

# Réseaux et bus de terrain

Département informatique

Frank Singhoff

C-208

[singhoff@univ-brest.fr](mailto:singhoff@univ-brest.fr)

## Sommaire

1. Rappels, présentation.
2. Ordonnancement temps réel réparti.
3. Exemples de protocoles d'arbitrage.
4. Conclusion et résumé.
5. Références.
6. Acronymes.

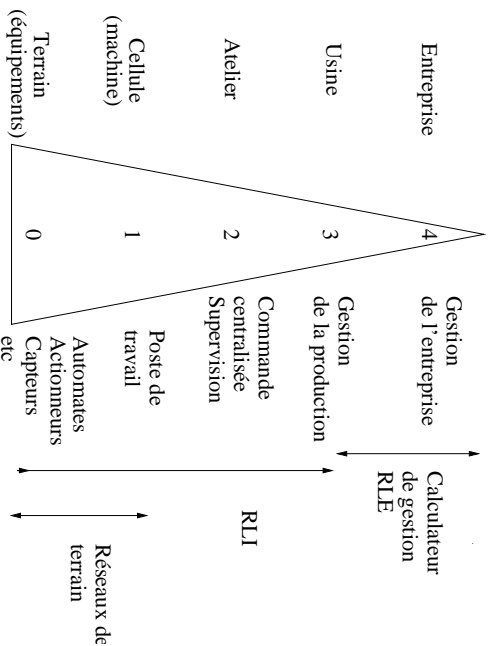
## Partie 1

### Rappels, présentation

### Rappels, présentation (1)

- Réseaux industriels [PUJ 95, CIA 99] :
  - Nés du besoin de rationaliser et automatiser les processus de production industrielle.
  - Concept des 4 zéros de la productique :
    1. Zéro délai.
    2. Zéro défaut.
    3. Zéro stock.
    4. Zéro panne.
- Intégration des systèmes d'informations de production et de gestion  $\Rightarrow$  la pyramide CIM ([WAL 90, VRI 99]).

## Rappels, présentation (2)



## Rappels, présentation (3)

- Réseaux de terrain :
  - Objectifs
    1. Interconnexion de divers équipements hétérogènes (capteurs, automates industriels, actionneurs, micro-ordinateurs, etc).
    2. Offrir des abstractions de communication adaptées (ex : variables et messages périodiques).
  - Solutions spécifiques aux domaines applicatifs  $\Rightarrow$  contraintes spécifiques  $\Rightarrow$  peu de normes.
  - Principales normes :
    - MAP : standard ISO soutenu par General Motors mais n'ayant pas réussi à s'imposer.
    - Norme en cours d'élaboration : standard européen EN 50170 (FIP + Profibus).

## Besoins/contraintes spécifiques (1)

- A propos des équipements et de l'environnement :
  - Sécurité de fonctionnement. Perte ou détérioration d'informations. Pannes d'équipements  $\Rightarrow$  détection et recouvrement des pannes.
  - Disponibilité et prix des équipements du réseau.
  - Capacité d'interconnexion à des équipements variés (difficultés matérielles et logicielles).
  - Faible répartition géographique des équipements  $\Rightarrow$  réseaux de faible taille.
  - Nombre d'équipements connectables et distances maximum entre eux.
  - Contraintes liées à l'environnement (température, vibrations, etc).
  - Etc.

## Besoins/contraintes spécifiques (2)

- A propos des services de communications :
  - Débits faibles : transfert d'événements, peu de données.
  - Fort besoin du respect des contraintes temporelles.
  - Contraintes temporelles de grande précision (parfois de l'ordre de la micro-seconde).
  - Possibilités de synchronisation des applications.
  - Service de diffusion possible ou non.
  - Etc.

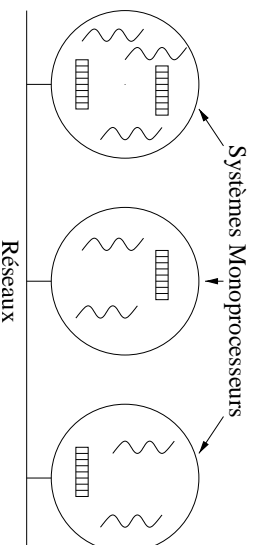
## Exemples de produits/applications

- Productique et robotique. Exemples : MAP[DWY 91], Token bus/[IEEE 802.4][PUJ 95], FIP[CIA 99], Profibus[STR 96].
- Industrie automobile. Exemple : bus CAN[ZEL 96].
- Aéronautique/spatial. Exemples : STD MIL 1553 et ARINC 429 et 629 aviation civile et militaire, la sonde Pathfinder[DEC 96, HEA 96].
- Domotique. Exemple : Batibus[CIA 99].

## Partie 2

Ordonnancement temps réel réparti

## Ordonnancement temps réel réparti



- Que cherche-t-on à valider ?

- Contraintes locales. Ex : GRMS[WIL 96].

Ordonnancement de message puis faisabilité processeur par processeur.

- Délai/contrainte de bout en bout : on teste la faisabilité de proche en proche (ex : [TIN 94, LEB 95, P.R 01, CHA 95]).

⇒ Approche concepteur de systèmes ou équipementiers ?

## Ordonnancement des communications (1)

- Objectif : déterminer une borne sur le temps de communication d'un message pour :

- L'analyse hors-ligne d'une application.
- Eventuellement la configuration du réseau (ex : FTP).

- Architecture d'un réseau de terrain

- Pile simplifiée ⇒ déterminisme temporel et prix des équipements.

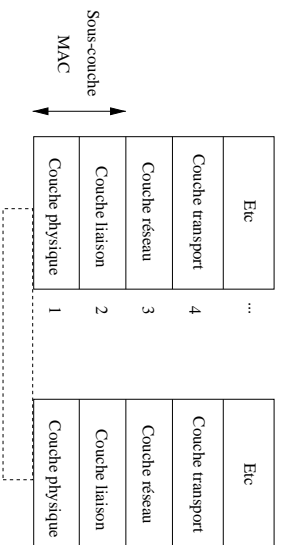
- Constituée de

1. Couche physique.
2. Couche liaison ⇒ protocole d'arbitrage.
3. Couche application : abstractions utilisateurs (messages, variables périodiques, non périodiques).

- Application de techniques d'ordonnancement classiques selon le protocole d'arbitrage.

## Ordonnancement des communications (2)

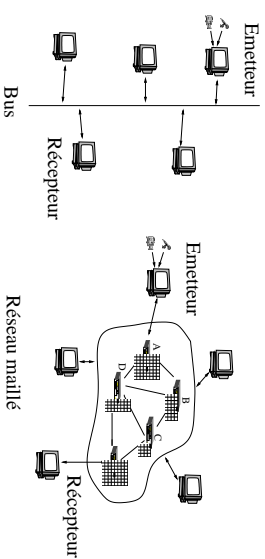
- Rappels sur les couches basses du modèle ISO :



- Physique : connectique, câblage, transmission et codage (octets).
- Liaison : protocole de communication fiable point à point (trames).
- Réseau : Adressage et acheminement. Réseau maillé.
- Quel chemin prendre ? (paquets)
- Transport : adressage des applications (services).

## Ordonnancement des communications (3)

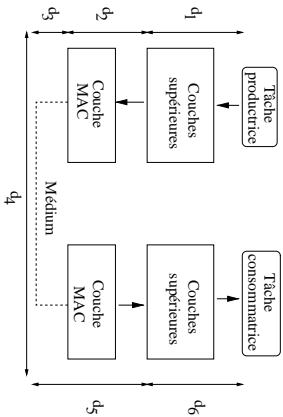
- Les contraintes de temps dans les réseaux :



- Transport : Expression + négociation des contraintes de temps.
- Réseau : commutation de paquet vs commutation de circuit  $\Rightarrow$  chemin d'acheminement variable vs chemin fixe + réservation (CPU, mémoire, bande passante).
- Physique/Liaison/MAC : partage du medium  $\Rightarrow$  protocole d'arbitrage / d'accès.

## Ordonnancement des communications (4)

- Délai de communication composé de [COT 00] :



- $d_1$  et  $d_6$  = délais de traversée des couches.
- $d_5$  = délai de réception.
- $d_1, d_5$  et  $d_6 \Rightarrow$  calcul facile, fixe (borne).
- $d_3$  = délai de transmission sur le médium (variable, calcul facile  $\Rightarrow$  taille message/débit).
- $d_4$  = délai de propagation (variable, calcul facile  $\Rightarrow$  taille réseau/vitesse).
- $d_2$  = **délai d'attente pour l'accès au réseau (variable, dépend du protocole d'arbitrage).**

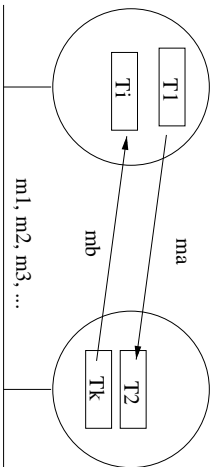
## Ordonnancement des communications (5)

- De l'ordonnancement de tâches aux messages :

Ordo. de tâches	Ordo. de messages
Tâches	Messages
Processeur	Médium de communication
Capacité	Temps de transmission + temps de propagation + temps de traversée
Temps d'interférence	Temps d'accès
Temps de réponse	Temps de communication "global"

- Points communs : échéance, période, etc.
- Spécificités : caractère **non préemptif**, caractère réparti (horloge, tolérance aux pannes).

## Temps de réponse bout en bout



- L'approche Holistique : injection du temps de réponse sous la forme d'une gigue[TIN 94] :
  - Soit  $TR(T1)$ , le temps de réponse de T1.
  - $TR(ma)$  est calculé, en fonction du protocole d'arbitrage, des autres messages périodiques et tel que  $J_{ma} = TR(T1)$ .
  - $TR(T2)$  est calculé comme  $TR(T1)$  avec  $J_2 = TR(ma)$ .
- Calcul itératif jusqu'à convergence.

## Partie 3

### Exemples de protocoles d'arbitrage

## Protocoles d'arbitrage (1)

- L'arbitrage définit la méthode d'accès au médium.
- Eléments de taxinomie :
  - Algorithme par coopération ou compétition.
  - Arbitrage symétrique ou asymétrique. Arbitrage centralisé/réparti. Notion de maîtres (ou arbitres) et d'esclaves : qui prend l'initiative de la communication ?
  - Synchrones ou asynchrones  $\Rightarrow$  y a t il une horloge globale à tous les coupleurs ?
- **Objectif principal : comportement prédictible des communications.**

## Protocoles d'arbitrage (2)

- Principaux protocoles d'arbitrage[UPPE 94] :
  - **CSMA/CA** :
    - Une priorité fixe est associée à chaque station.
    - Chaque station émet quand elle le souhaite.
    - Les éventuelles collisions sont réglées par le biais de la priorité : la station de plus forte priorité obtient le médium.
  - **Polling** :
    - Une station dédiée, dite "maître", émet un message sur le médium, invitant un "esclave" à émettre.
    - En réponse, l'esclave émet ses données. Puis, le maître interroge l'esclave suivant.
    - Le maître dispose d'une liste d'invitations fixe qu'il parcourt de façon séquentielle.

### Protocoles d'arbitrage (3)

- **Protocole à jeton :**
  - Une permission à émettre (le jeton) circule successivement entre les stations.
  - Une station qui reçoit le jeton émet ses données, puis, transmet le jeton à la station suivante selon un ordre prévu et fixe (ex : topologie en boucle).
- **TDMA [KOO 95] :**
  - Une station dédiée, appelée "maître" émet cycliquement une trame de synchronisation.
  - Chaque esclave émet alors, à un instant relatif par rapport à la trame de synchronisation.
  - L'ordre d'émission des esclaves est prédéterminé et fixe  $\Rightarrow$  partage temporel du médium.

### Protocoles d'arbitrage (4)

- Elements de comparaison :

Protocole	Prix de l'équipement	Résistance aux pannes	Efficacité
CSMA/CA	-	++	-
Polling	+	-	+
Jeton	-	+	+
TDMA	+	-	++

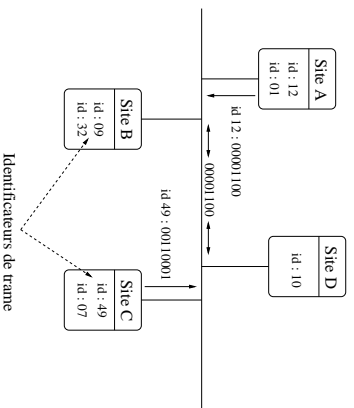
## CSMA/CA : le bus CAN (1)

- Créée par Bosh et Intel pour les applications automobiles.
- Utilisé initialement par Mercedes-Benz pour la Classe S. Adopté aujourd'hui par de nombreux constructeurs automobiles.
- Leader pour les applications automobiles.
- Caractéristiques :
  - Réseau multi-maîtres symétrique.
  - Composants très faibles à faibles coût (automobile).
  - Transmission par diffusion.
  - Topologie en bus, paires torsadées, généralement longueur maximum 40 m pour un débit de 1MBit/s.
  - Services de sûreté de fonctionnement très évolués (CRC, acquittement, diagnostic de coupleurs).

## CSMA/CA : le bus CAN (2)

- Arbitrage par compétition : CSMA non destructif (CSMA/CA).
- Identificateurs de trame = priorités. Identificateurs uniques et émis par une seule station.
- Principe :
  - Lorsque le bus est libre, émission bit à bit de l'identificateur puis écoute de la porteuse.
  - Un bit à 1 (récusif) est masqué par un bit à 0 (dominant).
  - Tout coupleur lisant un bit différent de celui qu'il vient d'émettre passe en réception. Puis, réémet immédiatement lorsque la porteuse est de nouveau libre.
  - Emission bit à bit + écoute porteuse = faible débit/taille du réseau.

## CSMA/CA : le bus CAN (3)



- Les sites A, B, C et D sont des maîtres : émetteurs de trames. Chacun détient une liste d'identificateurs uniques.
- Les sites A et C commencent à émettre en même temps les identificateurs 12 et 49 (priorités).
- Lors de la transmission du 3<sup>ème</sup> bit, le site C passe en réception.
- Le site A gagne et transmet son information sur le bus (entre 0 et 8 octets).

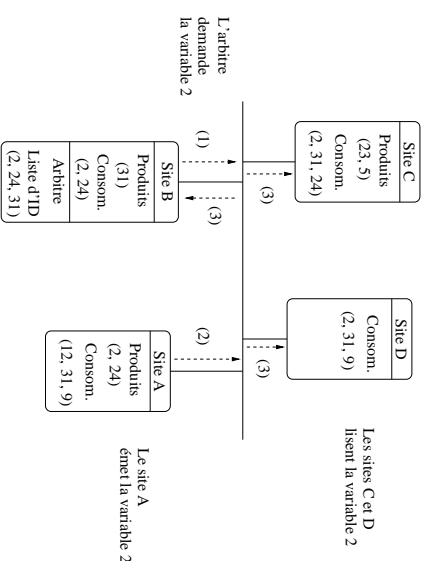
## CSMA/CA : le bus CAN (4)

- Comment déterminer le temps d'accès d'un message donné ?  
 $\Rightarrow$  application de l'algorithme RM en mode non préemptif :
  - L'identificateur est équivalent à la priorité fixe d'une tâche ordonnée par RM.
  - Utilisation des méthodes de tests de l'ordonnabilité dans le cas RM non préemptif.

## Polling : le bus FIP (1)

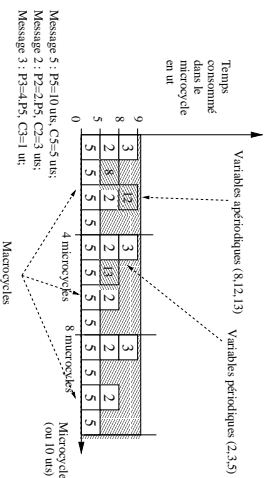
- Réseau pour la productique.
- Initialement français, en cours d'internationalisation (WorldFIP).
- Caractéristiques :
  - Polling : mono-maître, arbitre centralisé.
  - Topologie en bus ou en étoile. Paire torsadée.
  - Longueur de 4000 m avec un débit de 1Mbit/s.
  - Sécurité de fonctionnement : coupleur bi-médium.
  - Orienté variables (de 1 à 128 octets) et messages (1 à 256 octets). Variable = valeur de capteur.
  - Protocole de type producteur/consommateurs.
  - Diffusion de variables sur le bus.

## Polling : le bus FIP (2)



- L'arbitre détient une liste de variables qu'il exploite séquentiellement de la façon suivante :
  - L'arbitre indique la variable à transmettre par un message sur le bus. (1).
  - Le producteur émet la valeur sur le bus (2).
  - Les consommateurs lisent le bus (3).

## Polling : le bus FIP (3)



### • La liste de variables **périodiques** :

- Notion de microcycle (plus petite période) et de macrocycle (PPCM des périodes).
- L'arbitre est une tâche périodique, qui se réveille à chaque début de microcycle pour la transmission des variables périodiques d'abord, puis, s'il reste du temps, des messages/variables aperiodiques.

- Configuration : liste et lieu de production des variables, durée des phases, allocation des identificateurs.

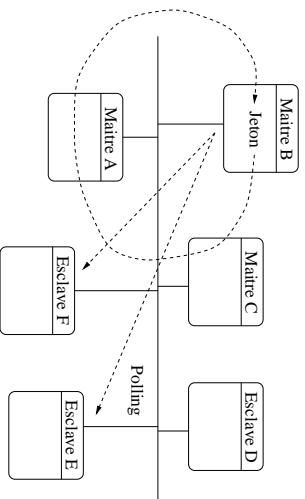
## Protocole à jeton : Profibus (1)

- Réseau pour la productique.
- Initialement proposé lors d'un projet allemand comprenant Bosh et Siemens.

### • Caractéristiques :

- Réseau multi-maîtres : arbitre non fixe  $\implies$  élection par jeton.
- Topologie en bus. Paire torsadée. Longueur de 400 m avec un débit de 1,5Mbit/s.
- Trois versions : Profibus FMS (niveau cellule), Profibus PA et DP (niveau terrain).

## Protocole à jeton : Profibus (2)



- L'arbitre (maître actif) est le site qui possède le jeton.
- Le maître actif effectue du polling sur les autres sites afin de les autoriser à transmettre.
- Le jeton est conservé pendant un laps de temps déterminé lors de la configuration du réseau (temps de parole).
- Deux phases : communications cycliques puis acycliques.
- Configuration : liste des esclaves, maîtres, listes des sites lors du polling, temps de parole, durée des cycles.

## Partie 4

### Conclusion et résumé

## Conclusion et résumé

- Ce qu'il faut retenir :
  - Caractéristiques spécifiques liées aux domaines applicatifs : faible débit, forte sûreté de fonctionnement, contraintes temporelles fortes, hétérogénéité des équipements, environnement, etc.
  - Produits souvent spécifiques à un domaine d'activité. Peu de normes.
  - Stratégies d'arbitrage.
  - Ordonnancement de messages :
    1. Abstractions classiques : priorité, périodicité.
    2. Utilisation d'algorithmes d'ordonnancement temps réel classiques.

## Partie 5

### Références

- [CHA 95] S. Chatterjee and J. Strosnider. « Distributed pipeline scheduling : end-to-end Analysis of heterogeneous, multi-resource real-time systems ». 1995.
- [CIA 99] CIAME. *Réseaux de terrain*. Edition Hermès, 1999.
- [COT 00] F. Cottet, J. Delacroix, C. Kaiser, and Z. Mammeri. *Ordonnement temps réel*. Hermès, 2000.
- [DEC 96] T. Decker. « Three Popular Avionics Databases ». *Real Time Magazine*, (2) :29–34, April 1996.
- [DWY 91] J. Dwyer and A. Ioannou. *Les réseaux locaux industriels MAP et TOP*. Editions Masson, mars 1991.
- [HEA 96] D. Head. « MIL-STD-1553B ». *Real Time Magazine*, (2) :25–28, April 1996.
- [KOO 95] P. J. Koopman. « Time Division Multiple Access Without a Bus Master ». Technical Report RR-9500470, United Technologies Research Center, June 1995.
- [LEB 95] L. Leboncher and J. B. Stefani. « Admission Control end-to-end Distributed Bindings ». pages 192–208. COST 231, Lectures Notes in Computer Science, Vol 1052, November 1995.
- [P.R 01] M. Richard P. Richard, F. Cottet. « On line Scheduling of Real Time Distributed Computers With

- Complex Communication Constraints ». 7th Int. Conf. on Engineering of Complex Computer Systems, Skovde (Sweden), June 2001.
- [PUJ 95] G. Pujolle. *Les réseaux*. Editions Eyrolles, décembre 1995.
- [STR 96] H. Strass. « Factory Floor Networks PROFIBUS : the natural choice ». *Real Time Magazine*, (2) :6–8, April 1996.
- [TIN 94] K. W. Tindell and J. Clark. « Holistic schedulability analysis for distributed hard real-time systems ». *Microprocessing and Microprogramming*, 40(2-3) :117–134, April 1994.
- [UPE 94] P. Upendar and P. J. Koopman. « Communication Protocols for Embedded Systems ». *Embedded Systems Programming*, 7(11) :46–58, November 1994.
- [VER 99] P. Vignat. *Les réseaux locaux industriels*. Gaëtan morin editeur, août 1999.
- [WAL 90] J. B. Waldner. *CIM : les nouvelles perspectives de la production*. Editions Dunod, août 1990.
- [WIL 96] T. Williams. « Designers looking for the road to distributed real-time systems ». *Computer Design's*

*Electronic Systems Technology and Design*, September 1996.

[ZEL 96] H. Zeltwanger. « CAN in industrial Applications ». *Real Time Magazine*, (2) :20–24, April 1996.

# Partie 6

## Acronymes

- **MAP**. Manufacturing Automation Protocol.
- **CAN**. Controller Area Network.
- **FIP**. Factory Instrumentation Protocol.
- **FIFO**. First In First Out.
- **MAC**. Medium Acces Control.
- **PROFIBUS**. Process Field Bus.
- **CSMA/CA**. Carrier Sence Multiple Access and Collision Detection Avoidance.
- **TDMA**. Time Division Multiple Access.