant/récessif, (a) : Low speed, (b) : High speed.	32
Figure 15.	Arbitrage par la technique CSMA-CR.....	33
Figure 16.	Format de trame standard (CAN 2.0A).....	37

Figure 17. Format de trame étendu (CAN 2.0B).....	37
Figure 18. Diagramme d'états de nœuds en fonction de l'apparition d'erreurs.	40
Figure 19. Format de trame d'erreur	42
Figure 20. Format de trame de surcharge	43
Figure 21. CAN-BUS Shield.....	44
Figure 22. cartographie des pins Shield CAN-BUS	45
Figure 23. Interconnexion du Shield avec la carte Arduino	45
Figure 24. Connexion du Shield.....	46
Figure 25. Module CAN MCP2515	47
Figure 26. Pinout du Module CAN MCP2515	47
Figure 27. Connexion Module CAN MCP2515 avec Arduino	48
Figure 28 Tracé des lignes CAN_H et CAN_L sur oscilloscope RedPitaya.....	49
Figure 29 Lignes CAN_H et CAN_L et signal différentiel H-L sur oscilloscope	50
Figure 30. Equipements AS-Interface	51
Figure 31. Architecture Maitre-Esclave	52
Figure 32. Structure du système AS-I	52
Figure 33. Esclave AS-I	53
Figure 34. Câble plat profilé.....	54
Figure 35. Prise vampire.....	54
Figure 36. Alimentation AS-I.....	55
Figure 37. Codage APM (Alternate Pulse Modulation)	57
Figure 38 Echange de données AS-I	58
Figure 39. AS-I Sécurité	61
Figure 40. Temps de réponse AS-I Safe.....	62
Figure 41. Profibus DP	64
Figure 42. Profibus DP et Profibus PA	65
Figure 43. Connectiques Profibus (RS 485, CEI 1158-2, Fibre optique).....	66
Figure 44. Profibus et Modèle OSI.....	66
Figure 45. Principe d'accès au réseau Profibus	70
Figure 46. Configuration hybride des accès ProfiBus	72
Figure 47 Format de l'entête de trame.....	74
Figure 48 les cinq type de trames du protocole Profibus-DP	76
Figure 49 Cycle d'échange Maitre-Esclave DP	77

Liste des Tableaux

Tableau 1 Classification des erreurs réseau CAN	39
Tableau 2. Caractéristiques Bus AS-i.....	56
Tableau 3. Syntaxe générale d'un code profil.....	60
Tableau 4 Trame de caractère codée NRZ de ProfiBus (Parité paire)	73
Tableau 5 Abréviations de l'en-tête de trame ProfiBus DP et octets de trame.....	75

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, les réseaux de communication jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs d'activité, permettant l'interconnexion et l'échange d'informations critiques entre une multitude d'équipements et de systèmes. Que ce soit dans l'industrie, les infrastructures intelligentes, la domotique ou encore les télécommunications, la maîtrise des concepts fondamentaux liés à l'architecture des réseaux est devenue une compétence incontournable pour les professionnels de ces domaines.

Ce polycopié de cours a pour objectif de présenter de manière approfondie les principales notions et principes régissant l'architecture des réseaux, en mettant l'accent sur les réseaux industriels spécialisés. À travers les différents chapitres, les étudiants acquerront une compréhension solide des classifications, topologies, protocoles et techniques de transmission de données qui sous-tendent le fonctionnement de ces réseaux essentiels.

Le premier chapitre offrira une vue d'ensemble sur les généralités des réseaux, en abordant leur taxonomie, leurs topologies physiques et logiques ainsi que les protocoles de communication les plus répandus. Les concepts clés relatifs aux techniques de transmission de données seront également explicités.

Le deuxième chapitre se concentrera sur les bus de terrain et les réseaux locaux industriels, identifiant leurs caractéristiques, leurs objectifs et leurs différentes classifications. Cette compréhension sera primordiale pour saisir les enjeux propres aux environnements industriels.

Le troisième chapitre approfondira le cas particulier du bus CAN (Controller Area Network), en détaillant sa classification, ses protocoles de communication et la représentation de ses trames. Cette technologie étant largement utilisée dans les systèmes embarqués et l'automation industrielle, une attention particulière lui sera accordée.

Le quatrième chapitre se penchera sur l'interface actionneurs capteurs (AS-I), un bus de terrain dédié aux applications de contrôle-commande. Son architecture et ses protocoles de communication seront étudiés en détail.

Introduction générale

Enfin, le cinquième chapitre abordera les réseaux de terrain ProfiBus, une famille de réseaux industriels de premier plan. Leur classification, leur relation avec le modèle OSI et leurs principes d'accès au bus seront analysés avec soin.

Au terme de ce polycopié, les étudiants disposeront d'une compréhension approfondie des concepts clés régissant l'architecture des réseaux, avec un accent particulier sur les réseaux industriels spécialisés. Cette solide base de connaissances leur permettra de relever les défis techniques et opérationnels auxquels ils seront confrontés dans leurs futures carrières.

Chapitre I

Architecture des réseaux

Chapitre I : Architecture des réseaux

1. Généralité sur les réseaux

1.1 Définition

Un réseau permet d'interconnecter un ensemble d'équipements entre eux pour assurer la communication et le partage de ressources. Les réseaux peuvent prendre formes et diverses technologies de connexion en fonction de la nature des échanges et des équipements connectés (capteurs ou actionneurs, caméras, imprimantes ou ordinateurs sous différents systèmes d'exploitation...) (Frayssinet, 2018).

1.2 Objectifs des réseaux

Parmi les objectifs et les intérêts des réseaux les plus remarquables, on peut noter les suivants :

Pour les entreprises et organisations :

- Partage des ressources (programmes, matériels, données)
- Outil de communication (messagerie électronique, travail collaboratif)
- Fiabilité/résistance aux pannes (duplication des données, cloud)
- Commandes de fournitures en temps réel...

Pour les particuliers :

- Accès à l'information partagée par les technologies du web
- Communication (email, messagerie instantanée, forums, blogs, etc.)
- Enseignement et divertissement à distance.
- Commerce en ligne...

1.3 Principe de fonctionnement

En pratique, la présence de plusieurs équipements nécessite un système d'identification cohérent appelé adressage, afin de différencier ces équipements au sein du réseau. De plus, la fonction de routage permet au réseau d'acheminer l'information vers tout destinataire en fonction de son adresse. Pour bien fonctionner, le réseau possède des principes généraux d'organisation définissant le comportement des équipements internes et externes, les règles de communication et partage, à savoir le modèle d'architecture et les techniques de commutation.

2. Classification des réseaux

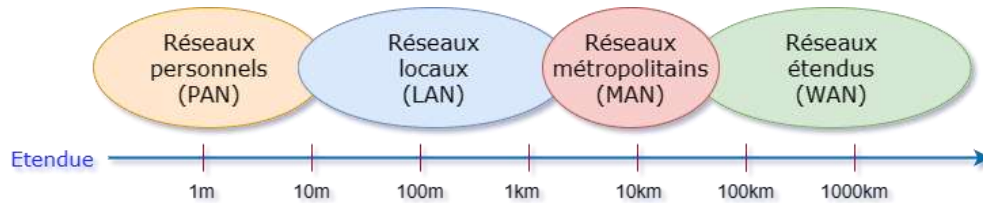


Figure 1. Classification des réseaux

La classification des réseaux peut se faire selon plusieurs critères de classification :

- Echelle
- Topologie
- Mode de transmission

2.1 Classification des réseaux par échelle

Les réseaux peuvent être classés selon leur étendue. Les objectifs ne sont pas identiques.

- PAN (Personal Area Network) : réseau est utilisé pour connecter des dispositifs personnels tels que des ordinateurs et d'autres appareils à proximité immédiate.
- LAN (Local Area Network) : Réseau d'entreprise dans un bâtiment ou un campus.
- MAN (Metropolitan Area Network) : Réseau pour connecter des LAN sur une ville.
- WAN (Wide Area Network) : Réseau entre utilisateur/systèmes sur un pays/continent.

2.1.1 WAN : Wide Area Network

Les réseaux étendus (WAN : Wide Area Network) sont chargés, de transporter des informations sur de longues distances à travers un pays, ou un continent. Ces réseaux sont utilisés par exemple, par des fournisseurs d'accès internet (Algérie Télécom), par de grandes sociétés industrielles, de financières ... etc.

Le réseau WAN utilisent des infrastructures différentes au niveau du sol, ou par des liaisons satellite.

2.1.2 MAN : Metropolitan Area Network

Les réseaux métropolitains (MAN) relient plusieurs réseaux locaux (LAN) géographiquement proches (de 10 à 100km) à des débits importants. En conséquence, un réseau MAN permet à un couple de nœuds distants de communiquer de manière transparente, comme s'ils faisaient partie d'un même réseau local. Ces réseaux MAN peuvent être publics ou privés.

Un réseau MAN est généralement constitué d'équipements réseau (commutateurs, routeurs) reliés par des liaisons à hauts débits à base de fibre optique.

2.1.3 LAN : Local Area Network

Les réseaux locaux (LAN : Local Area Network) sont constitués des moyens de communication au sein d'un établissement ou d'une entreprise, qui est entièrement maîtrisés et privés. La zone de service peut être un simple bâtiment, un complexe de bâtiments ou un campus.

Ce système de communication est limité à une zone géographique restreinte, ainsi les débits utilisés sont de l'ordre de quelques Mbits/s jusqu'au Gigabits/s.

Le réseau LAN n'utilise pas les circuits des opérateurs publics, mais peut contenir des passerelles ou des ponts vers d'autres réseaux comme Internet.

2.2 Classification des réseaux par topologie

Cette classification repose sur la manière dont les stations sont interconnectées. Cependant, on distingue de type de topologies :

- La topologie physique représentant la configuration spatiale, visible, du réseau qui définit la forme géométrique du réseau à savoir la disposition des stations, en ligne, en étoile, en anneau, en arbre ou encore la combinaison entre ces formes.
- La topologie logique représente la façon dont les données transitent dans les câbles, elle définit les règles pour la meilleure gestion du trafic au sein du réseau, suivant les objectifs de l'application.

Plus de détails sont données dans la [section §3](#).

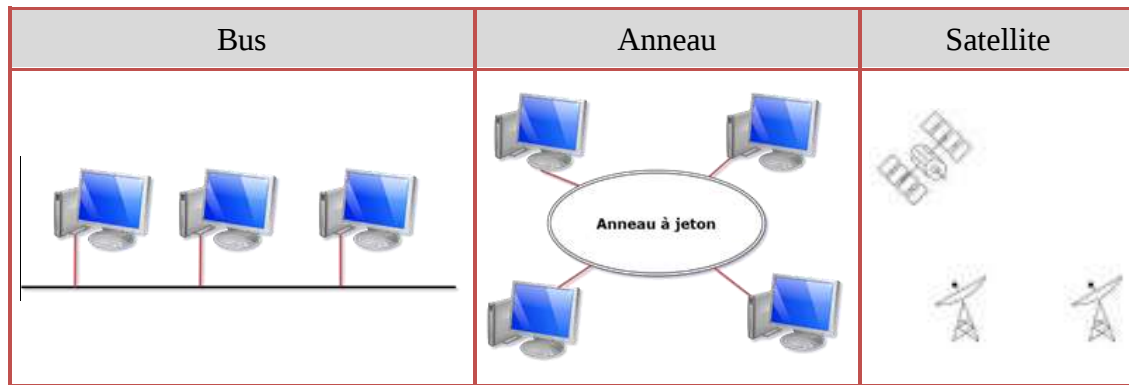
2.3 Classification des réseaux par mode de transmission

2.3.1 Réseaux à Transmission par diffusion

Dans cette catégorie de réseau, un seul canal est partagé par tous, et chaque message envoyé sur le réseau est reçu par toutes les stations. Le message dispose d'un champ adresse de destination, et la station possédant cette adresse accepte le message.

Dans la suite 03 topologies (architecture) des réseaux à diffusion :

- Bus
- Anneau
- Satellite



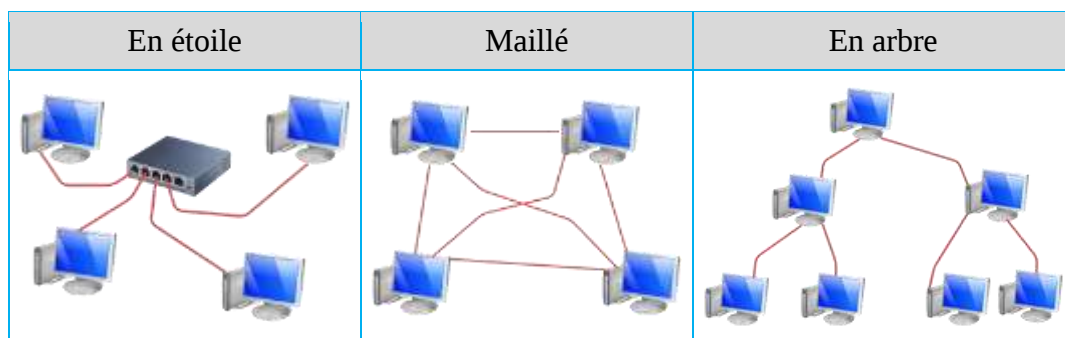
2.3.2 Réseaux à transmission point à point

Ce mode de transmission réseau est composé de lignes de transfert et de nœuds. Chaque ligne connecte deux nœuds.

Dans ce mode de transmission, le support physique relie uniquement une paire de stations seulement. Pour permettre la communication entre deux stations, elles passent nécessairement par un intermédiaire (le nœud).

Remarque : Les réseaux de type WAN sont principalement point à point, comme Internet.

Dans la suite, les 03 topologies (architecture) des réseaux point à point :



3. Topologies des réseaux

3.1 Composants

Les composants des réseaux se répartissent selon deux types :

- les composants de traitement sont les entités produisant et/ou consommant les informations qui circulent sur le réseau (par exemple les ordinateurs) ;
- les composants de routage assurent la transition et la circulation des informations échangées entre les composants de traitement (par exemple, les câbles, commutateurs).

3.2 Connexions

La connexion entre entités peut être point-à-point, c'est-à-dire qu'elle peut associer exactement deux entités, ou peut être une connexion multipoints qui en associe plus. Les modes de communication sont simplex, c'est-à-dire dans un seul sens, ou duplex, dans les deux sens.

3.3 Architectures des réseaux

L'architecture d'un réseau comprend 03 parties :

- L'architecture physique définit la topologie physique d'interconnexion des composants du réseau.
- L'architecture logique détermine la topologie de circulation de l'information. Elle peut être différente de l'architecture physique.
- L'architecture logicielle spécifie les logiciels assurant l'acheminement des données.

Les architectures physiques et logiques les plus classiques sont le bus, l'étoile, l'anneau, l'arbre, le graphe et la topologie complètement maillée.

3.4 Le bus

La topologie en bus consiste en un câblage unique auquel les différents nœuds sont connectés.

Le câble est le seule élément matériel constituant le réseau et seuls les nœuds sont responsables de la génération des signaux.

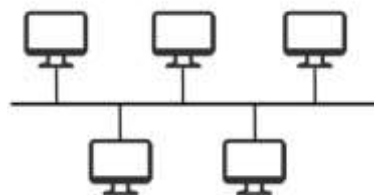


Figure 2 Topologie en bus

Lorsqu'une station est en panne et ne transmet plus de données sur le réseau, cela n'affecte pas le fonctionnement global du réseau. En revanche, une seule coupure du câble empêche toutes les stations d'échanger des messages sur le réseau.

3.5 L'étoile

Dans la topologie en étoile chaque nœud est connecté à un point central. Le point central doit être un matériel actif, comme un concentrateur ou un commutateur, c'est-à-dire un matériel qui remet en forme les signaux et les régénère avant de les retransmettre.

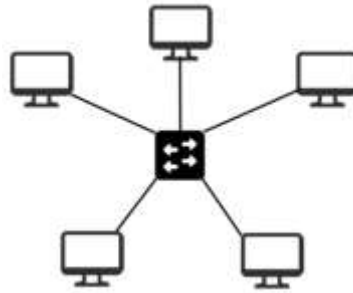


Figure 3 Topologie en étoile

La panne d'un nœud ne perturbe pas le fonctionnement global du réseau. En revanche, une panne de l'équipement central qui relie toutes les stations rend le réseau totalement inutilisable.

3.6 L'anneau

Dans une topologie en anneau, chaque station est reliée aux deux stations proches par une liaison point-à-point, et l'ensemble du réseau forme une boucle fermée.

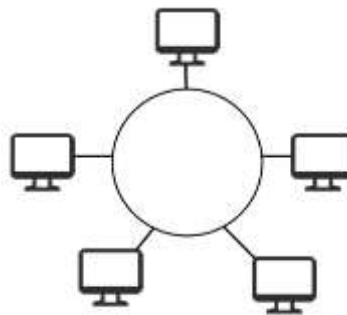


Figure 4 Topologie en étoile

Chaque station joue le rôle de nœud intermédiaire. Les informations transitent par chaque station dans une seule direction, qui se comporte comme un répéteur et retransmet les informations à la station suivante. Chaque station de travail accepte et répond aux paquets qui lui sont adressés, puis les faire suivre à la prochaine station de l'anneau. La défaillance d'une station rend le réseau inutilisable.¹

3.7 L'arbre

Dans l'architecture en arbre, les nœuds sont reliés entre eux de manière hiérarchique, donc par niveaux. Le sommet de haut niveau est appelé racine. Chaque nœud peut être connecté à plusieurs nœuds de niveau inférieur : dans ce cas on appelle ce nœud parent et les nœuds de niveau inférieur fils.

¹ https://math.univ-lyon1.fr/irem/Formation_ISN/formation_reseau/reseaux_generalites/generalites.html

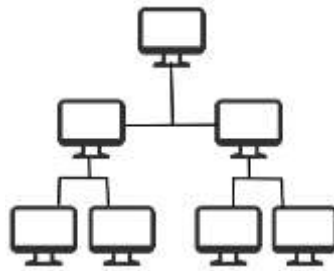


Figure 5 Topologie en arbre

Le point faible de cette topologie est le fait que si le nœud supérieur tombe en panne, il paralyse tout le sous réseau dont il est racine.

3.8 Le graphe

Dans une topologie en graphe les stations sont connectées entre eux par des liaisons point-à-point, de manière à construire un graphe connexe.

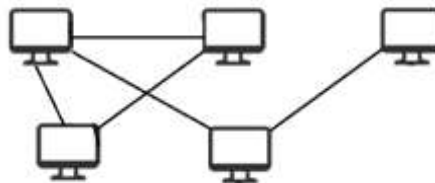


Figure 6 Topologie en graphe

L'information peut transiter le réseau suivant des itinéraires différents.

3.9 La topologie complète

Dans une topologie complète, il y a une liaison point-à-point entre chaque paire de nœuds, donc toute station est reliée à toutes les autres.

L'inconvénient de cette topologie réside dans le fait que le nombre de liaisons nécessaires qui devient très élevé lorsque le nombre de stations augmente.

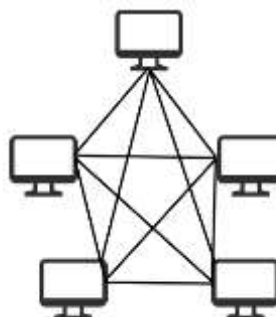


Figure 7 Topologie complètement maillée

4. Protocoles de communication

Un protocole de communication est un ensemble de règles et de conventions qui définissent comment les systèmes informatiques et les dispositifs de communication interagissent et échangent des informations. Il s'agit d'un langage commun qui permet aux différents éléments d'un réseau de se comprendre mutuellement et de transmettre des données de manière cohérente.

Les protocoles de communication sont essentiels pour assurer la compatibilité et l'interopérabilité entre les différents systèmes, matériels et logiciels, qui composent un réseau. Ils permettent d'établir des normes et des procédures pour l'opération d'envoi, de réception et de traitement des données.

Donc, un réseau devra permettre la connexion d'équipements différents, et répondre ainsi au besoin de communication. Pour cela, il est nécessaire que ceux-ci utilisent non seulement des techniques de connexion compatible (raccordement, niveau électrique, ...) mais aussi, des protocoles d'échange identiques, et une sémantique d'information compréhensible par les paires de communication. Pour atteindre cela une normalisation s'impose. C'est ce qu'a entrepris l'ISO² en 1975, en définissant un modèle de référence du réseau en 7 couches superposées appelé OSI (Open System Interconnect : modèle d'interconnexion des systèmes ouverts).

4.1 Modèle OSI

Le modèle de référence OSI³ est une représentation abstraite en couches servant de guide à la conception des protocoles réseau. Il divise le processus de réseau en sept (07) couches logiques, chacune ayant des fonctionnalités uniques et se voyant attribuer des services et des protocoles spécifiques.

4.1.1 Couche 1 : couche physique

La couche physique assure la transmission de l'information sous forme de suites composées de bits binaires (0,1) sous la forme de signaux analogiques ou numériques. La transmission est réalisée sur un support physique, l'équipement de transmission modifie la forme du signal passant entre les stations pour transférer le bit.

² ISO - International Organization for Standardization, <https://www.iso.org/home.html>

³ ISO/IEC 7498-1:1994 - Technologies de l'information — Interconnexion de systèmes ouverts (OSI) — Modèle de référence de base: Le modèle de base, <https://www.iso.org/fr/standard/20269.html>

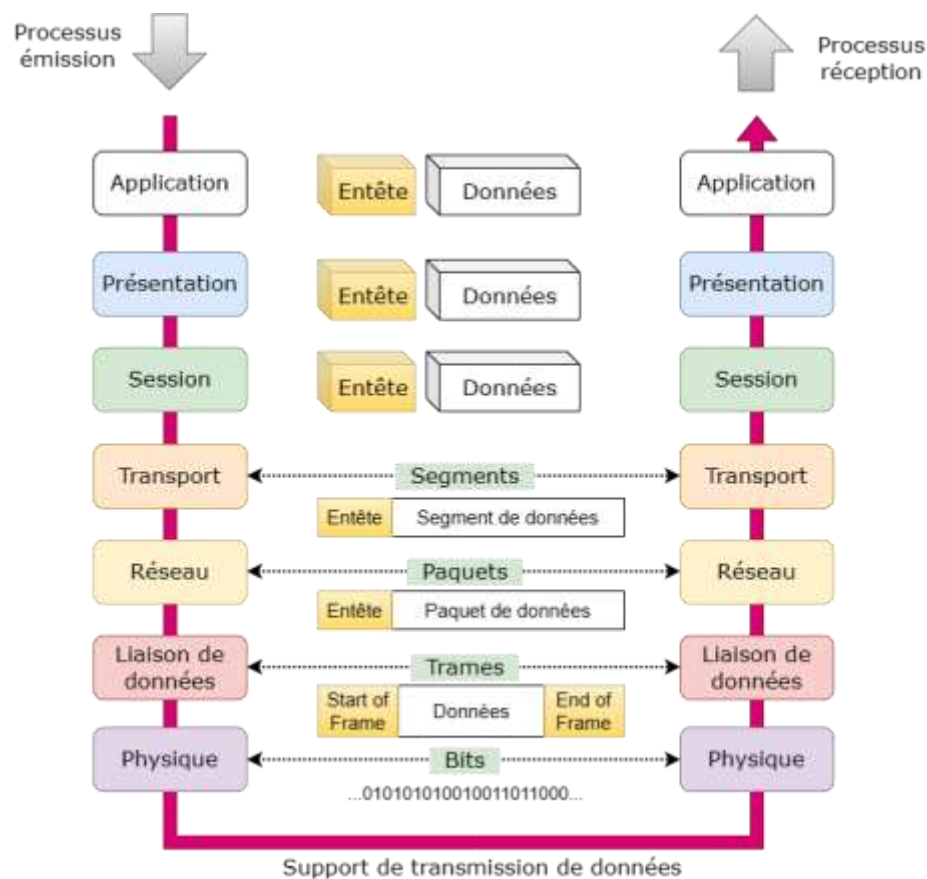


Figure 8 Couches du modèle OSI

Les équipements de la couche physique contiennent les éléments suivant :

- Supports de transmission (câble coaxial, paire torsadée, fibre optique) :

Les supports de transmission sont nombreux. Parmi ceux-ci, trois familles sont à distinguer : les supports métalliques, non- métalliques et immatériels. Les supports métalliques les plus anciens, comme les paires torsadées et les câbles coaxiaux, sont largement utilisés et servent à transmettre des courants électriques. Les supports modernes à base de verre ou de plastique, comme les fibres optiques, transmettent de la lumière, tandis que les supports immatériels des communications sans fil transmettent des ondes électromagnétiques et sont en plein évolution.

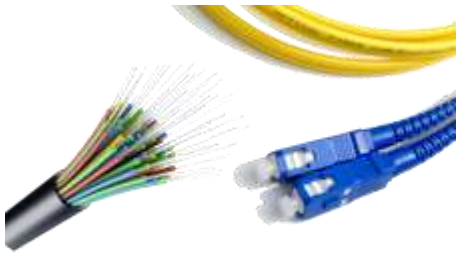
		
1. Câble coaxial	2. Paire torsadée	3. Fibre optique
		
4. Modem sans fil	5. Répéteur (point d'accès)	6. Concentrateur (HUB)

Figure 9 Equipements de la couche physique

- Les répéteurs, les amplificateurs, les modems, et les concentrateurs.

Les répéteurs font prolonger le support physique en amplifiant les signaux transmis. Ils propagent aussi les collisions. Ils sont utilisés pour relier deux segments de réseaux. Un répéteur n'a aucune fonction de conversion ou de transcodage. Il se contente de veiller à la répétition et à la régénération de signaux. Les répéteurs sont souvent utilisés pour s'affranchir des contraintes de distances préconisées dans les standards.

Le modem est un équipement spécifique placé à chaque extrémité du support de transmission. Cet équipement assure la génération de signaux en émission et leur récupération en réception. Pour émettre les données, le modem reçoit la suite de données binaires à transmettre et fournit un signal dont les caractéristiques sont adaptées au support de transmission. A l'inverse, en réception, le modem extrait la suite des données binaires du signal reçu. Le support de transmission est ainsi transparent à l'utilisateur. Le support de transmission et les deux modems placés à chacune de ses extrémités constituent un ensemble appelé circuit de données⁴, comme le montre la figure 3.4.

⁴ <https://www.guill.net/index.php?cat=2&nos=3>

À partir des années 1990, le câblage en étoile est utilisé, où toutes les stations sont connectées à un concentrateur qui retransmet tout signal reçu sur l'ensemble de ses ports. Le concentrateur agit uniquement au niveau du signal transmis, en récupérant les données binaires et en les recodant, sans interpréter les données reçues (Figure 3.6).

4.1.2 Couche 2 : couche liaison

La couche liaison assure la transmission d'informations entre (deux ou plusieurs) systèmes immédiatement adjacents. Détecte et corrige, dans la mesure du possible, les erreurs inhérentes de la couche inférieure (physique). Les unités de données échangées sont appelées trames ("frames"). Les fonctionnalités suivantes sont liées avec cette couche :

- Délimitation de trames
- Contrôle d'erreur
- Contrôle de flux
- Contrôle d'accès au medium

Pour faire communiquer des machines identifiées par leurs adresses, il faut définir un grand nombre de règles normalisées concernant la structuration du dialogue, le format des messages transmis, leur enchaînement logique, le codage de l'information, le rythme de transmission, etc. Un programme ou logiciel de communication qui se charge d'exécuter ces règles est installé sur les équipements communiquant à distance.

Le circuit de données transmet des éléments binaires. Cependant, le protocole de liaison de données travaille sur des blocs d'éléments binaires appelés trames qui font l'objet d'unité de données manipulées. Elle transporte en outre des données de l'utilisateur, des informations de commande, nécessaires au protocole pour garantir le bon déroulement du dialogue (trames de supervision).

Une trame compte différents champs composé de bloc d'éléments binaires dont la signification et l'interprétation sont précisées dans la définition du protocole. Le protocole doit également définir les règles du dialogue et spécifier la façon de corriger les erreurs détectées. En outre, on doit être capable de détecter les pannes des équipements ou les ruptures complètes de liaison pour avertir l'utilisateur de l'indisponibilité du service.

Parmi les équipements de la couche liaison on trouve les commutateurs (switch), les ponts (bridge)

Le commutateur (Switch) est un équipement multiport permettant de connecter plusieurs stations dans le même réseau local, il exploite ainsi sa table de correspondance entre l'adresses

physique (adresse MAC) de la station et son port de sortie reliant cette station afin d'adresser la trame reçue directement vers la station en question.

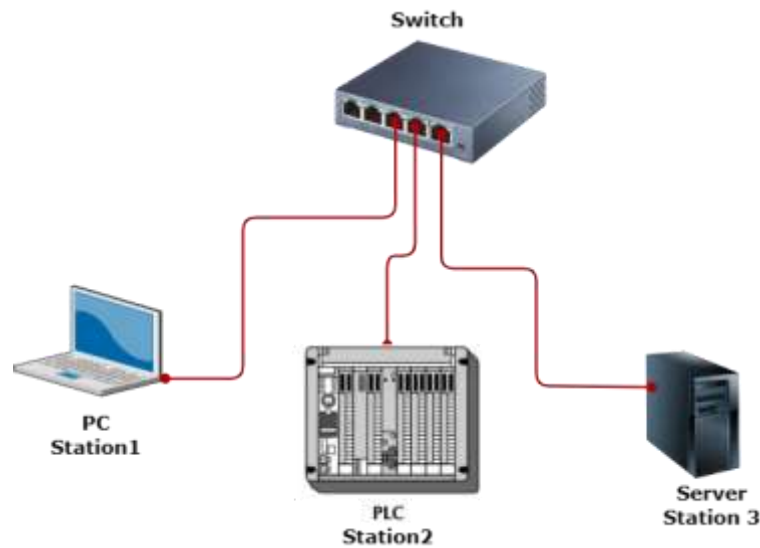


Figure 10. Switch

Le pont (Bridge) est similaire au Switch, à la différence que le Bridge ne comporte que deux prises (ports). Ainsi, il sert à relier deux réseaux de même adresse.

Le pont a pour double fonction de filtrer les messages et de relier deux segments de réseaux locaux qui sont différents aux niveaux 1 et 2 OSI, mais en général semblables aux niveaux supérieurs. Par exemple, il faut un pont entre un réseau 100BaseT et un 1000BaseF. Il concerne le niveau 2 OSI.

Aujourd'hui, la fonction de pont est assurée par le switch. De ce fait, un switch est un « multi-pont », qui fait l'objet d'un pont à connexions multiples. Donc, un switch à huit ports est un ensemble formé de huit ponts et d'un hub.

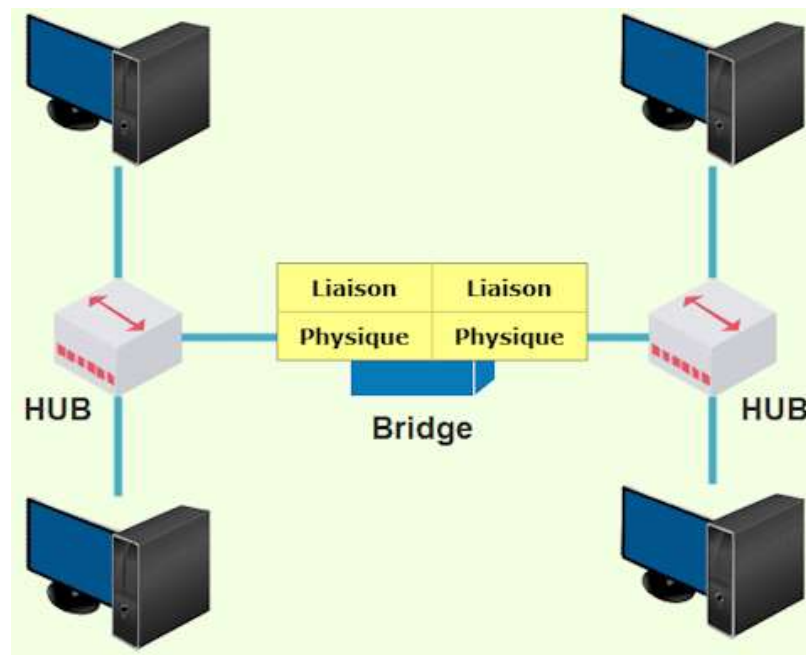


Figure 11. Pont réseau

- Sous couches MAC et LLC

La couche MAC (Media Access Control) est la sous-couche de la couche liaison de données qui gère l'accès au support physique. Elle assure la transmission des données entre les périphériques sur le même réseau. La couche LLC (Logical Link Control) est également une sous-couche de la couche liaison de données et gère le contrôle logique des données sur le réseau. Elle fournit des services de contrôle de flux, de correction d'erreurs et de contrôle d'accès au support. Conjointement, ces deux sous-couches jouent un rôle essentiel dans la gestion des communications sur un réseau informatique en assurant à la fois l'accès au support physique et le contrôle logique des données.

4.1.3 Couche3 : couche réseau

Cette couche est chargée, d'indiquer aux paquets les chemins ou routes et/ou directions à suivre pour aller de la source vers la destination, grâce à un système d'adressage, cette opération s'appelle acheminement ou routage.

4.1.4 Couche 4 : couche transport

La couche transport est indispensable pour assurer le transport des données de bout en bout à travers un réseau. Elle offre des services de multiplexage, permettant à plusieurs applications sur un même dispositif d'utiliser le réseau simultanément. De plus, la couche transport assure la segmentation des données en unités gérables pour la transmission. Elle prend en charge le contrôle

d'erreur, s'assurant que les données sont correctement reçues et, si nécessaire, renvoyées. Cette couche gère également le contrôle de flux pour réguler le flux de données entre les émetteurs et les récepteurs, évitant ainsi la congestion du réseau. En effet, la couche transport joue un rôle crucial dans la transmission fiable et efficace des données entre les applications sur des dispositifs différents.

4.1.5 Couche 6 : la couche session

La couche session, sixième couche du modèle OSI, est chargée de l'établissement, de la gestion et de la fin des sessions de communication entre les applications sur des dispositifs différents. Elle assure la coordination des échanges de données, la synchronisation et la reprise après une panne. La couche session permet également la sécurisation des sessions en gérant l'authentification et le contrôle d'accès. Elle offre des services de dialogues entre les applications, permettant l'organisation et la structuration des échanges. Donc, la couche session facilite la communication entre les applications en établissant des sessions fiables et sécurisées, tout en assurant la coordination et la gestion des échanges de données.

4.1.6 Couche 6 : la couche présentation

Un réseau est un environnement hétérogène (les stations peuvent représenter les données qu'ils utilisent de manière différente). La tâche principale de la couche présentation consiste à mettre les données sous un format standard de telle sorte que les éléments interlocuteurs se comprennent. En effet, cette couche garantit que les données peuvent être cryptées et décryptées, compressées et décompressées.

4.1.7 Couche 7 : couche application

La couche présentation, est chargée de la représentation des données pour l'interopérabilité entre les systèmes hétérogènes. Elle se charge de la traduction, de la compression et du chiffrement des données afin de les rendre compréhensibles par les applications destinataires. Cette couche assure la conversion des données dans un format standardisé pour faciliter l'échange entre les applications. De plus, elle gère la syntaxe et la sémantique des données, permettant ainsi une interprétation cohérente par les applications. La couche présentation joue un rôle crucial dans l'assurance de l'interopérabilité entre les systèmes en standardisant la représentation des données pour une communication efficace et sans erreur.

5. Techniques de transmission de données (D. DROMARD, 2009)

5.1 Caractéristiques des supports de transmission

Les caractéristiques des supports de transmission comprennent la capacité de transmission de données, la vitesse de transmission, la fiabilité, la distance de transmission, l'immunité aux interférences, la sécurité et le coût. Ces caractéristiques varient en fonction du type de support de transmission utilisé, tel que le câble coaxial, la fibre optique, le câble à paires torsadées ou les liaisons sans fil. Chaque support de transmission présente des avantages et des inconvénients en fonction de ces caractéristiques, ce qui influence le choix du support approprié pour une application spécifique.

5.2 Equipement de transmission : Circuit de Données

Un circuit de données est un équipement de transmission qui assure la communication de données entre différents points d'un réseau. Il peut être utilisé pour établir des connexions point à point ou multipoint, et il permet le transfert fiable de données sur des réseaux de communication. Les circuits de données peuvent être mis en place à l'aide de divers équipements tels que des modems, des routeurs, des commutateurs et d'autres dispositifs de réseau. Ces circuits de données sont essentiels pour assurer la connectivité et la transmission efficace des données dans les réseaux de communication.

5.3 Transmission en bande de base

La transmission en bande de base est une méthode de transmission de données dans laquelle le signal est directement transmis sur le support de transmission sans modulation. Cela signifie que le signal de données est transmis tel quel, sans être modulé sur une porteuse. La transmission en bande de base est couramment utilisée dans les réseaux locaux (LAN) pour transférer des données numériques à haute vitesse sur des supports tels que les câbles à paires torsadées. Cette méthode de transmission est simple et efficace pour les communications à courte distance, et elle est largement utilisée dans les réseaux informatiques pour la transmission de données numériques.

5.4 Transmission par modulation

La transmission par modulation est une méthode de transmission de données dans laquelle les signaux sont modifiés pour être transportés par un support de transmission. Cela implique de modifier une onde porteuse, généralement une onde sinusoïdale, en fonction des variations du signal de données. La modulation permet de transmettre des signaux sur des distances plus longues et à travers différents types de supports, tels que les câbles coaxiaux, les fibres optiques et les ondes radio. Cette technique est largement utilisée dans les communications sans fil, les réseaux

téléphoniques et les réseaux informatiques pour transférer efficacement des données sur de longues distances.

5.5 Modes de transmission de données

Les modes de transmission de données désignent les différentes méthodes par lesquelles l'information est transférée d'un point à un autre. Les principaux modes de transmission de données :

1. La transmission série est une méthode de transfert de données où les bits sont envoyés successivement sur un seul canal de communication. La transmission série est couramment utilisée dans les communications informatiques, les réseaux et les périphériques tels que les ports série sur les ordinateurs, ou des liaisons longue distance.
2. La transmission parallèle est une méthode de transfert de données où plusieurs bits sont envoyés simultanément sur des canaux distincts de manière plus rapide. Contrairement à la transmission série, qui envoie les bits successivement sur un seul canal, la transmission parallèle peut transférer des données plus rapidement, mais elle est plus sujette aux interférences et aux pertes de synchronisation sur de longues distances, plus des problèmes d'alignement des bits.
3. La transmission simplex est un mode de communication unidirectionnel où les données sont envoyées dans une seule direction, de l'émetteur au récepteur, sans possibilité de retour. Cela signifie qu'une fois que les données sont transmises, il n'y a pas de mécanisme pour renvoyer des informations ou obtenir une confirmation de réception. Ce mode est couramment utilisé dans des processus industriels automatisés où les données sont transmises en continu d'un point à un autre sans nécessiter de retour d'information ou d'intervention manuelle.
4. La transmission half-duplex : les données peuvent être envoyées dans les deux sens, mais pas simultanément. Cela signifie que les données peuvent être transmises automatiquement dans les deux directions, mais pas en même temps. Un dispositif doit attendre que l'autre ait terminé de transmettre. Ce mode est couramment utilisé dans des systèmes de communication sans fil ou des réseaux où les appareils peuvent envoyer et recevoir des données, mais pas simultanément.
5. La transmission full-duplex : la capacité des dispositifs automatisés à envoyer et recevoir des données simultanément et de manière autonome. Cela permet une communication bidirectionnelle en temps réel entre les différents composants des systèmes automatisés, ce

qui est essentiel pour assurer une coordination efficace et une réponse rapide aux changements dans l'environnement ou dans les conditions opérationnelles.

6. La transmission analogique : la communication de données sous forme de signaux continus et variables. Ce mode de transmission est utilisé dans des systèmes automatisés tels que les capteurs, les actionneurs et les systèmes de contrôle industriels pour transmettre des informations physiques telles que la température, la pression ou le mouvement sous forme de signaux analogiques.
7. Transmission numérique : Les signaux sont en bits et ne peuvent prendre que des valeurs spécifiques. Cela offre une meilleure résistance au bruit et permet une transmission plus fiable des données.
8. La transmission numérique : la communication de données sous forme de signaux discrétisés et codés en bits. Ce mode de transmission est largement utilisé dans les systèmes automatisés pour transmettre des informations sous forme de 0 et de 1, ce qui permet un traitement et une transmission efficaces des données par des dispositifs électroniques.

En résumé, ces modes de transmission de données, tels que la transmission simplex, half-duplex, full-duplex, analogique et numérique, sont utilisés dans une variété de domaines, notamment :

- Télécommunications
- Réseaux informatiques
- Systèmes embarqués
- Automatisation industrielle
- Communication sans fil
- Capteurs et actionneurs
- Contrôle de processus

Ces modes de transmission sont adaptés à différentes applications en fonction des besoins de communication unidirectionnelle ou bidirectionnelle, ainsi que des caractéristiques des données à transmettre.

5.6 Liaison synchrone, asynchrone

La liaison synchrone en automatique est une méthode de transmission de données dans laquelle les signaux sont envoyés en synchronisation avec une horloge commune. Cela permet une transmission régulière et synchronisée des données entre les dispositifs, ce qui est essentiel pour

les systèmes automatisés nécessitant une coordination précise. Les applications courantes de la liaison synchrone en automatique incluent les réseaux informatiques, les systèmes de contrôle industriels et les communications à haut débit.

En revanche, la liaison asynchrone en automatique est une méthode de transmission de données où les signaux sont envoyés sans horloge commune. Les données sont précédées par des bits de départ et suivies de bits d'arrêt pour la synchronisation. Cette méthode est souvent utilisée dans les systèmes embarqués et les capteurs, où une synchronisation précise n'est pas toujours nécessaire et où l'efficacité de la transmission des données est primordiale.

En résumé, la liaison synchrone est privilégiée pour les applications nécessitant une synchronisation stricte, tandis que la liaison asynchrone est adaptée aux applications où l'efficacité de la transmission des données prime sur la synchronisation stricte.

5.7 Codage de ligne : Conversion numérique-numérique

Le codage de ligne dans le contexte de la conversion numérique-numérique fait référence au processus de représentation des données numériques sous forme de signaux électriques ou optiques pour la transmission. Ce processus implique la conversion des bits de données en signaux physiques qui peuvent être transmis sur un canal de communication. Le codage de ligne est crucial pour assurer l'exactitude et l'intégrité des données transmises, ainsi que pour minimiser les erreurs de transmission.

Il existe différents schémas de codage de ligne, tels que le codage unipolaire, le codage bipolaire, le codage Manchester, le codage à déplacement de phase (DPSK), et d'autres encore. Chaque schéma de codage a ses propres caractéristiques en termes d'efficacité spectrale, de résistance au bruit et de complexité de mise en œuvre, ce qui les rend adaptés à différentes applications de transmission de données.

5.8 Débit binaire et rapidité de modulation

Le débit binaire représente la quantité de données numériques pouvant être transmises par unité de temps, généralement mesurée en bits par seconde (bps). Il indique la vitesse à laquelle les données peuvent être transmises sur un canal de communication. La rapidité de modulation, quant à elle, se réfère à la vitesse à laquelle un signal porteur est modulé pour transporter les données.

Lorsqu'il s'agit de transmission de données, le débit binaire et la rapidité de modulation sont des paramètres essentiels qui influent sur la capacité d'un système de communication à transmettre efficacement des informations. Un débit binaire plus élevé et une rapidité de modulation plus

rapide permettent une transmission plus rapide des données, mais peuvent également nécessiter des ressources supplémentaires et être sujets à des limitations techniques.

6. Conclusion

En conclusion, l'étude approfondie de l'architecture des réseaux nous a permis de comprendre la complexité et les enjeux de la conception et de l'implémentation des réseaux informatiques.

Nous avons tout d'abord abordé les généralités sur les réseaux, à savoir leur définition, leurs objectifs et leur principe de fonctionnement. Cela nous a permis d'avoir une vision globale du rôle et de l'utilité des réseaux dans les systèmes d'information. Ensuite, nous avons examiné les différentes classifications des réseaux, que ce soit par échelle (WAN, MAN, LAN), par topologie ou par mode de transmission. Cette diversité montre la richesse des solutions réseau disponibles pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs et des applications. L'étude des topologies des réseaux a mis en évidence la variété des architectures possibles, chacune présentant des avantages et des inconvénients en termes de performances, de fiabilité et de facilité de déploiement.

Enfin, l'analyse détaillée des protocoles de communication, en particulier le modèle OSI, a permis de comprendre les différentes couches qui composent un réseau et les rôles de chacune d'entre elles dans l'échange de données. La compréhension de ces concepts fondamentaux d'architecture réseau est essentielle afin de concevoir, déployer et maintenir des infrastructures réseau performantes, fiables et évolutives, répondant aux besoins actuels et futurs des utilisateurs.

Chapitre II

Bus de terrain et réseaux locaux industriels

Chapitre II : Bus de terrain et réseaux locaux industriels

1. Introduction

Les bus de terrain et les réseaux locaux industriels sont des éléments essentiels de l'infrastructure technologique dans les environnements industriels modernes. Ces systèmes de communication jouent un rôle crucial dans la connectivité des équipements, des capteurs et des actionneurs, permettant ainsi la mise en réseau et le contrôle efficace des processus industriels. En outre, ils facilitent la collecte de données en temps réel, la surveillance des performances et la mise en œuvre de stratégies d'automatisation avancées. Dans cette section, nous explorerons l'importance croissante des bus de terrain et des réseaux locaux industriels, leurs applications diverses et les avantages qu'ils offrent dans des environnements industriels variés.

2. Réseaux locaux industriels

Les bus de communication industrielle sont des réseaux de communication qui permettent à différents appareils, tels que des capteurs, des actionneurs, des automates programmables, des variateurs de vitesse ou des systèmes de supervision, de communiquer entre eux. Ces réseaux sont utilisés dans de nombreux domaines industriels, tels que l'automatisation, la robotique, la production, la logistique, l'énergie, la sécurité, la santé ou l'environnement.

2.1 Les avantages des bus de communication industrielle

Les avantages des bus de communication industrielle par rapport aux connexions point à point sont nombreux. Tout d'abord, ils permettent de réduire les coûts d'installation à savoir le câblage et les connectiques, car plusieurs appareils peuvent partager une même liaison. Ensuite, ils permettent de simplifier la conception du système, en facilitant la mise en place et la maintenance d'une architecture modulaire, évolutive et flexible. De plus, ils permettent de simplifier la programmation des automates (calculateurs), en utilisant des protocoles standardisés et des bibliothèques de fonctions. Enfin, ils permettent d'améliorer la qualité et disponibilité des données, en réduisant les erreurs de transmission et en assurant une bonne cohérence et un meilleur contrôle de données sur l'ensemble du système, par l'application de programmes appropriés.

Autres avantage :

- Interopérabilité importante grâce à la standardisation et l'ouverture du système aux niveaux hard et soft.

- Possibilité de connexion d'équipements de différents fournisseurs respectant le même standard.
- Echange de données par des mécanismes standard (protocoles).
- Modélisation orientée objet des équipements et de leur fonctionnalité : modèle de bloc fonctionnel aidant l'utilisateur à créer un modèle de supervision pour le bus de terrain.

2.2 Les domaines industriels d'application

Les bus de communication industrielle sont utilisés dans de nombreux domaines industriels, tels que :

- L'automatisation,
- La robotique,
- La production,
- La logistique,
- L'énergie,
- La sécurité,
- La santé ou l'environnement.

Les applications les plus courantes incluent le contrôle de processus, le contrôle de machines, la collecte de données, la surveillance de l'état des équipements, la gestion de l'énergie, la sécurité des personnes et des biens, la gestion de la qualité, la traçabilité et la conformité aux normes et aux réglementations.

2.3 Contraintes et défis

L'utilisation de bus de communication industrielle présente également des défis. En effet, leur mise en œuvre nécessite une planification soignée du réseau, une connaissance approfondie des protocoles et des technologies associées, ainsi qu'une gestion rigoureuse de la sécurité et de la maintenance du système. En outre, leur utilisation peut être limitée par des contraintes de temps réel, de bande passante, de distance de transmission, de sécurité, de coût ou de compatibilité avec les équipements existants.

3. Objectifs des bus de terrain

Les bus de terrain visent à fournir une plateforme de communication robuste et fiable pour les équipements industriels, permettant ainsi l'échange de données en temps réel entre les différents appareils. Leur objectif principal est de faciliter l'intégration transparente des systèmes automatisés, des capteurs et des actionneurs, tout en garantissant une communication efficace dans des environnements industriels exigeants. De plus, ces bus visent à améliorer l'efficacité opérationnelle, à réduire les coûts de câblage et de maintenance, et à permettre une surveillance et un contrôle centralisés des processus industriels. Donc, les bus de terrain sont conçus pour répondre aux besoins spécifiques de connectivité et de communication dans le contexte des applications industrielles avancées.

Les deux schémas suivants peuvent aider à comprendre le fonctionnement des bus de communication industrielle et leurs avantages par rapport aux connexions « point à point » :

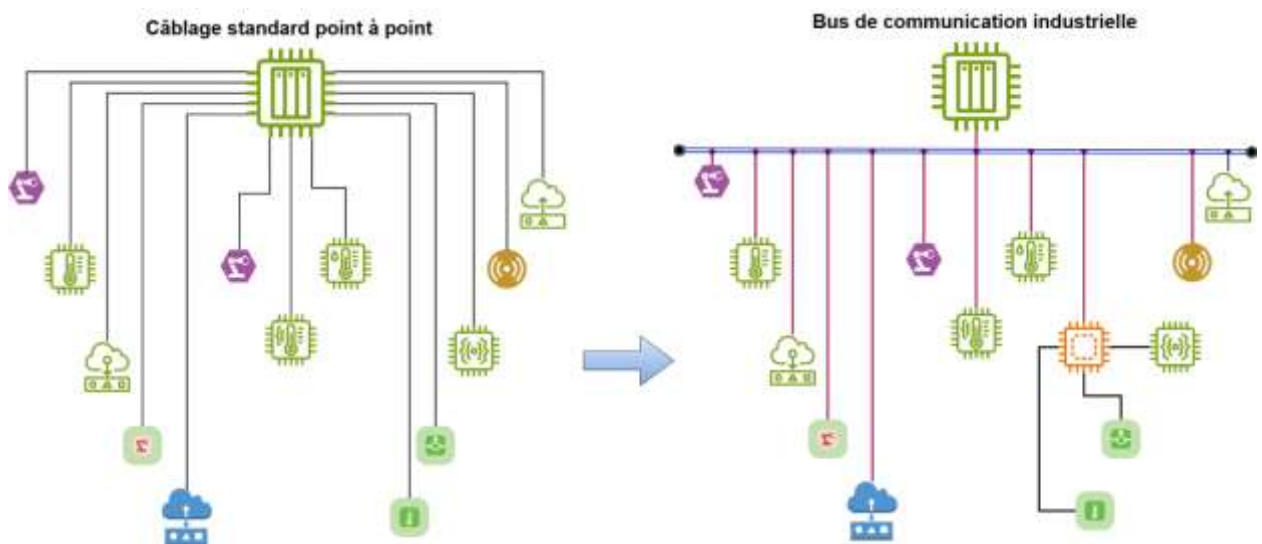


Figure 12 Connexions point à point vs. Bus de communication industrielle

Dans une architecture de connexion point à point, chaque appareil est connecté directement à un automate programmable, qui assure la communication avec les autres appareils. Cette méthode de connexion peut rapidement devenir complexe et coûteuse, en particulier lorsque le nombre d'appareils augmente.

Dans une architecture de bus de communication industrielle, les appareils sont connectés à un même réseau de communication, qui permet à chaque appareil de communiquer avec les autres. Cette méthode de connexion est plus simple, car elle réduit le nombre de câbles et de connecteurs nécessaires. De plus, elle permet de faciliter la maintenance du système, en simplifiant la recherche et le remplacement des appareils défectueux.

Schéma 2 : Avantages des bus de communication industrielle

Les bus de communication industrielle présentent de nombreux avantages par rapport aux connexions point à point, tels que :

- La réduction des coûts de câblage et de connectique
- La simplification de la conception du système
- La simplification de la programmation des automates
- L'amélioration de la qualité des données
- La facilitation de la maintenance du système

Dans ce schéma, on peut voir que l'utilisation d'un bus de communication industrielle permet de réduire considérablement le nombre de câbles et de connecteurs nécessaires, tout en permettant à chaque appareil de communiquer avec les autres. De plus, la mise en place d'une architecture modulaire et évolutive permet de simplifier la conception du système, tout en permettant une évolution facile du système en fonction des besoins de l'entreprise. Enfin, l'utilisation de protocoles standardisés permet de faciliter la programmation des automates, tout en assurant une cohérence des données sur l'ensemble du système.

4. Classification des bus de terrain

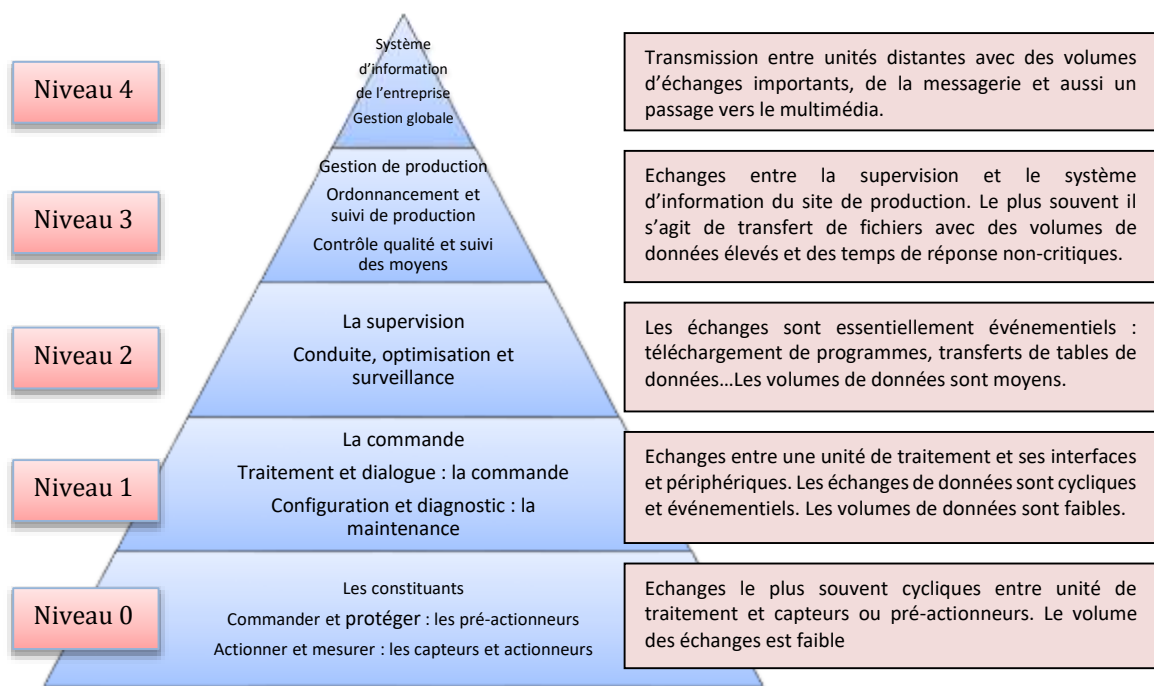
La classification des bus de terrain peut se faire selon des critères techniques inhérents de la complexité de l'équipement à relier et des informations à transmettre, à savoir :

- Vitesse de transmission des données : Les bus de terrain peuvent être classés en haut débit, moyen débit et bas débit en fonction de leur capacité à transmettre des données à des vitesses élevées, moyennes ou basses.
- Type de câblage : La classification peut se baser sur le type de câblage utilisé, tel que le câblage coaxial, la fibre optique ou la paire torsadée, ce qui influence la robustesse et la fiabilité du réseau.

- Topologie du réseau : Les bus de terrain peuvent adopter différentes topologies de réseau, telles que linéaire, en étoile, en anneau ou en arborescence, chaque configuration ayant ses propres avantages et inconvénients en termes de fiabilité et de facilité de maintenance.
- Protocole de communication : la classification peut se faire en fonction des protocoles de communication utilisés, tels que PROFIBUS, DeviceNet, Modbus, CANopen, EtherCAT, etc., chacun offrant des fonctionnalités spécifiques adaptées à différents types d'applications industrielles.

D'autre part, Certaine classification est basée sur la nature de décision à prendre dans le cadre de communication entre équipements de l'automatisme industriel, qui sont souvent gérés par des systèmes informatique (industrielle) suivant une structure hiérarchique : pyramide CIM (*Computer Integrated Manufacturing* : production intégrée par ordinateur). Ce concept décrit l'évolution vers l'automatisation complète des procédés de fabrication.

L'informatique industrielle permet la connectivité, l'interopérabilité et la collecte de données dans l'ensemble de la pyramide CIM. Cela facilite la prise de décision basée sur des données en temps réel, l'optimisation des opérations, et la mise en œuvre de solutions intelligentes dans le domaine de la fabrication industrielle. La combinaison de la pyramide CIM et de l'informatique industrielle contribue à la création d'environnements de production plus efficaces et flexibles.



5. Conclusion

Ce chapitre nous a présenté en détail les réseaux locaux industriels et les bus de terrain, qui sont des éléments cruciaux des systèmes de contrôle et d'automatisation modernes. Nous avons vu que les bus de terrain ont pour objectifs principaux d'assurer une communication fiable et en temps réel entre les différents éléments d'un système industriel, tout en offrant des fonctionnalités avancées telles que la configuration à distance, le diagnostic et la maintenance.

Nous avons également examiné les différentes classifications des bus de terrain, en fonction de leurs caractéristiques techniques, de leur domaine d'application et de leur niveau de complexité. Cette diversité illustre la richesse des solutions disponibles pour répondre aux besoins spécifiques des applications industrielles.

En maîtrisant les concepts clés des réseaux locaux industriels et des bus de terrain, les lecteurs sont désormais mieux équipés pour comprendre les enjeux liés à l'automatisation et à l'intégration des systèmes de production. Ces connaissances constituent une base solide pour aborder les prochains chapitres qui traiteront plus en détail des technologies et des protocoles utilisés dans les environnements industriels.

Chapitre 3

Bus CAN

Controller Area Network

Chapitre 3 : Bus CAN (Controller Area Network)

1. Introduction

Le bus CAN (Controller Area Network) est un protocole de communication série largement utilisé dans plusieurs domaines et plus particulièrement dans l'industrie automobile. Cette dernière est marquée par une forte demande en termes de sécurité, de confort, de diminution de la pollution et de la consommation, l'industrie automobile a développé de multiples systèmes électroniques (ordinateur de bord, anti-patinage, anti-dérapiage, fermeture centralisée, etc). La nécessité d'échange des données entre ces systèmes complexes a entraîné une augmentation du câblage et de connexions, ce qui posait des problèmes sérieux en termes de fiabilité et de maintenance.

Le bus CAN a apporté une solution dans les années 1980. Le bus CAN permet le partage d'informations entre les différents modules électroniques d'un système, tels que les capteurs, les actionneurs et les calculateurs, sans nécessiter une architecture hiérarchique traditionnelle.

Le bus CAN offre une communication fiable et robuste, avec la capacité de supporter différents types de données à des vitesses variables, ce qui en fait un choix apprécié pour les systèmes embarqués et les applications industrielles. Il utilise un système de messagerie à diffusion pour transmettre les données, offrant une grande immunité au bruit électromagnétique et une tolérance aux défaillances. Le bus CAN est capable de supporter des topologies en étoile, en arbre ou en ligne, ce qui le rend adaptable aux applications industrielles et automobiles (KADIONIK, 2001).

2. Classification des bus CAN (M. Di Natale, 2012)

La classification des bus CAN se fait principalement suivant leur vitesse de transmission. On distingue le CAN standard (jusqu'à 1 Mbit/s) et le CAN FD (Flexible Data-rate) qui permet des vitesses plus élevées. Il existe également d'autres variantes comme le CAN haute vitesse et le CAN basse vitesse, adaptés à des applications spécifiques.

La classification des bus CAN comprend plusieurs types suivant la vitesse de transmission et des applications typiques :

- CAN standard : Vitesse de transmission jusqu'à 1 Mbit/s, adapté aux applications automobiles et industrielles.
- CAN FD (Flexible Data-rate) : Permet des vitesses de transmission plus élevées, offrant une flexibilité accrue pour les données.

- CAN haute vitesse (CAN High Speed) : Utilisé dans les applications nécessitant des vitesses de transmission supérieures, telles que les systèmes de contrôle moteur avancés.
- CAN basse vitesse (CAN Low Speed) : Adapté aux applications nécessitant une communication à des vitesses plus faibles, telles que les systèmes de confort dans les véhicules.

Il existe sous deux versions du bus CAN :

- CAN2.0A : trame standard identificateur de 11 bits (CAN standard) ;
- CAN2.0B : trame plus longue avec identificateur sur 29 bits (CAN étendu).

D'autre part, il existe plusieurs protocoles de communication CAN, tels que CAN 2.0A, CAN 2.0B, J1939 (utilisé dans les véhicules lourds), CANopen (utilisé dans les systèmes embarqués) et d'autres. Chaque protocole définit les règles spécifiques pour la transmission des données, la gestion des erreurs, la priorité des messages et d'autres aspects de la communication.

2.1 CAN 2.0A Standard

Egalement connu sous le nom de "standard CAN 11-bit identifier", est l'un des protocoles de communication les plus couramment utilisés dans les réseaux de contrôle embarqués. Ce protocole définit les règles pour la transmission de messages sur un réseau CAN.

Le format des trames dans le protocole CAN 2.0A comprend un champ d'identifiant de 11 bits, ce qui signifie qu'il peut y avoir jusqu'à 2048 identifiants uniques pour les messages. Cela permet une priorisation des messages, où les messages avec des identifiants plus bas ont une priorité plus élevée que ceux avec des identifiants plus élevés.

Les trames CAN 2.0A peuvent contenir jusqu'à 8 octets de données et sont envoyées à l'aide d'une méthode de communication asynchrone sans maître, ce qui signifie que tous les nœuds du réseau ont un accès égal au bus CAN pour envoyer des messages.

Ce protocole offre une communication fiable, une gestion efficace des erreurs et une capacité à fonctionner dans des environnements électro-magnétiquement bruyants, ce qui en fait un choix populaire pour les applications automobiles, industrielles et d'autres applications embarquées.

2.2 CAN 2.0B Etendu

Le protocole CAN 2.0B, également appelé "standard CAN 29-bit identifier", est une extension du protocole CAN 2.0A qui offre des fonctionnalités supplémentaires pour les réseaux de communication embarqués.

La principale différence réside dans le format des trames, qui inclut un champ d'identifiant de 29 bits, permettant ainsi jusqu'à 536 millions d'identifiants uniques pour les messages. Cette capacité accrue de l'identifiant permet une plus grande flexibilité dans la priorisation des messages et la gestion de réseaux plus complexes.

De plus, le protocole CAN 2.0B prend en charge des trames de données plus longues, pouvant contenir jusqu'à 64 octets de données, offrant ainsi une capacité de transmission plus élevée pour les applications nécessitant des volumes importants de données.

CAN 2.0B conserve les avantages de la communication fiable, de la résistance aux interférences électromagnétiques et de la gestion robuste des erreurs, ce qui en fait un choix courant pour les applications nécessitant une communication temps réel dans des environnements exigeants tels que l'automobile, l'industrie et l'aérospatiale.

3. Protocoles de communication CAN (architecture de liaison de données)

3.1 Couche physique

Le support de transmission CAN est constitué d'une paire torsadée blindée ou non. La paire torsadée véhicule un signal différentiel sur deux lignes appelées **CAN_HIGH** et **CAN_LOW**. La masse qui sert de potentiel de référence est transmise par le blindage, qui protège le signal dans le cas de la transmission sur de longues distances ou dans des environnements bruyants. Le câble recommandé doit présenter une impédance caractéristique de $120\ \Omega$. Des résistances de terminaison sont placées à chaque extrémité de la ligne du bus (Cook, 2019).

Le réseau CAN est organisé selon une topologie bus : tous les nœuds (appareils) sont connectés sur les deux lignes de transmission du bus CAN selon une structure linéaire.

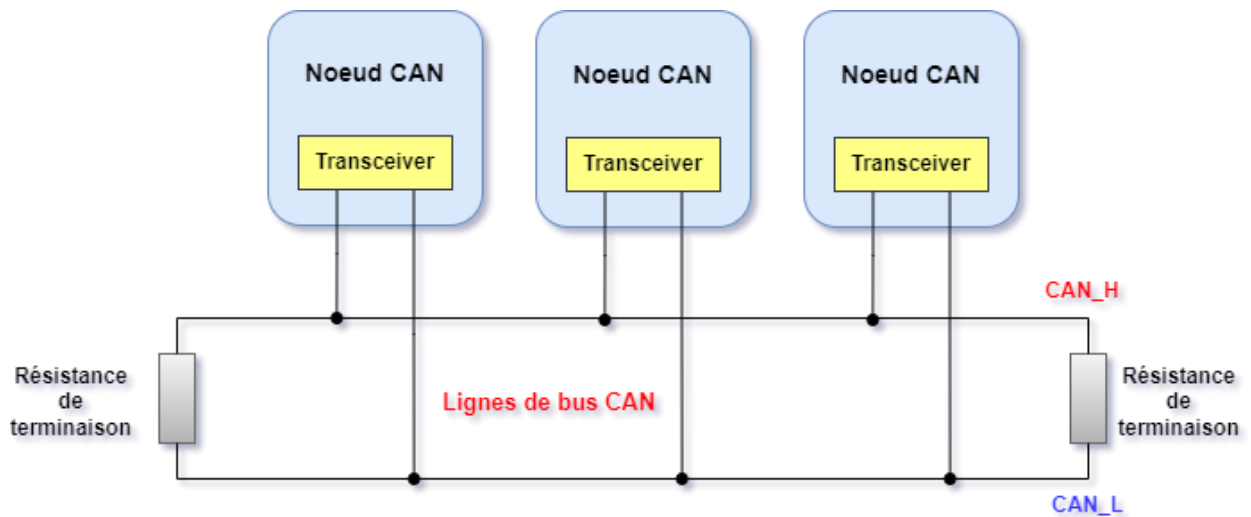


Figure 13. Topologie en bus du réseau CAN

Le protocole CAN (Controller Area Network) utilise le codage NRZ (Non Return to Zero) en raison de sa simplicité. D'après le codage NRZ, les signaux binaires à transmettre sont directement cartographiés : un (1) logique correspond à un niveau élevé, un (0) logique correspond à un niveau bas. Une caractéristique du codage NRZ est que les bits consécutifs de la même polarité n'entraînent aucun changement de niveau. Donc, la valeur du signal reste la même pendant toute la durée d'un bit (Simic, 2019).

D'après la spécification ISO 11898 (High speed), les nœuds identifient un bit comme récessif lorsque la différence de tension entre les lignes CAN_H et CAN_L est inférieure ou égale à 0,5 V. En revanche, un bit est considéré comme dominant si la différence est supérieure ou égale à 0,9V. D'autre part, la tension nominale pour un bit dominant (0) est de 3,5 V pour la ligne CAN_H et de 1,5 V pour la ligne CAN_L, comme illustré sur la figure2(a).

Quant à la norme ISO 11519 (Low speed), les nœuds reconnaissent un bit comme récessif lorsque la différence de tension entre CAN_L et CAN_H est d'environ 1,5 V, tandis qu'ils identifient un bit comme dominant lorsque cette différence est d'environ -3 V, figure 2(b).

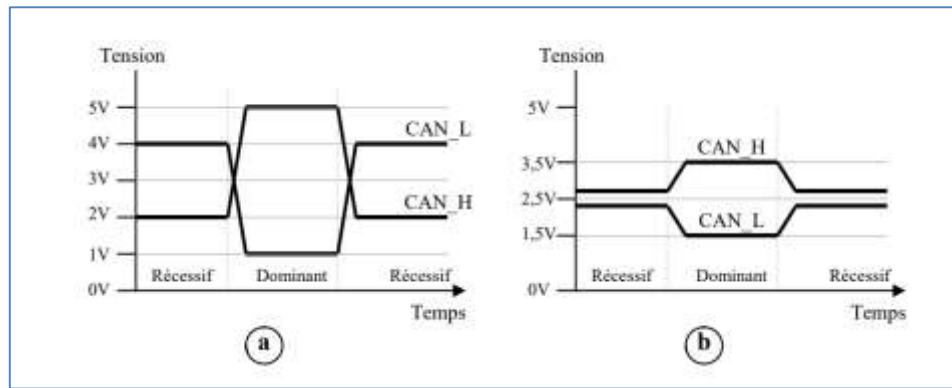


Figure 14. Niveaux physiques des bits dominant/récessif, (a) : Low speed, (b) : High speed

- **Notion de bit dominant et bit récessif**

Il existe différentes manières d'implémenter le protocole CAN respectant le concept des bits dominants et récessifs. Chaque nœud doit être capable de transmettre sur le bus un bit dit "dominant" (correspondant à '0' logique) et un bit dit "récessif" (correspondant à '1' logique). De plus, ces implantations doivent obéir à la règle suivante :

En cas de niveaux logiques différents émanant de deux nœuds, le bit dominant l'emporte. Ainsi, le bus CAN fonctionne comme une **porte logique ET (AND)**.

3.2 Protocole de niveau Liaison (sous couche MAC)

3.2.1 Identificateurs

Dans le bus CAN, les trames de données émises par un nœud, contenant des messages destinés à la couche Application, ne comprennent ni l'adresse du nœud destinataire ni celle du nœud source. Mais, elles encapsulent des identificateurs d'objets, avec un identificateur attribué à chaque trame. Prenons l'exemple suivant, l'identificateur 220 peut désigner le niveau du carburant de l'automobile, tandis que l'identificateur 221 peut représenter le régime moteur. Chaque identificateur est unique et spécifie de manière précise l'information (ou l'objet) transporté par une trame. Les identificateurs des messages sont affectés par le concepteur de l'application aux différents objets de l'application en fonction de leur importance par ordre de priorité.

En général, les objets associés aux grandeurs provenant des capteurs ou destinés aux actionneurs possèdent des identificateurs de faible valeur afin de favoriser leur échange en priorité en cas de conflit d'accès au bus. En d'autres termes, l'identificateur encapsulé dans une trame définit la priorité de cette trame dans le cas de conflit d'accès. La trame la plus prioritaire est celle qui contient un identificateur avec une faible valeur, elle contient plus de (0) que de (1).

Chaque nœud connecté au réseau est responsable de la production des valeurs d'un ou de plusieurs objets identifiés, ou de la consommation des valeurs d'un ou de plusieurs objets identifiés.

Il est possible qu'un nœud agisse à la fois en tant que producteur et consommateur de valeurs d'objets identifiés.

En utilisant l'identificateur contenu dans une trame, les nœuds connectés au réseau écoutent en permanence le bus, et sont capables d'identifier les objets qui les concernent (produits ou consommés) et traiter les trames. Chaque nœud effectue une copie de la trame actuelle s'il consomme l'objet diffusé, ou transmet sa valeur s'il est le producteur de l'objet diffusé. Le filtrage des messages reçus s'effectue au niveau de la sous-couche Contrôle de liaison logique. Les identificateurs sont codés sur 11 bits dans la version standard (CAN 2.0.A) et sur 29 bits dans la version étendue (CAN 2.0.B).

3.2.2 La méthode d'arbitrage

Dans un système dynamique, quelques paramètres changent plus rapidement relativement aux autres. De ce fait, les paramètres qui présentent des changements plus rapides soient transmis le plus souvent et donc doivent être plus prioritaires. Dans les applications temps réel, où la vitesse de transmission soit importante, il est nécessaire d'utiliser un mécanisme d'allocation du bus plus efficace, capable de palier le problème de la transmission simultanée de deux ou plusieurs nœuds. Pour cette raison, le bus CAN intègre une méthode simple et efficace appelée CSMA/CR ("Carrier Sense, Multiple Access with Collision Resolution"), dont le but est de gérer l'accès au bus. Cette méthode est basée sur le principe de l'arbitrage non destructif (dit "Non-Destructive Bitwise Arbitration"), qui évite de détruire les trames en cas de conflit d'accès au medium.

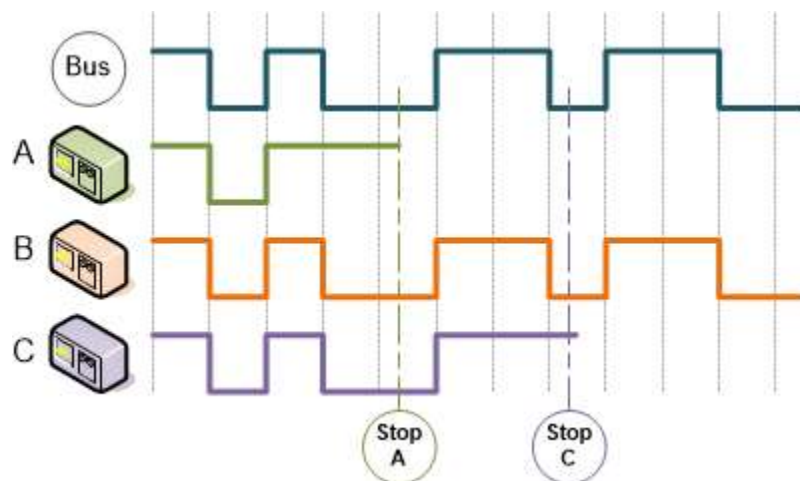


Figure 15. Arbitrage par la technique CSMA-CR

D'après les caractéristiques électriques définies par la norme CAN, s'il y a un accès simultané au bus (transmission par deux ou plusieurs nœuds en même temps), la valeur 0 écrase la valeur 1. Pendant l'arbitrage, lorsqu'un nœud émetteur détecte un bit à 0 sur le bus, alors qu'il émet un bit à 1, il abandonne sa tentative d'accès au bus.

De même, les nœuds en compétition abandonnent leur transmission en faveur du nœud le plus prioritaire (nœud qui transmet la trame ayant l'identificateur le plus petit), laissant ainsi la place pour la trame de plus haute priorité pour continuer sa transmission.

Lorsqu'un nœud perd l'arbitrage, il se transforme automatiquement en récepteur de la trame en cours de transmission. Les nœuds non prioritaires réessaient leur transmission ultérieurement une fois que le nœud actuellement prioritaire a terminé sa transmission, après un intervalle de silence sur le bus équivalent à au moins 3 fois la durée de transmission d'un bit.

Étant donné que l'arbitrage d'accès se base sur les identificateurs contenus dans les trames, le choix de ces identificateurs est crucial pour le bon fonctionnement d'une application.

3.2.3 Types d'échanges d'objets identifiés

En fonction des besoins de l'application, les objets identifiés peuvent être échangés entre les nœuds de périodique, sporadique (irrégulière) ou sur demande d'un utilisateur. Il est important de noter que la transmission d'un paquet de données prend du temps (qui est principalement déterminé par le débit du réseau) et que les nœuds doivent parfois attendre avant que leurs tentatives de transmission ne réussissent. Afin d'assurer le bon fonctionnement de l'application sans enfreindre les contraintes temporelles, une analyse minutieuse doit être effectuée pour garantir que les délais d'attente avant la transmission n'affectent pas la validité des données échangées.

Par exemple, le délai d'attente pour la transmission d'un paquet contenant la valeur d'une température qui doit être échangée toutes les **P** millisecondes doit être inférieure à **P** millisecondes. La phase durant laquelle le développeur d'une application temps réel doit vérifier préalablement le bon fonctionnement de son application est appelée la phase d'analyse de l'ordonnançabilité. Cette étape revêt une importance cruciale pour les applications critiques (systèmes embarqués dans les véhicules automobiles).

4. Représentation des trames CAN

4.1 Introduction

4.1.1 Protocoles 2.0A et 2.0B

Le protocole CAN 2.0 supporte deux variantes qui se distinguent uniquement par la longueur de l'identifiant (figures 4,5). La première version 2.0A utilise des identifiants de 11 bits (ce qui correspond à des trames de format standard), tandis que la deuxième version 2.0B utilise des identifiants de 29 bits (correspondant à des trames de format étendu).

Pour simplifier le développement de contrôleurs plus simples, il n'est pas obligatoire de prendre en charge intégralement le format étendu pour être conforme à la norme 2.0. Les contrôleurs sont considérés conformes à la norme 2.0 s'ils satisfont aux deux conditions suivantes :

- Le support complet du format standard est requis.
- Ils doivent être capables de recevoir des trames de format étendu, même s'ils ne sont pas nécessairement capables de les traiter ; ces trames ne doivent simplement pas être rejetées.

4.1.2 Types de trames ou messages

Il y a quatre catégories de messages qui peuvent être envoyés sur un bus CAN :

- Messages de données : ils servent à transporter des informations (messages) de l'application (ou des valeurs d'objets) sur le bus. C'est l'émetteur d'un identifiant qui envoie des messages de données associés à cet identifiant.

- Messages de requête distante : ils sont utilisés par un nœud (un consommateur) pour demander la transmission de messages de données par d'autres nœuds (les émetteurs) portant le même identifiant. Le bit RTR (Remote Transmission Request) permet de distinguer les messages de données des messages de requête. Le bit RTR est défini à 0 pour un message de données et à 1 pour un message de requête. Il est important de noter que les messages de données ont la priorité sur les messages de requête : en cas de conflit entre un émetteur et un consommateur concernant le même objet, c'est le message émis par l'émetteur qui prévaut, car ce message répond à la demande du consommateur.

- Messages d'erreur : ils sont envoyés par un nœud ayant détecté une erreur. Leur format et leur utilisation seront détaillés ultérieurement ([§ 4.5](#)).

- Messages de surcharge : ils sont utilisés pour demander un délai entre deux messages de données ou de requête successifs ([§ 4.6](#)).

Un intervalle appelé inter-trame sépare les trames de données ou de requête sont distingués des trames précédentes, cet intervalle dure au moins 03 bits. En revanche, il n'y a pas d'inter-trame entre les messages d'erreur ou de surcharge et les autres messages.

4.2 Le format de la trame DATA FRAME (trame de données)

Comme illustré dans la figure 6, les trames CAN se composent des éléments suivants (certains bits s'appliquent uniquement à la version 2.0B) :

- Bit SOF (Start of frame) : il marque le début d'une trame de données ou de requête, il est toujours un bit dominant (0). Un nœud ne peut commencer une transmission que si le bus est libre.

Ensuite, tous les autres nœuds se synchronisent sur le bit SOF émis par le nœud initiateur de la transmission.

- Champ d'arbitrage : ce champ varie en fonction du format de la trame (standard ou étendu):
 - Pour le format standard : il se compose d'un identificateur sur 11 bits et d'un bit RTR.
 - Pour le format étendu : il inclut un identificateur sur 29 bits, un bit SRR, un bit IDE et un bit RTR. L'identificateur est divisé en deux parties de 11 bits et 18 bits. Le bit IDE ("Identifier Extension") est un bit récessif, le bit SRR ("Substitute Remote Request") est également récessif. Le bit RTR est dominant pour les trames de données et récessif pour les trames de requête, dans les deux formats de trame.
- Champ de contrôle : ce champ est composé de 06 bits. Le premier bit est appelé IDE et dépend du format de la trame, ce bit est dominant dans le format standard, alors qu'il est noté r1 (réservé) dans le format étendu. Le deuxième bit (r0) est réservé pour des extensions futures. Les quatre bits suivants indiquent la longueur des données (DLC : Data Length Code). La valeur du champ DLC varie entre 0 et 8, soit 9 valeurs possibles. La valeur minimale binaire 0000 correspond à une longueur nulle, ainsi la valeur maximale 1000 correspond à la taille (8 octets).
- Champ de données : ce champ transporte les données de la couche application qui contiennent la valeur de l'objet identifié par le champ d'arbitrage. Il peut contenir de 0 à 8 octets (0 à 64 bits).
- Champ de CRC (Cyclic Redundancy Check) : ce champ se compose d'une séquence CRC sur 15 bits suivie d'un délimiteur de CRC (1 bit récessif). La séquence CRC permet de détecter les erreurs de transmission. Les bits utilisés pour le calcul du CRC proviennent des champs SOF, arbitrage, contrôle et données. Le calcul des bits CRC est effectué en utilisant le polynôme générateur spécifié : $X^{15} + X^{14} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^4 + X^3 + 1$.
- Champ ACK (acquiescement) : ce champ se compose de deux bits : un bit ACK et un bit de délimitation d'acquiescement (qui est toujours un bit récessif). Lors de l'émission d'une trame, le bit ACK est positionné à 1 (bit récessif). Ensuite, ce bit est remplacé (par un bit dominant) par tout récepteur ayant correctement reçu la trame. Ce mécanisme évite l'utilisation de trames distinctes pour les acquiescements. Il est important de noter que dans ce contexte, l'acquiescement positif (ACK = 0) indique qu'au moins l'un des récepteurs a reçu la trame correctement. La présence du bit d'acquiescement ne signifie pas que le récepteur a accepté ou rejeté les données contenues dans la trame. En revanche, l'absence d'acquiescement (bit ACK = 1) indique que les nœuds récepteurs ont détecté une erreur et qu'il est probable que cette erreur provienne du nœud émetteur. La période durant laquelle le bit ACK peut être modifié par les récepteurs est appelée fenêtre d'acquiescement.

- Champ de fin de trame (EOF : End Of Frame) : toutes les trames de données ou de requête se terminent par une séquence de 7 bits récessifs. Après l'émission des 7 bits de fin de trame, le bus doit rester libre pendant au moins une durée équivalente au temps nécessaire pour transmettre trois bits (inter-trame).

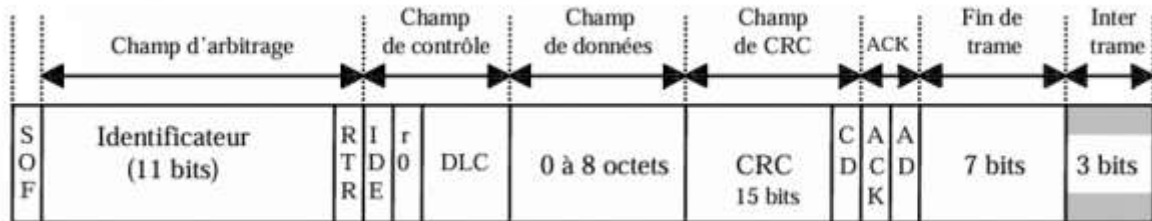


Figure 16. Format de trame standard (CAN 2.0A)

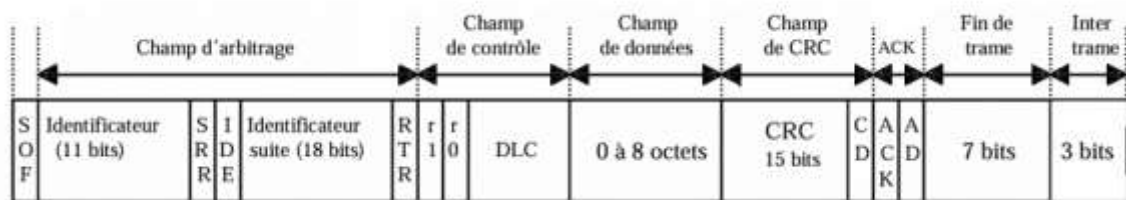


Figure 17. Format de trame étendu (CAN 2.0B)

Les deux figures précédentes utilisent les acronymes suivants, avec leurs significations respectives :

SOF	Start of Frame	CRC	Cyclic Redundancy Check
ACK	ACKnowledgement	CD	CRC Delimiter
AD	ACK Delimiter	IDE	Identifier Extension
RTR	Remote Transmission Request	SRR	Substitute Remote Request
DLC	Data Length Code	EOF	End Of Frame

4.3 Le format de la trame REMOTE FRAME (trame de requête)

Une station qui a besoin de données spécifiques peut démarrer le processus de transmission en émettant une trame de requête (remote frame). La configuration d'une trame de requête est similaire à celle des données, à l'exception du champ de données qui est facultatif dans ce type de trame (pro, 2017).

La trame de requête diffère de la trame de données par le bit RTR (Remote Transmission Request). Ce bit est à 0 pour une trame de données et à 1 pour une trame de requête. La trame REMOTE FRAME est utilisée lorsqu'un nœud a besoin de données qui ne sont pas disponibles

localement. Il envoie une trame de requête au nœud qui possède les données, qui répond ensuite en envoyant une trame de données (Fabrice CAIGNET).

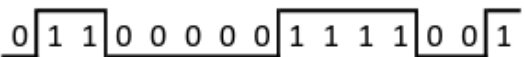
4.4 Bit-Stuffing

Pour améliorer la détection des erreurs de transmission, le protocole CAN utilise une technique appelée "bit stuffing" (ou bourrage de bits) qui fonctionne de la manière suivante : lorsque l'émetteur repère cinq bits identiques consécutifs, il insère automatiquement un bit de valeur opposée qui sera supprimé lors de la réception. Les bits ajoutés sont également pris en compte pour détecter les séquences de cinq bits consécutifs et identiques (voir l'exemple). De plus, cette opération de bourrage introduit dans le spectre du signal initial NRZ (Non-Return-to-Zero) une composante alternative fondamentale minimale qui n'était pas présente auparavant.

Cette méthode permet également d'assurer des liaisons galvaniquement isolées par transformateur. Le bourrage de bits crée artificiellement plus de transitions dans le signal, même avec l'utilisation du codage NRZ, ce qui facilite la synchronisation lors de la réception.

Le processus de "bit stuffing" s'applique uniquement aux champs de début de trame (SOF), d'arbitrage, de contrôle, de données et de CRC ; les autres champs ont une structure fixe et ne sont pas soumis au 'bit stuffing'.

Exemple d'application du 'bit stuffing' :

Suite de bits à l'émission (sans "stuffing")	Suite de bits transmis (avec "stuffing")
0 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1	0 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 1
	

Remarque :

Le processus de "bit stuffing" améliore la capacité de détection des erreurs, mais il diminue le débit utile du réseau. En effet, pour une trame contenant n octets de données, le "bit stuffing" peut entraîner la transmission de $(47 + 8n) + \text{INT}((34 + 8n)/4)$ bits au lieu de $(47 + 8n)$ bits. Dans le scénario le plus défavorable, le "bit stuffing" ajoute $\text{INT}((34 + 8n)/4)$ bits supplémentaires. $\text{INT} (a/b)$ désigne la partie entière de (a/b) .

4.5 Détection et contrôle des erreurs

Le réseau CAN a été conçu pour fonctionner dans des environnements difficiles et hostiles tels que l'industrie automobile et les procédés industriels, ce qui explique la présence de nombreux mécanismes de détection d'erreurs de transmission dues aux divers bruits présents dans ces

environnements. CAN intègre cinq méthodes de détection des erreurs : deux au niveau du bit (contrôle de bit, contrôle du "bit stuffing") et trois au niveau de la trame (vérification du CRC, de la structure des trames et de l'acquittement). La norme CAN fait une distinction entre les erreurs temporaires et permanentes sur le bus.

4.5.1 Types d'erreurs

Les erreurs détectables sur le bus CAN peuvent être classées en cinq catégories :

Erreur de bit	un nœud détecte une erreur de bit si le bit reçu est différent de celui qu'il a envoyé, à l'exception des cas spécifiques tels que la perte d'arbitrage ou pendant la fenêtre d'acquittement.
Erreur de stuffing	une erreur de stuffing est identifiée lorsqu'un nœud reçoit six bits consécutifs identiques.
Erreur de CRC	une erreur de CRC est détectée lorsqu'un récepteur calcule un CRC différent de celui contenu dans la trame reçue
Erreur d'acquittement	un nœud émetteur repère une erreur d'acquittement s'il ne reçoit pas de bit dominant pendant la fenêtre d'acquittement.
Erreur de forme	une erreur de forme est détectée lorsqu'un bit a une valeur différente de celle attendue, par exemple, des délimiteurs de CRC ou une fin de trame incorrects.

4.5.2 Gestion et isolation des erreurs

L'isolation des erreurs est un processus qui distingue les erreurs temporaires des erreurs permanentes. Les erreurs temporaires peuvent résulter de perturbations transitoires, tandis que les erreurs permanentes sont généralement causées par des connexions défectueuses ou des composants défaillants. Cette distinction permet d'isoler un nœud défaillant du bus pour éviter toute perturbation des autres nœuds.

Pour gérer efficacement les erreurs, CAN définit trois états de fonctionnement pour un nœud :

Tableau 1 Classification des erreurs réseau CAN

Erreur	Description
État d'erreur actif	Un nœud en état d'erreur actif peut participer normalement à la communication sur le bus. En cas de détection d'une erreur, il transmet un "drapeau d'erreur actif" (composé de 6 bits dominants consécutifs). Un nœud en état d'erreur actif est considéré comme peu ou pas du tout perturbé par les erreurs.

État d'erreur passif	Un nœud en état d'erreur passif peut participer à la communication, mais s'il détecte une erreur sur le bus, il transmet un "drapeau d'erreur passif" (composé de 6 bits récessifs consécutifs). Cet état indique un nœud rencontrant des problèmes liés aux erreurs.
État d'erreur déconnecté	Un nœud en état d'erreur déconnecté n'est pas autorisé à communiquer sur le bus ; il est considéré comme trop perturbé par les erreurs pour intervenir. Ce nœud peut rejoindre le bus lorsque la couche supérieure (sa couche applicative) lui demande de revenir en mode de fonctionnement normal, après avoir observé 128 occurrences de 11 bits consécutifs récessifs sans erreur sur le bus, indiquant ainsi que le bus est revenu à son état de fonctionnement normal.

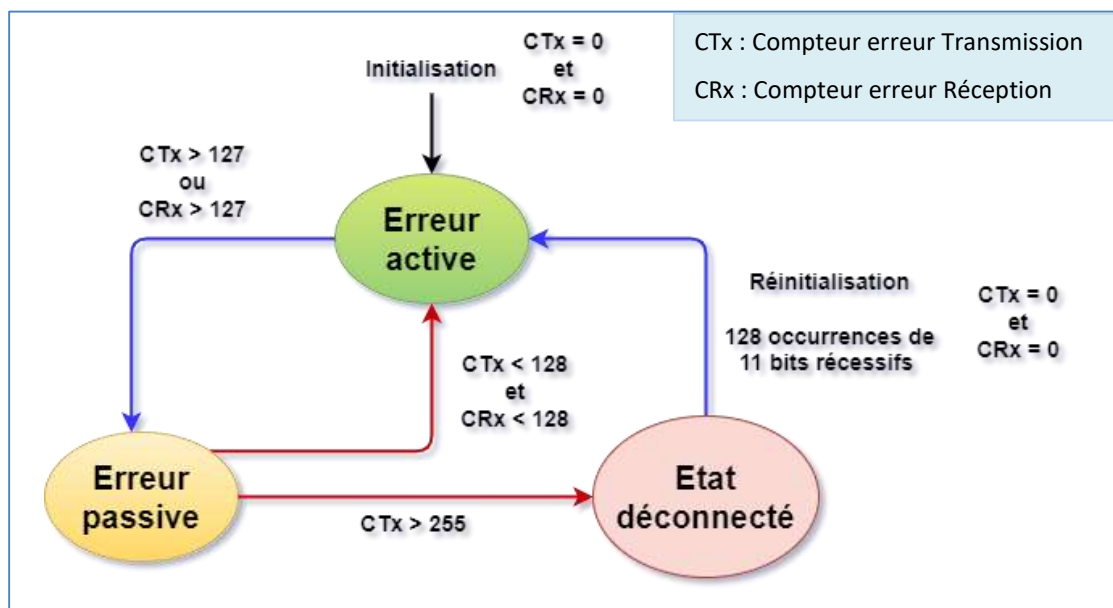


Figure 18. Diagramme d'états de nœuds en fonction de l'apparition d'erreurs.

Le compteur CTx est utilisé pour enregistrer les événements lors de l'émission d'une trame par un nœud, tandis que le compteur CRx est utilisé pour suivre les événements lors de la réception par un nœud.

Un nœud est considéré comme un émetteur lorsqu'il envoie une trame (de données ou de requête) et comme un récepteur lorsqu'il reçoit une trame émise par un autre nœud. Un nœud émetteur reste dans cet état jusqu'à ce que le bus soit libre ou qu'il perde l'arbitrage au profit d'un autre nœud. Un nœud récepteur reste dans cet état jusqu'à ce que le bus redevienne libre.

La mise à jour des compteurs d'erreurs CTx et CRx est gérée selon les règles suivantes :

R1. Lorsqu'un récepteur détecte une erreur, son compteur CRx est augmenté de 1, sauf en cas d'erreur de bit pendant l'émission d'un drapeau d'erreur actif ou d'un drapeau de surcharge.

R2. Si un récepteur détecte un bit dominant comme premier bit après l'émission d'un drapeau d'erreur, son compteur CRx est augmenté de 8.

R3. Lorsqu'un émetteur envoie un drapeau d'erreur, son compteur CTx est augmenté de 8, sauf dans certaines situations spécifiques.

R4. Si un émetteur détecte une erreur de bit pendant l'émission d'un drapeau d'erreur actif ou d'un drapeau de surcharge, son compteur CTx est augmenté de 8.

R5. Si un récepteur détecte une erreur de bit pendant l'émission d'un drapeau d'erreur actif ou d'un drapeau de surcharge, son compteur CRx est augmenté de 8.

R6. Chaque nœud peut tolérer jusqu'à sept bits dominants consécutifs après l'émission d'un drapeau d'erreur actif, passif ou de surcharge. Après la détection du 14ème bit dominant consécutif (après un drapeau d'erreur actif ou de surcharge) ou du 8ème bit dominant consécutif (après un drapeau d'erreur passif) et après chaque séquence supplémentaire de huit bits dominants consécutifs, chaque émetteur incrémente son compteur CTx de 8 et chaque récepteur incrémente son compteur CRx de 8.

R7. Après une transmission réussie (réception de l'ACK et absence d'erreurs jusqu'à la fin de la trame), le compteur CTx est décrémenté de 1, sauf s'il est déjà à zéro.

R8. Après une réception réussie (réception correcte et émission du bit ACK), le compteur CRx est décrémenté de 1 s'il était compris entre 1 et 127. S'il était à zéro, il reste à zéro. S'il était supérieur à 127, il prend aléatoirement une valeur entre 119 et 127.

Conformément à la figure 12, les transitions d'état d'un nœud suivent les règles ci-dessous :

1. Lors de l'initialisation (ou de la réinitialisation), le nœud se trouve dans l'état d'erreur actif avec ses deux compteurs à zéro.

2. Un nœud bascule vers l'état d'erreur passif lorsque l'un de ses compteurs CTx ou CRx dépasse la valeur 127.

3. Un nœud passe à l'état d'erreur déconnecté lorsque son compteur CTx dépasse la valeur 255.

4. Un nœud revient à l'état d'erreur passif lorsque ses deux compteurs CTx et CRx passent en dessous de la valeur 128.

5. Un nœud en état d'erreur déconnecté retourne à l'état d'erreur actif s'il observe 128 occurrences de 11 bits consécutifs récessifs. Alors, il réinitialise ses deux compteurs CTx et CRx.

4.5.3 Trame d'erreur

Quand un nœud repère une erreur (et s'il est autorisé à agir sur le bus), il arrête immédiatement la trame en cours et envoie un drapeau d'erreur (actif ou passif selon son état) pour alerter les autres nœuds de la situation. Un drapeau d'erreur se compose de deux parties (comme illustré dans la figure 13). La première partie consiste en la superposition des divers drapeaux d'erreurs émis par les nœuds du bus qui peuvent en émettre. La seconde partie est un délimiteur.

Lorsqu'un nœud détecte une erreur, il informe les autres en envoyant un drapeau d'erreur. Ce drapeau viole la règle du "bit stuffing" (car il transmet 6 bits consécutifs identiques), ce qui amène tous les autres nœuds à également détecter une erreur et à commencer à envoyer un drapeau d'erreur. La séquence de bits dominants présente alors sur le bus est le résultat de la superposition de plusieurs drapeaux d'erreurs, sa longueur variant entre 6 et 12 bits.

Le délimiteur d'erreur se compose de 8 bits récessifs. Après avoir émis son drapeau d'erreur, chaque nœud envoie des bits récessifs et surveille le bus jusqu'à ce qu'il détecte un bit récessif, moment où il envoie encore 7 bits récessifs supplémentaires.

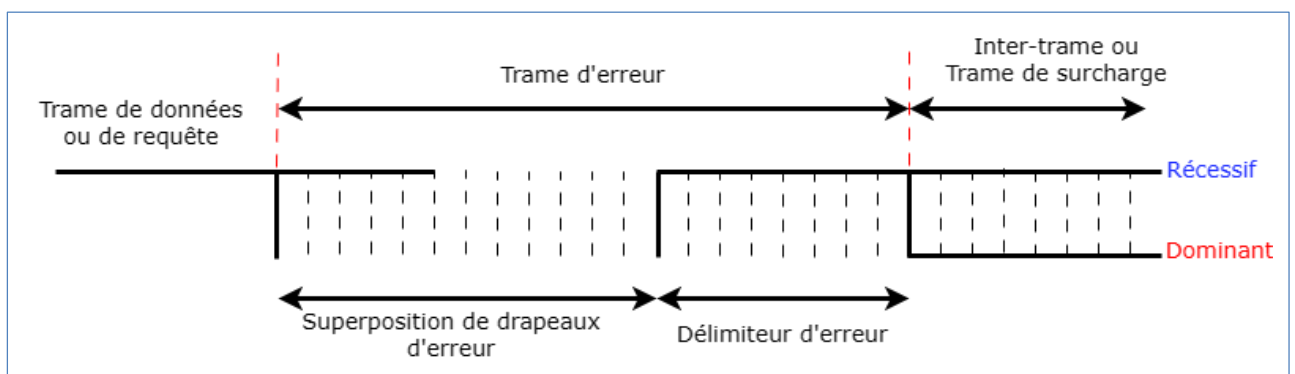


Figure 19. Format de trame d'erreur

4.6 Trames de surcharge

Les conditions internes d'un nœud peuvent le conduire à demander un délai ("une pause") pour accepter la prochaine trame de données ou de requête provenant des autres nœuds. Il peut faire cette demande en envoyant une trame de surcharge. L'émission automatique de trames de surcharge par les nœuds saturés assure en quelque sorte le contrôle du flux.

La trame de surcharge ne peut apparaître qu'à la fin d'une trame normale, d'une trame d'erreur ou d'une autre trame de surcharge, donc elle remplace l'inter-trame. La norme CAN autorise au maximum deux trames de surcharge consécutives pour éviter de blocage indéfini du bus.

La trame de surcharge se compose uniquement de deux champs : un champ avec des drapeaux de surcharge suivis d'un délimiteur de champ. Le drapeau de surcharge est constitué de 06 à 12 bits dominants, tandis que le délimiteur de surcharge est constitué de 08 bits récessifs.

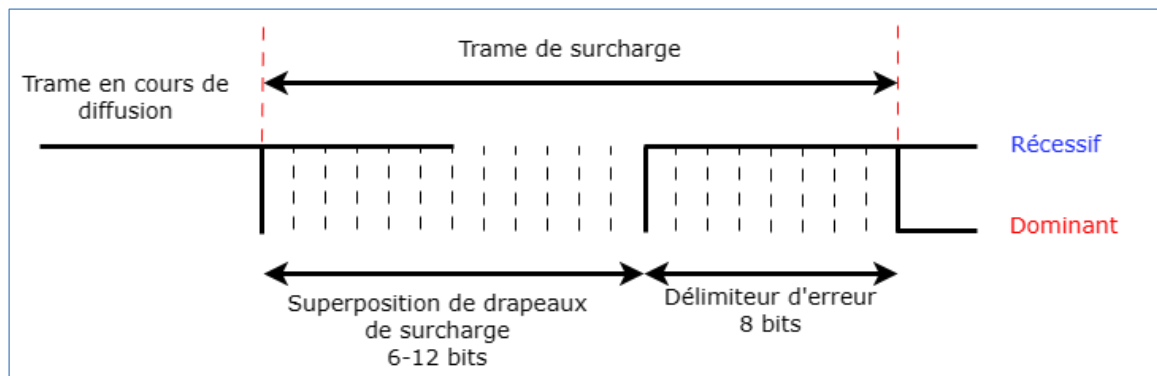


Figure 20. Format de trame de surcharge

5. Mise en œuvre du bus CAN

La mise en œuvre du bus CAN implique la configuration et la gestion d'un réseau de communication basé sur le protocole CAN (Controller Area Network). Cela comprend la sélection des composants matériels appropriés tels que les contrôleurs CAN, les transcepteurs et les nœuds du réseau, ainsi que la programmation des logiciels pour permettre la communication entre les différents appareils connectés au bus CAN. Une mise en œuvre efficace du bus CAN nécessite une compréhension approfondie du protocole CAN, de ses spécifications et de ses exigences en matière de communication.

5.1 Architectures autour de CAN

Architecture en ligne : Les nœuds du réseau sont connectés en série les uns après les autres, formant une structure linéaire. Cette architecture est souvent utilisée dans les applications nécessitant une communication séquentielle entre les nœuds.

5.2 Composants utilisés dans le bus CAN

5.2.1 Canbus shield

La carte shield « CAN-BUS » permet de mettre en œuvre une interface de communication via un bus CAN. Cette carte intègre un contrôleur CAN MCP2515 et un émetteur/récepteur CAN MCP2551. Cette carte permet d'implémenter un bus CAN standard (2.0A) ou bus CAN étendu (2.0B) avec une vitesse de fonctionnement allant jusqu'à 1 Mbits/s. Cette carte a été conçue pour s'enchâsser sur une carte Arduino UNO ou compatible.

Elle dispose également de deux borniers à vis permettant d'accéder aux lignes CAN-H et CAN-L. Ainsi que deux connecteurs (liaison série asynchrone et bus I2C) au format « Grove » permettent la connexion de capteurs directement sur le 'Shield'.

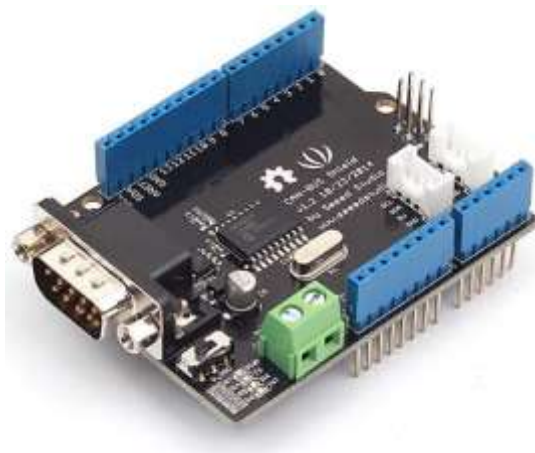


Figure 21. CAN-BUS Shield

5.2.2 Anatomie de la carte Shield CAN

N°	Désignation	
1	Port DB9	
2	Commutateur permettant d'alimenter la carte via le connecteur DB9 donc via la prise OBD II.	
3	Indicateurs LED : PWR : Allumée lorsque la carte est sous tension TX : Clignotante lorsqu'une donnée est émise RX : Clignotante lorsqu'une donnée est reçue INT : Allumée si une donnée d'interruption est reçue	
4	Bornes de connexion lignes CAN-H et CAN-L	
5	Broches de connexion à une carte Arduino	
6	Connecteur Grove « Liaison série Asynchrone »	
7	Connecteur Grove « Liaison I2C »	
8	Connecteur ICSP	
9	Emetteur/Récepteur CAN MCP2551	
A	Contrôleur CAN à interface SPI MCP2515	

5.2.3 Interconnexion du Shield avec la carte Arduino

La communication entre le Shield « Bus CAN » et la carte Arduino est réalisée au moyen de la liaison **SPI**⁵ (Serial Peripheral Interface).

⁵ <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/techniques/3300/3300-le-bus-spi.pdf>

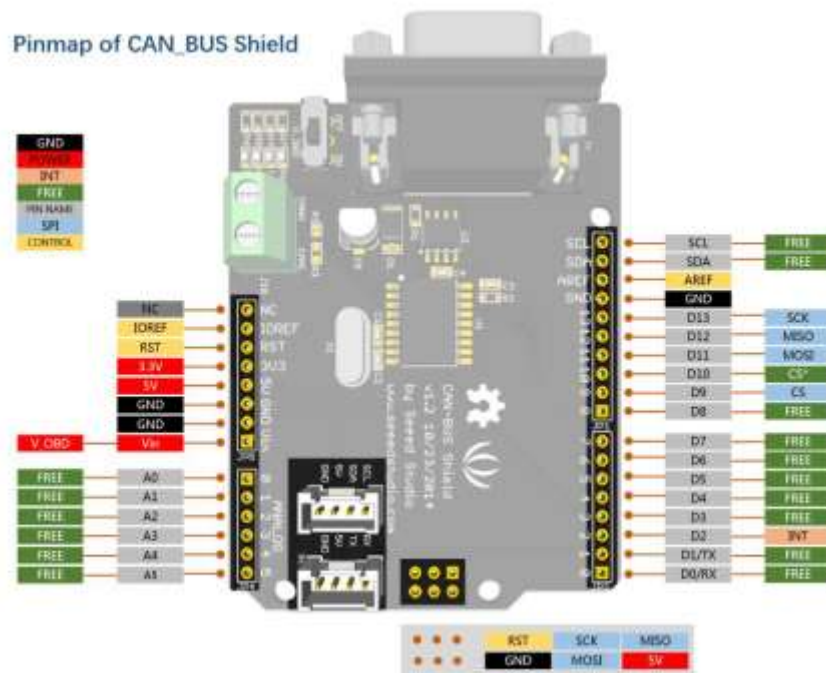


Figure 22. cartographie des pins Shield CAN-BUS

Les signaux SCK, MISO, MOSI sont par défaut transmis à la carte Shield via le connecteur ICSP. Le signal CS est quant à lui disponible par défaut sur la broche numérique D9.

Le schéma de câblage par défaut entre la carte Arduino et le Shield est le suivant :

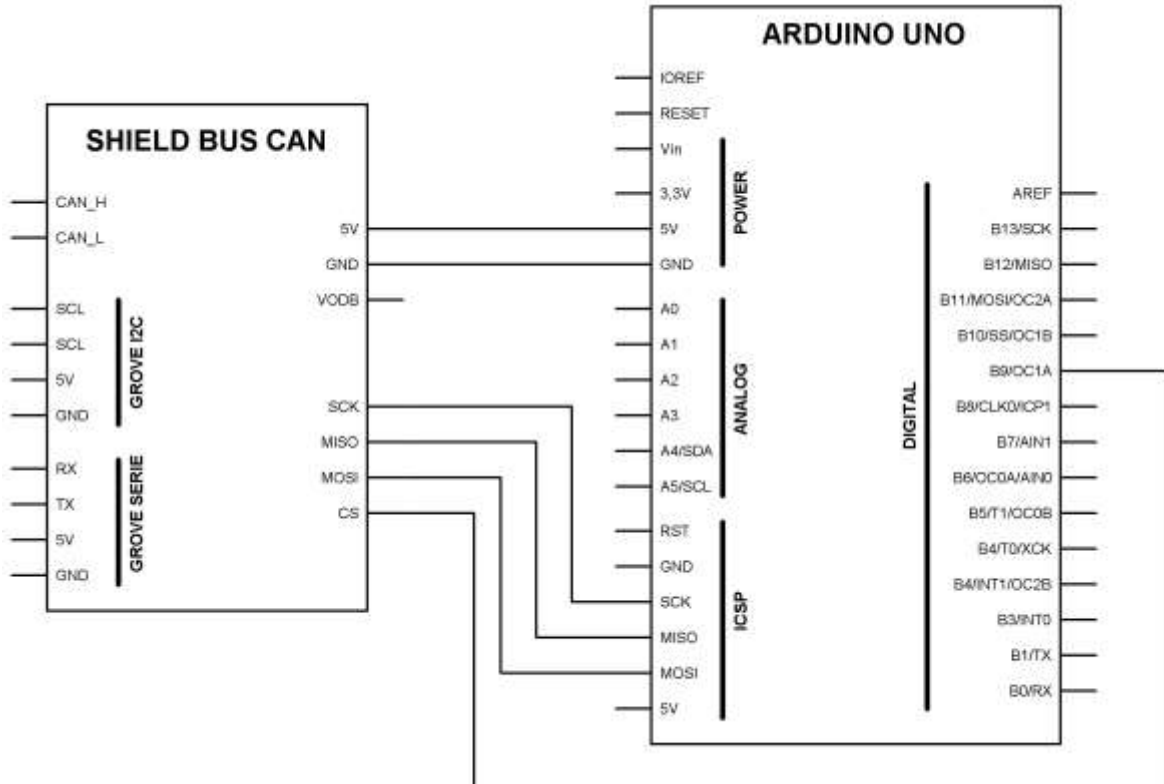


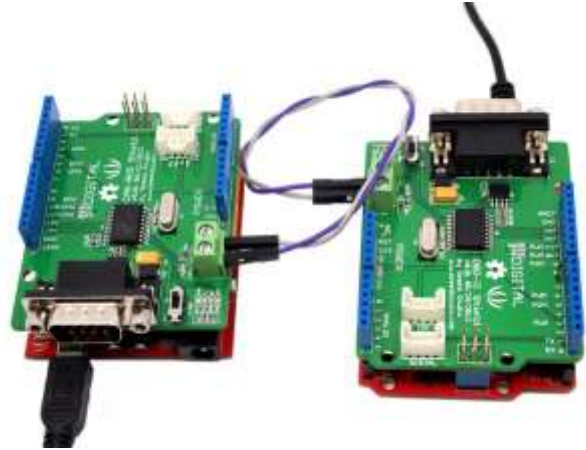
Figure 23. Interconnexion du Shield avec la carte Arduino

5.2.4 Connexion du Shield

Pour utiliser le Shield « Bus CAN », il est nécessaire d'enficher le Shield sur une carte Arduino, cela permet de former un nœud CAN. Ensuite il faut connecter les lignes **CAN_H** et **CAN_L** du Shield au bus CAN via les borniers à vis ou via le connecteur DB9.



(a). can-bus shield enfiché sur carte Arduino UNO



(b) l'interconnexion de deux Shields « Bus CAN ».

Figure 24. Connexion du Shield

5.2.5 Canbus module : Présentation de la carte module CAN mcp2515

Le module mcp2515 permet de mettre en œuvre une interface de communication via un bus CAN. Cette carte intègre un contrôleur CAN MCP2515 et un émetteur/récepteur (transceiver) CAN MCP2551. Cette carte permet d'implémenter un bus CAN standard (2.0A) ou bus CAN étendu (2.0B) avec une vitesse de fonctionnement allant jusqu'à 1 Mbits/s.

Cette carte a été conçue pour s'interfacer avec une carte Arduino UNO ou compatible via le Bus SPI. Elle dispose également de deux borniers à vis permettant d'accéder aux lignes CAN-H et CAN-L.

Le MCP2515 a deux masques d'acceptation et six filtres d'acceptation qui sont utilisés pour filtrer les messages et décider d'accepter ou de rejeter les messages circulant sur le bus CAN.

CAN DRIVER MODULE MCP2515



Figure 25. Module CAN MCP2515

5.2.6 Anatomie du module CAN MCP2515



Figure 26. Pinout du Module CAN MCP2515

5.2.7 Interconnexion du module CAN avec la carte Arduino

La communication entre le Module « CAN MCP2515» et la carte Arduino est réalisée au moyen de la liaison SPI. Les signaux SCK, MISO, MOSI sont transmis au module CAN via les connecteurs SCK, SI et SO. Le signal CS est disponible sur la broche numérique D10.

Le schéma de câblage par défaut entre la carte Arduino et le module est donné par la figure 27.

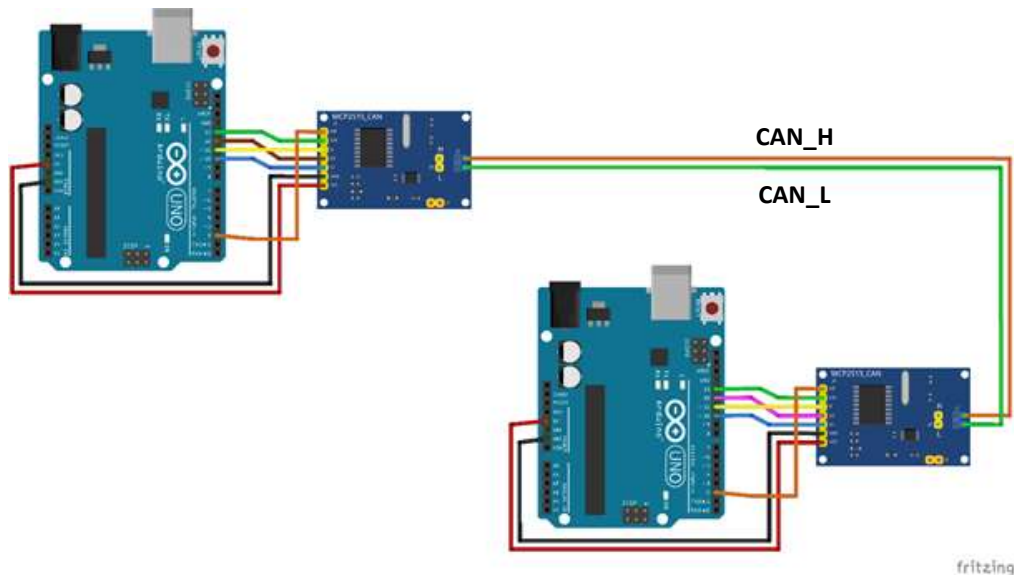


Figure 27. Connexion Module CAN MCP2515 avec Arduino

5.3 Implémentation avec Arduino : Librairie « MCP-CAN »

La librairie « mcp2515_can » contient des fonctions permettant de gérer le Module CAN.

```
include "mcp2515_can.h"
```

5.3.1 Création de la liaison CAN

Pour déclarer une nouvelle liaison CAN, il faut utiliser la fonction suivante avec « spiCSPin » représentant la broche numérique utilisée pour le signal CS.

```
mcp2515_can CAN(spiCSPin);
```

Exemple :

```
const int spiCSPin = 10;
mcp2515_can CAN(spiCSPin);
```

5.3.2 Initialisation du Bus CAN :

Pour initialiser le bus CAN, il faut utiliser la fonction suivante en indiquant la vitesse de fonctionnement.

```
CAN.begin("Vitesse") ;
```

La vitesse de communication doit être choisie parmi les valeurs suivantes :

Vitesse	Mot clé	Vitesse	Mot clé	Application
10 kbits/s	CAN_10KBPS	5 kbits/s	CAN_5KBPS	Low speed
25 kbits/s	CAN_25KBPS	20 kbits/s	CAN_20KBPS	
33 kbits/s	CAN_33KBPS	31,25 kbits/s	CAN_31K25BPS	
50 kbits/s	CAN_50KBPS	40 kbits/s	CAN_40KBPS	

83,3 kbits/s	CAN_83K3BPS	80 kbits/s	CAN_80KBPS	
125 kbits/s	CAN_100KBPS	95 kbits/s	CAN_95KBPS	
200 kbits/s	CAN_200KBPS	50 kbits/s	CAN_125KBPS	
500 kbits/s	CAN_500KBPS	250 kbits/s	CAN_250KBPS	High speed
1 Gbits/s	CAN_1000KBPS	666 kbits/s	CAN_666KBPS	

Exemple :

```
CAN.begin(CAN_500KBPS) ; // Initialisation du bus CAN à 500 kbit/s
```

5.3.3 Envoi d'une trame

La fonction suivante permet d'envoyer une donnée sur le bus CAN.

```
CAN.sendMsgBuf(id, trame, len, data); // Lire les données
```

Paramètre	Type	Fonction
id	byte	Identifiant du message
trame	byte	Type de trame : 0 trame standard - 1 trame étendue
len	byte	Taille de la donnée à envoyer
data	byte	Tableau contenant les données à envoyer

5.4 Format du trame CAN : allure du signal CAN_H et CAN_L



Figure 28 Tracé des lignes CAN_H et CAN_L sur oscilloscope RedPitaya⁶

⁶ <https://redpitaya.com>

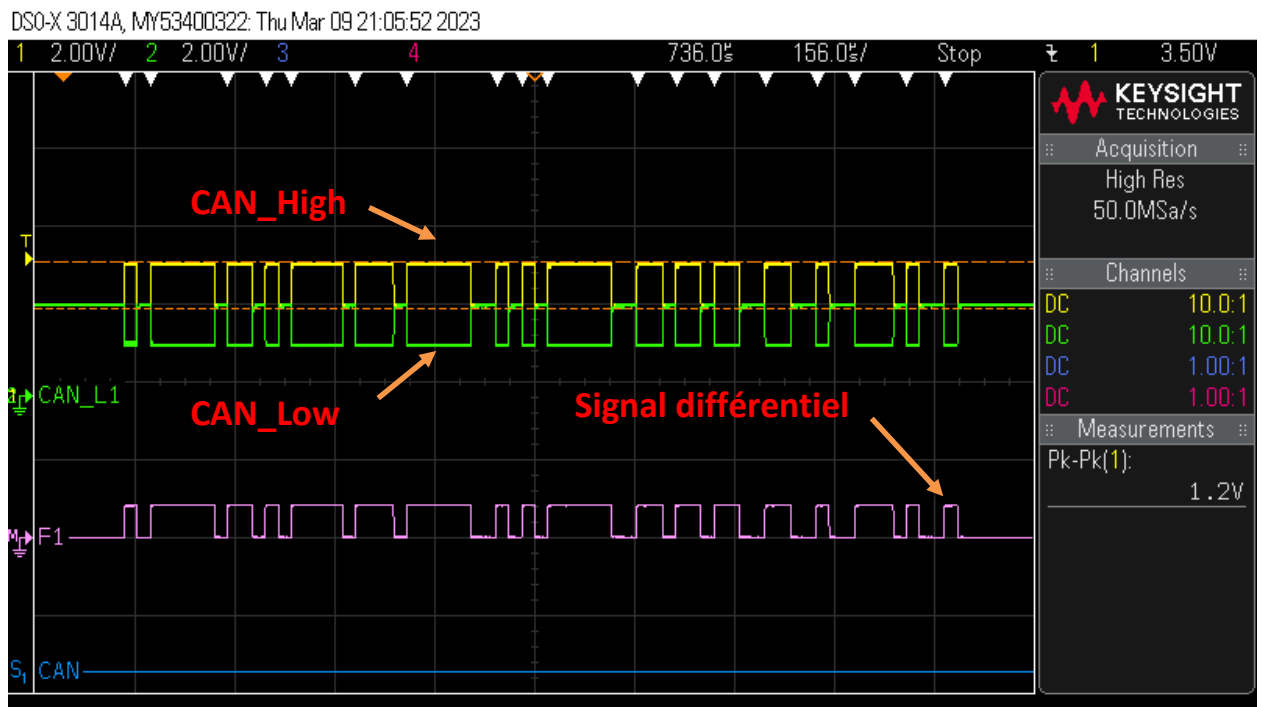


Figure 29 Lignes CAN_H et CAN_L et signal différentiel H-L sur oscilloscope⁷

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons approfondi les caractéristiques du bus CAN, l'un des bus de terrain les plus répandus dans les applications industrielles et automobiles. Nous avons d'abord examiné les différentes classifications du bus CAN, en fonction de ses paramètres de configuration et de son champ d'application.

Ensuite, nous avons étudié en détail les protocoles de communication CAN, qui assurent une transmission de données fiable et en temps réel entre les différents nœuds du réseau. Nous avons notamment analysé la structure des trames CAN, leurs différents types et les mécanismes de détection et de gestion des erreurs.

Cette compréhension approfondie du bus CAN permet aux étudiants de mieux appréhender les enjeux liés à l'utilisation de ce bus dans les systèmes embarqués et les procédés industriels. Ils sont désormais en mesure de concevoir, configurer et dépanner des réseaux CAN de manière plus efficace.

⁷ <https://www.keysight.com/us/en/product/DSOX3024A/oscilloscope-200-mhz-4-channels.html>

Le prochain chapitre se concentrera sur un autre bus de terrain, l'AS-i bus, afin de compléter les connaissances des lecteurs sur les technologies de communication industrielle les plus répandues.

Chapitre 4

Interface Actionneurs Capteurs (AS-I)

Chapitre 4 : Interface actionneurs capteurs (AS-I)

1. Introduction

L'AS-Interface (AS-I) est un système de bus de terrain utilisé pour connecter les actionneurs et les capteurs dans les applications industrielles. Il permet la communication bidirectionnelle entre les différents composants d'un système automatisé, facilitant ainsi le contrôle et la surveillance des processus industriels. Les actionneurs, tels que les moteurs et les vannes, peuvent être commandés efficacement via l'AS-I, tandis que les capteurs peuvent transmettre des données en temps réel pour une surveillance précise.

AS-I est un système de bus ouvert et non propriétaire, il assure la transmission des signaux tout-ou-rien (TOR) et analogiques au niveau des machines. Il fait l'objet également d'interface universelle entre le niveau de commande et les capteurs et actionneurs binaires simples.

Grâce à son installation simple et à sa configuration conviviale, l'AS-Interface est largement utilisé dans divers secteurs industriels pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la flexibilité des systèmes automatisés (Hinnah F., 2019).



Figure 30. Equipements AS-Interface

2. Architecture d'un bus de terrain AS-I (SIEMENS, 11/2008)

L'architecture d'un bus de terrain AS-Interface (AS-I) est conçue de manière à simplifier et optimiser la communication entre les actionneurs et les capteurs dans un environnement industriel.

Le système (AS-i) permet d'interconnecter des modules Esclaves à un Maître (API). Pour un seul maître, on peut connecter jusqu'à 31 esclaves et pour chacun d'eux on peut piloter 04 entrées et/ou 04 sorties par esclave en disposant, en plus, de 04 bits de paramétrage.

Les modules d'E/S permettent de recevoir 01 à 08 capteurs/actionneurs soit actifs soit passifs (intégrant un chip ASI).

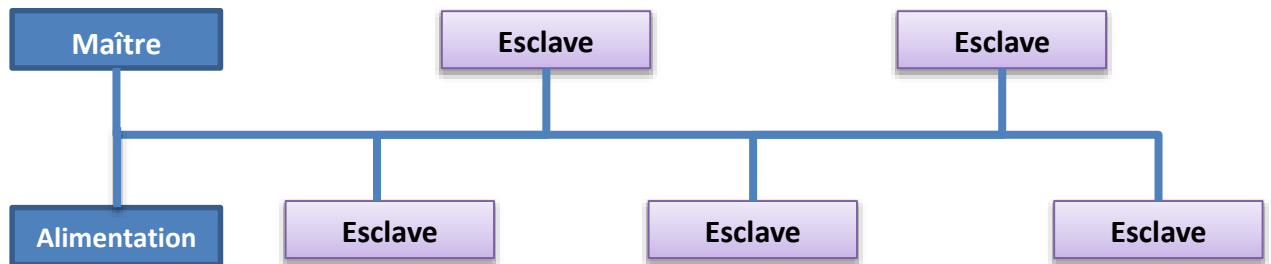


Figure 31. Architecture Maître-Esclave

Le système AS-i se compose d'un maître, d'une alimentation et de stations connectées, appelées esclaves. La topologie est totalement libre (étoile, bus, arbre), mais ne doit pas dépasser 100m par segment.

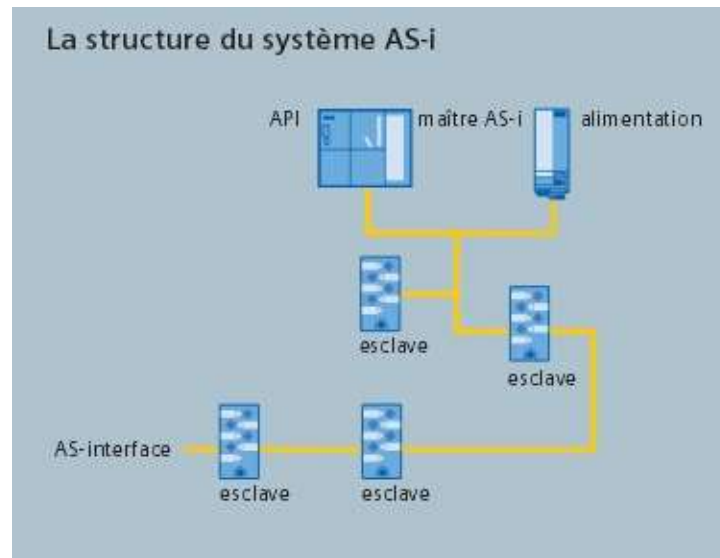


Figure 32. Structure du système AS-I

NB. Grâce à une alimentation AS-i spéciale, les données et l'énergie sont transmises simultanément sur un seul câble bifilaire. Cela facilite les travaux de câblage longs et coûteux.

2.1 Maître AS-I

Le maître AS-I est l'élément central du système AS-Interface. Il assure la communication entre le niveau de contrôle supérieur (PLC, API, etc.) et les périphériques AS-I connectés, tels que les actionneurs et les capteurs. Le maître AS-I contrôle le cycle de communication sur le bus AS-I et échange des données avec les esclaves AS-I.

Il organise de manière autonome les échanges de données sur le câble AS-i, scrute les signaux, transmet les paramètres aux stations, surveille le réseau et assure son diagnostic, et ce, qu'il s'agisse d'applications standard avec AS-Interface ou d'applications de sécurité avec ASI-safe.

2.2 Esclaves AS-I

Les esclaves AS-I sont les périphériques connectés au bus AS-I, tels que les actionneurs (moteurs, vannes, etc.) et les capteurs (capteurs de proximité, interrupteurs, etc.). Ces esclaves communiquent avec le maître AS-I en envoyant des données sur leur état ou en recevant des commandes pour effectuer des actions spécifiques.

Les stations esclaves connectées sur l'AS-i comprennent non seulement l'électronique AS-i, mais aussi les interfaces nécessaires au raccordement des capteurs et actionneurs.

Jusqu'à 62 esclaves (31 standard) des catégories les plus diverses peuvent être raccordés sur un réseau AS-i. Il peut s'agir de modules d'entrée/sortie à monter dans l'armoire ou d'appareils décentralisés directement utilisables sur le terrain.



Figure 33. Esclave AS-I

2.3 Câblage

Le bus AS-I utilise un câblage simple à deux fils pour connecter tous les périphériques. Un câble plat spécial est souvent utilisé pour simplifier l'installation et réduire les coûts. Ce câblage permet de transmettre à la fois l'alimentation électrique et les données de communication sur la même ligne.



Figure 34. Câble plat profilé

Pour l'alimentation en 24 V des actionneurs, on utilise un deuxième câble plat profilé, mais de couleur noire. Les deux câbles font appel à la même technique de raccordement par prises vampires.



Figure 35. Prise vampire

Spécialement développée pour l'AS-i, celle-ci permet de connecter simplement et sans risque d'inversion de polarité les différentes stations en n'importe quel point des deux câbles profilés.

AS-Interface permet de transmettre sur un même câble des données standard et des données liées à la sécurité. Le câblage d'arrêt d'urgence d'une machine ou d'une installation peut ainsi être réalisé à l'aide du système AS-i.

2.4 Alimentation

L'alimentation électrique est fournie via le bus AS-I pour alimenter tous les périphériques connectés. Cette alimentation est distribuée à partir du maître AS-I à travers le câblage à deux fils, ce qui simplifie l'installation en réduisant le besoin de câblage d'alimentation supplémentaire.

Le bloc d'alimentation spéciale AS-i génère une tension continue régulée de 30 VDC caractérisée par une stabilité élevée et une faible ondulation résiduelle (Equilibrage des tensions).

Il alimente en énergie l'électronique du réseau, c'est-à-dire le maître, les modules AS-i et les capteurs connectés.

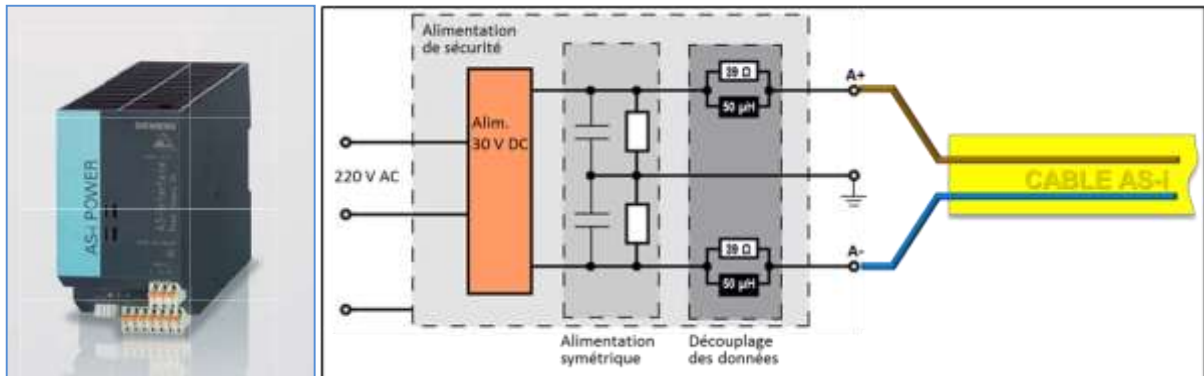


Figure 36. Alimentation AS-I

Grâce à un découplage de données intégré, le bloc d'alimentation assure la séparation entre les données et l'énergie qui transitent simultanément sur le même câble bifilaire AS-i.

2.5 Topologie en ligne

La topologie en ligne est couramment utilisée dans l'architecture d'un bus de terrain AS-I. Les périphériques sont connectés en série le long du bus AS-I, ce qui facilite l'extension du système en ajoutant simplement de nouveaux esclaves à la ligne existante.

Cette approche présente plusieurs avantages clés : elle permet une installation et un câblage simples, réduit les coûts grâce à un nombre limité de câbles et de connecteurs, et améliore la fiabilité du système, une panne sur un esclave n'affectant pas les autres éléments du bus.

La topologie en ligne est donc particulièrement adaptée à l'architecture des bus de terrain AS-i, offrant une grande flexibilité d'extension tout en assurant une fiabilité et une facilité de mise en œuvre élevées.

3. Caractéristiques Bus AS-i

L'AS-i est étudié pour répondre exactement aux besoins du niveau inférieur de terrain, notamment les exigences de temps réel, volumes de données minimisés et le nombre élevé d'appareils raccordés. C'est la raison pour laquelle le maître AS-i effectue un échange, à chaque cycle, de quatre bits de données d'entrée et quatre bits de données de sortie avec chacun des 62 esclaves éventuellement connectés.

Résultat : un nombre important de capteurs et d'actionneurs sont adressés en temps réel. Ce qui le rend un bus de terrain véritablement sur mesure.

AS-Interface a été optimisé en vue de la connexion d'actionneurs et de capteurs TOR et analogiques. La ligne AS-i assure l'échange de données entre les capteurs/actionneurs (esclaves AS-i) et le maître AS-i, ainsi que l'alimentation électrique des capteurs/actionneurs.

Le câblage est simple et peu coûteux, même pour le montage en utilisant des connexions de type vampire, et la grande souplesse grâce à un câblage arborescent.

Tableau 2. Caractéristiques Bus AS-i

Nombre d'esclaves	62 max
Nombre d'E/S	496 entrée et 496 sorties (spécification 3.0)
Support	Câble bifilaire non blindé pour les données et l'énergie
Temps de cycle	10 ms (20 ms max)
Transmission de données	TOR et analogique (16 bits)
Longueur de câble	Standard : 100 m, Extensible : 600 m par adjonction de composant

Temps de réponse courts : Le maître AS-i ne nécessite pas plus de 5 ms pour assurer l'échange de données cyclique avec au plus 31 abonnés (10 ms pour 62 abonnés).

Les abonnés (esclaves AS-i) connectés à la ligne AS-i peuvent être soit des actionneurs/capteurs à connexion AS-i intégrée soit des modules AS-i conçus pour la connexion d'au maximum huit actionneurs/capteurs TOR.

Les modules AS-i standard permettent d'exploiter jusqu'à 124 actionneurs et 124 capteurs connectés à la ligne AS-i.

L'utilisation de modules AS-i à zone d'adressage étendue permet d'exploiter jusqu'à 248 actionneurs et 248 capteurs à l'aide d'un maître étendu. En cas d'utilisation du profil d'esclave S-7.A.A avec 8E/8S on peut exploiter jusqu'à 496 actionneurs et 496 capteurs.

4. Protocoles de communication AS-I

4.1 Codage APM (Alternate Pulse Modulation)

Le codage APM a été spécifiquement développé pour le bus AS-i. La transmission utilise un codage synchrone Manchester sans composante continue, à une vitesse de 167 kbits/s. Les trames ont une longueur fixe de 14 bits pour le maître et de 7 bits pour l'esclave. Chaque esclave est identifié par une adresse. Les échanges sont très rudimentaires : écriture périodique des sorties

suivie de la lecture des entrées d'un esclave ; écriture aperiodique de la configuration d'un module esclave.

La forme du signal est en $\sin^2$ ce qui le rend moins sensible aux perturbations CEM.

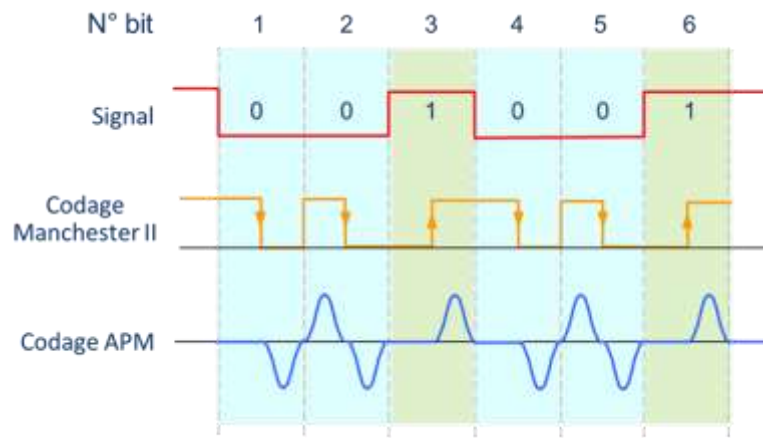


Figure 37. Codage APM (Alternate Pulse Modulation)

4.2 Adressage des stations

La plage d'adresses définie par ASI s'étend de 0 à 31. L'adresse 0 représente la configuration par défaut, elle n'est pas exploitable pour l'échange de données. Seuls les esclaves sont concernés par l'adressage, le maître n'est pas attribué d'adresse. L'adressage est réalisé par le biais d'une console portable ou du maître, donc pas d'adressage physique par Switch ou roues codeuses sur les esclaves.

4.3 Adressage étendu

La version 2.11 (1998) a introduit le concept d'adressage étendu, permettant de doubler le nombre de stations esclaves. Pour des raisons de compatibilité, on a maintenu la plage d'adressage de 1 à 31, chaque adresse peut désormais accueillir 02 esclaves : un esclave A et un esclave B.

Exemple : un esclave à l'adresse 7A et un autre à l'adresse 7B.

Il est possible de combiner sur un même réseau des esclaves avec adressage simple et d'autres avec adressage étendu. Les esclaves A et B sont scrutés par le maître alternativement. Il en résulte un impact sur le temps de rafraichissement. Si le réseau est entièrement chargé, soit 31 esclaves A et 31 esclaves B, les stations seront rafraichies par le maître à chaque 10 ms (5ms x2).

4.4 Trames AS-i

Les trames des messages AS-i ont toujours une longueur fixe. 14 bits pour les messages de requête du maître, et 07 bits pour les messages de réponse des esclaves. La durée de pause entre

02 messages étant définie, il est possible de calculer facilement le temps de cycle du maître AS-i en situation normale.

Le maître AS-i gère les échanges de données avec les esclaves de manière cyclique (par polling). Au cours d'un cycle, il y a un échange de quatre bits de données d'entrée et quatre bits de données de sortie.

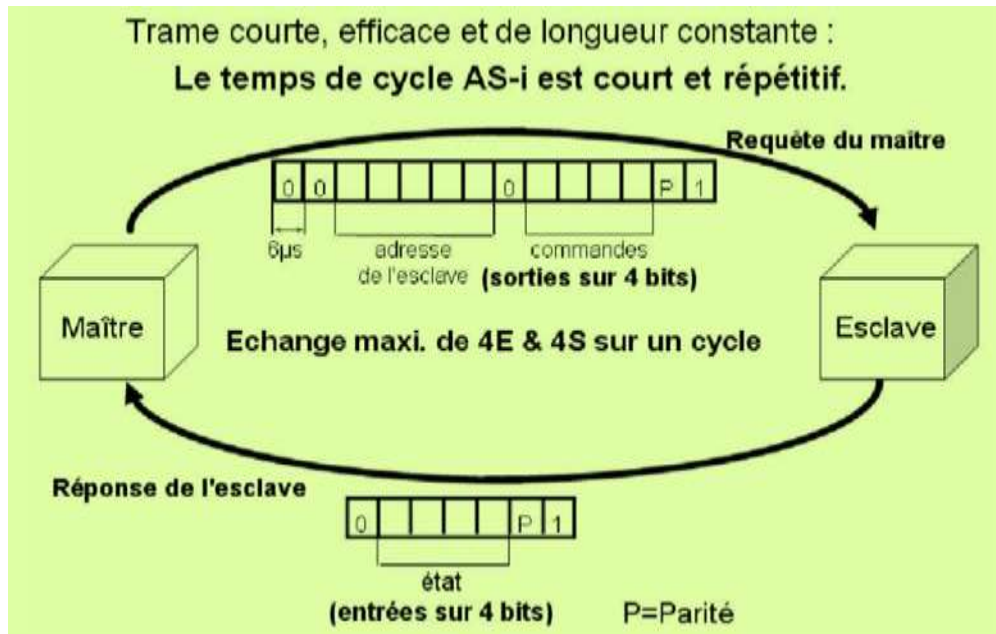


Figure 38 Echange de données AS-I

4.4.1 Structure d'une requête maître

Les trames d'une requête de maître s'étendent sur une longueur fixe de 14 bits, comme suit :

SB	CB	A4	A3	A2	A1	A0	I4	I3	I2	I1	I0	PB	EB
0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1

SB	Start Bit	bit de début = 0
CB	Bit de contrôle	0: échange de données / paramètres définie par I0 à I4 1: commandes définie par I0 à I4
A0 à A4	5 bits d'adresse esclave (1 à 31)	0 : réservé à la fonction adressage automatique
I0 à I4	5 bits d'information	fonction du type de la requête
PB	Bit de parité	bit de contrôle de parité paire
EB	End Bit	bit de fin = 1

4.4.2 Structure d'une réponse esclave

Les trames d'une réponse d'esclave s'étendent sur une longueur fixe de 07 bits, comme suit :

SB	D3	D2	D1	D0	PB	EB
0	0	1	0	1	0	1

SB	D0 à D3	PB	EB
Start Bit (0)	04 bits de données	Bit de parité	End Bit (1)
SB=0	Retournés au maître		EB = 1

4.4.3 Catalogue des requêtes et réponses

Les différentes interactions maître/esclave sont représentés dans le tableau suivant :

Requêtes du maître						Réponse esclave					
	CB	5 bits d'adresse esclave					4 bits d'information				
Echange de données	0	A4	A3	A2	A1	A0	E3	E2	E1	E0	Ei = entrées esclave
Ecriture de paramètres	0	A4	A3	A2	A1	A0	P3	P2	P1	P0	Pi = paramètres renvoyés en écho
Ecriture d'adresse	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	Ack de l'esclave 6 Transaction 15 ms max
Reset esclave	1	A4	A3	A2	A1	A0	0	1	1	0	Ack de l'esclave 6 Transaction 2 ms max
Reset adresse	1	A4	A3	A2	A1	A0	0	1	1	0	Ack de l'esclave 6
Lecture I/O Configuré	1	A4	A3	A2	A1	A0	C3	C2	C1	C0	I/O code esclave de 0 à F
Lecture code ID	1	A4	A3	A2	A1	A0	ID3	ID2	ID1	ID0	ID code esclave de 0 à F
Lecture Status esclave	1	A4	A3	A2	A1	A0	S3	S2	S1	S0	Sti = 4 bits d'états de l'esclave
Lecture et reset Status esclave	1	A4	A3	A2	A1	A0	S3	S2	S1	S0	Sti = 4 bits d'états de l'esclave avant RAZ

4.4.4 Intégration

Les esclaves ont des caractéristiques différentes en termes de nombre E/S, nature des E/S et type d'équipement. Afin que le maître puisse établir une communication avec chacun d'eux, il est impératif qu'il dispose de ces informations.

Contrairement à d'autres réseaux plus complexes, AS-i ne fait pas usage d'un fichier descriptif. L'équipement doit se conformer à l'un des profils définis dans le standard AS-i.

Le profil est caractérisé par la lettre S- suivie d'un Code E/S et de 1 à 3 Codes ID (en hexadécimal) suivant la version AS-i à laquelle l'équipement se conforme. Ces codes s'étendent à partir de 0 à F (en Hexadécimal).

Tableau 3. Syntaxe générale d'un code profil

S-	Code E/S	Code ID	Code ID 1	Code ID 2
Slave	Définit le nombre d'entrées et de sorties de la station	Identifiant fonctionnel	Identifiant fonctionnel (réglé par l'utilisateur)	Identifiant fonctionnel étendu

5. AS-i Sécurisé

5.1 ASI-safe

En effet, la version sécurisée de l'AS-Interface transmet les données standards et les données de sécurité sur un unique bus. Il est donc possible de relier directement et en toute sécurité à l'AS-i des interrupteurs d'arrêt d'urgence, des scanners laser et bien d'autres entrées/sorties pour réaliser des applications allant jusqu'à la catégorie 4 selon EN 954-1 ou SIL3 selon IEC 61508⁸.

Les installations existantes peuvent être aisément étendues avec des fonctions de sécurité. ASI-safe, certifié par l'organisme de certification TÜV⁹, constitue une solution à la fois très économique et unique sur le marché. Aucune autre technologie n'offre une efficacité comparable.

5.2 Gestion de la sécurité

Pour assurer une bonne sécurité des transmissions, on peut ajouter sur le bus des « moniteur » chargés de gérer la sécurité.

Une évolution du standard en 2000 permet d'utiliser le bus AS-i pour interconnecter des équipements de sécurité tels que :

- Arrêt d'urgence.
- Barrière immatérielle.
- Interrupteur de sécurité...

⁸ <https://nobelcert.com/DataFiles/FreeUpload/IEC%2061508-1-2010.pdf>

⁹ <https://www.tuv.com/france/fr/certification.html>

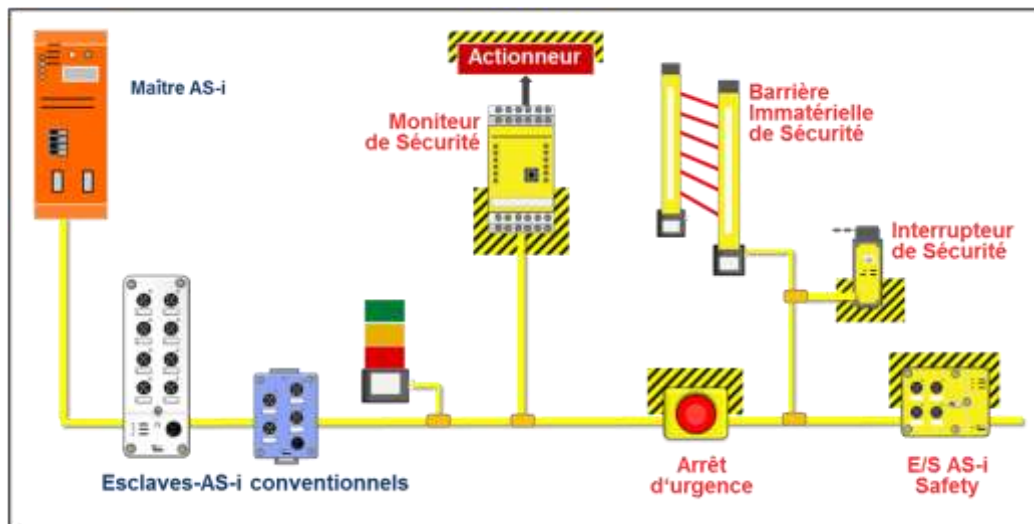


Figure 39. AS-I Sécurité

5.3 Principes de base

Le système de sécurité AS-i est fondé sur les mêmes mécanismes qu'AS-i traditionnel.

Un maître AS-i standard peut être utilisé pour gérer des esclaves de sécurité. Les appareils de sécurité peuvent ainsi, coexister sur le même réseau que des équipements de contrôle industriels classiques.

La fonction de sécurité est assurée par un "moniteur de sécurité". Chaque esclave possède une table de 8 x 4 bits. Le module de sécurité lit les tables de chaque esclave. On compare en permanence les codes transmis et les codes attendus. Le système est arrêté lorsqu'une différence est détectée. Les tables de codes dynamiques garantissent la transmission de données sûres

5.4 Moniteur de sécurité

La gestion de la sécurité est prise en charge par un équipement spécifique appelé le "moniteur de sécurité". Il active la sécurité lorsqu'un déclencheur a été actionné mais aussi en cas de problème de communication. Plusieurs moniteurs de sécurité peuvent être connectés sur le même bus AS-i et ils peuvent être positionnés en un point quelconque du réseau. Certains maîtres AS-i intègrent également la fonctionnalité de moniteur de sécurité, ils disposent donc d'une certification 'Safety at Work'.

5.5 Temps de réponse

Le délai maximal entre le déclenchement d'un esclave de sécurité, et l'ouverture du contact de sécurité correspondant sur le moniteur est de 40 ms.

Grâce à son coût réduit et à sa simplicité de mise en œuvre, AS-i Safety at work rencontre un large succès.

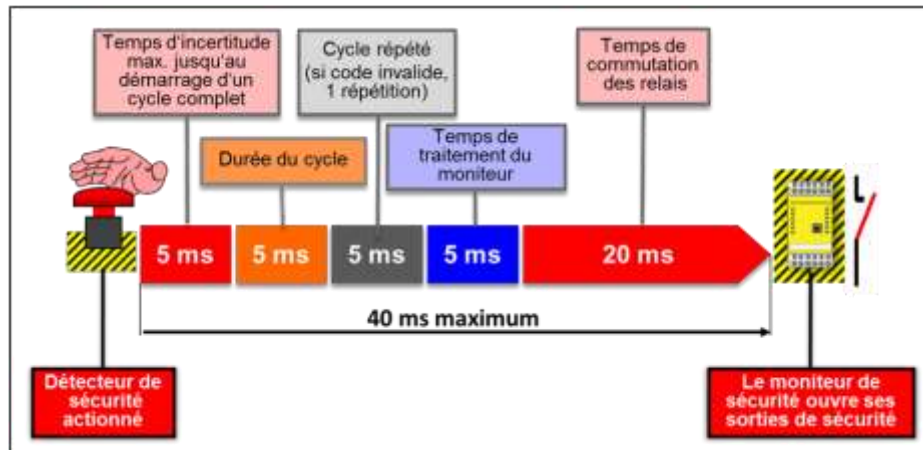


Figure 40. Temps de réponse AS-I Safe

Remarque :

En cas de mauvaise installation du réseau, alors des problèmes de communication risquent de rendre l'installation difficilement exploitable puisque le moniteur se mettra en mode de sécurité s'il ne reçoit pas de données fiables (correctes) à chaque cycle.

6. Conclusion

<i>Points forts</i>	<i>Points faibles</i>
Temps de cycle rapide et déterministe	Quelques bits échangés
Facilité de câblage	Nombre d'esclaves maximum
Simplicité d'utilisation car très bien intégré dans PL7	Longueur du bus : max 100 m
Evolution de l'architecture aisée	

Chapitre V

Réseaux de terrain ProfiBus

Chapitre V : Réseaux de terrain ProfiBus

1. Introduction

Parmi les différents protocoles de bus de terrain industriels, le Profibus se démarque comme une norme largement utilisée dans l'automatisation industrielle. Développé par un consortium d'entreprises, le Profibus offre une communication de haut débit entre divers appareils d'un réseau, le rendant adapté aux systèmes industriels complexes. Grâce à sa capacité à prendre en charge à la fois les architectures de contrôle décentralisées et centralisées, le Profibus offre une flexibilité dans la conception des systèmes. Le protocole a également démontré sa robustesse et sa fiabilité, en faisant un choix privilégié pour les industries nécessitant une communication permanente pour leurs processus critiques. De plus, le Profibus a évolué au fil des années pour répondre aux demandes changeantes de l'automatisation industrielle, avec des avancées telles que le Profibus PA pour l'automatisation des procédés et le Profibus DP pour l'automatisation des usines (Powell, 2015).

2. Classification des réseaux ProFiBus

La classification des réseaux Profibus peut se faire en fonction de différents critères, tels que la vitesse de transmission, le type d'application et la topologie du réseau. Les principaux types du réseau Profibus sont Profibus DP, Profibus PA et Profisafe.

2.1 Profibus DP (Decentralized Peripherals)

Les réseaux de bus industriels se caractérisent par une grande vitesse et une périodicité élevée et sont largement utilisés dans les systèmes de contrôle industriel, comme dans les industries pétrolière, chimique et électrique. Profibus DP est conçu pour des applications nécessitant une communication rapide en temps réel entre les périphériques décentralisés et le contrôleur central. Ce type de Profibus est largement utilisé dans les systèmes d'automatisation industrielle pour connecter des capteurs, des actionneurs, des variateurs de fréquence et d'autres périphériques décentralisés, afin de garantir l'échange cyclique de données de processus et l'échange de données acycliques pour la configuration et le diagnostic (Li, 2023).

Le système PROFIBUS-DP se compose d'un maître DP, d'un esclave DP et d'un actionneur. Le maître et les esclaves communiquent en utilisant le protocole PROFIBUS-DP à des débits allant de 9200 kbps à 152 000 kbps, ce qui le rend adapté aux applications exigeant des temps de réponse courts. La Figure 1 montre un système PROFIBUS-DP typique.

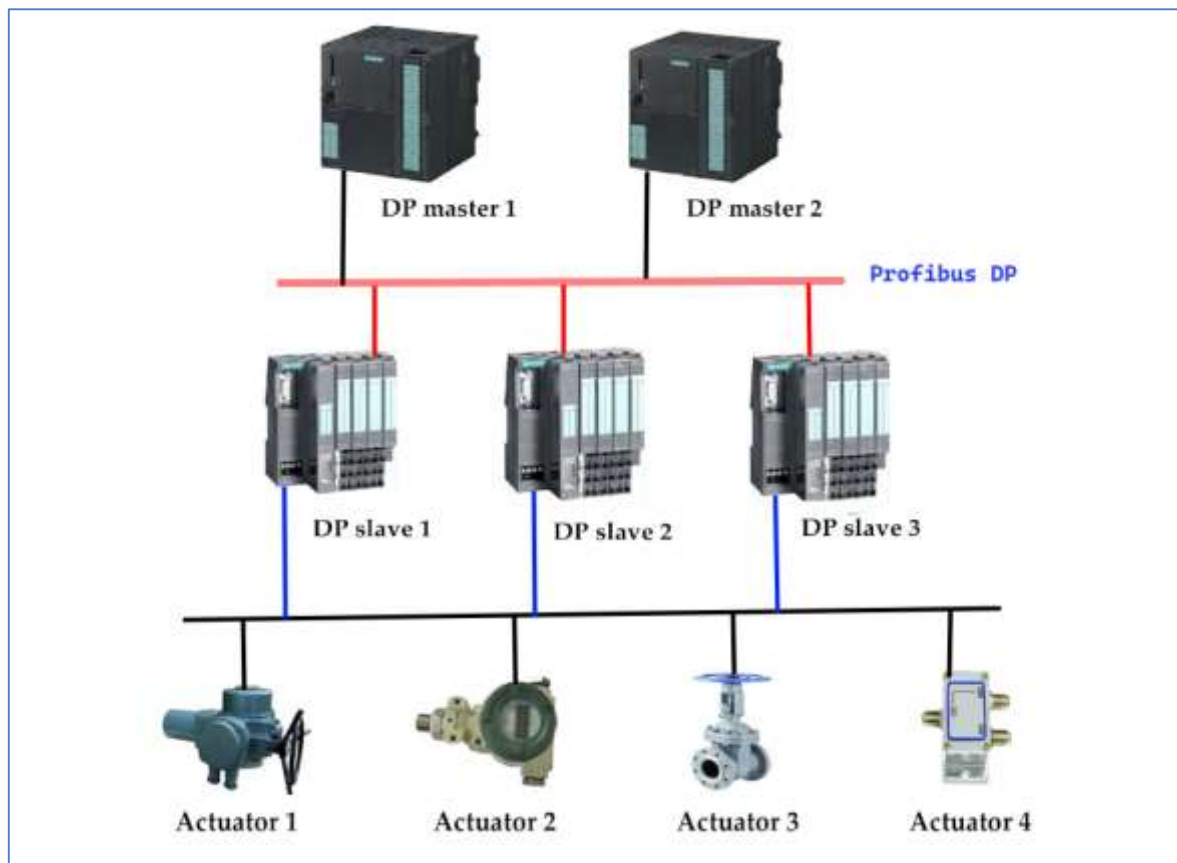


Figure 41. Profibus DP

2.2 Profibus PA (Process Automation) :

Profibus PA est spécifiquement conçu pour les industries de process, telles que l'industrie chimique, pétrolière et gazière. Ce type de Profibus est utilisé pour connecter des instruments de mesure et de contrôle dans les environnements difficiles et potentiellement explosifs des usines de process.

Profibus PA fonctionne à des vitesses plus basses que Profibus DP, généralement jusqu'à **1,5 Mbit/s**, mais il est optimisé pour la communication dans des conditions spécifiques aux industries de process.

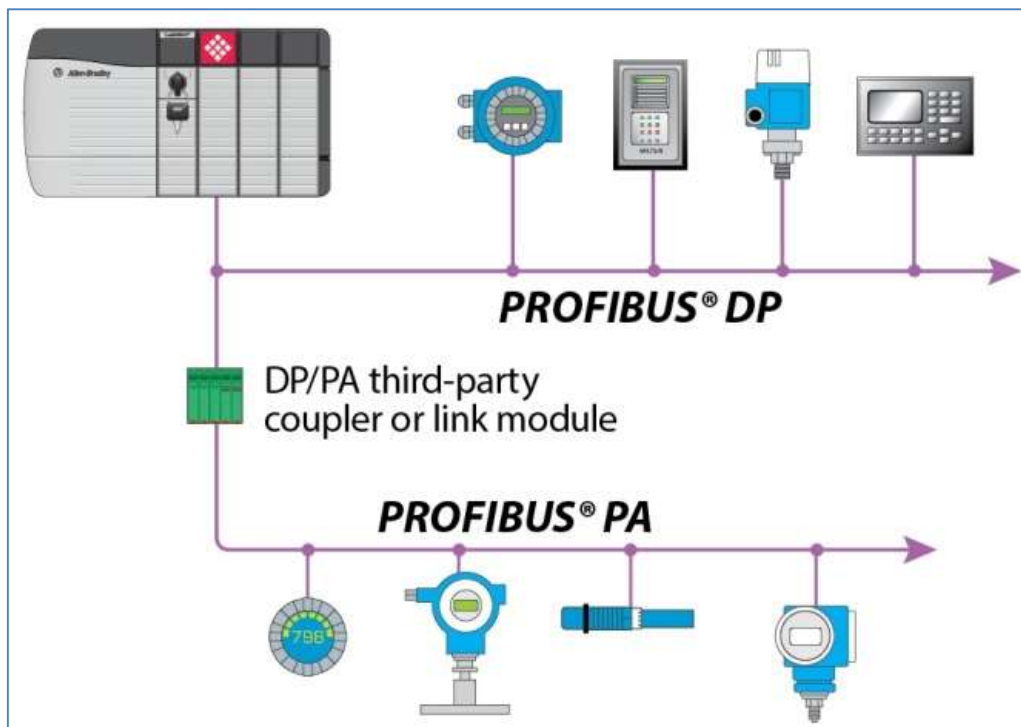


Figure 42. Profibus DP et Profibus PA

2.3 Profisafe

Profisafe est une extension du Profibus DP qui intègre des fonctionnalités de sécurité pour assurer une communication sécurisée entre les équipements de sécurité et les systèmes d'automatisation. Ce type de Profibus est utilisé pour la mise en œuvre de fonctions de sécurité telles que l'arrêt d'urgence et la surveillance des capteurs de sécurité.

2.4 Topologie du réseau

Les réseaux Profibus peuvent être configurés en différentes topologies, en étoile, en ligne ou en anneau en fonction des besoins spécifiques de l'application.

La topologie en étoile est couramment utilisée pour les applications nécessitant une grande flexibilité et une facilité de maintenance, tandis que la topologie en ligne est plus adaptée aux applications avec un grand nombre de périphériques distribués le long d'une ligne principale.

2.5 Supports physiques

La performance d'un bus de terrain est liée avec le choix de son support physique. Les exigences générales sont la fiabilité de transmission, de gestion des longues distances et des débits élevés. Les exigences spécifiques orientés 'process' concernent le fonctionnement en milieu dangereux, transmission des données et de l'énergie sur un même câble.

Pour satisfaire ces exigences de transmission, PROFIBUS utilise trois profils physiques :

- La liaison RS 485 répondant aux applications universelles de l'industrie manufacturière,
- La transmission CEI 1158-2 adaptée au process,
- La fibre optique, synonyme d'excellente immunité aux parasites et de longues distances.



Figure 43. Connectiques Profibus (RS 485, CEI 1158-2, Fibre optique)

3. Profibus et modèles OSI (protocole de communication)

La conception des modules technologiques avec PROFIBUS est orientée vers le modèle en 7 couches ISO/OSI. Le processus de communication entre deux nœuds est réparti sur sept couches, de la couche 1 (couche physique) à la couche 7 (couche application). PROFIBUS utilise les couches : 1, 2 et 7.

	Programme utilisateur		Profil applicatif
7	Application		Protocole PROFIBUS DP
6	Présentation		Non utilisés
5	Session		
4	Transport		
3	Réseau		
2	Liaison de données		Liaison de données réseau de terrain (FDL) Maitre – Esclave Réseau à jeton
1	physique		Techniques de transmission
	Couches du modèle OSI		Implémentation OSI ProfiBus

Figure 44. Profibus et Modèle OSI

3.1 Couche physique

La couche 1 définit la transmission physique. Avec PROFIBUS, il existe des versions en fil de cuivre (RS485 et MBP) ainsi que des transmissions optiques et sans fil.

3.1.1 PROFIBUS en fil de cuivre

Les versions de PROFIBUS en fil de cuivre comprennent PROFIBUS DP qui utilise la transmission RS485, la version la plus répandue, ainsi que PROFIBUS PA qui emploie la technologie MBP (Manchester Encoded Bus Powered) pour les applications de contrôle de processus.

3.1.2 Transmissions optiques

La version de PROFIBUS utilisant la transmission par fibre optique offre plusieurs avantages majeurs : elle permet de couvrir de longues distances sans perte de signal grâce à la fibre optique, elle est totalement immune aux interférences électromagnétiques, et elle présente une sécurité renforcée car il est plus difficile d'intercepter les données transmises. Cette version de PROFIBUS s'avère donc particulièrement adaptée aux applications industrielles ou de processus nécessitant une couverture étendue et un environnement exempt de perturbations électromagnétiques.

Cette version PROFIBUS est souvent utilisée dans les usines chimiques ou pétrochimiques. Dans ces environnements industriels, il est crucial de disposer d'une connexion fiable et sécurisée sur de grandes distances, tout en étant protégé contre les interférences électromagnétiques potentiellement générées par les équipements lourds et les procédés industriels. La fibre optique répond parfaitement à ces exigences, permettant ainsi une communication robuste entre les différents automates et systèmes de contrôle-commande répartis sur l'ensemble du site de production. Cette version de PROFIBUS contribue ainsi à l'automatisation et à la supervision efficace des procédés industriels dans des environnements particulièrement exigeants.

3.1.3 Transmissions sans fil

La version sans fil de PROFIBUS utilise une connexion radio permettant une grande flexibilité d'installation et de configuration. Cette version offre plus de souplesse et d'adaptabilité au réseau industriel, tout en simplifiant son déploiement et sa maintenance. Elle est donc particulièrement adaptée aux applications nécessitant mobilité et déploiement rapide, grâce à l'absence de câbles facilitant le positionnement des équipements, réduisant les coûts d'installation et simplifiant la maintenance.

Les principaux avantages de la version sans fil de PROFIBUS sont :

- Flexibilité d'installation : Avec l'absence de câbles, les composants peuvent être positionnés de manière plus libre et adaptée à l'environnement, facilitant la mise en place du réseau, notamment dans des zones difficiles d'accès.
- Mobilité des équipements : Les appareils connectés de manière sans fil peuvent être déplacés ou réarrangés plus facilement, ce qui est particulièrement intéressant pour les applications nécessitant des modifications fréquentes de l'installation.
- Réduction des coûts d'installation : La suppression des câbles réduit les coûts liés au tirage et à la pose des lignes de communication.
- Maintenance simplifiée : L'absence de câbles élimine les problèmes potentiels liés à leur usure ou à leur endommagement, facilitant ainsi les opérations de maintenance.

3.2 Couche Liaison de données

La couche 2 du modèle OSI, qui définit la méthode d'accès au bus, est un aspect essentiel de la spécification PROFIBUS. Dans le cas de PROFIBUS, cette couche utilise une méthode de communication de type maître-esclave, combinée à une méthode de passage de jeton.

- Méthode maître-esclave : Un ou plusieurs équipements maîtres (contrôleurs, automates...) interrogent et commandent des esclaves (capteurs, actionneurs...) connectés au bus. Seuls les maîtres peuvent initier des communications.
- Méthode du jeton : Un jeton circulant sur le bus accorde temporairement le droit de communication aux maîtres. Chaque maître ne peut accéder au bus que lorsqu'il détient le jeton, assurant ainsi une gestion ordonnée des échanges.

Cette combinaison de méthodes maître-esclave et de passage de jeton au niveau de la couche 2 permet de garantir une communication sécurisée et déterministe sur le réseau PROFIBUS. Cela assure une transmission fiable des données, essentielle dans les environnements industriels où la coordination et le séquençement des échanges sont cruciaux et complexes.

✓ Exemples

Dans une ligne de production automobile, le contrôleur principal (maître) interroge régulièrement les différents capteurs et actionneurs (esclaves) le long de la chaîne de montage. Il leur envoie des ordres de commande pour synchroniser les opérations de fabrication. Le jeton lui permet d'accéder au bus de manière ordonnée et de garantir la cohérence des actions.

Dans une usine chimique, le système de contrôle-commande central (maître) collecte les données des instruments de mesure (esclaves) répartis dans les différentes unités de production. Il

analyse ces informations et renvoie les consignes aux actionneurs pour ajuster les procédés. Le jeton assure une gestion sécurisée de ces échanges critiques.

3.3 Couche application

La couche 7 forme l'interface avec l'application et représente ainsi le lien entre l'application et la couche de communication. Cette couche application se décline en plusieurs variantes spécialisées :

3.3.1 PROFIBUS DP (Decentralized Peripherals)

La couche application PROFIBUS DP est spécifiquement conçue pour les applications d'automatisation avec des périphériques décentralisés, tels que les capteurs et actionneurs. Elle définit les services d'échange de données en temps réel, comme la lecture et l'écriture des entrées/sorties ainsi que la gestion des diagnostics, permettant ainsi une communication rapide et déterministe entre le contrôleur et les équipements de terrain, répondant ainsi aux exigences des environnements industriels.

3.3.2 PROFIBUS PA (Process Automation)

Pour les applications d'automatisation de procédés industriels, la couche application PROFIBUS PA est spécialement adaptée. Elle prend en charge la transmission de grandeurs analogiques essentielles au contrôle de processus, tout en incluant des fonctions avancées de gestion des alarmes et de configuration des instruments de mesure et de régulation. De plus, PROFIBUS PA intègre des mécanismes de sécurité fonctionnelle, répondant ainsi aux exigences critiques des environnements de production industrielle.

3.3.3 PROFIBUS FMS (Fieldbus Message Specification)

La couche application PROFIBUS FMS (Fieldbus Message Specification) est quant à elle plus générique, permettant des communications plus complexes. Cette variante est adaptée aux applications nécessitant des échanges de données étendus entre équipements, offrant des services de communication plus élaborés tels que le transfert de fichiers ou l'exécution de programmes, répondant ainsi aux besoins des environnements industriels requérant des fonctionnalités avancées au-delà des échanges de données temps réel.

4. Principe d'accès au bus dans un réseau profibus

Le principe d'accès au bus dans un réseau Profibus repose sur le concept de communication maître-esclave bien orchestrée, où un maître contrôle l'accès au bus et coordonne les échanges de

données entre les différents périphériques esclaves connectés, de manière équitable et déterministe, ce qui contribue à une communication efficace et fiable dans les environnements industriels.

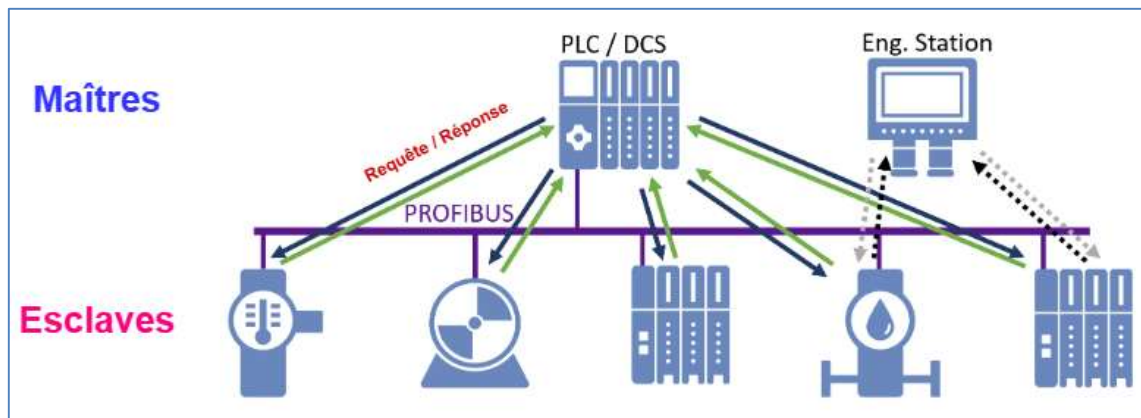


Figure 45. Principe d'accès au réseau Profibus

4.1 Technique Maître-Esclave

Dans un réseau Profibus, la méthode de communication est la méthode maître-esclave simple. La transmission de données utilisée dans les usines nécessite non seulement de la vitesse, mais aussi de la fiabilité. En d'autres termes, il est nécessaire de garantir que les données seront transmises de manière fiable dans un certain délai. Sans cette assurance, les données seront perdues et le contrôle et la surveillance seront affectés.

PROFIBUS utilise le protocole maître-esclave le plus simple. Il s'agit d'une méthode dans laquelle le maître (généralement PLC, DCS ou PC) qui initie les communications et contrôle l'accès au bus, en lançant une requête à l'esclave (périphérique subordonné tels que les capteurs, les actionneurs et les autres dispositifs connectés), et le périphérique esclave ne peut envoyer des données requises que lorsque le maître passe la requête. En principe, cette méthode ne provoque pas de collisions de données. En effet, seul le maître est responsable du contrôle de la circulation des communications dans le bus. Avec cette méthode maître-esclave, il n'y aura pas de collisions de données et donc pas du temps de récupération après collision.¹⁰

4.2 Cycle de communication

Le maître Profibus organise le cycle de communication sur le bus en envoyant des trames de données aux périphériques esclaves à intervalles réguliers. Chaque esclave a une plage de temps allouée pour transmettre ses données au maître ou recevoir des commandes, ce qui garantit un accès équitable au bus pour tous les périphériques.

¹⁰ <http://www.profibus.jp/tech/profibus.html>

4.3 Accès déterministe

Le protocole de communication du Profibus assure un accès déterministe au bus, ce qui signifie que les périphériques peuvent prédire avec précision le moment où ils seront autorisés à transmettre des données. Cela garantit une communication fiable et synchronisée entre les différents composants du réseau.

4.4 Protocole de communication

Le protocole de communication du Profibus définit les règles et les procédures à suivre pour l'accès au bus, la transmission des données, la détection d'erreurs et d'autres aspects de la communication. Ce protocole garantit une coordination efficace des échanges de données dans le réseau.

4.5 Flexibilité et performances

Le principe d'accès au bus dans un réseau Profibus offre une grande flexibilité en permettant à différents types de périphériques de communiquer de manière efficace et fiable. Les performances élevées du Profibus en termes de vitesse de transmission et de temps de réponse contribuent à l'optimisation des processus industriels.

5. Mode d'accès hybride

Dans une configuration hybride des accès dans un réseau PROFIBUS, différents mécanismes d'accès peuvent être utilisés pour répondre aux besoins spécifiques du réseau. Cette approche combine généralement plusieurs méthodes d'accès telles que l'anneau à jeton, la topologie en ligne (bus) et d'autres méthodes selon les exigences du système.

Par exemple, certains segments du réseau peuvent être configurés en anneau à jeton pour garantir un contrôle précis de l'ordre des transmissions entre les maîtres, tandis que d'autres segments peuvent être configurés en topologie en ligne pour permettre une communication directe entre les esclaves et les maîtres.

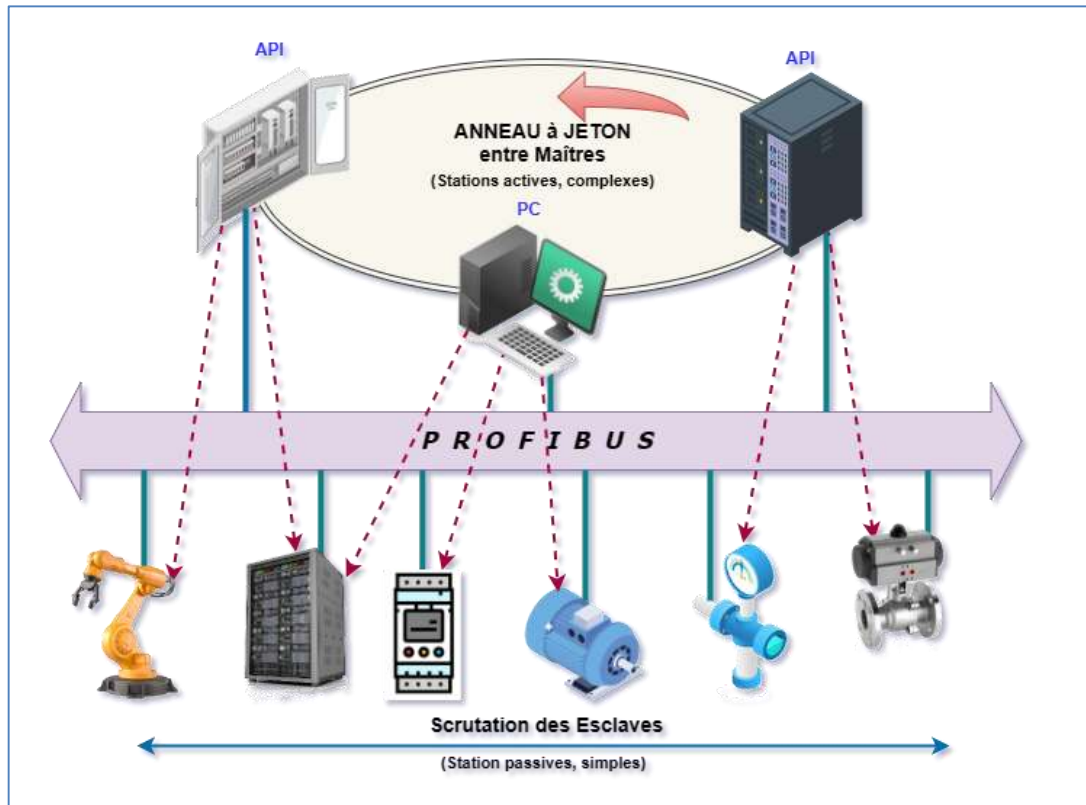


Figure 46. Configuration hybride des accès ProfiBus

La méthode d'accès à PROFIBUS est de nature hybride, c'est-à-dire que la communication inter-maître repose sur la méthode du jeton, tandis que les échanges entre maîtres et esclaves s'effectuent sur le mode maître-esclave. D'un autre côté, la méthode maître-esclave permet au maître détenant le jeton d'accéder à ses esclaves pour leur envoyer des messages ou, à l'inverse, lire leurs messages.

Cette méthode d'accès permet de réaliser une configuration maître-esclave pure, une configuration maître-maître pure (jeton), ou une configuration hybride.

La méthode du jeton, réservée aux échanges entre stations complexes, garantit l'accès de chaque maître au bus, au moins une fois dans un temps donné. En clair, cela signifie que le jeton, télégramme spécial véhiculant un droit de parole de maître en maître, doit être transmis à chaque maître au moins une fois dans une fenêtre temporelle configurable. Si le nœud n'a pas de message à envoyer, il transmet directement le jeton au nœud suivant dans l'anneau logique (Felser, 2012).

Cette configuration hybride des accès dans un réseau PROFIBUS permet de tirer parti des avantages de différents mécanismes d'accès en fonction des besoins spécifiques de chaque partie du réseau, offrant ainsi une solution flexible et optimisée pour assurer une communication efficace et fiable dans un environnement industriel.

6. Formats de trame

6.1 Format de caractères de données ProfiBus DP (Acromag, 2002)

Tous les caractères transmis sur le réseau ProfiBus sont composés de 11 bits au total :

- 1 bit de départ
- 8 bits de données
- 1 bit de parité paire
- 1 bit d'arrêt

Le ProfiBus DP utilise le codage binaire NRZ (Non Return to Zero). Cela signifie que la valeur du signal, soit "0" soit "1", reste inchangée pendant toute la durée du bit.

Lorsqu'aucune donnée n'est transmise, le potentiel sur la ligne est au niveau "1" (état de repos). Un bit de départ fait passer ce potentiel à "0" pour indiquer le début de la transmission d'un caractère.

Tableau 4 Trame de caractère codée NRZ de ProfiBus (Parité paire)

Start	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Parité	Stop
'0'	0	1	2	3	4	5	6	7	Paire	'1'
←	<i>LSB</i>	←	←	←	←	←	←	<i>MSB</i>	←	←

La trame de 11 bits s'applique à tous les octets de données transmis sur le réseau ProfiBus, y compris les octets d'en-tête des trames de télégrammes. Lors de la transmission des messages sur les réseaux ProfiBus, chaque caractère ou octet de données est envoyé selon l'ordre des bits, du bit de poids faible (lsb) au bit de poids fort (msb), comme décrit précédemment.

Pour le transfert de mots composés de plusieurs octets, l'octet de poids fort est transmis en premier, suivi de l'octet de poids faible. Cela correspond au format de stockage Big-Endian ou Motorola.

6.2 Contrôle des erreurs de données ProfiBus

Les réseaux ProfiBus utilisent la méthode de contrôle des erreurs de données par *parité* paire, qui contrôle la façon dont le bit de parité d'une trame de données est défini.

Le ProfiBus utilise la vérification de parité paire pour chaque trame de caractères. Cela signifie que le nombre de bits à 1 dans la partie "données" (8 bits) de chaque trame est compté. Le bit de parité est alors réglé à 0 ou 1 afin d'obtenir un nombre total de bits 1 pair dans la trame complète (11 bits).

Par exemple, si une trame de caractères contient les 8 bits de données "**1100 0011**", le nombre de bits 1 est déjà pair (4 bits de 1). Le bit de parité sera donc réglé à 0 pour maintenir une parité paire sur l'ensemble de la trame. Ce mécanisme de vérification de parité permet de détecter les éventuelles erreurs de transmission des données sur le réseau ProfiBus.

Lors de la transmission d'un message ProfiBus, le bit de parité est calculé et ajouté à la trame de chaque caractère envoyé. Le dispositif récepteur compte alors le nombre de bits 1 dans la partie "données" de la trame reçue. Il compare ce décompte à la valeur du bit de parité transmis.

Si le nombre total de bits 1 ne correspond pas à la parité attendue, le récepteur détecte une erreur dans la transmission. Ainsi, la vérification de parité permet de détecter uniquement les erreurs où un nombre impair de bits ont été ajoutés ou supprimés de la trame pendant la transmission. Ce mécanisme ne peut pas détecter les erreurs où un nombre pair de bits auraient été modifiés.

Remarque : avec une parité paire, si deux bits 1 sont supprimés d'un caractère, le résultat est toujours un nombre pair de bits 1 et aucune erreur de parité ne sera détectée.

6.3 Structure d'une trame ProfiBus

Une trame ProfiBus peut contenir jusqu'à 256 octets de données par nœud par message, plus 11 octets de surcharge. Cette surcharge est appelée l'en-tête de trame. Tous les en-têtes de trame font 11 octets, à l'exception des tramed Data_Exchange qui ont 09 octets d'informations d'en-tête (les octets DSAP et SSAP sont supprimés). Notons que 12 octets de surcharge pour un seul message est beaucoup et cela rend ProfiBus moins efficace pour de petites quantités de données. Cependant, comme jusqu'à 244 octets de données peuvent être transmis par message, et puisque les données de sortie sont envoyées et les données d'entrée reçues dans un seul cycle de trame, cela rend ProfiBus plus efficace lorsque de grandes quantités de données doivent être transférées.

Notons qu'un état de repos d'au moins 33 Tbits (temps de synchronisation en temps de bit) doit être présent avant chaque trame de demande à envoyer, et toutes les données sont transférées sans espace entre les caractères individuels. Tous les échanges de données entre un Maître et un Esclave sont gérés dans l'en-tête de la trame à l'aide de Points d'Accès de Service (SAP). ProfiBus DP utilise les SAP 54 à 62, plus le SAP par défaut (Data_Exchange) (Acromag, 2002).

SD	LE	LEr	SD	SA	FC	DSAP	SSAP	DU	FCS	ED
1 bit	1 bit	1 bit	1 bit	1 bit	1 bit	1 bit	1 bit	var	1 bit	1 bit

Figure 47 Format de l'en-tête de trame

Le tableau suivant présente les abréviations utilisées pour désigner les différents champs de la trame ProfiBus.

Tableau 5 Abréviations de l'en-tête de trame ProfiBus DP et octets de trame

Abréviation	Longueur	Désignation
SD	1 octet	Délimiteur de début (utilisé pour distinguer le format du télégramme).
LE	1 octet	Longueur des données du réseau (DU) + DA + SA + FC + DSAP + SSAP.
LEr	1 octet	Longueur répétée.
DA	1 octet	Adresse de destination - Où ce message est destiné.
SA	1 octet	Adresse source - D'où ce message provient. L'adresse de la station émettrice.
FC	1 octet	Code de fonction (FC = Type/Priorité de ce message). Utilisé pour identifier le type de télégramme, comme les télégrammes de demande, d'accusé de réception ou de réponse (FC=13 signale des données de diagnostic).
DSAP	1 octet	Point d'accès au service de destination (port COM du récepteur). La station de destination utilise cela pour déterminer quel service doit être exécuté.
SSAP	1 octet	Point d'accès au service source (port COM de l'expéditeur).
DU	1 à 32b (ou 1-244b)	Unités de données/Données nettes de 1 à 244 octets.
FCS	1 octet	Séquence de vérification de trame (addition ASIC des octets dans la longueur spécifiée).
ED	1 octet	Délimiteur de fin (toujours 16H).

Il existe cinq principaux formats de messages dans le protocole de bus PROFIBUS-DP (Felsler, 2012), comme le montre la figure 40, sa fonction la plus importante est de réaliser l'échange de données entre le maître DP et l'esclave DP, en communiquant les valeurs de données et les informations de contrôle, etc. La fonction du message SD1 (SD = délimiteur de début) est le diagnostic de l'esclave DP par le maître DP ; que le message SD2 est la transmission de données variables ; que le message SD3 est la transmission de données fixes ; que le message SD4 est la transmission de trames de jeton ; et que le message SC (confirmation courte) est la trame de réponse.

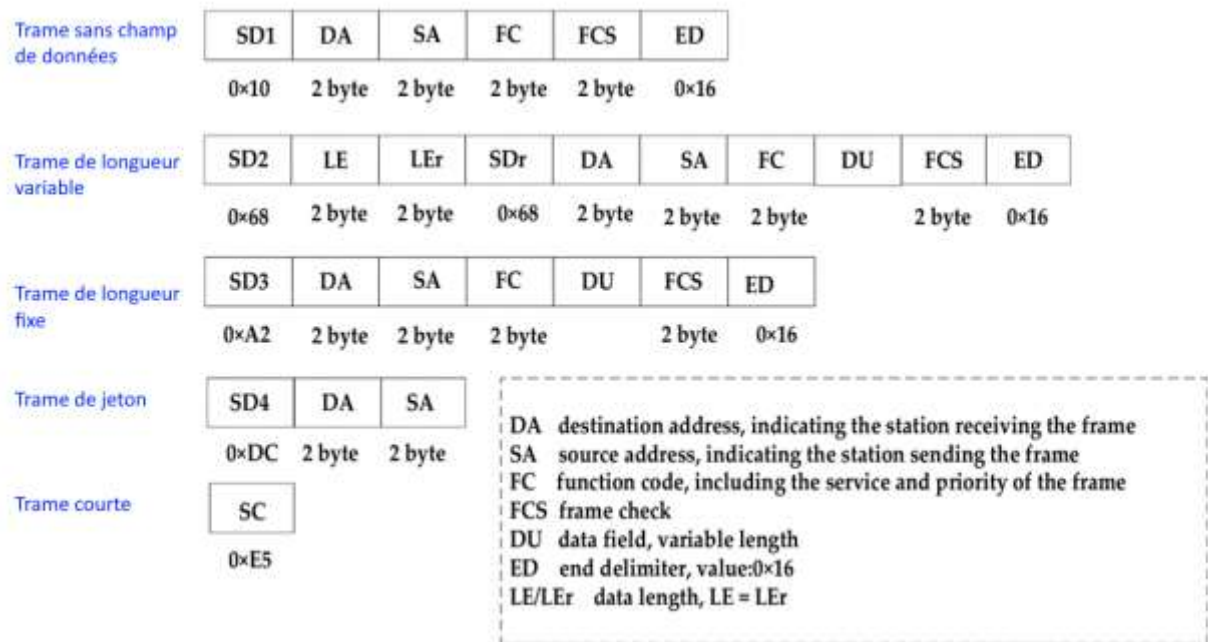


Figure 48 Les cinq type de trames du protocole Profibus-DP

Nous différencions les formats de Trames suivantes¹¹ :

- Trame sans champ de données
- Trame d'une longueur variable de 4 à 249 octets et donc une charge utile dans la plage de 1 à 246 octets
- Trame avec une longueur de données fixe de 8 octets
- Trame de jeton
- Trame courte : pour les réponses courtes et positives, une Trame courte a été défini.

6.4 Séquence d'échange de trames

L'image suivante représente la séquence des trames entre un maître de classe 1 et un esclave DP.

¹¹ <https://www.felser.ch/profibus-manual/telegrammformate.html>

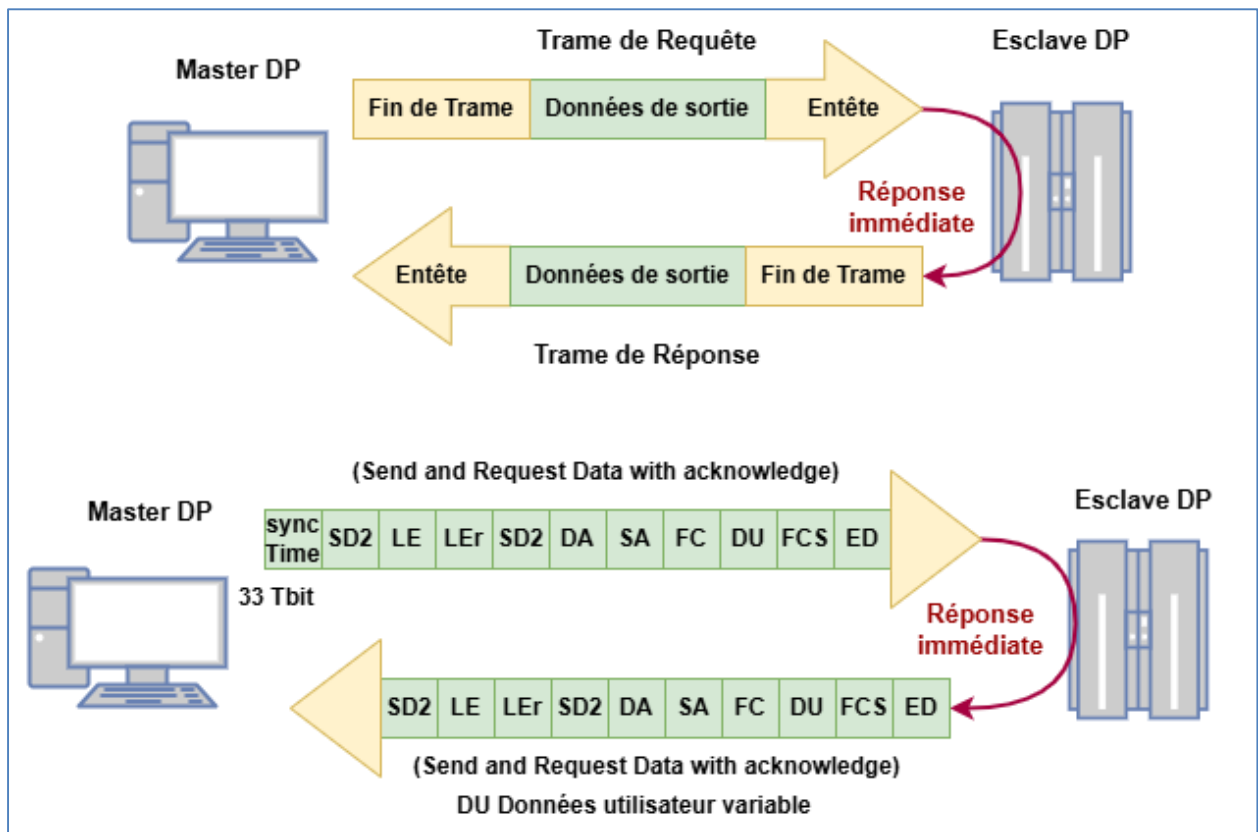


Figure 49 Cycle d'échange Maître-Esclave DP

7. Conclusion

Profibus est sans aucun doute devenu un pilier de l'automatisation industrielle. En fournissant un moyen de communication robuste, efficace et interopérable, il a rendu le processus d'automatisation nettement plus facile et plus efficace.

En conclusion, la compréhension des divers états de fonctionnement des esclaves Profibus DP est essentielle pour garantir le bon fonctionnement et la fiabilité du réseau. Ces états, tels que la mise sous tension, le paramétrage, la configuration E/S et l'échange de données, jouent un rôle crucial dans la performance globale du système Profibus DP. Ainsi, une connaissance approfondie de ces états est indispensable pour les professionnels travaillant avec cette technologie.

Bibliographies

- [1].Acromag. (2002). *INTRODUCTION TO PROFIBUS DP*. 30765 South Wixom Road, P.O. BOX 437, Wixom, MI 48393-7037 U.S.A: ACROMAG INCORPORATED.
- [2].Cook, J. A. (2019). *Controller Area Network (CAN). EECS 461*. Retrieved from ethz.ch
- [3].D. DROMARD, D. S. (2009). *Architecture des Réseaux*. Paris: Pearson Education France.
- [4].Fabrice CAIGNET, L. –C. (n.d.). *Introduction aux Protocoles de communication : Le bus CAN (control Area network)*,. Retrieved from https://homepages.laas.fr/fcaignet/Cours/presentation_bus_CAN.pdf.
- [5].Felser, M. (2012). *PROFIBUS Manual, Ed.1.2.2*. Berlin, Germany: ePubli GmbH.
- [6].Frayssinet, C. (2018, Novembre). *Formation I.S.N*. Retrieved from IREM DE Lyon: https://math.univ-lyon1.fr/irem/Formation_ISN/formation_reseau/reseaux_generalites/generalites.html
- [7].Hinnah F., S. B. (2019). *Manuel AS-Interface: les base pour installer un système AS-i (Edition 2.3)*. ifm electronic. Retrieved from <https://www.ifm.com/mounting/7390566FR.pdf>
- [8].KADIONIK, P. (2001). *LE BUS CAN*. BORDEAUX: ENSEIRB.
- [9].Li, Z. W. (2023). DpGuard: ALightweight Attack Detection Method for an Industrial Bus Network. *Electronics*, 12(5), 1121.
- [10]. M. Di Natale, H. Z. (2012). *Understanding and Using the Controller Area Network Communication Protocol : Theory and Practice*. London: Springer Science &&Business Media.
- [11]. Powell, J. (2015). *Catching the Process Fieldbus: An Introduction to PROFIBUS and PROFINET (2nd ed.)*. Siemens Milltronics Process Instruments Inc.
- [12]. pro, T. (2017, 11 18). *Le Bus CAN*. Retrieved from <https://www.technologuepro.com/>: <https://www.technologuepro.com/cours-systemes-embarques/cours-systemes-embarques-Bus-CAN.htm>
- [13]. SIEMENS. (11/2008). *AS-Interface system, System Manual*. NÜRNBERG - GERMANY: Siemens AG.

- [14]. Simic, M. S. (2019). *New CAN Bus Line Coding Scheme* (Vol. 145). (Y.-W. a. Chen, Ed.) Singapore: Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-13-8566-7_40

Semestre: 6

Unité d'enseignement: UEF 3.2.2

Matière 2: Bus de communication et Réseaux industriels

VHS: 22h30 (Cours: 1h30)

Crédits: 2

Coefficient: 1

Objectifs de l'enseignement:

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.

Connaissances préalables recommandées:

Notions de bas sur la logique booléenne.

Contenu de la matière:

Chapitre 1. Architecture des réseaux (2 Semaines)

- Généralité sur les réseaux
- Classification des réseaux
- Topologies des réseaux
- Protocoles de communication
- Techniques de transmission de données

Chapitre 2. Bus de terrain et réseaux locaux industriels (3 semaines)

- Réseaux locaux industriels
- Objectifs des bus de terrain
- Classification des bus de terrain

Chapitre 3. Bus CAN (Controller Area Network) (3 Semaines)

- Classification des bus CAN.
- Protocoles de communication CAN
- Représentation des trames CAN

Chapitre 4. : Interface actionneurs capteurs (AS-I) (3 semaines)

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

Chapitre 5. Réseaux de terrain ProfiBus (4 semaines)

- Classification des réseaux ProFiBus
- Profibus et modèle OSI (protocoles de communication)
- Principe d'accès au bus dans un réseau profibus

Mode d'évaluation:

Examen: 100%.

Références bibliographiques:

1. Pascal Vignat, « Réseaux locaux industriels - Cours et travaux pratiques », 1999.

2. Jean-François Hérold, Olivier Guillotin, Patrick Anaya, « Informatique industrielle et réseaux », Dunod 2010.
3. Eric DECKE, « Module de cours, Réseaux Locaux Industriels et Bus de Terrain », polycopie.
4. Tanenbaum, Andrew, « Réseaux », Dunod 4e édition 2003.
5. Stéphane Lohier, Dominique Présent, « Transmissions et réseaux », Éditions DUNOD
6. Francis Lepage et al, « Les réseaux locaux industriels », Hermes 1991.
7. Fred Halsal, "Multimedia Communications: Applications, Networks, Protocols and Standards", AddisonWesley, 2001.
8. <http://lysjack.free.fr/jack/RLI.htm>.