

Dominique Paret  
Hassina Rebaine

# Réseaux de communication pour systèmes embarqués

CAN, CANFD, LIN, FlexRay, Ethernet...

2<sup>e</sup> édition

DUNOD

Cet ouvrage a été traduit et publié en anglais et en coréen (Corée du Sud).

Toutes les marques citées dans cet ouvrage sont des marques déposées par leurs propriétaires respectifs.

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2005, 2014

ISBN 978-2-10-070700-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# TABLE DES MATIÈRES

---

Avant-propos	IX
Introduction	1

## A

### Protocoles *event triggered* CAN, CAN FD, LIN

<b>1 • Le CAN – Généralités</b>	<b>13</b>
1.1 Notions d'accès au réseau et d'arbitrage	13
1.2 Traitement et gestion des erreurs	18
1.3 Petite rubrique « enrichissez votre vocabulaire »	22
1.4 Du concept à la réalité	22
1.5 Contexte historique du CAN	24
1.6 Brevets, licences et certifications	30
<b>2 • Le CAN : son protocole, ses particularités</b>	<b>35</b>
2.1 Les définitions du protocole CAN – « ISO 11 898-1 »	35
2.2 Les erreurs : vies intimes, détections et traitements	64
2.3 Le reste de la trame	83
2.4 Le CAN 2.0 B	87
<b>3 • La couche physique CAN</b>	<b>95</b>
3.1 Introduction	95
3.2 Le « bit CAN »	98
3.3 Le nominal bit time	102
3.4 CAN et propagation du signal	106
3.5 La (re)synchronisation bit	118
3.6 Débit du réseau	129
<b>4 • Medium et implémentation physiques</b>	<b>139</b>
4.1 Les différents médias et les types de couplage au réseau	140
4.2 CAN à débit rapide (high speed CAN) de 125 kbit/s à 1 Mbit/s – « ISO 11 898-2 »	145
4.3 CAN à bas débit (low speed CAN) de 10 à 125 kbit/s	157

4.4	Liaisons filaires CAN isolées	172
4.5	Liaisons filaires par courants porteurs	177
4.6	Répéteur	181
4.7	Passerelle de medium à medium	183
4.8	Support optique	184
4.9	Supports électromagnétiques	185
4.10	Pollutions et conformités EMC	187
<b>5</b>	<b>• Composants CAN, applications et outils</b>	<b>197</b>
5.1	Composants CAN	197
5.2	Applications	217
5.3	Couches applicatives et outils de développement pour CAN	232
<b>6</b>	<b>• Le CAN FD « CAN with flexible data rate »</b>	<b>245</b>
6.1	La situation sur le terrain en 2014	246
6.2	Les solutions possibles	246
6.3	Le CAN FD, l'exemple de migration douce	248
6.4	Description de la trame CAN FD	250
6.5	La réalité	259
6.6	Les composants pour le CAN FD	262
6.7	La normalisation	266
6.8	Attentes, certitudes, doutes concernant l'introduction du CAN FD	266
6.9	Outils de développement, de simulation et environnements de test pour CAN FD	268
<b>7</b>	<b>• LIN – Local Interconnect Network</b>	<b>277</b>
7.1	Introduction	277
7.2	Concept du protocole LIN 2.2A	279
7.3	Coût et marché	292
7.4	Conformité du LIN	292
7.5	Exemples de composants pour LIN 2.2A	295

## **B**

### Protocoles *time triggered* TTCAN, FlexRay

<b>8</b>	<b>• Les protocoles time triggered</b>	<b>305</b>
8.1	Quelques généralités	305
8.2	Aspects event triggered et time triggered	306
8.3	TTCAN - Time triggered communication on CAN	307

<b>9 • Hauts débits et systèmes redondants</b>	<b>311</b>
9.1 Hauts débits	311
9.2 X-by-Wire	311
9.3 Redondances	312
9.4 Des besoins applicatifs de haut niveau	313
9.5 TTP/C – Time triggered protocol	317
<b>10 • FlexRay</b>	<b>319</b>
10.1 La genèse	319
10.2 Le Consortium FlexRay	320
10.3 But de FlexRay	321
10.4 Protocole FlexRay	324
10.5 Couche physique de FlexRay	332
10.6 Saint-Chro, priez pour nous !	340
10.7 Architecture d'un nœud FlexRay	344
10.8 Composants électroniques FlexRay	346
10.9 Conclusion	350
<b>11 • Qui dit bus, dit fail safe SBC, dit passerelles...</b>	<b>353</b>
11.1 Le pourquoi SBC et les multiples aspects des fail safe SBC	354
11.2 La stratégie et philosophie du re-use	364
11.3 Gateways	365

## C

### Protocoles audio-video Most, Ethernet

<b>12 • Les réseaux et bus audio-vidéo</b>	<b>371</b>
12.1 Bus I2C	371
12.2 Bus D2B – Domestic digital bus	372
12.3 Bus MOST – Media oriented systems transport	374
12.4 Bus IEEE 1394 ou « FireWire »	380
<b>13 • Ethernet dans l'automobile</b>	<b>387</b>
13.1 Introduction	387
13.2 Les nouvelles applications automobiles	389
13.3 Les nouvelles requêtes techniques	389
13.4 Le choix d'Ethernet – un bon prétendant ?	398

13.5	Goulet d'étranglement d'Ethernet en automobile	403
13.6	Choix de la couche physique en automobile	403
13.7	Line code	415
13.8	Diagramme de l'œil	427
13.8	Le choix de Ethernet 100BASE TX IEEE 802.3u en automobile	429
13.10	Architecture de l'étage driver de ligne	432
13.11	Les composants électroniques (couche physique)	439
13.12	Les outils de développement et d'aide à la conception pour Ethernet	443

## **D**

### Safe-by-Wire Communications RF

<b>14 •</b>	<b>Safe-by-Wire</b>	<b>451</b>
14.1	Un peu d'histoire	451
14.2	Safe-By-Wire Plus, PSI 5	453
14.3	Un peu de technique	455
<b>15 •</b>	<b>Communication RF et mini-réseaux wireless</b>	<b>463</b>
15.1	Communications radiofréquences urbi	463
15.2	Communications radiofréquences orbi	466
15.3	Les wireless networks	475
<b>Conclusion</b>		<b>479</b>

## **E**

### Annexes

A.1	Le CiA – CAN in Automation	482
A.2	Les bibles	484
A.3	Les bonnes lectures	487
A.4	Les bonnes adresses	488
<b>Index</b>		<b>489</b>

# AVANT-PROPOS

---

À ce jour, globalement, les réseaux de communication multiplexés tels que CAN, LIN, FlexRay et autres représentent un domaine industriel mature, et seuls quelques pans nouveaux tels que les systèmes *X-by-Wire* et Ethernet Automobile finissent de s'affiner.

Travaillant dans ce domaine depuis de nombreuses années, M<sup>me</sup> Hassina Rebaine, responsable de la formation technique chez *Vector Informatik France*, et moi-même Dominique Paret, après de longues années chez NXP, fondateur et directeur de *dp-consulting*, ne pouvions manquer de communiquer sur ces sujets. En effet, à ce jour peu d'informations et de formations techniques de base et applicatives sont disponibles pour les ingénieurs, les techniciens, et les étudiants. Nous espérons que cet ouvrage comblera, du moins partiellement, ce manque.

Comme d'habitude nous avons attendu un long moment avant d'écrire cette nouvelle édition. En effet, de nombreuses nouveautés sont apparues, accompagnées de leurs sempiternels effets d'annonces associés, claironnant par monts et par vaux que « tout est bon, tout est beau ». Nous avons donc préféré attendre quelque temps, afin que ces effets retombent et que l'horizon commence à se dégager de toute affirmation de ce type, ce qui, hélas, a pris comme d'habitude un certain temps.

Le but de cet ouvrage est donc d'offrir, à une date donnée, le b.a.-ba le plus complet de ce domaine en pleine évolution. Par ailleurs ce livre n'a pas vocation à être une encyclopédie, mais plutôt une longue et dense introduction technique à ce sujet – et non une traduction littérale de ce que chacun d'entre vous peut trouver sur le web ! Il est dense, dans le sens où tous les « vrais » sujets de ces applications (principes, composants, normes, applications, sécurité, etc.) sont abordés concrètement. Pour les nouveaux venus dans ce domaine, il offre des vues conceptuelles et applicatives globales de ces différents protocoles.

Sachant que cette branche est en pleine évolution, nous avons conscience qu'il sera nécessaire de réactualiser à nouveau le contenu de cet ouvrage d'ici quelques années. En attendant, les bases et les principes fondamentaux seront au moins posés !

Par ailleurs, nous avons fait un gros effort pédagogique afin que le lecteur puisse faire à tout instant la liaison entre théorie, aspects technologiques, aspects économiques, etc.

Pour compléter cet avant-propos, sachez qu'il existe d'autres ouvrages parus chez le même éditeur intitulés *Le bus CAN – Applications*, *Les réseaux multiplexés* et *FlexRay et ses applications* qui complètent celui-ci, en traitant plus spécifiquement des couches applicatives et des détails de leur mise en œuvre.

En attendant, nous vous souhaitons une bonne et fructueuse lecture... et surtout faites-vous plaisir car, sachez que nous n'avons pas écrit cet ouvrage pour nous mais pour vous !

#### Remarque très importante

Dès à présent, nous désirons attirer l'attention des lecteurs sur le fait important que, pour couvrir correctement le sujet des réseaux et bus multiplexés, cet ouvrage décrit de très nombreux principes techniques brevetés, soumis à exploitation de licences et de droits associés (codages bit, techniques de communication, etc.), qui ont déjà été publiés au sein de communications techniques professionnelles officielles, ou lors de conférences ou de séminaires publics... Leur usage doit impérativement être fait selon les règles légales en vigueur.

## Mode d'emploi de cet ouvrage

Nous vous conseillons de lire les quelques lignes qui suivent avant de rentrer dans les détails techniques qui seront exposés au cours des prochains chapitres.

Tout d'abord, il faut savoir que cet ouvrage comporte de nombreux sujets qui s'entrechoquent, se télescopent et se recourent, ce qui ne rend pas simple la construction d'un plan. Il a donc fallu procéder à un choix de présentation globale et pédagogique, afin que vous, Lecteur, puissiez vous repérer aisément dans tous ces principes de communication et de nouveaux protocoles émergents, que vous allez découvrir et utiliser dans les années à venir.

L'introduction a pour but de vous mettre l'eau à bouche, au travers d'une application qui nous touche quotidiennement, l'automobile, les systèmes embarqués et leurs mystères. Évidemment, tout ce que nous avons écrit dans cet ouvrage est généralisable aux applications industrielles de tout acabit (commande de machines-outils, de ligne de productions, avionique, immotique, etc.).

### Première partie A

Les chapitres 1 à 7 dédiés aux protocoles *event triggered* ont pour but de remettre les pendules à l'heure en ce qui concerne le protocole CAN et la nouvelle introduction du protocole CAN FD ainsi que toutes les subdivisions possibles des couches physiques et tout ce qui touche aux problèmes de conformité. Une partie de cet exposé est déjà connue de certains d'entre vous, mais de très nombreux compléments concernant les couches physiques ont été ajoutés ou remis au goût du jour. On ne peut parler de tout cela sans évoquer (brièvement) les couches applicatives CAL, CANopen, OSEK, AUTOSAR et les outils *hardware* et *software* nécessaires pour supporter l'aide au développement, à la vérification, à la production, à la maintenance, etc. Jusque-là rien de plus normal...

Nous décrivons également en détail le protocole LIN, son fondement, ses particularités, ses problèmes et la manière de les résoudre. Le LIN est généralement



présenté par ses concepteurs comme un sous-bus du CAN, le « sous » n'étant pas péjoratif, mais purement fonctionnel !

## Deuxième partie B

En introduction à cette partie nous évoquerons les limites fonctionnelles et applicatives du CAN, et nous ferons un point entre les systèmes de communication déclenchés temporellement (*time triggered*) et toutes les implications que des utilisations, dites de temps réels sécuritaires, engendrent.

Nous serons amenés à présenter le fonctionnement et le contenu des protocoles tels que TTCAN, FlexRay, ainsi que pour ces derniers des applications de type *X-by-Wire*... en version décodée : adieu la mécanique, « tout par fil » !

Nous décrirons ensuite rapidement les différentes contraintes et possibilités de passerelles entre les réseaux présentés en première partie et de nouveaux venus, en expliquant comment sont conçus et constitués les *fail safe - System basis chips* (SBC) et autres passerelles *gateways*.

## Troisième partie C

Cette troisième partie présente les protocoles dédiés à la distribution de l'ensemble audio-vidéo, le terme vidéo étant pris ici au sens le plus large possible c'est-à-dire couvrant la télévision conventionnelle, l'aide à la navigation, la gestion et l'affichage des nombreuses caméras d'aide à la conduite (ADAS), les détections de piétons, etc. donc nécessitant de très haut débits (100 Mbit/s). Nous présenterons donc le protocole MOST déjà utilisé depuis de nombreuses années et nous effectuerons une très longue introduction technique de l'application ETHERNET dans le domaine de l'automobile (... ce qui n'est pas simple !) en nous attardant notamment sur le contenu de l'OPEN Alliance et le concept de la solution BroadR-Reach.

## Quatrième partie D

Pour terminer cette longue promenade en bus, nous évoquerons (succinctement avec seulement quelques détails sinon on friserait l'encyclopédie universelle) la nuée d'autres réseaux et protocoles qui côtoient ceux présentés dans les volets précédents dans un système embarqué tel qu'un véhicule automobile. Ce dernier sera à terme, selon certains, un élément de mobilité sûr et fiable, une annexe domestique (audio, vidéo, jeux, etc.) et une annexe du bureau ! À ce propos, nous évoquerons les liaisons séries filaires et non filaires internes au véhicule, en d'autres termes *urbi* (*Safe-by-Wire Plus*, CPL, etc.) et externes à celui-ci, *orbi* (télécommande *remote keyless entry*, entrée mains libres *passive keyless entry*, TPMS *Tire pressure monitoring system*, *tire identification*, GSM, Bluetooth, ZigBee et autres consorts).

Voici, et si la route vous paraît longue, ... prenez le bus !

## Remerciements

La branche des réseaux de communication multiplexés s'agrandit de jour en jour et de nombreuses personnes compétentes y travaillent. Par chance, j'ai l'occasion de croiser fréquemment beaucoup d'entre elles, aussi il m'est très difficile de remercier individuellement tout le monde.

Je tiens à dédier quelques remerciements spécifiques à de nombreux amis de NXP/Philips Semiconductors de Nimègue (Pays-Bas) et de Hambourg (Allemagne), avec lesquels j'ai le plaisir de travailler depuis de longues années sur le sujet et, prenant le risque de faire des jaloux, plus particulièrement à Matthias Muth, les nombreux « Hans » et autres collègues des Pays-Bas, les nombreux « Peter » et autres collègues d'Allemagne.

Pour terminer, je serais ingrat de ne pas remercier également les nombreux collègues de la profession, constructeurs automobiles et équipementiers, que je rencontre régulièrement, soit lors de réunions de travail, soit à l'ISO. Ils se reconnaîtront aisément, pour les remarques concernant la confection de cet ouvrage. Enfin, j'adresse de très grands remerciements à M<sup>me</sup> Philipsen de NXP/Philips Semiconductors à Eindhoven, et à MM Henri Belda et Jean Philippe Dehaene de la société VECTOR Informatik France pour les nombreux documents et photos qu'ils ont eu la gentillesse de me fournir afin d'égayer cet ouvrage.

Dominique PARET  
Meudon, le 16 décembre 2013.