HAL
open science

Histoire, état de l'art et perspectives des réseaux de terrain

Jean-Pierre Thomesse

To cite this version:

Jean-Pierre Thomesse. Histoire, état de l'art et perspectives des réseaux de terrain. Proceedings of European Symposium INNOCAP'99, 1999, Grenoble/France, 16 p. inria-00107818

HAL Id: inria-00107818

https://inria.hal.science/inria-00107818v1

Submitted on 19 Oct 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Histoire, état de l'art et perspectives des réseaux de terrain

Jean Pierre Thomesse
LORIA-INPL
ENSEM, 2 Avenue de la forêt de Haye
54516 Vandœuvre lès Nancy
Tél. (+33) (0) 3 83 59 55 76
Fax (+33) (0) 3 83 44 07 63
E-mail thomesse@loria.fr

Résumé
Les réseaux de terrain sont très nombreux, même si les besoins sont relativement similaires dans les différents domaines d'application. Ceci est dû en grande partie à l'histoire qui a conduit à des difficultés et des retards de normalisation. Les solutions techniques ont ainsi été multipliées ces dernières années. Elles mettent en évidence aussi bien au niveau Medium Access Control qu'au niveau Application des principes généraux ou des paradigmes comme centralisé ou distribué, périodique ou apériodique, synchrone ou asynchrone.

Mots-clés
Réseaux de terrain, Profils, Normalisation, Synchronisme, Périodicité, Distribution

1. Introduction

Les réseaux de terrain sont nés il y environ 20 ans. Aucune norme internationale n'existe complètement, même si des normes européennes et américaines ont émergé ces dernières années. La compréhension de la situation actuelle passe par un minimum d'histoire de cette « saga » que nous rappelons brièvement au paragraphe 2 en terminant par l'état de la normalisation. Les principales solutions sont ensuite présentées (§ 4) en nous focalisant sur les principales couches du modèle OSI, après avoir résumé les besoins des applications (§ 3). Les solutions actuelles passent par la définition d'un assez grand nombre de protocoles différents. Nous abordons aussi d'autres aspects comme l'ordonnancement et les langages car ils jouent des rôles importants respectivement pour le respect des contraintes de temps et pour l'obtention de systèmes interopérables. Ces solutions reposent sur des choix de leurs spécifieurs : mécanismes périodiques ou non, solutions centralisées ou non, déterministes ou non, synchronisme ou non, etc. Ces paradigmes sont analysés dans le paragraphe 5 avant d'envisager quelques perspectives.

2. Historique

2.1 Origines

L'histoire des réseaux de terrain démarre avec l'expérimentation du réseau KSU de Brown Boveri à la centrale solaire d'EDF dans les Pyrénées à la fin des années 1970. Puis en 1982 démarre le

groupe de travail qui donnera naissance au réseau FIP devenu WorldFIP (Galara and Thomesse, 1984).
La normalisation à l'IEC démarre en 1985 au sein du comité IEC TC 65/SC65C/WG6 (Gault and Lobert, 1985), en conjonction avec le comité ISA SP50 chargé de définir la norme américaine.
La position américaine était de collaborer étroitement avec le comité IEC de façon à obtenir une unique norme reconnue internationalement et valable pour tout domaine d'application. L'idée était louable, mais démarrant par un appel à propositions, de nombreux systèmes se présentèrent comme candidats. Il était d'usage à l'époque de tenter de définir une norme à partir de systèmes existants ou au moins de prototypes. Souvenons nous de l'origine des normes IEEE 802 qui sont nées de la bataille entre Ethernet et le Token Bus au début des années 1980. C'est ainsi que les protocoles MIL 1553B, Hart et son extension Digital Hart de Rosemount, une proposition de Foxboro, BITBUS d'Intel étaient parmi les candidats. De plus, deux propositions européennes, FIP and PROFIBUS, à cette époque seulement sur le papier, tentaient d'infléchir les comités vers des solutions nouvelles. Il était normal que la convergence soit longue à intervenir. Surtout que toutes ces propositions ne procédaient pas de la même approche.
Par exemple Rosemount défendait l'idée d'un bus à basse vitesse, pouvant utiliser le câblage existant pour le 4-20 mA. Profibus défendait une idée plus proche de celle Mini-MAP que d'un réseau de terrain, pour assurer la communication entre des automates et leurs capteurs et actionneurs sans remise en cause des architectures centralisées connues alors. FIP préconisait un réseau et un système d'exploitation réparti permettant à toutes les stations d'avoir la même vue du système et donc de pouvoir répartir simplement l'application sans trop de contraintes. FIP était à l'époque la seule solution qui préparait l'avènement de l'instrumentation intelligente et des nouvelles architectures que l'on connaît aujourd'hui.

2.2 Normalisations européennes et IEC

Alors comment définir une norme qui satisferait les différents points de vue ? C'était le défi lancé aux comités. Les premières années ont consisté à expliquer les concepts, en essayant de convaincre des partenaires et concurrents qui avaient leurs propres solutions à défendre et à promouvoir. Aucune solution n'émergea des cinq premières années de travail.
En Europe les normes nationales étaient votées pendant toutes ces années : P-Net, (DS 21906) en 1990 au Danemark (DS, 1990), Profibus (DIN 19245-1 to 19245-3) en 1990 en Allemagne (DIN, 1990) et FIP, (AFNOR, 1989; Thomesse, 1993) en France. Différentes options étaient prises dans chacun de ces cas.
La première norme internationale apparaît en 1993, la couche physique (IS 1158.2) (IEC, 1993), qui était très proche de la couche physique de la norme française. La situation était bloquée pour les couches liaison et application.
A ce stade des rappels historiques, il est bon d'analyser comment les solutions de Profibus et de WorldFIP auraient pu converger.
Quand une station maître de Profibus a le jeton elle scrute ses capteurs et ses actionneurs. Il était alors facile d'appliquer à la station maître les mêmes prérogatives qu'à l'arbitre de bus de WorldFIP. Par ailleurs, l'arbitre de bus devant pouvoir être redondé, il était facile de choisir la technique de jeton de Profibus pour ce faire. Il était bien sûr nécessaire d'harmoniser les protocoles, mais en 1988 et 1989, quand cette solution fut proposée, les développements de

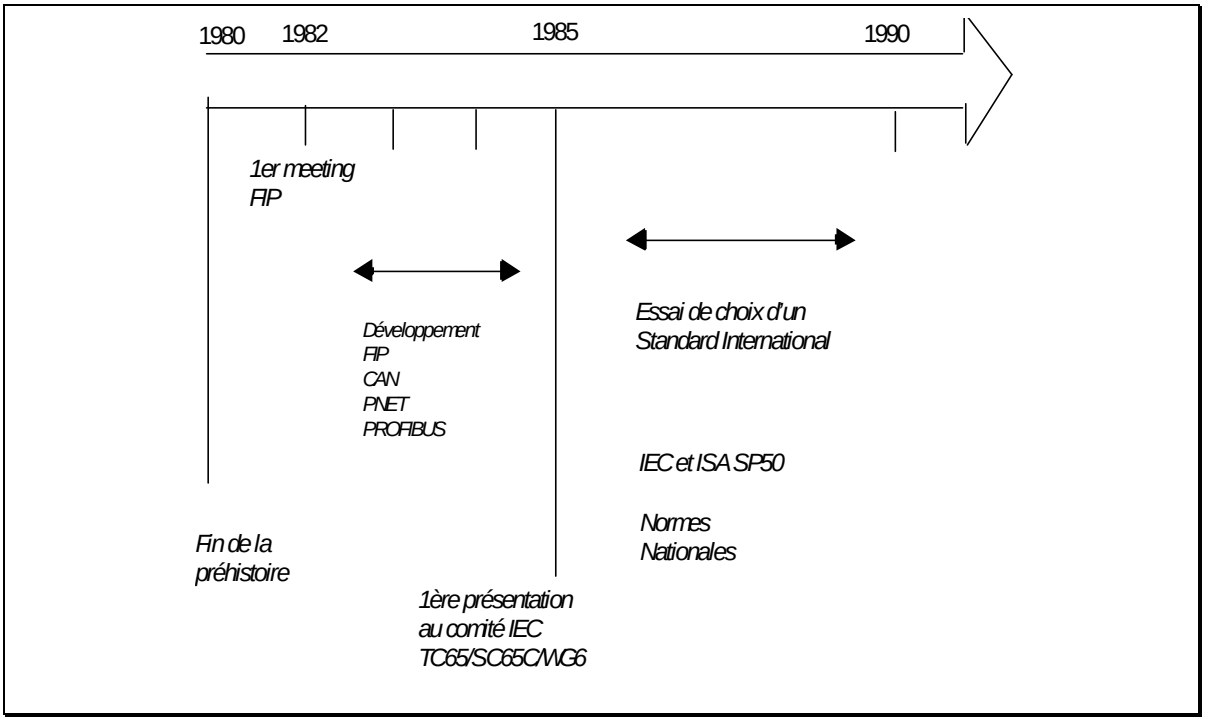

Fig. 1 : Histoire de la normalisation-1

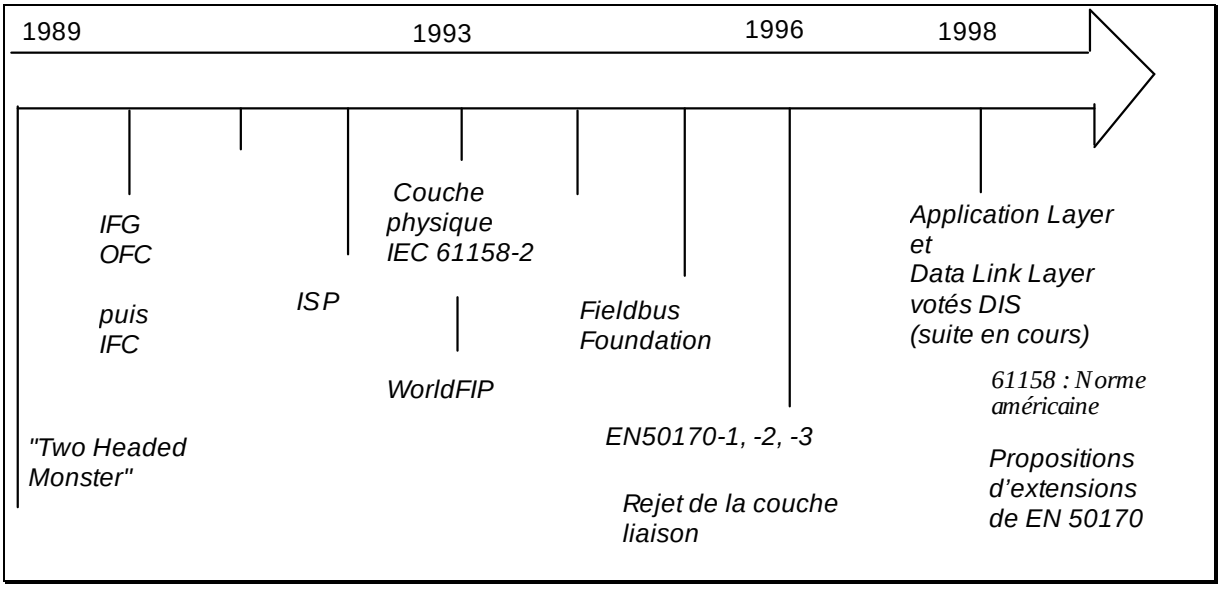

Fig. 2 : Histoire de la normalisation-2

chacun de ces deux réseaux étaient encore à un stade où tout était possible. Les circuits intégrés n'étaient pas fondus. Mais cette solution peut-être trop simple ou simpliste fut rejetée par les principaux intéressés, certains pensant que leur solution l'emporterait.

C'est ainsi qu'en 1989, une solution appelée « Two Headed Monster » était proposée par un groupe de différents experts. Cette solution consistait en une seule norme de service et deux normes de protocoles, dans la droite ligne des normes IEEE 802. Cette proposition fut acceptée par les américains, mais pas par l'IEC. Sans convergence obtenue, chaque solution tentait alors de

l'emporter. Pour défendre les différentes solutions, des consortiums se constituent, des concurrents se rapprochent, le lobbying devint prépondérant.
C'est ainsi qu'ont été créés puis dissous plusieurs consortiums, l'OFC (Open Fieldbus Consortium), l'IFG (International Fieldbus Group), puis l'IFC (International Fieldbus Consortium) et l'ISP (Interoperable System Project). Sans aucun succès tangible.
Finalement fut créé le consortium « Fieldbus Foundation » en 1994 avec comme premier objectif de définir une solution adaptée aux processus continus lents. C'est ainsi que le réseau dit « Fieldbus Foundation » à faible débit (31,25kbit/s) est né.
Il fallut que quelques experts (sous l'animation de Tom Phinney de Honeywell) décident d'écrire une norme internationale qui soit compatible avec Profibus et WorldFIP pour que les premières versions des normes 1158-3 et 1158-4 voient le jour (Leviti, 1995).
Le premier vote en automne 1996 conduisait à rejeter la proposition même si presque tous les pays l'avaient acceptée. Un appel sur les conclusions conduisaient plus ou moins à annuler le vote et à le reprendre en même temps que celui de la couche application. C'est ainsi qu'après de nombreuses péripéties et recours, le vote pour l'obtention d'un DIS (Draft International Standard) fut finalement acquis en mars 1998. Les normes 1158-3, -4, -5 et -6 sont actuellement à l'état de DIS. Le vote final de la norme internationale (IEC, 1998a; IEC, 1998b; IEC, 1998c; IEC, 1998d)) ne fut toutefois pas obtenu à l'automne 1998. D'autres procédures sont en cours pour réétudier la validité des votes de certains pays.

2.3 Autres projets

Une différentiation est apparue ces dernières années entre réseaux de terrain, réseaux de capteurs-actionneurs ou « sensorbus », et les réseaux dits « devicebus ». Elle est assez artificielle, car tous sont prévus pour interconnecter des capteurs et actionneurs aux systèmes de commande. Les différences tiennent actuellement à deux critères, la taille maximale des trames transmises et la distance couverte par le réseau.
En ce qui concerne les réseaux de capteurs-actionneurs (on parle aussi de « sensorbus ») dont le représentant type est ASI (Actuator and Sensor Interface, (ASI, 1996)), la taille des trames ne permet que de transporter quatre bits d'information utile ; il est donc bien adapté à la connexion de capteurs ou actionneurs tout ou rien du type « interrupteurs ». ASI est aussi annoncé pour pouvoir connecter des équipements analogiques, mais ce devrait être l'exception, car le protocole n'est vraiment pas adapté à ce genre de cas, puisqu'une mesure de capteur simple devra être fragmentée par « paquets » de quatre bits pour être transmise. On pourrait penser que ce genre de réseau pourrait aussi être adapté à certaines applications domotiques.
Par exemple, ASI garantit une scrutation périodique de toutes les stations à une fréquence minimale de 200 Hz (temps de cycle maximal de 5 ms). On fait l'hypothèse que des qualités comme la cohérence des données est satisfaite avec cette fréquence. La scrutation est centralisée ce qui garantit la fréquence en l'absence de défaillances.
En ce qui concerne les réseaux dits « devicebus », ils sont prévus pour couvrir de courtes distances. On pourrait parler de réseaux de machines. C'est sous l'impulsion d'offreurs comme Honeywell avec SDS (Smart Distributed System, (SDS, 1997)), ou Allen-Bradley avec DeviceNet (DeviceNet, 1996) que ce concept est né. Ces deux réseaux sont en fait basés sur le réseau CAN (Controller Area Network (ISO, 1995)) défini à l'origine pour les systèmes embarqués dans les automobiles.

Par exemple, si on considère tous les réseaux basés sur CAN, une contrainte est introduite par son protocole de Medium Access Control. Le temps de transmission d'un bit doit être au moins égal à 2 fois le temps de propagation. La raison en est l'arbitrage bit par bit. Toutes les stations doivent avoir reçu chaque bit émis simultanément (c'est à dire pendant le temps de propagation) avant de décider si elles continuent à émettre ou non.
Ceci explique qu'il soit réservé à de courtes distances. Avec par exemple, un délai de propagation de 5 ns par mètre, un réseau de 1000 m impose un délai de propagation de 5 microsecondes, donc un débit maximum de 100 kbit/s.
Fonctionnellement parlant ce sont toujours des réseaux de terrain. Les différences tiennent plus à d'autres critères comme les distances, les coûts de connexion, le type d'équipements pour lesquels le réseau a été conçu, qu'aux aspects services et fonctionnalités fournies.
D'autres réseaux de terrain peuvent très bien être caractérisés de « devicebus » sur ces mêmes critères (cf. DWF, (Device WorldFIP (AFNOR, 1996)) qui est un profil simplifié de WorldFIP au coût de connexion réduit et compatible à la norme EN 50170 (CENELEC, 1996)).

2.4 Etat actuel

Plus de cinquante réseaux sont actuellement disponibles sur le marché. Des normes européennes existent ou sont en passe d'être acceptées.
La norme EN 50170 (CENELEC, 1996) inclut P-Net, PROFIBUS, WorldFIP. FF (Fieldbus Foundation) (BSI, 1996) et ControlNet (BSI, 1998) sont candidats à des ajouts à cette norme.
La norme EN 50254 (CENELEC, 1998) inclut Device WorldFIP, Profibus-DP, Interbus.
Le projet ENV 13321 inclut Bacnet, Profibus, WorldFIP.
Une ENV devrait inclure BatiBus, EIBUS, EHS, LON (LON, 1995) pour les applications domotiques.
Une autre ENV est aussi en préparation pour les autobus, incluant WorldFIP et CAN déjà défini par la norme ISO 11898.
En plus de la couche physique IEC 61158-2, les différents volumes de IEC 61158 devraient donner naissance à une norme générale pour les réseaux de terrain. Ils sont actuellement classés comme rapports techniques, mais sont reconnus par l'ANSI comme norme américaine.
SDS, DeviceNet, Seriplex sont eux aussi candidats à la normalisation.

3. Besoins et contraintes

Les réseaux de terrain ont souvent été considérés comme un simple moyen de simplification du câblage. Mais en fait ils sont bien plus que cela, en particulier, ce sont des réseaux temps réel qui constituent l'épine dorsale des applications temps réel réparties et constituent donc la base des systèmes d'exploitation temps réel répartis. A ce titre ils doivent fournir les services facilitant la distribution des applications, celle des données, des traitements et du contrôle des traitements et des accès aux données. Ils doivent aussi fournir la qualité de service nécessaire pour satisfaire les contraintes de temps et de sûreté de fonctionnement imposées par l'application. De plus ils doivent permettre la gestion générale des équipements raccordés, leur maintenance et la gestion technique de l'installation.

Les besoins en terme de communications peuvent essentiellement être exprimés de deux points de vue, celui de l'environnement dans lequel sera placé le réseau, distance, perturbations potentielles, nécessité de téléalimentation, etc. et celui des processus d'application qui

communiquent, coopèrent et se synchronisent par le réseau. On pourrait ajouter un troisième point de vue qui est celui de l'exploitant qui configure, gère, maintient et qui doit donc disposer d'outils pour ce faire. Ces trois points de vue correspondent à trois « interfaces » fournies par le modèle OSI : la couche application, le support et la couche physique et les fonctions de gestion de réseau et de système.

3.1 Besoins applicatifs

3.1.1 Services temps réel

Les processus d'application qui composent une application coopèrent par des échanges de données et des demandes de services divers. Ces échanges sont directement issus du mode de conception des applications. Les processus coopèrent par flux de données et/ou flux de contrôle.

3.1.2 Contraintes temporelles

De nombreux types de contraintes temporelles devraient pouvoir être spécifiées comme la périodicité, une gigue acceptable, des temps de réponse entre un événement « cause » et un événement « effet », la durée de validité d'une information, la cohérence temporelle d'opérations, (Dasarathy, 1985), (Vega, 1996). Elles doivent pouvoir être spécifiées statiquement ou dynamiquement selon les cas d'applications. Les choix d'architecture opérationnelle jouent un rôle important dans la satisfaction des contraintes (Simonot, 1995).

3.1.3 Gestion de réseau et de système

D'autres besoins que les services temps réel sont identifiés pour la configuration des équipements et plus généralement du système, pour leur observation, leur maintenance et leur gestion technique. Ces besoins ne correspondent pas forcément à des communications temps réel et nécessitent souvent des échanges de données plus volumineux que les échanges temps réel.

3.1.4 Définition des objets

En ce qui concerne la définition des objets de tous types, deux classes de réseaux de terrain peuvent être identifiés, ceux qui offrent des services de création et destruction dynamiques d'objets et ceux qui n'offrent ces services que de façon statique à la configuration des équipements et de l'installation. La plupart permettent certaines opérations dynamiques.

3.1.5 Interopérabilité

L'interopérabilité est une propriété d'un équipement qui exprime la capacité de l'équipement à coopérer avec les autres du système pour une application donnée. Elle se décline en différents types (Benkhellat, 1992 et 1995).
L'interchangeabilité est une propriété entre deux ou plusieurs équipements de fonctionnalités similaires, par exemple des capteurs de pression, des variateurs de vitesse. Elle exprime que l'on peut remplacer un équipement d'un constructeur par un autre sans avoir à modifier les autres équipements du système.

3.2 Besoins « physiques »

Une application impose un débit minimum sur une certaine distance dans un environnement donné. Ces caractéristiques sont en fait des contraintes pour le choix du réseau. Mais comme ces

contraintes varient avec la distribution choisie des processus d'application sur les sites, si un réseau est imposé, on peut en général résoudre le problème par des considérations architecturales (découpage d'un système en sous-systèmes autour de réseaux spécifiques, découpage d'un réseau en segments, choix d'architectures, de répartition...).
Les conditions environnementales imposent parfois le câblage, la sécurité intrinsèque est parfois requise, la téléalimentation des équipements également. Ces contraintes sont prises en charge par le choix du câblage, le choix d'une topologie et le choix d'un protocole de couche physique. Nous ne détaillerons pas plus ce point.

3.3 Autres besoins

De nombreux autres besoins non techniques ou des contraintes sont aussi exprimés dans un cahier des charges d'une application. Nous ne faisons ici que les évoquer. Ces contraintes relèvent des aspects économiques, de la nécessité de compatibilité avec des systèmes existants, de décisions stratégiques de l'entreprise. Mais d'autres besoins se traduisent par des contraintes techniques comme la sûreté de fonctionnement au travers de la disponibilité ou de la fiabilité qui peut conduire à des architectures redondantes, des besoins en performances qui se traduisent par un débit minimal, etc.

4. Types de solutions

L'obtention d'une solution passe par l'usage de techniques et d'algorithmes qui relèvent d'une part des systèmes exécutifs (protocoles, ordonnancement) et d'autre part des techniques de développement d'application et en particulier des langages.

4.1 Services et Protocoles

Nous analysons brièvement ici les types de services et de protocoles dans les couches MAC et Application ainsi que pour la gestion de réseau. Pour plus de détail se référer à (Thomesse, 1998 et 1999)

4.1.1 MAC et LLC

Les protocoles MAC des réseaux de terrain sont de différents types.

4.1.1.1 Scrutation.

Ces MAC sont centralisés, une station maître distribue les droits de parole par envoi explicite de messages. Les techniques de scrutation sont elles-mêmes de deux types, scrutation par adressage des stations (Interbus), scrutation par désignation des objets indépendamment de leur localisation sur les stations (WorldFIP). Ces techniques garantissent un certain déterminisme de l'instant d'obtention du droit de parole en particulier pour le trafic périodique, en l'absence d'erreurs et de défaillance.

4.1.1.2 Multiplexage temporel (TDMA, Time Division Multiple Access)

La technique TDMA consiste à allouer périodiquement un temps de parole à chaque station adressée implicitement par un instant de début indiqué localement par l'horloge de la station. Ces techniques sont mises en œuvre avec un recalage périodique des horloges qui peut être centralisé (SERCOS, (DIN, 1995)) ou distribué (TTP, Time Triggered Protocol (Kopetz, 1993)).

4.1.1.3 Technique de jeton

Les techniques à jeton sont à l'origine issues de la scrutation en supprimant la notion de station maître. Le jeton matérialise le droit de parole. La station qui possède le jeton peut émettre pendant un délai donné maximum et doit passer le jeton à la suivante. Dans les réseaux de terrain, cette technique n'est utilisée que par Profibus en conjonction avec une technique de scrutation. Le jeton est passée entre des stations dites « maîtres ». Chaque station maître peut alors scruter ses stations « esclaves » tant qu'elle détient le jeton. Ces techniques garantissent un certain déterminisme de l'obtention du droit de parole en l'absence d'erreurs et de défaillance. Les gigues ne sont pas maîtrisées si les temps de détention du jeton sont variables.

4.1.1.4 Type CSMA

Les protocoles MAC du type CSMA sont basés sur la détection de silence et celle de collision éventuelle. Une technique dite CSMA-CA (Collision Avoidance) ou BA (Bitwise Arbitration) permet toujours à une trame (la plus prioritaire) d'être émise complètement en cas de collision. Cette technique est issue de CAN (Paret, 1995), (Lawrenz, 1997) et est utilisée par DeviceNet, SDS (SDS, 1997), CANopen, et plusieurs réseaux domotiques. D'autres variantes pour résoudre les collisions de façon déterministe ont été proposées, (Le Lann et Rivierre, 1994).

4.1.2 Application

Les services et protocoles de couche application sont au premier abord très différents, pourtant seules deux grandes classes de réseaux peuvent être identifiés, ceux qui n'offrent que des services d'échanges de valeurs d'objets (entiers, réels, booléens, etc.) et ceux qui offrent des services sur des objets plus complexes comme les tâches, les événements, les programmes, etc. Ces derniers s'appuient souvent sur des concepts issus de MMS (Manufacturing Message Specification). On distingue souvent les services de type client-serveur et ceux du type producteur(s)-consommateur(s). Des extensions ont été étudiées et sont toujours un sujet de préoccupation, en particulier pour définir des coopérations multipoints et pour y intégrer des contraintes de temps (Elloy, 1995), (Akazan, 1995).

4.1.3 Gestion de réseau

La gestion de réseau selon les normes OSI a plusieurs rôles, entre autres la configuration, la gestion des fautes, la gestion des performances, la gestion de la sécurité. La gestion de réseau inclut aussi de plus en plus la gestion des processus d'application inclus sur un équipement. Les solutions passent par la définition normalisée de tous les objets « visibles par le réseau » et par les services et protocoles qui permettent d'y accéder. Ces objets sont soit ceux qui relèvent strictement du réseau et des protocoles du système de communication, soit ceux qui relèvent des processus d'application, à savoir les « functions blocks », les modes de marche, les caractéristiques structurelles et de performances des équipements, toutes informations relevant des normes d'accompagnement. Un point délicat est ici de spécifier les comportements temporels. Des modèles doivent être choisis, par exemple des automates et la logique temporelle (Alur, 1991).

4.1.4 Profils ou normes d'accompagnement ou guides d'interopérabilité

Le terme « norme d'accompagnement » est né après la définition de MMS, du besoin de définir précisément les équipements raccordés de façon à construire leur interopérabilité. Les normes

d'accompagnement spécifient les divers objets accessibles sur les équipements par les services de la couche application et la gestion de réseau. Elles sont aussi appelées « profils », « guides d'interopérabilité » ou parfois (et improprement) « couche 8 » par référence aux 7 couches du modèle OSI. Elles font pourtant partie intégralement de la couche 7 « application ». Le terme « profil » peut avoir plusieurs significations; il désigne parfois la pile de protocoles du système de communication ou aussi l'ensemble constitué de la pile de communication et des objets d'un équipement donné. On parle ainsi de profil « capteur de pression », « variateur de vitesse », etc. pour un réseau donné.

C'est sur ce point que portent aujourd'hui la plupart des travaux internationaux dans les consortiums, les groupes de travail, les projets européens et les comités techniques des organismes de normalisation. Ces travaux devraient contribuer à améliorer la construction de l'interopérabilité. Les normes IEC 61499 (IEC, 1997), IEC 61131, les normes STEP / EXPRESS sont prises en compte, testées et doivent être validées. Le projet NOAH joue un rôle important en Europe pour définir un modèle général des équipements indépendamment des réseaux sous-jacents et une méthode de conception des applications permettant des validations avant implantation.

4.2 Ordonnancement

L'ordonnancement est à la base des solutions pour satisfaire les contraintes de temps, que ce soit des tâches sur un ou plusieurs processeurs donnés, ou des messages sur un réseau, (voir par exemple (Cardeira, 1995) pour une synthèse). Dans les réseaux de terrain, l'ordonnancement des messages est essentiellement régi par le protocole de Medium Access Control. Toutefois certains proposent une couche réseau, voire une couche transport, l'ordonnancement final des messages est alors obtenu par une combinaison des ordonnancements dans ces diverses couches.

L'ordonnancement des tâches sur chaque station est local. Des ordonnancements globaux sont très rarement rencontrés car plus complexes à mettre en œuvre. Ils nécessitent la connaissance d'un état global impossible à connaître exactement.

Diverses techniques d'ordonnancement ont été définies depuis fort longtemps pour les tâches (aussi bien informatiques que dans un atelier). Certaines de ces techniques sont applicables à l'ordonnancement des messages et peuvent être implantées au dessus du protocole MAC.

Une solution idéale serait de disposer d'un ordonnancement temps réel conjoint des tâches et des messages. Cet ordonnancement reste à être inventé.

On peut schématiser grossièrement les diverses solutions possibles entre deux solutions extrêmes l'une complètement statique et l'autre complètement dynamique. La première considère un système réparti dans lequel l'ordonnancement des messages est complètement défini statiquement et l'ordonnancement des tâches complètement piloté par celui des messages. La seconde considère des tâches ordonnancées localement sans coordination entre sites autre que par les échanges de données ou de services entre tâches, sans aucun ordonnancement a priori des messages autre que celui défini par le protocole MAC.

4.3 Langages

Les langages représentent un point important pour l'intégration, l'interopérabilité et plus généralement la conception des applications réparties. Les travaux actuels en relation avec la définition des profils portent sur les langages orientés objets pour la définition standardisée des équipements, de façon à ce que leur spécification soit intégrée automatiquement dans les

applications. On parle ainsi de EDDL (Electronic Device Description Language). DDL issu du réseau Hart en est un des premiers exemples. La définition d'un tel langage est un des objectifs du projet NOAH (Network Oriented Application Harmonisation), projet européen N° EP 26951 (NOAH, 1998). Sur ce sujet il faut aussi mentionner les langages dits de configuration, de description d'architectures (Kogut, 1995). Enfin dans un autre domaine, nous mentionnerons l'impact d'Internet. Ses technologies comme HTTP et HTML, comme Java, sont maintenant étudiées pour pouvoir être utilisées dans les réseaux de terrain. On peut en effet considérer que la gestion de système pourrait faite au travers d'HTTP et du Web, si chaque équipement était modélisé au travers de pages HTML.

5. Paradigmes

Nous avons vu dans le paragraphe précédent une grande variété de choix de solutions. Nous analysons ici brièvement les principaux paradigmes qui sont à la base de ces solutions.

5.1 Centralisé vs distribué

Ces deux qualificatifs sont souvent utilisés pour caractériser les protocoles de Medium Access Control. Mais ils peuvent l'être aussi pour caractériser les applications et les principes de base de la messagerie. A ce sujet il faut distinguer la distribution des traitements de celle des données et de celle du contrôle. Il faut « déconnecter » les deux aspects (MAC et Application).
Un modèle de coopération client-serveur permet l'accès à distance à une ressource et aux services associés mais cette ressource est localisée sur un seul site. L'accès à distance à plusieurs ressources réparties nécessite d'autres modèles de coopération et d'autres protocoles.

5.2 Synchrone vs asynchrone

Les termes « synchrone » et « asynchrone » ont de nombreux sens selon le contexte d'utilisation. Ils s'appliquent aussi bien au niveau de la couche physique, qu'au niveau des systèmes d'exploitation et des processus d'application, voire au niveau des langages et sont parfois abusivement utilisés à la place de synchronisé ou de non synchronisé.

5.2.1 Transmission synchrone vs asynchrone

Les transmissions physiques sont de l'une ou l'autre nature, mais nous n'étudions pas ce point ici.

5.2.2 Systèmes synchrones vs asynchrones

5.2.2.1 Systèmes synchrones

Les systèmes synchrones (Nussbaumer, 1987) sont caractérisés par la gestion périodique d'une tâche. Les entrées sont scrutées cycliquement, une image en mémoire du processus physique est rafraîchie à fréquence fixe, la tâche de commande détecte les changements d'état (occurrences d'événements) de certaines entrées, puis calcule les commandes selon la loi de commande en fonction des consignes fournies, enfin la tâche applique les commandes aux actionneurs par les dispositifs de sortie.
Si les entrées ou les sorties sont acheminées par un réseau, il est évidemment souhaitable que les protocoles du réseau permettent le rafraîchissement périodique des entrées et des commandes à la fréquence des tâches.

5.2.2.2 Systèmes asynchrones

Les systèmes asynchrones sont caractérisés par le fait que plusieurs tâches coopérantes coexistent dans le système et sont concurrentes pour être exécutées sur un ou plusieurs processeurs. Ils sont conçus pour réagir à des événements extérieurs survenant aléatoirement ; ils sont qualifiés d' asynchrones, ce sont les systèmes d' exploitation multitâches et temps réel.
Les tâches sont soit périodiques soit apériodiques. Ce qui signifie qu'elles sont déclenchées à des moments connus ou à des moments inconnus à la conception et à l'implantation de l'application.
Les tâches périodiques sont déclenchées à des instants prédéterminés, les autres sur des occurrences d'événements dont il n'est pas possible de connaître les instants a priori. Les tâches sont alors exécutées selon les règles de l' ordonnanceur (en fonction de priorités statiques ou dynamiques, d' un délai, d'une date...).
Le réseau doit alors être capable de transporter les événements et les données nécessaires à l'exécution des tâches et les sorties, tout cela à des moments imprévus, et autant que possible en respectant des contraintes de temps comme par exemple, des temps de réponse.
Les échanges déclenchés par de telles tâches le seront donc de façon aléatoire et on ne peut faire trop d' hypothèses pour en déduire des protocoles particuliers ou des configurations spécifiques du réseau.

5.2.2.3 Synchrone ou synchronisé

Le terme synchrone est parfois utilisé dans des normes ou des spécifications pour qualifier des phénomènes synchronisés sur un événement en provenance du réseau. Le terme « synchronisé » serait plus correct. Par exemple certains statuts de rafraîchissement ou de promptitude de WorldFIP et les statuts homologues du projet de norme IEC 61158 sont qualifiés de synchrone car le délai dans lequel l'action de production ou de réception doit se dérouler débute par la réception d'une variable dite de synchronisation.
Le terme « asynchrone » désigne alors un phénomène sur une station qui n'est pas synchronisé avec un événement du réseau. Des statuts analogues aux précédents sont dits asynchrones quand le début du délai est un événement local indépendant du réseau.
Cette confusion est poussée à l'extrême dans certains systèmes. Par exemple le système MidART (Shen, 1998) définit comme synchrone une écriture (une émission) déclenchée par un processus d'application et comme asynchrone une émission déclenchée périodiquement. En fait cette dernière est synchrone et asynchronisée par rapport au processus de production, alors que la première est synchronisée avec le processus de production.

5.2.3 Systèmes « event driven » et « time triggered »

Les systèmes « event driven » sont les systèmes réactifs pilotés par les événements par opposition aux systèmes réactifs dits « time triggered » pour lesquels le temps pilote leur déroulement (Kopetz, 1990).
On retrouve ici respectivement les systèmes asynchrones et synchrones.

5.2.4 Communication entre processus

Cette communication est qualifiée de synchrone quand les deux processus doivent être arrivés simultanément en un point donné pour s'échanger des données. On appelle couramment cette communication le « rendez-vous ».

La communication est asynchrone quand les processus communiquent sans être présents en un point donné, c'est à dire par partage de mémoire commune ou par messages et files d'attente.

5.2.5 Langages

On pourrait aussi analyser les langages synchrones vis à vis des langages asynchrones mais ce n'est pas le lieu ici.

5.3 Déterminisme vs indéterminisme

Le déterminisme n'existe pas en général si on n'a pas précisé les hypothèses en particulier de bon fonctionnement, de délai supposé, etc. Toutefois on peut souvent lire des phrases telles que « tel protocole est déterministe ». Au début des années 1980, la compétition entre Ethernet et les techniques de jeton ont donné lieu à de nombreux débats sur ce point précis.
Ce débat est souvent rencontré dans les réseaux de terrain et surtout dans les protocoles MAC (cf. § 4.1 ci-dessus).
Mais ce paradigme doit s'appliquer d'abord au comportement des applications qui doit être déterministe, quelles que soient les conditions environnementales.

5.4 Périodique vs apériodique

Ces qualificatifs caractérisent les processus d'application, les trafics, les protocoles MAC. Les processus d'application véritablement temps réel dans les réseaux de terrain sont le plus souvent périodiques car issus de la théorie des systèmes échantillonnés. C'est ce qui a conduit à définir les premiers protocoles de telle sorte que les trafics soient cadencés au même rythme que les processus d'application. Les choix de répartition des processus d'application sur les équipements influencent grandement la nature des trafics induits.

5.5 Statique vs dynamique

Ces caractéristiques caractérisent la façon de distribuer le droit de parole, la définition des objets dans les stations, l'ordonnancement des tâches et des trafics, les systèmes d'exploitation voire la définition des nœuds eux-mêmes.
Sur chaque équipement un système (même réduit) gère les objets informatiques de l'application, les tâches, les variables ou les structures de données, les fichiers etc. Ces objets peuvent être définis par construction ou être définis « en ligne » et en temps réel, selon les besoins. Si aucune opération dynamique n'est possible, les objets échangés sur le réseau sont alors parfaitement répertoriés par construction des équipements et on peut alors définir statiquement les échanges et les trafics. Par contre, si des objets peuvent être créés dynamiquement, non seulement certains échanges ne peuvent être prédéfinis, mais il faudra aussi acheminer par le réseau les messages de demande de création, de destruction.

6. Perspectives

Les réseaux de terrain sont très nombreux aujourd'hui pour diverses raisons, retard de normalisation, besoins analysés différemment par secteurs industriels et conduisant à des solutions différentes, concurrence, etc.
Si les réseaux de terrain sont aussi nombreux aujourd'hui on peut penser que leur nombre ira en diminuant pour des raisons simplement économiques.

Les perspectives des réseaux de terrain peuvent être analysées selon différents points de vue, architecture, services et protocoles, technologies utilisées, normalisation, économique, mais en fonction des évolutions visibles ou prévisibles dans différents domaines.

- Impact de l'industrie automobile
  L'impact du réseau CAN est déjà visible. L'industrie automobile consommant de plus en plus de circuits CAN, leur coût diminue et les réseaux les utilisant deviennent de moins en moins onéreux. Leur développement dans d'autres applications est donc naturel.
- Impact de l'industrie des télécoms et du multimédia
  Les réseaux à haut débits se développent, avec de nouveaux protocoles comme ATM, qui permettent le transport de la parole, des images, de la vidéo. Dans le monde industriel, les salles de contrôle sont équipées d'écrans de supervision, de télévision interne, de téléphones, etc. Il n'est pas impensable d'imaginer que les réseaux de terrain futurs s'appuient sur ces technologies pour servir de support unique à ces différents canaux. De plus certaines similitudes apparaissent (en particulier en ce qui concerne les contraintes de temps) entre les applications multimédia et les applications industrielles. On peut penser à une convergence des solutions au moins fonctionnellement, même si en termes de performances, de débits, les ordres de grandeurs sont différents.
- Impact des technologies Internet
  Les technologies issues de l'Internet comme le langage Java, le Web commencent à être envisagées dans le monde industriel et dans les réseaux de terrain.
- Impact des instruments intelligents
  Les instruments intelligents se sont développés essentiellement à partir des progrès de la micro-électronique, des systèmes de communication numériques et des réseaux de terrain. On peut imaginer que ces instruments posséderont de plus en plus de fonctions locales, et que leurs besoins en termes de trafics induits évolueront, comme peut-être la présence de plus de trafic de type apériodique au détriment du trafic périodique. La distribution des applications devra aussi certainement être réanalysée pour tenir compte de l'existence de plus en plus de fonctions standards liées au développement des normes d'accompagnement.
- Impact des « firewire »
  Les réseaux de type « Firewire » à très hauts débits se développent pour l'intégration des matériels audiovisuels. Si le coût de raccordement est encore élevé, il devrait sensiblement baisser et l'usage de ces réseaux se développer comme réseau de terrain.

7. Conclusion

Cette (trop) brève présentation de l'état de l'art des réseaux de terrain a tenté de donner une image de la situation actuelle et de mettre en exergue quelques problèmes ouverts et perspectives.
La situation actuelle peut être résumée en quelques mots, plus de cinquante réseaux de terrain et variantes, plusieurs normes européennes ou ISO et un projet de norme IEC. Les normes européennes contiennent plusieurs profils de communication incompatibles entre eux. Une convergence semble se dessiner au dessus de la communication stricto-sensu au travers des modèles d'équipements, des langages et des normes d'accompagnement. Ceci est aussi vrai dans le domaine des réseaux industriels que dans celui de la domotique.

Les solutions actuelles reposent pour beaucoup sur des mécanismes périodiques, sur des configurations statiques et sur des approches centralisées essentiellement pour des raisons de simplicité et de respect des contraintes de temps.
Il reste beaucoup à faire pour passer à des solutions mettant en œuvre des mécanismes dynamiques, qu'il s'agisse de la demande de qualité de service dans les requêtes des applications, de mécanismes protocolaires ou d'ordonnancement.
Non seulement ces mécanismes devront être validés, mais il sera de plus en plus nécessaire de valider les applications elles-mêmes au travers de leur architecture opérationnelle, intégrant leur distribution, les performances des matériels utilisés et les caractéristiques des systèmes exécutifs.
Enfin les perspectives seront certainement d'aller vers une réduction de la variété actuelle des réseaux de terrain et d'intégrer dans le futur les technologies émergentes afin de faciliter l'interopérabilité des systèmes à grande échelle. Cette opération passe aussi par une réduction du nombre des systèmes d'exploitation et leur standardisation comme on l'a vu avec Unix dans d'autres domaines.

8. Bibliographie

(AFNOR, 1989). French Standards NF C46601 to C46607. FIP bus for exchange of information between transmitters, actuators and programmable controllers. Published between 1989 and 1992 by AFNOR.

(AFNOR, 1996). French Standard C46-638, Système de Communication haute performance pour petits modules de données (DWF, WorldFIP Profil 1), 1996

(Akazan, 1995) Akazan J. and Mammeri Z., Real Time extensions to MMS. In Proc. IEEE-IES Workshop on Factory Communication Systems. (JD Decotignie Ed). Oct 1995, EPFL, Lausanne, Switzerland, pp 192-200.

(Alur and Henzinger, 1991). Alur R. and T. A. Henzinger. Logics and models of real time : a survey. In REX Workshop, Springer Verlag, LNCS 600. pp 74-106.

(ASI, 1996). Actuator and Sensor Interface, Low voltage switchgear and controlgear, CENELEC TC17B(secretariat)146.

(Benkhellat et al, 1992). Benkhellat Y, M. Siebert and J. P. Thomesse, 1992. Interoperability of sensors and distributed systems. Journal Sensors and actuators A, Vol A37 and A38, (2), pp247-254.

(Benkhellat Y., 1995). Benkhellat Y. Formalisation et vérification de l' interopérabilité dans les systèmes de communication, PhD thesis, INPL, Nancy, France.

(BSI, 1996). DD 238 (Draft for Development), CEN/TC310/SWG N171. Fieldbus Foundation, Part 1 System Architecture, Part 2 Network Management, Part 3 Data Link Services Subset, Part 4 Data Link Protocol Specification, Part 5 Fieldbus Message Specification, Part 6 Fieldbus Access Sublayer.

(BSI, 1998). DD 241 (Draft for Development), CEN/TC310. ControlNet.

(Cardeira et al, 1995), Cardeira C. and Z. Mammeri, 1995. A schedulability analysis of tasks and network traffic in distributed real-time systems, Measurement, 15, pp 71-83.

(CENELEC, 1996). European standard EN 50170. General Purpose Field Communication System. Volume 1 : P-Net, Volume 2 : PROFIBUS, Volume 3 : WorldFIP.

(CENELEC, 1998). European standard EN 50254, High efficiency communications subsystems for small data packages, CLC TC/65CX.

(Dasarathy, 1985), Dasarathy B., 1985. Timing constraints of real time systems : constructs for expressing them, methods for validating them. IEEE Trans on Software Engineering, 11(1) pp80-86.

(DeviceNet, 1998) DeviceNet Specifications, Open Vendor Association, Inc. 20423 State Road, Boca Raton, FL 33498, USA.

(Decotignie, 1993a), Decotignie J.D., 1993. Die Feldbusse-der grosse Bazar. Bulletin SEV/VSE, Teil 1, Die Probleme der industriellen Kommunication, 21/93 pp 11-17. Teil 2, Das Pflichtenheft, 25/93, pp26-29, Switzerland.

(DIN, 1990). German Standards 19245-1 to 19245-3, PROFIBUS, Process fieldbus.

(DIN, 1995). German Draft Standard 19 258-1. Interbus-S, sensor and actuator network for industrial control systems for for CENELEC (1996b).

(DIN, 1996). German Draft Standard 19245-4 PROFIBUS-PA, Profibus for Process Automation, CLC/TC 65CX (DE) 10, for CENELEC (1996b).

(DS, 1990). Danish Standard, DS 21906. P-Net, Multi-master, multi-net fieldbus for sensor, actuator and controller communications.

(Elloy et al, 1995), Elloy J.P., P. Molinaro and R. Ricordel, 1995. A temporal extension to the MMS protocol with the Kernext tool. In Proc. IEEE-IES Workshop on Factory Communication Systems. (JD Decotignie Ed). EPFL, Lausanne, Switzerland.

(Galara et Thomesse, 1984), Galara D. and J.P. Thomesse, 1984. Groupe de réflexion FIP. Proposition d' un système de transmission série multiplexée pour les échanges d' informations entre des capteurs, des actionneurs et des automates réflexes. Ministère de l' Industrie et de la Recherche, mai 1984, 56 pages. Published by Editions KIRK, Paris, France, 1991.

(Gault et Lobert, 1985), Gault M. and J..P. Lobert, 1985. Contribution for the fieldbus standard, Presentation to IEC/TC65/SC65C/WG6.

(IEC, 1993), IEC Standard 1158-2, Fieldbus standard for use in industrial control systems- Part 2 Physical layer specification and service définition + AMD1 (1995).

(IEC, 1994). TC44 (Sec)148 Draft Standard for Electrical equipment of industrial machines-Serial data link for real time communications between controls and drives, (SERCOS).

(IEC, 1997), IEC 61499, Function blocks for industrial process measurement and control systems,

(IEC, 1998a). TC65/SC65C. Digital Data Communications for measurement and control-Fieldbus for use in industrial control systems. Part 3 Data Link Service Specification, IEC 61158-3, IEC 65C/197/FDIS.

(IEC, 1998b). TC65/SC65C. Digital Data Communications for measurement and control-Fieldbus for use in industrial control systems. Part 4 Data Link Protocol Specification, IEC 61158-4, IEC 65C/198/FDIS.

(IEC, 1998c). TC65/SC65C. Digital Data Communications for measurement and control-Fieldbus for use in industrial control systems. Part 5 Application Service Specification, IEC 61158-5. IEC 65C/199/FDIS

(IEC, 1998d). TC65/SC65C. Digital Data Communications for measurement and control-Fieldbus for use in industrial control systems. Part 6 Application Protocol Specification, IEC 61158-6. IEC 65C/200/FDIS

(IEC, 1998e). TC65/SC65C. Digital Data Communications for measurement and control-Fieldbus for use in industrial control systems. Part 7 System Management (Clause 2), IEC 61158-7-1. IEC 65C/191/CD.

(IEC, 1998f). TC65/SC65C. Digital Data Communications for measurement and control-Fieldbus for use in industrial control systems. Part 7 System Management (Clause 3-8), IEC 61158-7-2. IEC 65C/149/CDV.

(ISO, 1995). IS 11898 Road Vehicle-Interchange of digital Information- Controller Area Network for high speed communication.

(Kogut, 1995). P. Kogut and P. Clements. Features of Architecture Representation Languages, Software Engineering Institute Technical Report, 1995.

(Kopetz, 1990). Kopetz H., 1990. Event triggered vs time triggered real time systems. LNCS Vol 563 Springer Verlag pp87-101.

(Kopetz, 1993). Kopetz H., G. Gruensteidl, 1993. TTP, a Time Triggered protocol for Fault Tolerant Real Time Systems. IEEE Computer, Vol 24, (1), pp 22-66.

(Lawrenz, 1997) Lawrenz, W., 1997. CAN System Engineering, from theory to practical applications, Springer Verlag, 468 pages

(Le Lann et Rivierre, 1994), Le Lann G. and N. Rivierre, 1994. Real time communications over broadcast networks : the CSMA-DCR and the DOD/CSMA-CD protocols, RTS' 94, pp 67-84, Teknéa, Toulouse, France.

(Leviti, 1995), Leviti P., 1995. Tutorial on the Data Link Service Specification, Digital Data Communications for measurement and control-Fieldbus for use in industrial control systems, (Part 3 of the IEC 1158-3, IEC 65C/160/CDV), IEC TC65/SC65C.

(LON, 1995). Documentation Echelon Corporation, 4015 Miranda Avenue, Palo Alto, CA 94304, USA.

(NOAH,1998) Network Oriented Application Harmonization, European Project 26951 documentation, Technical appendix. Voir aussi l'URL : http//:www.noah.loria.fr.

(Nussbaumer, 1987), Nussbaumer H. (1987) Informatique industrielle. Tomes 3 et 4, 1987. Presses polytechniques romandes. Lausanne, Suisse.

(Paret, 1996). Paret, Le réseau CAN, Controller Area Network, Dunod, France.

(Shen et Gonzales, 1998), Shen C. , Gonzales O. , Real-ime Communicating Tasks on COTS-based distributed Platforms : tasks models and end-to end scheduling. RTS IFIP Symposium (Works in Progress volume), Madrid, Spain, Déc 1998, pp 47-50.

(SDS, 1997). Smart Distributed Systems, CENELEC Working Draft 0.2, Low voltage switchgear and controlgear- Part 5, control circuits and switching elements- EN 60947-5.X.

(Simonot et al, 1995), Simonot-Lion F., J.P. Thomesse, M. Bayart and M. Staroswiecki M, 1995. Dependable distributed computer control systems : analysis of the design step activities. 13th IFAC Workshop on Distributed Control Systems, AEK Sahraoui (éd), Toulouse. pp 119-124.

(Thomesse, 1993), Thomesse J.P., 1993. Le réseau de terrain FIP, Revue Réseaux et Informatique Répartie, Hermès, Vol 3, N°3, 1993, pp 287-321.

(Thomesse, 1998) Thomesse J. P. 1998 , A review of the fieldbuses, Annual Review in Control, vol 22, pp 35-45.

(Thomesse, 1999) Thomesse J. P. 1999 , Les réseaux industriels temps réel, Ed Innovation 128, rue du 4 septembre, Paris, 220 pages.

(Vega, 1996), Vega-Saenz L. and J. P. Thomesse, 1996. Modélisation des contraintes temporelles dans la communication temps réel, CFIP' 96, pp 133-147, Eyrolles, Paris, France.