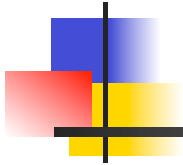


Réseaux et Bus pour systèmes embarqués temps-réel



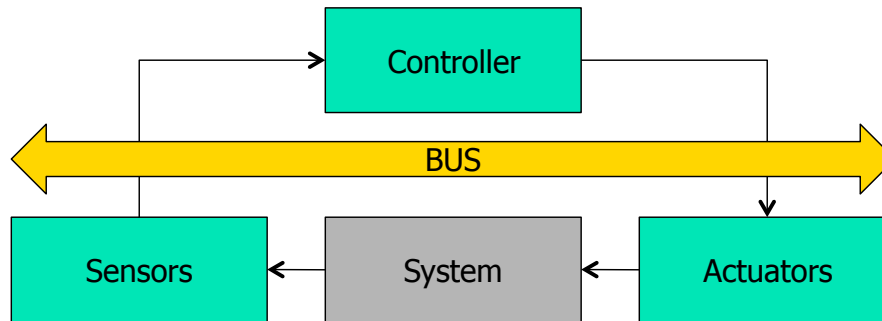
Laurent Pautet

Laurent.Pautet@enst.fr

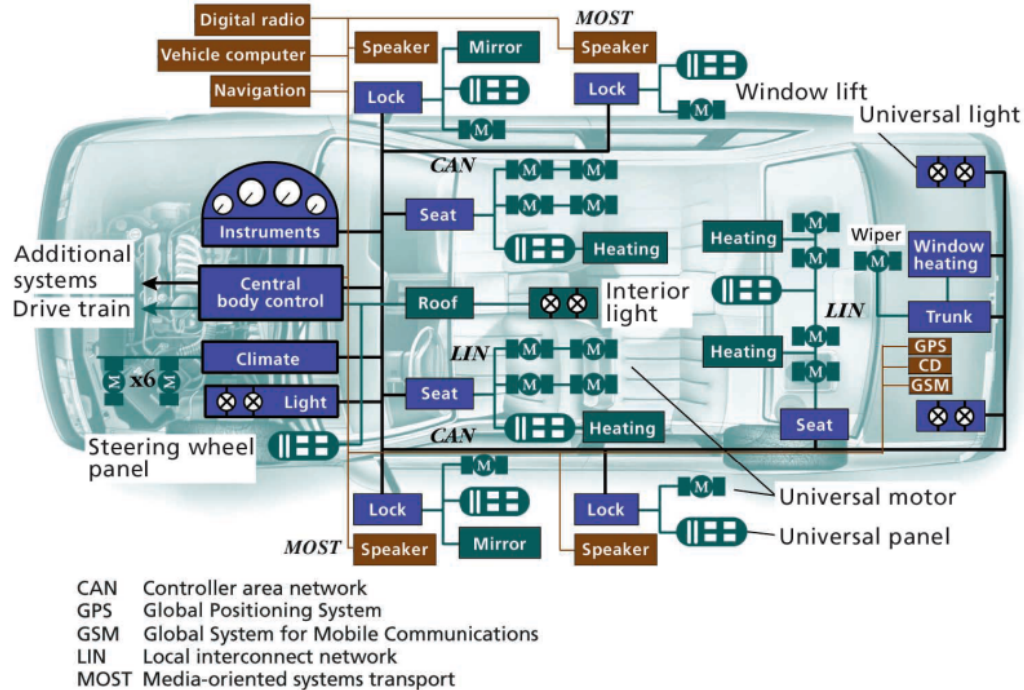
Version 1.0

Contexte

- Les systèmes embarqués temps réel sont répartis (acteurs, capteurs, calculs distants)
 - Systèmes de transports
 - Systèmes multimédia
- Les nœuds sont organisés autour de boucles de contrôle reliées par des bus ou réseaux
- Le bus ou le réseau devient une donnée critique car partagée par des nœuds critiques



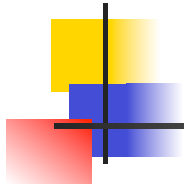
Topologie d'un réseau automobile





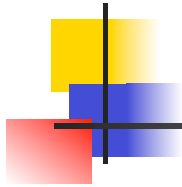
Contraintes et Services

- Les services à assurer sont
 - Transmissions efficaces de petites données
 - Transmission de capteurs et d'actionneurs simples
 - Transmissions périodiques contrôlées en temps
 - Petites périodes, faibles latences, faibles giges
 - Transmissions apériodiques
 - Transmissions rapides d'alarmes
 - Transmissions non temps réel de larges données
 - Journalisation, images
 - Transmissions de type diffusion



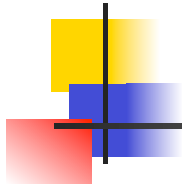
Interfaces, Messages, Transactions

- Le bus ou le réseau se constitue de
 - Une infrastructure matérielle
 - Des couches logicielles
 - Des interfaces de communication (CNI)
- Le message contient les données transmises
 - Mais contient aussi des informations de contrôle
 - Implique une transaction ou séquence d'actions
- L'efficacité du réseau dépend du ratio entre
 - Les données réelle et la surcharge introduite



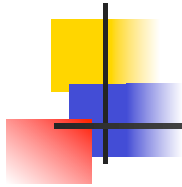
Comportement temporel et fonctionnel

- Sources de variations temporelles
 - Délais fixes (temps d'accès au médium)
 - Délais variables (encombrement du médium)
 - Tampon de régulation (problèmes de débit)
 - Perte de message (médium peu fiable)
- Types de messages
 - Les événements sont ordonnés dans une file d'attente et retirés après lecture
 - Les états ou données partagées sont lus plusieurs fois et écrasés par l'état ou la donnée suivants



Architecture

- Les architectures réseaux (comme systèmes) sont dirigées par les événements ou le temps
- Par événement
 - Exemple : la vitesse a été augmentée de $+dv$
 - Il ne faut pas perdre les événements
 - Peu déterministe, plus flexible
- Par le temps
 - Exemple : à la date t , la vitesse est de v
 - Il faut supporter un flot important de donnée
 - Plus déterministe, moins flexible



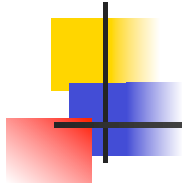
Modèle OSI

- Couches OSI (réseau traditionnel)
 - Application (service offerts, FTP, HTTP ...)
 - Présentation (traitement données, compression ...)
 - Session (traitement contrôle, séquence d'action ...)
 - Transport (transfert des données, TCP, UDP ...)
 - Réseau (routage, adresse logique)
 - Liaison (accès au médium, collision, arbitrage ...)
 - Physique (transmission physique, cuivre ...)



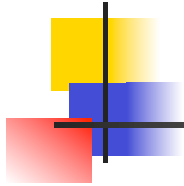
Problèmes du modèle OSI

- Chaque couche ajoute une surcharge due aux informations de contrôle (enveloppe)
- Le modèle OSI s'adresse à des applications très générales alors que les systèmes temps réel embarqués sont des applications dédiées
- Applications (et donc données) bien définies (nécessité de présentation ?)
- Transmission dans un seul domaine (nécessité de la couche réseau ?)



Modèle OSI réduit

- Pour les besoins du temps réel, il faut éviter toutes les surcharges introduites par toutes ces couches
- La couche Applications interagit directement avec la couche Liaison qui devient la Communication Network Interface (CNI)
- Ces réseaux s'appellent alors Bus de Terrain (Fieldbuses)



Couche Physique

- Les 2 couches restantes varient suivant les domaines et les applications
- La couche Physique
 - Topologie en anneau, bus, arbre, étoile, ...
 - Matériel en cuivre, fibre, radio, infra-rouge ...
 - Caractéristiques différentes (débit, erreur, ...)
 - Contraintes industrielles (prix, température, ...)



Couche Liaison (1/2)

- L'adresse du receveur ou de l'émetteur est déterminée sur mesure
 - Identificateur du récepteur donné à la conception
 - Récepteur connu à la date de transmission
 - Récepteur connu par la nature de la donnée reçue
- Le contrôle du lien logique
 - Envoi avec acquittement immédiat
 - Envoi sans acquittement
 - Communication par connexion (ie TCP vs UDP)
 - ... selon les besoins de performances

la réception des identificateurs n'est pas forcément utile : quand on reçoit une donnée à un certain temps, on sait de qui ça vient

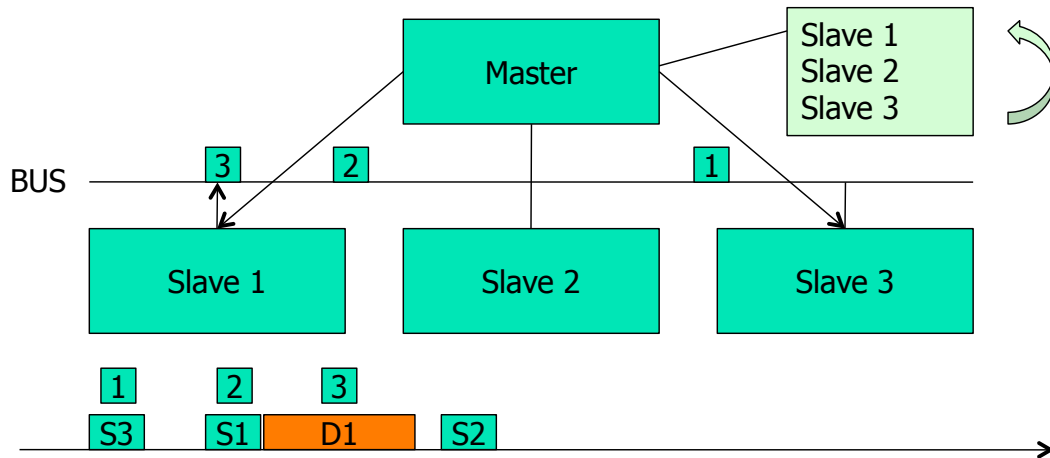


Couche Liaison (2/2)

- Le contrôle d'erreur de transmission
 - Code correcteur d'erreur
 - Répétition en cas d'erreur signalée par le récepteur
 - Répétition en l'absence d'acquittement par émetteur
- Le contrôle d'accès au médium ou Medium Access Control (MAC)
 - Maître / Esclave
 - Jeton circulant
 - Contrôle par le temps
 - Arbitrage de collision

MAC: Maître/Esclaves

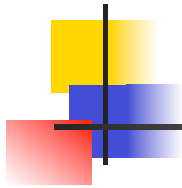
- Le maître invite chaque esclave à émettre pendant un laps de temps
- L'esclave utilise l'invitation pour émettre
- 1 message émis => +1 message de contrôle





Bus FIP

- Réseau pour la productique
- Topologie en bus ou étoile
- Orienté variables ou messages
- Schéma producteur / consommateur
- Le maître émet une requête d'émission de variable
- L'esclave concerné émet la valeur de la variable
- Les autres esclaves lisent la valeur de la variable
- Table de diffusion des variables périodiques en fonction de leur période et leur durée de transmission
- Demande d'émission des variables apériodiques dans les temps libres du bus



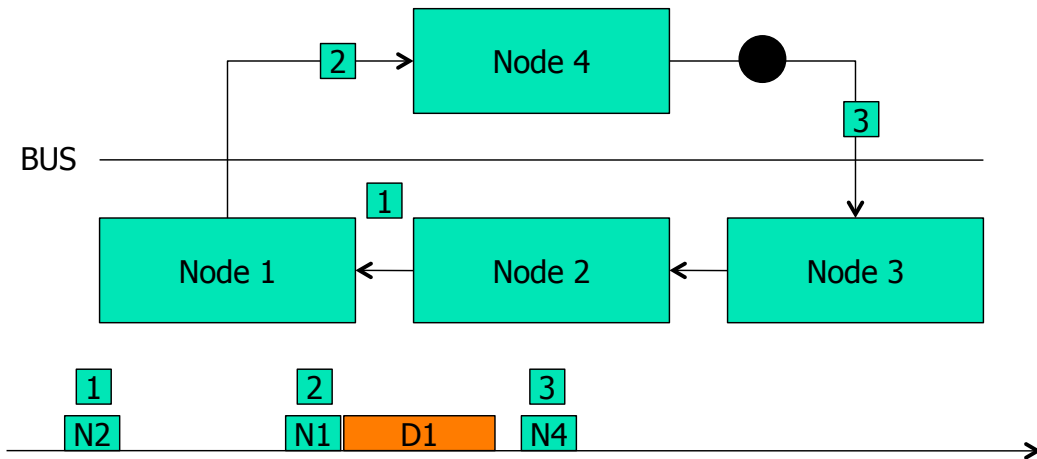
Bus FIP

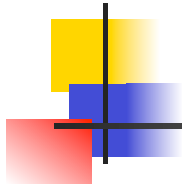
Message	Capacité	Période
M1	5ms	10ms
M2	3ms	20ms
M3	1ms	40ms

00ms - 10ms	M1	M1	M1	M1	M1	M2	M2	M2	M3	
10ms - 20ms	M1	M1	M1	M1	M1					
20ms - 30ms	M1	M1	M1	M1	M1	M2	M2	M2		
30ms - 40ms	M1	M1	M1	M1	M1					

MAC: Anneau à jeton

- Le jeton permet d'émettre pendant un laps de temps
- Le jeton circule en boucle entre les nœuds
- Le nœud doit rendre le jeton après échéance





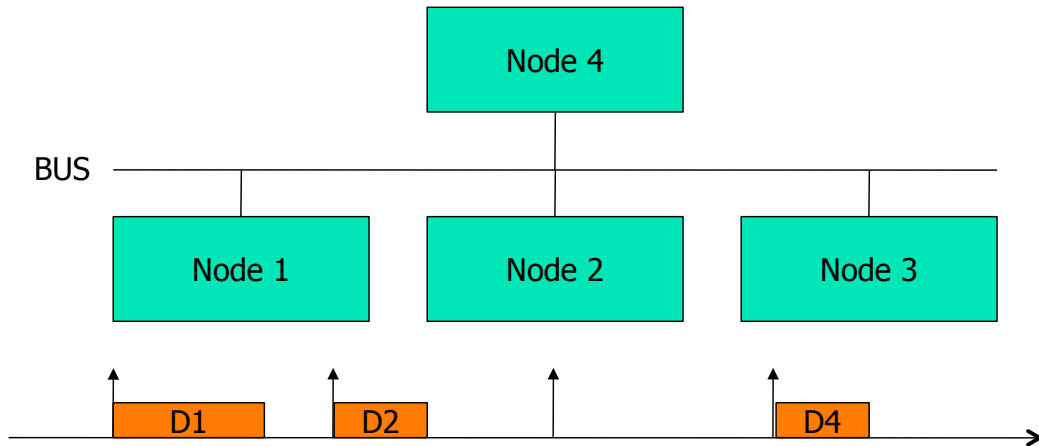
Bus ProFiBus

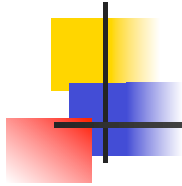
- Un jeton circule parmi certains nœuds qui se comportent comme des maîtres et émettent auprès de certains esclaves
- Chaque maître dispose de compteurs et de timers précisant le temps de rotation et le temps de possession du jeton
- Ces données permettent notamment de détecter la perte du jeton et de forcer la libération du jeton
- Tout nœud n'est pas forcément maître.
- Le jeton ne circule que parmi peu de maîtres pour réduire les temps de rotation et les pertes de jeton



MAC: Division temporelle

- Time-Division Multiple Access (TDMA)
- Fenêtres de temps attribuées aux nœuds
- Table statique périodique d'attribution
- Synchronisation par trame ou horloge globale





Time Triggered Protocol

- Ordonnancement statique off line par construction d'une table
- Les sites sont identifiés par la date d'émission: il n'y a pas de champ adresse dans les trames
- Chaque site dispose de «slots» **exclusifs sur le bus**, l'ordonnancement peut donc être testé indépendamment sur chaque site
- Voir la présentation de systèmes à temps cadencé (Time Triggered)



MAC: Arbitrage de collision

- Carrier-Sense Multiple Access (CSMA)
- Emission lorsque le médium semble libre
- Pas de prévention de collision
- Ré-émission en cas de collision
- Fonctionnement limité en cas de temps réel
 - CA : Collision Arbitration / Avoidance
 - Un mécanisme (priorité) évite la collision pour un émetteur
 - Les autres réémettent ultérieurement
 - CD : Collision Detection
 - Lors de collision, réémission pour tous après un temps aléatoire déterminé indépendamment pour chacun



Controller Area Network (CAN)(1/2)

- Bus de terrain pour l'automobile
- Lorsque le bus est libre, émission bit par bit de l'identifiant du nœud
- Chaque émetteur lit bit par bit ce qui est transmit
- En cas de différence il devient récepteur
- La priorité est donnée en fonction de l'identifiant
- Le nœud à petit identifiant est le plus prioritaire
- Lors de rejet, réémission lorsque le bus est libre
- Le calcul de temps d'accès est similaire au calcul d'un temps de réponse de tâche avec RMS non préemptif

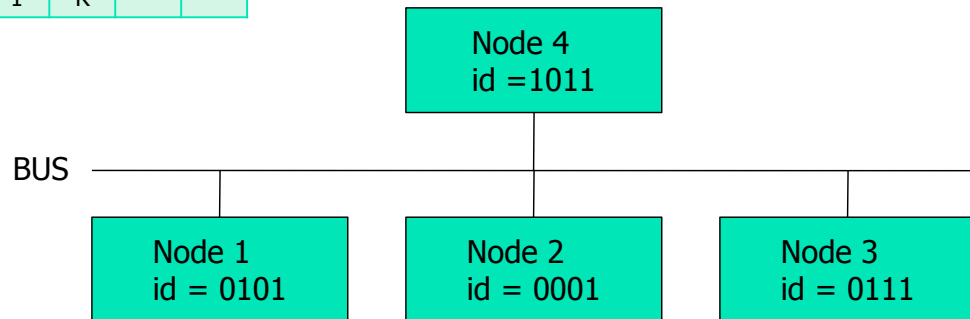


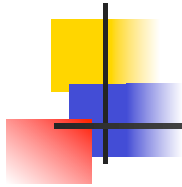
Controller Area Network (CAN)(2/2)

- Dans notre exemple le bus CAN est dit wired AND
- Si un nœud envoie un bit 0, tous les nœuds reçoivent le bit 0
- Si un nœud émet un bit (récessif) 1, mais lit un bit (dominant) 0 il perd l'accès au bus et devient récepteur

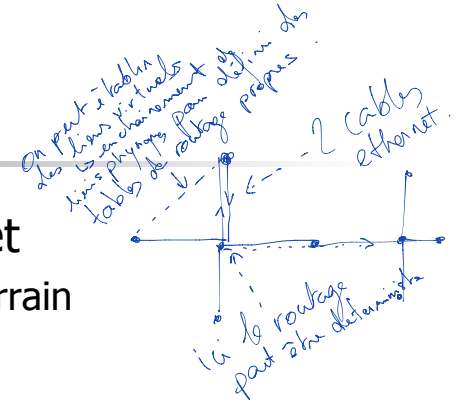
T \longrightarrow

N1	0	1	R	
N2	0	0	0	E
N3	0	1	R	
N4	1	R		

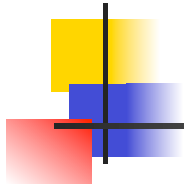




AFDX



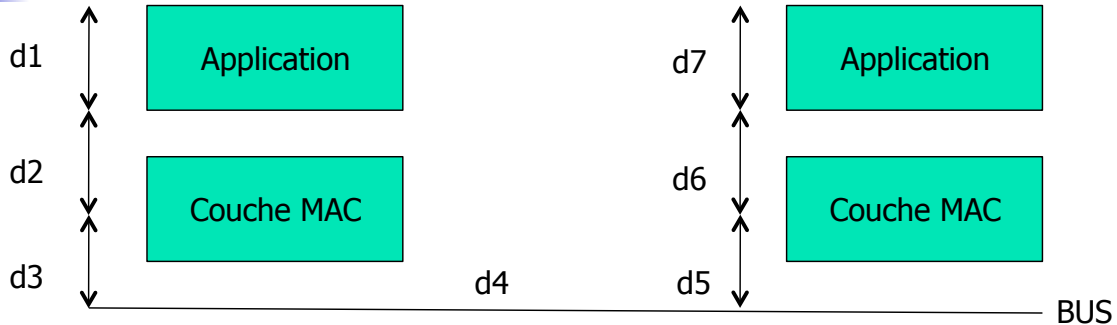
- Avionic Full Duplex switched Ethernet
 - Plus un réseau Ethernet qu'un bus de terrain
 - Respecte le standard ARINC 664
- Couche Physique
 - Différent d'Ethernet « ouvert » car pas de collision
 - 2 paires torsadées Rx/Tx entre deux nœuds reliés
 - Switchs avec tampons pour des nœuds distants
 - Redondance pour sûreté et gestion des duplicats
 - Configuration des liens réels et des switchs pour assurer des liens virtuels de 2 nœuds quelconques
 - Multiplexage et gestion des trames pour assurer la co-habitation de plusieurs liens virtuels par nœud



Calcul de temps de réponse

- Tâches
- Processeur
- Capacité
- Temps d'interférence
- Temps de réponse
- Messages
- Médium de comm.
- Temps
 - de transmission
 - de propagation
 - de traversée
- Temps d'accès
- Temps de comm.

Différentes délais



- Durées d1 et d7 de traversée dans l'application
- Durées d2 et d6 d'accès au medium
 - Difficile à déterminer car dépend du protocole d'accès
- Durées d3 et d5 de transmission
 - Facile à déterminer avec le débit et la taille des données
- Durée d4 de propagation

Calcul des réveils et échéances de tâches avec précedence

- Pour calculer les dates de réveil (maximum):

- $r_i^* = \max (r_i, \max \{r_j^* + C_j + d_{j \rightarrow i}\})$
 - Pour tout j qui précède i

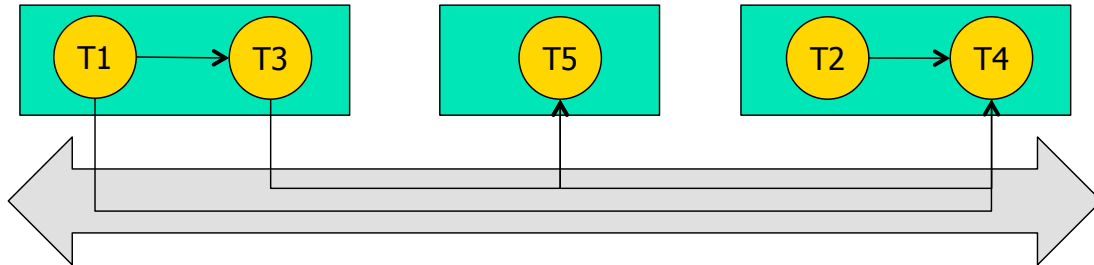
- Pour calculer les échéances (minimum):

- $D_i^* = \min (D_i, \min \{D_j^* - C_j\})$
 - Pour tout j que i précède

- Pour calculer les temps de réponse de nœud:

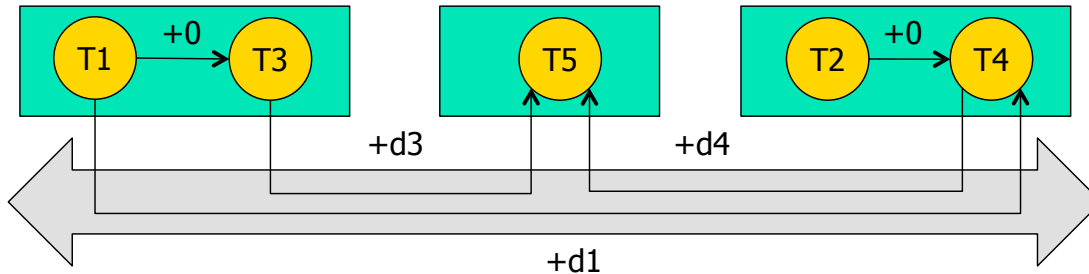
$$r_i(t) = J_i + w_i \text{ avec } w_i = C_i + \sum_{j>i} C_j \left\lceil \frac{w_i + J_j}{P_j} \right\rceil$$

Ordonnabilité sur un exemple (1/2)



	T1	T2	T3	T4	T5
Réveil	0	250	0	0	0
Calcul	50	100	100	50	150
Echéance	250	350	250	500	600

Ordonnabilité sur un exemple (2/2)



	T1	T2	T3	T4	T5
Réveil	0	250	0	0	0
Réveil max	0	250	50+0	350+0 50+d1	400+d4 100+d1+d4 150+d3
Calcul	50	100	100	50	150
Echéance	250	350	250	500	600
Échéance min	150	350	250	450	600